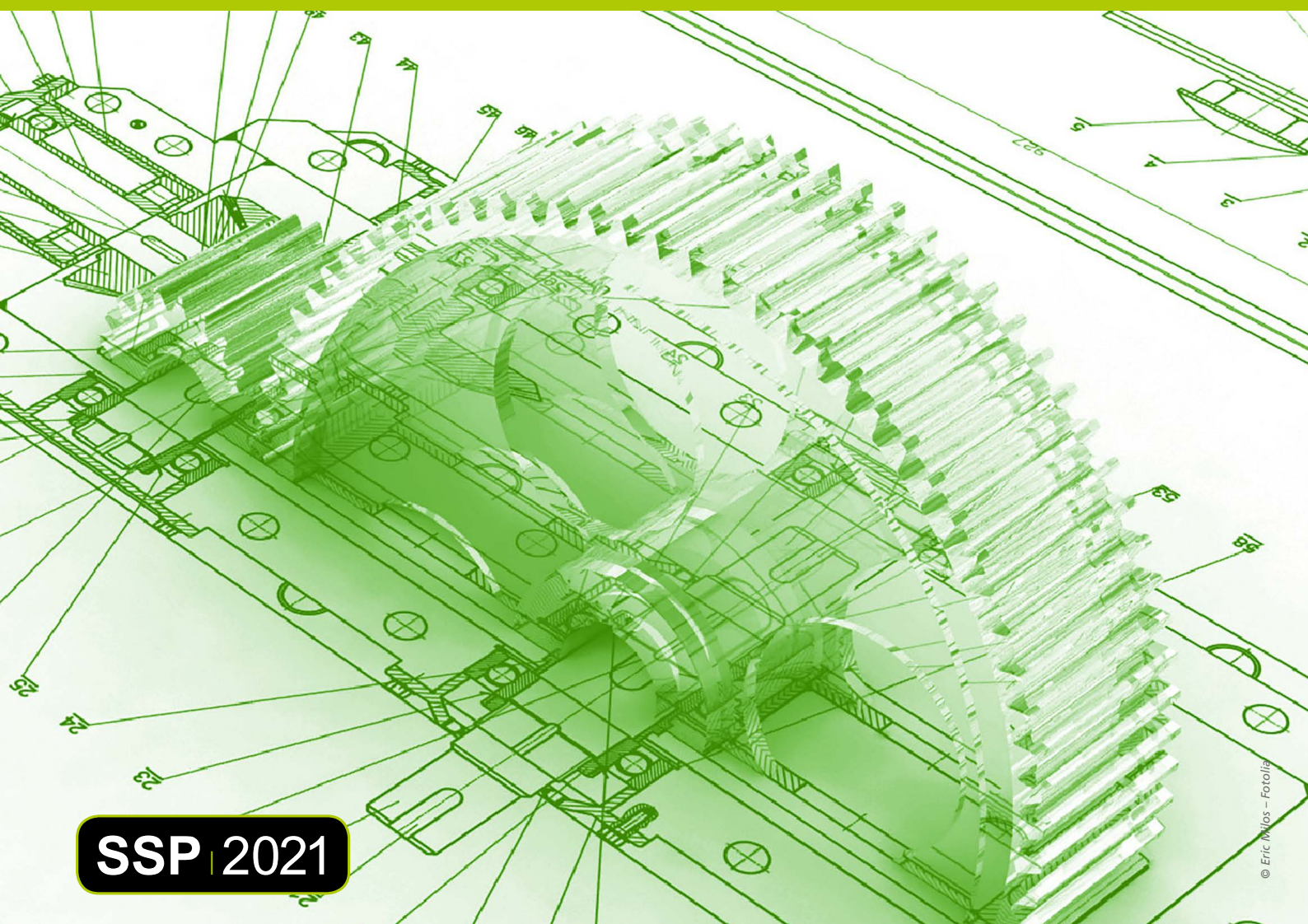


STUTTGARTER SYMPOSIUM FÜR PRODUKTENTWICKLUNG SSP 2021

Stuttgart, 20. Mai 2021 | Wissenschaftliche Konferenz



SSP 2021

Abstractheft

STUTTGARTER SYMPOSIUM FÜR PRODUKTENTWICKLUNG SSP 2021

Konferenz zum 6. Stuttgarter Symposium 2021

Stuttgart, 20. Mai 2021 | Wissenschaftliche Konferenz

Alle eingereichten Beiträge für das Stuttgarter Symposium 2021 wurden mindestens von zwei unabhängigen Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirats begutachtet.

Dieses Werk unterliegt den Schutzrechten der Berner Übereinkunft und den allgemeinen internationalen Urheberrechten.

Programmbeirat

Prof. Dr. Hansgeorg Binz, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Bernd Bertsche, Universität Stuttgart (IMA)
Prof. Dr. Dieter Spath, IAT Universität Stuttgart
Dr. Daniel Roth, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Thomas Maier, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Oliver Riedel, Fraunhofer IAO / Universität Stuttgart (ISW)
Prof. Dr. Wilhelm Bauer, Fraunhofer IAO

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. Albert Albers, Karlsruher Institut für Technologie (IPEK)
Prof. Dr. Reiner Anderl, Technische Universität Darmstadt
Prof. Dr. Wilhelm Bauer, Fraunhofer IAO
Prof. Dr. Beate Bender, Ruhr-Universität Bochum
Prof. Dr. Bernd Bertsche, Universität Stuttgart (IMA)
Prof. Dr. Hansgeorg Binz, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Herbert Birkhofer (i. R.), Technische Universität Darmstadt (pmd)
Prof. Dr. Lucienne Blessing, Singapore University of Technology and Design
Prof. Dr. Hans-Georg Enkler, Hochschule Furtwangen
Prof. Dr. Detlef Gerhard, Ruhr-Universität Bochum
Prof. Dr. Dietmar Göhlich, Technische Universität Berlin
Prof. Dr. Iris Gräßler, Universität Paderborn / Heinz Nixdorf Institut
Prof. Dr. Günter Höhne, Technische Universität Ilmenau
Hon.-Prof. Alfred Katzenbach, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Eckhard Kirchner, Technische Universität Darmstadt (pmd)
Prof. Dr. Dieter Krause, Technische Universität Hamburg-Harburg (PKT)
Dr. Matthias Kreimeyer, MAN Truck & Bus SE
Prof. Dr. Jens Krzywinski, Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Roland Lachmayer, Leibniz Universität Hannover (IPeG)
Prof. Dr. Udo Lindemann (i. R.), Technische Universität München
Prof. Dr. Thomas Maier, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Frank Mantwill, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg (MRP)
Prof. Dr. Sven Matthiesen, Karlsruher Institut für Technologie (IPEK)

Prof. Dr. Mirko Meboldt, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH)
Prof. Dr. Alexander Müller, Hochschule Esslingen
Prof. Dr. Kristin Paetzold, Universität der Bundeswehr München (ITPE)
Prof. Dr. Wolfram Remlinger, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Oliver Riedel, Fraunhofer IAO / Universität Stuttgart (ISW)
Dr. Daniel Roth, Universität Stuttgart (IKTD)
Prof. Dr. Christian Schindler, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH)
Prof. Dr. Dieter Spath, IAT Universität Stuttgart / Fraunhofer IAO
Prof. Dr. Karsten Stahl, Technische Universität München (FZG)
Prof. Dr. Rainer Stark, Fraunhofer IPK / Technische Universität Berlin
Prof. Dr. Klaus-Dieter Thoben, Universität Bremen (BIBA/IKAP)
Prof. Dr. Michael Vielhaber, Universität des Saarlandes (LKT)
Prof. Dr. Thomas Vietor, Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr. Sandro Wartzack, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (KTmfk)
Prof. Dr. Robert Watty, Technische Hochschule Ulm
Prof. Dr. Christian Weber (i. R.), Technische Universität Ilmenau
Prof. Dr. Klaus Zeman, Johannes Kepler Universität Linz, Österreich
Prof. Dr. Detmar Zimmer, Universität Paderborn



VORWORT DER VERANSTALTER

Das Stuttgarter Symposium (SSP) findet dieses Jahr zum sechsten Mal statt und richtet sich an Fachexpertinnen und -experten aus Wissenschaft und Wirtschaft. In logischer Weiterführung und -entwicklung der erfolgreichen Symposien in den Jahren 2011 bis 2019 gibt die diesjährige Digital-Konferenz einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu Methoden, Lösungsansätzen und Technologien in der Produktentwicklung. Die wissenschaftliche Digital-Konferenz bietet Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern eine Plattform zur Präsentation und Diskussion ihrer neuesten Forschungsergebnisse und fördert den interdisziplinären Wissenstransfer.

Wir freuen uns außerordentlich, dass dieses Konzept nach wie vor so gut in der wissenschaftlichen Community angenommen wird und die sehr beachtenswerte Anzahl von 72 Beiträgen eingereicht wurde, von denen 52 zur Präsentation ausgewählt wurden.

Schwerpunktt Themen der diesjährigen Konferenz stellen unter anderem **Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Innovations- und Technologie-management, Zuverlässige Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken** sowie **Design-Technik-Konvergenz** dar. Zudem wurde die Fachtagung DES=ING in das Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung integriert und beschäftigt sich mit den interdisziplinären Gestaltungsprozessen, in denen Designerinnen und Designer sowie Ingenieurinnen und Ingenieure eine Hauptrolle spielen.

Die Vorbereitung und Durchführung dieses Symposiums bedarf tatkräftiger Unterstützung vieler Personen. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang dem Organisationsteam unter der Leitung von Herrn Dr. Daniel Roth.

Wir freuen uns auf die vielen, sicherlich interessanten Vorträge und Diskussionen.

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Dr.-Ing. Daniel Roth

STUTTGARTER SYMPOSIUM FÜR PRODUKTENTWICKLUNG SSP 2021

WISSENSCHAFTLICHE KONFERENZ
STUTTGART, 20. MAI 2021

9.00 Uhr **Begrüßung und Einführung**

Chair: Wilhelm Bauer
Chair: Hansgeorg Binz

9.15 Uhr **Key-Note: Digitalisierung der Produktentwicklung bei Fahrzeugantrieben**

Dr.-Ing. Peter Fietkau
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG
Chair: Hansgeorg Binz

9.45 Uhr **Best Paper**

Chair: Hansgeorg Binz

10.15 Uhr **Kaffeepause**

Pausenraum || Networking

10.30 Uhr **Parallelstream 1**

12.00 Uhr **Mittagessen**

Pausenraum || Networking

13.00 Uhr **Parallelstream 2**

14.30 Uhr **Kaffeepause**

Pausenraum || Networking

14.45 Uhr **Parallelstream 3**

16.15 Uhr **Kaffeepause**

Pausenraum || Networking

16.30 Uhr **Elevator-Pitches und Abschluss**

Chair: Bernd Bertsche

17.00 Uhr **Freies Netzwerken und Ende der Veranstaltung**

Pausenraum || Networking

18.00 Uhr **Ende der Konferenz**

Track 1: Virtuelle Produktentwicklung

Digital Engineering
Chair: Joachim Lentes

Digital Engineering & Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering
Chair: Mehmet Kürümlüoğlu

Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering
Chair: Mehmet Kürümlüoğlu

Track 2: Methoden und Prozesse der Produktentwicklung

Konstruktionsmethodiken
Chair: Hansgeorg Binz

Leichtbau in der Produktentwicklung
Chair: Hansgeorg Binz

Agile Produktentwicklung & Wissensmanagement in der Produktentwicklung
Chair: Hansgeorg Binz



Alle Veranstaltungen finden über »Microsoft Teams« statt,
Kaffeepausen und freies Networking finden über »Wonder« statt.

**Track 3: Technologie-
management und
Zuverlässigkeitstechnik**

Innovations- und
Technologiemanagement
Chair: Manfred Dangelmaier

Zuverlässige Produkt-
entwicklung
Chair: Bernd Bertsche

Zuverlässige Produkt-
entwicklung
Chair: Bernd Bertsche

**Track 4: DES=ING &
Technologiemanagement**

Nutzerzentriertes Design
Chair: Thomas Maier

Design-Technik-Konvergenz
Chair: Thomas Maier

Innovations- und
Technologiemanagement
Chair: Manfred Dangelmaier

DONNERSTAG, 20.5.2021, 9.15–10.15 Uhr

Stichworte: Digitalisierung, Produktentstehungsprozess, Fahrzeugantriebe, digitaler Prototyp, virtuelle Entwicklung, Systems Engineering, gesamtheitliche Absicherung

Digitalisierung der Produktentwicklung bei Fahrzeugantrieben

Dr.-Ing. Peter Fietkau

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Porschestraße 911, 71287 Weissach, peter.fietkau@porsche.de

Die Automobilindustrie befindet sich in einem großen Wandel. Es kommen neue elektrische Antriebstechnologien hinzu und die Vielfalt im Produktportfolio wird größer. Zeitgleich steigen die Elektronik- und Softwareumfänge und damit die Systemkomplexität massiv an. Dies bedingt auch stark steigende Prototypenkosten. Aus diesen Gründen sind Optimierungen am bisher üblichen Produktentstehungsprozess (PEP) von Fahrzeugantrieben sinnvoll. Eine große Möglichkeit bietet dabei die Digitalisierung von Entwicklungstätigkeiten.

Zunächst werden die virtuelle Mechanikentwicklung und die virtuelle Softwareapplikation in ihrer Bedeutung gestärkt und intensiviert. Eigene Meilensteine und Freigabekriterien ermöglichen eine frühe Validierung und eine Reduktion von Prototypen. In der zweiten Stufe wird der PEP mit Hilfe des Systems Engineering neu strukturiert und alle Anforderungen von der Kundenebene abgeleitet. Hierdurch besteht das Potential, Felddaten gezielt zur Auslegung und Validierung auf allen Systemebenen zu nutzen. Eine logische dritte Stufe der Digitalisierung könnte die methodische und organisatorische Zusammenlegung virtueller und physischer Absicherung sein. Somit wäre es möglich, ein gemeinsames Validierungsprogramm zu erstellen und nach gegebenen Zielkriterien zu optimieren.

Zu allen Stufen der Digitalisierung werden Anwendungsbeispiele aus der Praxis vorgestellt und die kontinuierliche Weiterentwicklung über die Produktgenerationen aufgezeigt. Ebenso werden aktuelle Herausforderungen sowohl methodischer als auch prozessualer Natur skizziert.

Keywords: Digitization, product development process, vehicle powertrains, digital prototyp, virtual development, systems engineering, holistic validation

Digitalization of Product Development for Vehicle Powertrains

Dr.-Ing. Peter Fietkau

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Porschestraße 911, 71287 Weissach, peter.fietkau@porsche.de

The automotive industry is in a state of great change. New electric drive technologies are introduced and the variety in the product portfolio is growing. At the same time, the scope of electronics and software, and thus the system complexity, are increasing massively. This also means that prototype costs will rise sharply. For these reasons, it makes sense to optimize the product development process (PDP) of vehicle drives that has been common up to now. The digitization of development activities offers a great opportunity.

First, the significance of the virtual mechanical development and the virtual software calibration is increased. Own milestones and approval criteria enable early validation and a reduction of prototypes. In the second stage, the PDP is restructured with the help of systems engineering and all requirements are derived from the customer level. This has the potential to use field data specifically for design and validation on all system levels. A logical third stage of digitization could be the methodical and organizational merging of virtual and physical validation. Thus it would be possible to create a common validation program and to optimize it according to given target criteria.

Application examples from practice are presented for all stages of digitization and the continuous further development over the product generations is shown. Current challenges of both a methodological and a procedural nature are outlined.

Themen: Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Interorganisationale Projekte, Projektkultur, Kooperation in Netzwerken, Forschung und Entwicklung

Ein projektkulturbewusstes Management-Modell für interorganisationale F&E-Projekte

Katharina Dieterich¹, Verena Lisa Kaschub¹, Peter Ohlhausen²

¹Universität Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO und Hochschule Reutlingen

Die zunehmende Technologie- und Produktkomplexität führen dazu, dass sich immer mehr Unternehmen für ihre F&E mit externen Organisationen vernetzen. So entstehen interorganisationale F&E-Projekte, welche temporäre Organisationen darstellen. Forschungsfragen zu diesen Projekten sind u. a. hinsichtlich der Praktiken und Verhaltensregeln offen. Über ein kulturbewusstes Projektmanagement können kooperations- und innovations-förderliche Praktiken und Verhaltensregeln aufgebaut werden, die für diese F&E-Projekte essenziell sind. So ist die Forschungsfrage dieses Beitrags, wie ein projektkulturbewusstes Management interorganisationaler F&E-Projekte erfolgen kann. Dafür wird auf Basis der theoretischen Grundlagen zum F&E-Projektmanagement, zu menschlichen Handlungssystemen und Ebenen der Zusammenarbeit, zu Kultur und Verhalten ein projektkulturbewusstes Management-Modell entwickelt. Das Modell umfasst zwei Teile. Im ersten Teil wird der Bereich aufgezeigt, in welchem sich die Projektkultur entwickelt. Im zweiten Teil wird aufgezeigt, wie die Faktoren für ein wahrscheinlich kooperatives und innovatives Verhalten innerhalb dieses Bereiches gestaltet werden sollten.

Topics: Innovation and Technology Management

Keywords: Interorganizational projects, project culture, collaboration in networks, research and development

A project-culture-aware management model for interorganizational R&D-projects

Katharina Dieterich¹, Verena Lisa Kaschub¹, Peter Ohlhausen²

¹University of Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)

²Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO and Reutlingen University

Due to the increasing technology and product complexity more and more companies cooperate for their R&D activities with external organizations. This leads to interorganizational R&D-projects representing temporary organizations. Research questions on these projects are amongst others open concerning the practices and rules of conduct. With a culture-aware project management, practices and rules of conduct which are beneficial for cooperation as well as for innovation can be build. These are essential for interorganizational R&D-projects. Thus, the research question is how interorganizational R&D-projects can project-culture-aware be managed. To answer this question, an overview of the theoretical background about R&D-project management, human action systems and levels of collaboration, as well as about culture and behavior is given. Based on this theoretical background the project-culture-aware management model is developed. This model has two parts. At the first part, the area is shown in which the project culture results. The second part shows how the factors for a probably cooperative and innovative behavior can be designed within this area.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: Digital Engineering

Stichworte: Digital Engineering, Produktentwicklung, Industrie 4.0

Topics: Digital engineering

Keywords: Digital engineering, product development, industry 4.0

Towards Customized Digital Engineering: Herausforderungen und Potentiale bei der Anpassung von Digital Engineering Methoden für den Produktentwicklungsprozess

Benjamin Gerschütz¹, Christopher Sauer¹, Anne Wallisch²,
Jan Mehlstäub³, Andreas Kormann³, Benjamin Schleich¹, Bettina Alber-
Laukant³, Kristin Paetzold², Frank Rieg³, Sandro Wartzack¹

¹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für
Konstruktionstechnik

²Universität der Bundeswehr München, Institut für Technische
Produktentwicklung

³Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Die Transformation der virtuellen Produktentwicklung zum Digital Engineering hat begonnen und ist unabdingbar für den zukünftigen wirtschaftlichen Erfolg der Unternehmen. Allerdings sind die Organisations- und IT Strukturen unterschiedlicher Unternehmen nicht identisch, so dass eine Anpassung (Customization) bestehender Digital Engineering Methoden notwendig wird. Der Beitrag grenzt die virtuelle Produktentwicklung vom Digital Engineering ab, um darauf aufbauend die Potentiale dieses neuen Entwicklungsparadigmas zu ermitteln. Da durch neue Methoden auch neue Werkzeuge eingeführt werden müssen, kommt der Analyse datengetriebener Methoden und Werkzeuge auf die Anwendbarkeit im Produktentwicklungsprozess und deren Einordnung im Kontext der VDI 2206 eine zentrale Bedeutung zu. Die Herausforderungen, die bei Einführung dieser Methoden bewältigt werden müssen, reichen von technologisch und organisatorischen Problemen bis hin zu sozialpsychologischen Aspekten. Zur zielgerichteten Bewältigung der Herausforderungen erfolgt eine detaillierte Analyse der Hemmnisse.

Towards Customized Digital Engineering: Challenges and potentials of adapting digital engineering methods for the product development process

Benjamin Gerschütz¹, Christopher Sauer¹, Anne Wallisch²,
Jan Mehlstäub³, Andreas Kormann³, Benjamin Schleich¹, Bettina Alber-
Laukant³, Kristin Paetzold², Frank Rieg³, Sandro Wartzack¹

¹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Chair of Engineering
Design (KTmfk)

²University of the German Federal Armed Forces Munich, Institute for
Technical Product Development

³University of Bayreuth, Department of Engineering Design and CAD

The transformation of virtual product development to digital engineering has begun and is indispensable for the continued economic success of the companies. However, the organisational as well as the IT structures of the companies are not identical, making customizing of existing methods necessary. This article differentiates virtual product development from digital engineering in order to determine the potential of the new development paradigm. Since new methods require the introduction of novel tools, the analysis of data-driven methods and tools in respect to their applicability in the product development process and their classification in the context of VDI 2206 is essential. The challenges when introducing these methods range from technological and organisational problems to social psychological aspects. A detailed analysis of the barriers will be carried out in order to enable a target oriented solving of the problems.

Themen: *Digital Engineering, Nachhaltige Produktentwicklung*

Stichworte: *Nachhaltige Erprobung, digitaler Prüfstand, Modellbildung, Lastkollektiv, Elektromobilität*

Modellbasierte Validierung der Prüfstandsdynamik zur Erprobung von Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge mithilfe eines digitalen Zwillings

Lukas Bauer, Manuel Bauer, Markus Kley

Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik

In der Fahrzeugtechnik ist ein zunehmender Trend zur Elektromobilität erkennbar. Diese Entwicklung bringt neben neuartigen Potentialen auch Herausforderungen mit sich. So müssen sämtliche neuen Funktionen mithilfe von Versuchen abgesichert werden. Neben klassischen Straßenversuchen erfolgt eine Verlagerung zu Prüfstandsversuchen. Die erhöhte Dynamik elektrischer Maschinen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren erfordert dabei auch eine höhere Dynamik der Prüfstandstechnik. Aufgrund der gesteigerten Komplexität der Systeme sowie der sich wandelnden Einsatzbedingungen ist bestehendes Erfahrungswissen aus verbrennungsmotorischen Antriebssträngen nur noch bedingt übertragbar. Geplante Versuche können das dynamische Potential der Prüfstände im Betrieb überschreiten. Zur Validierung geplanter Testfälle beschreibt diese Arbeit ein digitales Abbild eines Antriebsstrangprüfstandes. Dieser bildet das dynamische Verhalten des realen Prüfstands ab und ermöglicht eine frühzeitige Aussage über die Auslastung der Prüftechnik für geplante Versuche. Dadurch können Risiken und Kosten in der Durchführung gemindert werden. Durch den Abgleich mit einfachen Versuchen des realen Systems wird Potential zur weiteren Optimierung aufgezeigt.

Topics: *Digital Engineering, Sustainable Product Development*

Keywords: *Sustainable testing, digital test bench, modelling, load cycle, electromobility*

Model-based validation of test rig dynamics for testing components of electrified powertrains using a digital twin

Lukas Bauer, Manuel Bauer, Markus Kley

Aalen University, Institute for Drive Technology

An increasing trend towards electromobility can be seen in vehicle technology. This development brings innovative potentials as well as challenges. For example, all new functions must be validated by means of tests. In addition to classic road tests, there is a shift towards test bench tests. The increased dynamics of electric machines compared to combustion engines also requires a higher dynamic of the test bench technology. Due to the increased complexity of the systems as well as the changing operating conditions, existing knowledge from combustion engine drive trains can only be transferred to a limited extent. Planned tests can exceed the dynamic potential of the test benches during operation. For the validation of planned test cases this paper describes a digital model of a powertrain test bench. It reproduces the dynamic behaviour of the real test bench and allows an early statement about the utilisation of the test technology for planned investigations. As a result, risks and costs in the implementation can be reduced. By comparison with simple tests of the real system, potential for further optimisation is shown.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: Digital Engineering, Leichtbau in der Produktentwicklung

Stichworte: Topologieoptimierung, Bildverarbeitung, virtueller Produktentwicklungsprozess

Automatische Erstellung von Drahtgittermodellen aus Topologieoptimierungen

Christian Gomes Alves, Tjark Siefkes

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte

Die Erstellung von CAD-Strukturen aus Topologieoptimierungsergebnissen ist ein ingenieurtechnisch aufwändiger und damit zeit- und kostenintensiver Schritt in vielen Produktentwicklungsprozessen. In diesem Beitrag wird eine neue Methode vorgestellt, die diesen Prozessschritt automatisiert und so wesentlich beschleunigen kann. Nach einer initialen Voxelisierung des FE-Netzes wird das topologische Modell ausgedünnt. Um die Topologie abzubilden, werden anschließend Strukturknoten erkannt, mit Linien verbunden und geglättet. Am Ende steht ein Drahtgittermodell aus Punkten und Linien, das sich für parametrische top-down-Konstruktionen im CAD eignet. Die Methode hebt sich von anderen Arbeiten auf diesem Gebiet durch die Verwendung eines Voxelmodells zur Diskretisierung von FE-Modellen ab. Dadurch werden die nachfolgenden Schritte unabhängig vom ursprünglichen Netz aus finiten Elementen und es können effiziente Bildverarbeitungsalgorithmen eingesetzt werden. Das Verfahren wird beispielhaft auf einen Schienenfahrzeugwagenkasten angewandt, ist jedoch prinzipiell auf Topologie-optimierungsergebnisse von Bauteilen aus vielen Disziplinen anwendbar.

Topics: Digital Engineering, Lightweight Design within the Product Development

Keywords: Topology optimization, image processing, virtual product development process

Automatic Generation of Wireframe Models from Topology Optimizations

Christian Gomes Alves, Tjark Siefkes

German Aerospace Center, Institute of Vehicle Concepts

The generation of CAD structures from topology optimization results is a complex and therefore time and cost intensive step in many product development processes. In this paper, a new method is presented which automates this step and can thus save significant time. After an initial voxelization of the FE-mesh, the topological model is thinned out. To map the topology, structural nodes are then detected, connected with lines and smoothed. The result is a wireframe model consisting of points and lines, which is suitable for parametric top-down designs in CAD. The method differs from other work in this field by using a voxel model to discretize FE models. This makes the subsequent steps independent from the original mesh of finite elements and allows the use of efficient image processing algorithms. The method is applied to a rail vehicle body, but, in principle, is applicable to topology optimization results of components from many disciplines.

Themen: *Digital Engineering, Konstruktionsmethodiken*

Stichworte: *3D Skizzen, Virtual Reality, Konzeptphase, Entwurfsphase, Probandenversuche*

Topics: *Digital Engineering, Design Methodology*

Keywords: *3D sketches, virtual reality, conceptual design, embodiment design, proband experiment*

3D-Skizzen in Virtual Reality zur Unterstützung der frühen Phasen der Produktentwicklung

Carsten Seybold, Frank Mantwill

Helmut Schmidt Universität, Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung

3D Sketching in Virtual Reality to support the early phases of product development

Carsten Seybold, Frank Mantwill

Helmut Schmidt Universität, Chair for Machine Elements and Computer Aided Product Design

Die Handskizze stellt derzeit immer noch das Standardwerkzeug für die Erstellung von Konzept- und Entwurfslösungen dar. In der fortschreitenden Digitalisierung des Produktentwicklungsprozesses werden solche analog erstellten Inhalte selten dokumentiert und sind für Folgekonstruktionen nicht verfügbar. Eine Alternative kann die Nutzung von digitalen Verfahren sein. In diesem Beitrag wird die Erstellung von 3D-Skizzen in den frühen Phasen der Produktentwicklung unter Nutzung von Virtual Reality untersucht. Unter der Nutzung eines eigens hierfür entwickelten Demonstrators wurden Probanden mit der Lösung von zwei unterschiedlichen Problemstellungen beauftragt. Die hier erstellten Lösungen sind nach den Faktoren konstruktive Weiterverwendbarkeit, Interpretier- & Nachvollziehbarkeit, Eignung als Bewertungshilfe und Lösungsgüte empirisch bewertet worden. Die Untersuchung ergab, dass Skizzen in VR in den benannten Bereichen Vorteile gegenüber der herkömmlichen Skizzenerstellung bei mindestens gleichbleibender Lösungsgüte bieten können. Folglich können 3D-Skizzen zur Unterstützung der im Produktentwicklungsprozess nachfolgenden Prozesse beitragen.

Hand-drawn sketches are the standard tool for the creation of concept and design solutions. During the digital transformation of the product development process, such analogue content is rarely documented and it is not available for subsequent designs. An alternative could be the use of digital methods. This article examines the creation of 3D sketches in the early phases of product development using virtual reality. Using a developed demonstrator tool, test subjects were assigned to solve two different design problems. The solutions created here have been empirically evaluated according to the factors constructive reusability, clarity, suitability for assessment and solution quality. As a result, sketches in VR can offer advantages in the named areas compared to conventional sketching with at least the same solution quality. Therefore, 3D sketches can contribute to the support of the subsequent processes in the product development process.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 13.00–14.30 Uhr

Themen: *Digital Engineering*

Stichworte: *Digitaler Zwilling, Vorausschauende Instandhaltung, Physikbasierte und Datengetriebene Modellierung*

Digitaler Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung in der Produktion –Physikbasierte Modellierung und Simulation zur Optimierung datengetriebener Modelle

Andreas Werner¹, Joachim Lentjes², Nikolas Zimmermann²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Die Analyse von Produktionssystemen und Produkten während des Betriebs beziehungsweise der Nutzung ist ein zentraler Wettbewerbsfaktor für Unternehmen. Digitale Zwillinge von Produkten und Produktionssystemen gewinnen dabei an Bedeutung, weil sie neben der Analyse von Betriebsdaten zur Berechnung der Restnutzungsdauer potenzielle Ausfallmechanismen identifizieren, sodass Versagensursachen einfacher lokalisiert werden können. In diesem Beitrag wird ein Konzept zum Digitalen Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung vorgestellt. Das Konzept dient als Grundlage für ein schrittweises Vorgehen zur Entwicklung physikbasierter und datengetriebener Modelle sowie deren Harmonisierung. Insbesondere wird die Generierung von Daten mittels eines physikbasierten Simulationsmodells zur Optimierung eines datengetriebenen Modells beleuchtet. Das Konzept wurde in einem konkreten Anwendungsfall zur Vorhersage einer Filterverstopfung eines Wärmeregulators realisiert. Das Vorgehen soll produzierende Unternehmen bei der Implementierung einer vorausschauenden Instandhaltung unterstützen, sodass sie in die Lage versetzt werden, neben der Lebensdauer von Anlagen die nächste Produktgeneration zu optimieren.

Topics: *Digital Engineering*

Keywords: *Digital Twin, Predictive Maintenance, Physics-based and Data-driven Modelling*

Digital Twin for Predictive Maintenance in Production – Physics-based Modelling and Simulation to Optimize Data-driven Models

Andreas Werner¹, Joachim Lentjes², Nikolas Zimmermann²

¹Institute of Human Factors and Technology Management IAT at the University of Stuttgart

²Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

The analysis of production systems and products during operation or usage is a key competitive factor for companies. Digital twins of products and production systems are gaining in importance here since, in addition to the analysis of operating data to estimate remaining useful life, they identify potential failure mechanisms, making it easier to locate the causes of failure. This paper outlines a concept of digital twins for predictive maintenance. The concept serves as a basis for an approach for the development of physics-based and data-driven models and their harmonization. In particular, the generation of data using a physics-based simulation model for the optimization of a data-driven model is highlighted. The concept was realized in a concrete use case for the prediction of filter clogging of a thermal regulator. The procedure is intended to support manufacturing companies in the implementation of predictive maintenance in order to optimize not only the lifetime of machines but also the next product generation.

Themen: *Digital Engineering*

Stichworte: *Rechnerunterstützte Entwicklungsumgebung, Kurzschaftendoprothetik, Hüftgelenkersatz, Effect-Engineering, Funktionsintegration*

Spezifikationen einer Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte

*Patrik Müller, Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau*

In der Endoprothetik können konfektionierte Kurzschaftprothesen die anatomischen und osteologischen Anforderungen an die Standzeit, Funktionalität und Komplikationsfreiheit nicht optimal erfüllen. Dieser Beitrag bietet die Spezifikationen für eine rechnerunterstützte Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte, die den Erfüllungsgrad dieser Anforderungen an das Implantat maximieren kann. Dafür werden im Rahmen einer Design Research Methodology die osteologischen und anatomischen Einflussfaktoren auf den Produktlebenszyklus einer Kurzschaftendoprothese identifiziert und Lösungsmethoden zur Erfüllung der Anforderungen konzipiert. Im Anschluss an den Entwurfsprozess der Kurzschaftendoprothese wird das Effect-Engineering in der Prothetik, mithilfe der additiven Fertigung, vorgestellt, welches durch die Funktionsintegration verschiedener physikalischer Effekte und Optimierungsstrategien die Lebensqualität der operierten Patienten erhöht.

Topics: *Digital Engineering*

Keywords: *Computer-aided Engineering Environment, Short Shaft Endoprosthetics, Hip Joint Replacement, Effect-Engineering, Integration of Functions*

Specifications of a development environment for the synthesis of a patient-specific short shaft endoprosthesis of the hip

*Patrik Müller, Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau*

In endoprosthetics, standardized short shaft prostheses cannot optimally fulfil the anatomical and osteological requirements for durability, functionality and freedom from complications. This article provides the specifications for a Computer-aided Engineering Environment for the synthesis of a patient-specific short shaft endoprosthesis of the hip, which can maximise the degree to which these requirements are met by the implant. To this end, the osteological and anatomical factors influencing the product life cycle of a short-shaft endoprosthesis are identified in the course of a design research methodology and solution methods are designed to meet the requirements. Following the design process of the short shaft endoprosthesis, the Effect-Engineering in prosthetics, with the help of additive manufacturing, is presented, which increases the quality of life of the operated patients through the functional integration of various physical effects and optimisation strategies.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 13.00–14.30 Uhr

Themen: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering*

Stichworte: *Model-Based Systems Engineering, MBSE, Systemmodell, Zielmodellierung, Anforderungsmanagement*

Durchgängige Systemmodellierung - Integration von Zielen in technische Systemmodelle im Kontext des Anforderungsmanagements

*Dennis Horber, Fabian Wilking, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für
Konstruktionstechnik*

Durch die steigende Komplexität technischer Konsumentenprodukte beschäftigen sich immer mehr Unternehmen mit Ansätzen, um diese Komplexität greifbarer zu machen. Ein Ansatz dafür ist das Model-Based Systems Engineering (MBSE). Ein zentrales Element dieses Ansatzes ist die Verwendung von Systemmodellen, die zur Beschreibung von Struktur und Verhalten des Systems dienen. Anforderungen lassen sich somit unmittelbar mit Systemelementen verbinden und verifizieren. Die im entwicklungsmethodischen Vorgehen oft vernachlässigten Ziele, die den Anforderungen hierarchisch übergeordnet sind, finden aber auch in diesen Modellen noch keine Anwendung. Dieser Beitrag beschäftigt sich damit, inwiefern sich Ziele konsistent in technische Systemmodelle integrieren lassen, so dass eine durchgängige Modellierung von den Zielen bis hin zu den einzelnen Elementen ermöglicht wird. Dabei werden bereits bestehende Möglichkeiten, hier beispielhaft in der System Modelling Language (SysML), um Systemelemente und Verbindungen ergänzt, um eine konsistente Integration von Zielen gewährleisten zu können und die Syntax der Notationen nicht erheblich zu beeinflussen.

Topics: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering*

Keywords: *Model-Based Systems Engineering, MBSE, System Model, Goal Modeling, Requirements Engineering*

Continuous System Modelling - Integration of Goals into technical System Models in Context of Requirements Management

*Dennis Horber, Fabian Wilking, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Chair of Engineering
Design (KTmfk)*

Caused by the increasing complexity of technical consumer products, many enterprises are considering new approaches to grasp this complexity. One of these approaches is Model-Based Systems Engineering (MBSE). A central element of this approach is the use of system models, which describe structure and behaviour of the system. This enables the connection between requirements and system elements. Goals, as superordinated requirements, are often unheeded within engineering approaches and are not represented within technical system models. Therefore, this paper discusses the utilization of a goal integration into system models to enable a continuous modelling from goals towards single elements. Therefore, existing possibilities, e.g. within the System Modelling Language (SysML), are enhanced by further system elements as well as relations to achieve a consistent integration of goals and prevent a substantial influence on the syntax of the language.

Themen: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Nachhaltige Produktentwicklung*
Stichworte: *MBSE, Nachhaltigkeitsmanagement, Technologiemanagement*

Die Rolle von MBSE für die nachhaltige Forschung und Entwicklung

Michaela Kesselring¹, Jonathan Masior², Oliver Riede²

¹*Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT*

²*Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO*

Die vorliegende Studie analysiert, wie MBSE externe und interne Wissensquellen in der nachhaltigen Produkt-, Dienstleistungs- und Systementwicklung miteinander verbinden kann. Dazu bedient sich die Studie eines qualitativen Forschungsansatzes. Die Datenstichprobe besteht aus achtzehn Experten aus Forschung und Industrie auf dem Gebiet von MBSE und Nachhaltigkeit.

Zusammengenommen deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der MBSE sowohl die Exploration als auch die Exploitation von nachhaltigkeitszentrierten Wissensquellen ermöglicht. MBSE wurde am häufigsten für die Unterstützung ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeit anerkannt. Die soziale Nachhaltigkeit wurde am seltensten anerkannt. Ein Vergleich der Antworten von Experten ergab Diskrepanzen im wahrgenommenen Umfang der nachhaltigen Gestaltungsmöglichkeiten durch MBSE.

Topics: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Sustainable Product Development*
Keywords: *MBSE, sustainable development, technology management*

The role of MBSE in the exploration and exploitation of sustainable development

Michaela Kesselring¹, Jonathan Masior², Oliver Riede²

¹*Institute of Human Factors and Technology Management IAT at the University of Stuttgart*

²*Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO*

The present study analyses how to manage and integrate internal and external knowledge sources in sustainable product-, service- and system development with MBSE. To do so, the study employs a qualitative research approach. The data sample consists of eighteen experts from research and industry in the field of MBSE and sustainability.

Together, the results indicate that MBSE enables both exploration and exploitation of sustainability-centered knowledge sources. MBSE was most often recognized to support ecologic and economic sustainability. Social sustainability was least often recognized. A comparison of expert answers revealed, discrepancies in the perceived scope of the sustainability performance of MBSE.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering*

Stichworte: *Smart Service, Produkt-Service-Systeme, Referenzarchitektur*

Referenzarchitektur für Smart Services

Arthur Wegel, Philipp Sahrhage, Fabio Worthmann, Martin Rabe, Roman Dumitrescu

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM

Die Digitalisierung ermöglicht neue, intelligente Marktleistungen und bietet zudem das Potenzial, ganze Wertschöpfungs-systeme zu revolutionieren. Gleichzeitig neigen produzierende Unternehmen dazu, ihre Marktleistungen zunehmend dienstleistungsorientiert zu gestalten. Folglich werden bestehende physische Produkte um digitale Dienstleistungen ergänzt, um zusätzliche Mehrwerte für die Kunden zu schaffen. Dadurch entstehen so genannte Smart Services, die auf der Auswertung großer Datenmengen intelligenter, kommunikationsfähiger Maschinen und Systemen basieren. Smart Services sind - mehr noch als traditionelle mechatronische Systeme – domänenübergreifende technische Systeme, die entwickelt, betrieben und abgerechnet werden müssen. Zur Beherrschung der daraus resultierenden Komplexität wird ein Strukturierungsrahmen benötigt, der interdisziplinäre Teams bei der Entwicklung von Smart Services unterstützt. Im vorliegenden Beitrag wird eine Referenzarchitektur für Smart Services vorgestellt, die generische Smart-Service-Elemente und deren Wirkbeziehungen strukturiert. Damit soll die Komplexität der stark interdisziplinären Systeme durch produzierende Unternehmen beherrschbar werden.

Topics: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering*

Keywords: *Smart service, product service systems, reference architecture*

Reference Architecture for Smart Services

Arthur Wegel, Philipp Sahrhage, Fabio Worthmann, Martin Rabe, Roman Dumitrescu

Fraunhofer Institute for Mechatronic Systems Design IEM

Digitization enables new, intelligent market services and also offers the potential to revolutionize entire value creation systems. At the same time, manufacturing companies are tending to make their market services increasingly service-oriented. Consequently, existing physical products are being supplemented with digital services in order to create additional added value for customers. This results in so-called smart services, which are based on the evaluation of large volumes of data from intelligent, communication-enabled machines and systems. Even more so than traditional mechatronic systems, smart services are cross-domain technical systems that must be developed, operated and billed. In order to master the resulting complexity, a structuring framework is required that supports interdisciplinary teams in the development of smart services. This paper presents a reference architecture for Smart Services that structures generic Smart Service elements and their relationships. Thus, the complexity of the strongly interdisciplinary systems should become manageable by manufacturing companies.

Themen: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Wissensmanagement in der Produktentwicklung*
Stichworte: *Model-Based Systems Engineering, Anforderungsmanagement, Produktgenerationsentwicklung, Systemarchitektur*

Vorgehen zur systematischen Verknüpfung von Produktanforderungen und Systemarchitektur unter Berücksichtigung der PGE

*Moritz Wäschle¹, Marcel Timucin¹, Aline Radimersky², Constantin Mandel¹,
 Joshua Fah!¹, Tobias Hirschter¹*

¹Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung

²Robert Bosch GmbH

Die Nachfrage von Stakeholdern nach einem immer breiteren Spektrum von Funktionen bei gleichzeitig steigenden Qualitätsanforderungen, kürzeren Produktlebenszyklen und attraktiven Preisen führt zu steigender Produktkomplexität. Gleichzeitig dienen bereits bestehende Systeme mit verifizierten Anforderungen als Grundlage für die Produktentwicklung. Durch ein gezieltes Anforderungsmanagement inklusive der Verknüpfung zur Systemarchitektur wird versucht, diesen Herausforderungen zu begegnen. Zur Verknüpfung von Anforderungen zur Systemarchitektur kann die modellbasierte Systementwicklung genutzt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden hierzu die in Doors definierten Anforderungen eines Stellmotors im industriellen Umfeld mit einer Systemarchitektur in der Sprache Systems Modeling Language geeignet verknüpft. Dies ermöglicht die Nachvollziehbarkeit von Systemelementen und realisiert eine Berücksichtigung und Wiederverwendung von Referenzprodukten. Basierend auf dem Systemtripel aus Anforderung, Testfall und physischem Element können unterschiedliche produktgenerationsübergreifende Variationen im Sinne des Modells der Produktgenerationsentwicklung identifiziert werden.

Topics: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Knowledge Management within the Product Development*
Keywords: *Model-Based Systems Engineering, Requirements Engineering, Product Generation Engineering, Systemarchitecture*

Procedure for the systematic linking of product requirements and system architecture under consideration of the PGE

*Moritz Wäschle¹, Marcel Timucin¹, Aline Radimersky², Constantin Mandel¹,
 Joshua Fah!¹, Tobias Hirschter¹*

¹Karlsruhe Institute of Technology, IPEK – Institute of Product Engineering

²Robert Bosch GmbH

Stakeholder demand for an ever-wider range of functions combined with increasing quality requirements, higher reliability, shorter product lifecycles and attractive pricing leads to increasing product complexity. At the same time, the products build on existing systems with verified requirements. By means of a targeted requirements management including the link to the system architecture, an attempt is made to meet these challenges. Model-Based system development can be used to link requirements to system architecture. In the present work the requirements of an actuator in an industrial environment, as defined in Doors, were suitably linked with a system architecture in the language Systems Modeling Language. This enables the traceability of system elements and realizes a consideration and reuse of reference products. Based on the system triad of requirement, test case and physical element, different product generation-spanning variations can be identified in the sense of the Product Generation Engineering.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Wissensmanagement in der Produktentwicklung*

Stichworte: *Produktkonfiguration, Model-Based Systems Engineering, Prinziplösung, Wissensmanagement*

Integration von Produktportfolios in die funktionsorientierte modellbasierte Systementwicklung

Christian Wyrwich, Georg Jacobs, Kathrin Spütz, Thilo Zerwas, Christian Konrad

RWTH Aachen University, Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung

Steigender globaler Wettbewerbsdruck erfordert von Unternehmen des Maschinenbaus die dynamische Anpassung an sich verändernde Marktsituationen. Kunden erwarten, dass Hersteller individuelle Produkte mit der Qualität, in der Lieferzeit sowie zu dem Preis eines Großserienerzeugnisses anbieten. Als Teil dieses Mass-Customization-Trends ist die Verwendung von Produktkonfiguratoren weit verbreitet. Angesichts der zunehmend funktionsorientierten Produktentwicklung und vernetzter komplexer Systeme, gerät der traditionelle regelbasierte Konfigurationsablauf jedoch an seine Grenzen. Das Model-Based Systems Engineering ermöglicht es, über einen funktionsbasierten, interdisziplinären Entwicklungsansatz auch komplexe technische Systeme an individuelle Anforderungen anzupassen. Dieser Beitrag beschreibt, wie vorhandene Portfolioelemente eines etablierten Produktbaukastens über die Verknüpfung mit Prinziplösungen für die flexible funktionsbasierte Produktkonfiguration nutzbar gemacht werden können. Durch die Kopplung des Konfigurators mit dem MBSE-Systemmodell wird die wirtschaftliche Produktkonfiguration der für den Kunden optimal geeigneten Produktvariante möglich.

Topics: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Knowledge Management within the Product Development*

Keywords: *Product configuration, model-based systems engineering, principle solution, knowledge management*

Integration of product portfolios into the function-oriented model-based system development

Christian Wyrwich, Georg Jacobs, Kathrin Spütz, Thilo Zerwas, Christian Konrad

RWTH Aachen University, Institute for Machine Elements and Systems Engineering

Increasing global competitive pressure requires mechanical engineering companies to adapt dynamically to changing market situations. Customers expect manufacturers to offer individual products with the quality, delivery time and the price of a mass-produced product. As part of this Mass-Customization-Trend, the use of product configurators is widespread. However, with increasingly function-oriented product development and complex interlinked technical systems, the traditional rule-based configuration process reaches its limits. Model-Based Systems Engineering makes it possible to adapt even complex technical systems to individual requirements using a function-based interdisciplinary development approach. This contribution describes how existing portfolio elements of an established modular product system can be made usable for flexible function-based product configuration by linking them with principle solutions. By connecting the configurator with the MBSE system model, the economic product configuration of the product variant optimally suited for the customer becomes possible.

Themen: *Digital Engineering, Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering*

Stichworte: *Mission Profiles, SysML, Systems Engineering, MBSE, Mikroelektronik*

Integration von Mission Profiles in die modellbasierte Systementwicklung zur Förderung der Kollaboration in automobilen Wertschöpfungsnetzen

Damun Mollahassani, Sven Forte, Jens C. Göbel

Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung

Durch die informationstechnische Vernetzung, die Integration smarter Services und die zunehmende Elektrifizierung werden moderne Fahrzeuge immer mehr zu smarten Produkten. Mit der steigenden Komplexität und Interdisziplinarität der Produkte gehen auch grundlegend neue Herausforderungen für das Engineering einher. Hierbei kommt der durchgängigen Integration von Mikroelektronikentwicklungen in übergreifende Prozesse des Modell-basierten Systems Engineerings eine Schlüsselrolle zu. Ziel des in diesem Beitrag vorgestellten Ansatzes zur Integration von Mission Profiles in den Systementwicklungsprozess ist es, durch ganzheitliche, um Nutzungskontext und -umgebungsinformationen erweiterte Anforderungsmodelle kollaborativ zu entwickeln und auszutauschen. Dieser Ansatz fokussiert auf unternehmensübergreifende Kollaborationen in automobilen Wertschöpfungsnetzen, beginnend in der Innovations-Roadmapping Phase bis in die frühen Entwurfsphasen der Produktentwicklung. Die informationstechnische Grundlage für die Integration, basiert auf der Systems Modelling Language.

Topics: *Digital Engineering, Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering*

Keywords: *Mission Profiles, SysML, Systems Engineering, MBSE, Microelectronics*

Supporting Collaboration in Automotive Value-Networks by Integrating Mission Profiles into Model-Based Systems Engineering Development

Damun Mollahassani, Sven Forte, Jens C. Göbel

Technische Universität Kaiserslautern, Institute for Virtual Product Engineering

Through information technology networking, the integration of smart services and increasing electrification, modern vehicles are increasingly becoming smart products. The increasing complexity and interdisciplinarity of the products also bring with it fundamentally new challenges for engineering. The continuous integration of microelectronics developments into comprehensive processes of model-based systems engineering plays a key role here. The goal of the approach for the integration of mission profiles into the system development process presented in this paper is to collaboratively develop and exchange holistic requirements models extended by usage context and environment information. This approach focuses on cross-company collaborations in automotive value networks starting in the innovation roadmapping phase and extending into the early design phases of product development.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 1: KONSTRUKTIONSMETHODIKEN

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Innovations- und Technologiemanagement*

Stichworte: *Produktportfolio-übergreifend, Spezifizieren, Produktfunktion, Sportwagenentwicklung, Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung*

Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen am Beispiel der Sportwagenentwicklung

Joshua Fahl, Tobias Hirschter, Albert Albers

Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung

Das Funktionsspektrum heutiger Generationen hochentwickelter Fahrzeuge hat sich, aufgrund steigender Kunden- und Anwenderanforderungen u.a. an Fahrerassistenz, Digitalisierung und Elektromobilität, im letzten Jahrzehnt mehr als vervierfacht. In der automobilen Entwicklungspraxis lässt sich beobachten, dass solche teilweise komplexen Funktionen übergreifend für das gesamte Produktportfolio eines Anbieters und nicht mehr nur für einzelne, automobiler Produktgenerationen entwickelt werden müssen. Produktentwickler stehen daher vor der Herausforderung, bereits beim Spezifizieren der Funktionen teils diametrale Anforderungen sowie Wechselwirkungen vielfältiger Produktgenerationen aus verschiedenartigen Produktlinien zu berücksichtigen. Im vorliegenden Beitrag wird daher die prozessuale und methodische Entwicklungsunterstützung beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren aus Funktionssicht empirisch analysiert, in einem Referenzprozess synthetisiert sowie in der Entwicklungspraxis am Beispiel der Produktfunktion »Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln« in der Sportwagenentwicklung angewandt und evaluiert.

Topics: *Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering, Innovation and Technology Management*

Keywords: *Product Portfolio-spanning, Specifying, Product Function, Sports Car Development, Model of PGE – Product Generation Engineering*

Product Portfolio-spanning Specifying of Product Functions using the Example of Sports Car Development

Joshua Fahl, Tobias Hirschter, Albert Albers

Karlsruhe Institute of Technology, IPEK – Institute of Product Engineering

The functional spectrum of today's generations of highly developed vehicles has more than quadrupled due to increasing customer and user requirements, such as driver assistance, digitalization and electro mobility in the last decade. In automotive development practice, it has become apparent that such functions, often complex in nature, no longer have to be developed for individual automotive product generations but rather for the entire product portfolio of a provider. Product developers are therefore faced with the challenge of considering partly diametrical requirements as well as interactions of diverse product generations from different product lines already when specifying the functions. In this paper, the process-related and methodical development support for product-portfolio-spanning specifying is therefore empirically analyzed from a functional point of view, synthesized in a reference process and applied and evaluated in development practice using the example of the product function "Actively Controlling Vehicle Aerodynamics" in sports car development.

Themen: Konstruktionsmethodiken, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell, fertigungsgerechte Gestaltung, Tailored Forming, Parametrische CAD-Modelle

Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für mechanische Bauteile

Kevin Herrmann, Tim Brockmöller, Paul Gembarski, Iryna Mozgova, Roland Lachmayer

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

Durch fertigungsbedingte Restriktionen wird der Gestaltungsraum von mechanischen Bauteilen während der Produktentwicklung eingeschränkt. Die Einschränkungen sind in der Regel nicht vollständig bekannt und können daher nicht in vollem Umfang bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt werden. Das betrifft insbesondere prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen, die bei der Aneinanderreihung von mehreren Fertigungsschritten entstehen. Dieser Beitrag schlägt einen Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsansatz vor, um das Wissen für ein herstellungsgerechtes Bauteil möglichst früh im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung zu stellen. Grundlage dieses Gestaltungsansatzes sind Transfermodelle, welche Fertigungsprozessketten entgegen der späteren Prozessrichtung beschreiben. Dabei werden schrittweise zwischengelagerte Fertigungsstufen abgeleitet und deren Herstellbarkeit mit Hilfe geeigneter Kontrollmechanismen evaluiert.

Topics: Design Methodology, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Manufacturing Stage Based Design Model, Design for Manufacturing, Tailored Forming, Parametric CAD-models

Manufacturing Stage-Based Design Model for Mechanical Components

Kevin Herrmann, Tim Brockmöller, Paul Gembarski, Iryna Mozgova, Roland Lachmayer

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

Manufacturing restrictions limit the design scope of mechanical components during product development. Often, these restrictions are not completely known and can therefore not be taken fully into account during the design of component. This concerns in particular cross-process manufacturing restrictions, which arise when several manufacturing steps are chained together. This paper proposes a design approach based on knowledge about of manufacturing steps in order to provide a manufacturable component as early as possible in the product development process. The basis of this design approach are transfer models, which describe the manufacturing process chain against the later process direction. Thereby, intermediate manufacturing stages are derived step by step and their manufacturability is evaluated by means of suitable control mechanisms.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 1: KONSTRUKTIONSMETHODIKEN

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Leichtbau in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken*

Stichworte: *Leichtbau in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken, Additive Fertigung, Konstruktionskatalog*

Konzept eines Konstruktionskatalogs für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen

Enno Garrelts^{1,2}, Daniel Roth², Hansgeorg Binz²

¹Universität Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Mit additiven Fertigungsverfahren können Bauteile von hoher Komplexität mit wenigen Restriktionen erzeugt werden. Da die Gestaltung viele Möglichkeiten bietet, ist es empfehlenswert, den Bauteilnutzen über Funktionsintegration zu steigern. Eine Methode, die Konstrukteure bei der Funktionsintegration unterstützen kann, ist das Aufzeigen von geeigneten Beispielen. In diesem Beitrag werden die wichtigen Aspekte einer solchen Sammlung in Form eines Konstruktionskatalogs anhand der Literatur diskutiert. Darauf aufbauend wird ein Konzept eines Konstruktionskatalogs für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen hergeleitet. Es wird gezeigt, dass ein solcher Katalog mit Hilfe eines multidimensionalen Gliederungsteils und einer Erläuterung der Effekträger die funktionsintegrierte Gestaltung unterstützt.

Topics: *Lightweight Design within the Product Development, Design Methodology*

Keywords: *Lightweight construction in product development, design methodologies, additive manufacturing, design catalog*

Concept of a design catalog for the function-integrated design of additively manufactured components

Enno Garrelts^{1,2}, Daniel Roth², Hansgeorg Binz²

¹University of Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)

²University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

With additive manufacturing processes, components of high complexity can be produced with few restrictions. Since the design offers many possibilities, it is recommended to increase the component usefulness through function integration. One method that can support designers in function integration is to provide suitable examples. In this paper, the important aspects of such a collection in the form of a design catalog are discussed based on the literature. Building on this, a concept for a design catalog for the function-integrated design of additively manufactured components is derived. It is demonstrated, that such a catalog supports the function-integrated design with the help of a multidimensional catalog-structure and an explanation of the effect carriers.

Themen: Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Additive Fertigung, Bauteiltrennung, Herstellkosten, Bauteilorientierung

Topics: Design Methodology

Keywords: Additive manufacturing, part separation, manufacturing costs, part orientation

Bauteiltrennung zur Reduzierung der Prozesszeit und -kosten in der Additiven Fertigung

Jannik Reichwein, Kay-Eric Steffan, Eckhard Kirchner

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente

Component separation to reduce process time and costs in additive manufacturing

Jannik Reichwein, Kay-Eric Steffan, Eckhard Kirchner

Technical University Darmstadt, Institute for Product Development and Machine Elements

Die additive Fertigung bietet durch die schichtweise Herstellung von Bauteilen ein großes Potenzial in der geometrischen Gestaltung. Dies wird bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile häufig dazu genutzt, Bauteile leichter zu gestalten. Eine weitere Reduzierung der Masse ist möglich, wenn mehrere Bauteile zu einem komplexeren Bauteil zusammengefasst werden. Mit der höheren Komplexität steigen jedoch auch die Herstellkosten, durch einen höheren Bedarf an Stützkonstruktionen, Nachbearbeitung und längerer Fertigungszeit. Gerade bei komplexen Bauteilen, die den Bauraum der additiven Fertigungsanlage nur schlecht ausnutzen, ist Bauteiltrennung zielführend, um eine Reduzierung der Herstellkosten zu erreichen. In diesem Beitrag wird ein Vorgehen zur automatisierten Bauteiltrennung vorgestellt, welches eine bezüglich der Herstellkosten optimale Schnittebene unter Berücksichtigung der Bauteilanzahl, der Fertigungszeit und dem Volumen der Stützkonstruktionen ermittelt. Anhand eines Evaluierungsbeispiels wurde bei einer größeren Stückzahl eine Kostenreduzierung von bis zu 50 Prozent erreicht.

Additive manufacturing offers great potential in geometric design through the layer-by-layer production of components. This is often used in the development of additively manufactured components to make components lighter. A further reduction in mass is possible if several components are combined into a more complex component. However, the higher complexity also increases the manufacturing costs, due to a higher demand for supporting structures, reworking and longer production time. Especially for complex components, which make poor use of the space available in the additive manufacturing system, component separation is a good way to reduce manufacturing costs. In this paper a procedure for automated component separation is presented, which determines an optimal cutting plane with respect to the manufacturing costs, taking into account the number of components, the manufacturing time and the volume of the supporting structures. Based on an evaluation example, a cost reduction of up to 50 percent was achieved for a larger number of parts.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 2: LEICHTBAU IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 13.00 – 14.30 Uhr

Themen: *Leichtbau in der Produktentwicklung*

Stichworte: *Leichtbau, Massenverteilung, Produktarchitektur, DSM*

Eine Methodik zur Identifizierung der leichtbaugetriebenen Massenpotenziale für die frühe Konzeptphase

Felix Laufer, Daniel Roth, Hansgeorg Binz

*Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches
Design (IKTD)*

Die Treiber zum Einsatz von Leichtbau sind vielfältig. Performancesteigerung, Reduzierung des Materialverbrauchs oder Senkung des Treibhausgasausstoßes sind einige Beispiele. Des Weiteren fordern Anwender, dass Leichtbauoptimierungen nicht um jeden Preis umgesetzt werden dürfen. Die Frage nach kosteneffizienten Lösungen steht somit häufig im Mittelpunkt des Optimierungsprozesses. Dem Beginn dieses Prozesses ist demnach die Ableitung von Leichtbaupotenzial unter Berücksichtigung aller relevanten Treiber vorzuschalten. Der vorliegende Beitrag stellt hierzu eine Methodik vor, welche auf Grundlage eines breiten Motivatorensatzes für Leichtbau Massenpotenziale ableitet. Hierbei werden nicht nur Möglichkeiten der Massenreduzierung untersucht, sondern auch Potenziale für eine Massenumverteilung abgeleitet. Eine finale Bilanzierung der Aufwände und Nutzen erlaubt dem Produktentwickler im Rahmen der Methodik eine gezielte Entscheidung für konkrete Leichtbaumaßnahmen sowie eine Priorisierung von Bauteilen im Optimierungsprozess.

Topics: *Lightweight Design within the Product Development*

Keywords: *Lightweight design, mass distribution, product architecture,
DSM*

A methodology for identifying the lightweight-driven mass potentials for the early conceptual phase

Felix Laufer, Daniel Roth, Hansgeorg Binz

*University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial
Design*

The drivers for performing lightweight design are manifold. Increasing performance, reducing material consumption or lowering greenhouse gas emissions are some examples. Moreover, users demand that lightweight design optimizations must not be implemented at any price. The question of cost-effective solutions poses therefore often the core challenge of the optimization process. Thus, the start of this process should be preceded by the derivation of lightweight design potential, taking into account all relevant drivers. The present paper presents a methodology for this purpose, which derives mass potentials based on a broad set of motivators for lightweight design. In this context, not only possibilities of mass reduction are investigated, but also potentials for mass redistribution are derived. A final balance of the efforts and benefits allows the product developer to make a targeted decision for lightweight design measures and to prioritize components in the optimization process.

Themen: Leichtbau in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken

Stichworte: Ganzheitlicher Leichtbau, Structural-Health-Monitoring (SHM), Faserverbundwerkstoffe, leichtbauoptimierte Dachstruktur, Seitenschürze

Performancesteigerung von Faserverbundstrukturen in Schienenfahrzeugen

Robert Winkler-Höhn¹, Lars Trampe², Kay-Uwe Kohlshorn³, Peer Heß⁴, Jörg Bünker⁵, Friedrich von Dungern⁶, Stefan Lindner⁷

¹Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte

²Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

³J. M. Voith Se & Co. KG

⁴Forster System-Montage-Technik GmbH

⁵SEARTEX GmbH & Co. KG

⁶INVENT GmbH

⁷EAST-4D Carbon Technology GmbH

Für eine signifikante Masseinsparung ist ein ganzheitlicher Leichtbauansatz notwendig. Dieser ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekts »Signifikante Masseinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem«(faWaSiS) verfolgt worden.

Der Ansatz konnte am Beispiel einer Seitenschürze eines Triebzugs der Baureihe 612 umgesetzt werden, die nachfolgend im realen Betrieb erprobt wird. Die gewonnen Erkenntnisse werden des Weiteren innerhalb des Projekts auf eine methodisch leichtbauoptimierte, faser-verbundintensive Dachstruktur eines Eisenbahnwagenkastens übertragen.

Topics: Lightweight Design within the Product Development, Design Methodology

Keywords: Holistic lightweight construction, Structural-Health-Monitoring (SHM), Fibre composite materials, roof structure optimised for lightweight construction, side skirt

Performance increase of fiber composite structures in rail vehicles

Robert Winkler-Höhn¹, Lars Trampe², Kay-Uwe Kohlshorn³, Peer Heß⁴, Jörg Bünker⁵, Friedrich von Dungern⁶, Stefan Lindner⁷

¹German Aerospace Center, Institute of Vehicle Concepts

²German Aerospace Center, Institute of Composite Structures and Adaptive Systems

³J. M. Voith Se & Co. KG

⁴Forster System-Montage-Technik GmbH

⁵SEARTEX GmbH & Co. KG

⁶INVENT GmbH

⁷EAST-4D Carbon Technology GmbH

A holistic lightweight construction approach is necessary to achieve significant weight savings. This was pursued within the framework of the joint project "Significant mass savings through structurally supporting fibre-composite-intensive car body structures of rail vehicles with integrated damage diagnosis system" (faWaSiS) funded by the Federal Ministry of Economics Affairs.

The approach was implemented using the example of a side skirt of a class 612 multiple unit train and testing it in real operation. Within the project, the knowledge gained from this was transferred to a methodically lightweight construction-optimised, fibre-composite-intensive roof structure of a railway car body.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 2: LEICHTBAU IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 13.00–14.30 Uhr

Themen: *Leichtbau in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken*
Stichworte: *Aluminiumschaum-Sandwich, Konstruktionsrichtlinie, Design for X (DfX), Leichtbau*

Überwindung der Herausforderungen beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich

Patrick Hommel, Daniel Roth, Hansgeorg Binz
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Aluminiumschaum-Sandwich (AFS) ist eine innovative Materialkombination für die Konstruktion von leichten Bauteilen und besitzt viele Vorteile, wie eine hohe Biegesteifigkeit bei geringer Dichte und ein gutes Dämpfungsverhalten. Obwohl das Material serienreif entwickelt ist, fehlt es auch erfahrenen Konstrukteuren an Konstruktionskenntnissen, weshalb die Anzahl der industriellen Anwendungen unter dem Potenzial des Materials liegt. Dieser Beitrag beschreibt die notwendigen Inhalte für eine Unterstützung für das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich und erläutert in welcher Bereitstellungsform diese Informationen zur Verfügung gestellt werden können. Auf Grundlage definierter Anforderungen an die Unterstützung wird die Form einer Konstruktionsrichtlinie ausgewählt, die das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich zukünftig erleichtern soll, sodass das volle Potenzial dieses Materials genutzt werden kann.

Topics: *Lightweight Design within the Product Development, Design Methodology*
Keywords: *Aluminum foam sandwich, Design guideline, Design for X (DfX), Lightweight design*

Overcoming the challenges of designing with aluminum foam sandwich

Patrick Hommel, Daniel Roth, Hansgeorg Binz
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Aluminum foam sandwich (AFS) is an innovative material combination for designing lighter products and has many advantages such as a high bending stiffness at a low density and a good damping behavior. Although the material is ready for series production, even experienced designers do not have the necessary design knowledge, so that the number of industrial applications is below the material's potential. This paper describes the necessary contents for a design support for aluminum foam sandwich and explains in which form this information can be provided. On the basis of defined requirements for the support, a design guideline is selected which is intended to simplify designing with aluminum foam sandwich in the future, allowing the full potential of this material to be realized.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 3: AGILE PRODUKTENTWICKLUNG & WISSENSMANAGEMENT IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: *Agile Produktentwicklung, Nutzerzentriertes Design*

Stichworte: *Agile Produktentwicklung, Technisches Design, nutzerzentrierte Entwicklung*

Topics: *Agile Product Development, User Centered Design*

Keywords: *Agile product development, technical design, user-centred development*

Entwicklung einer situativen Entwicklungsmethodik – ein hybrider Ansatz zur agilen Transformation im Technischen Design

Florian Reichelt, Daniel Holder, Thomas Maier

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Development of a situational development methodology - a hybrid approach for agile transformation in technical design

Florian Reichelt, Daniel Holder, Thomas Maier

University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

In den vergangenen Jahren konnte eine sukzessive Zunahme der Anwendung agiler Methoden in der physischen Hardwareentwicklung wahrgenommen werden. Diese Anwendung erfolgte zuerst in Pilotprojekten. Derzeit findet die Ausweitung agiler Methoden im unternehmensweiten Sinne statt. Für eine organisationsweite Anwendung agiler Methoden existieren verschiedene Frameworks, wie SAFe oder LeSS. Zahlreiche Studien und Casestudies zeigen jedoch zunehmend die Grenzen bei der derzeitigen Umsetzung solcher Transformationsansätze auf, wie z. B. Missverständnisse der agilen Werte oder organisatorische Limitationen. Ziel dieses Beitrags ist es einerseits einen Überblick über derzeit bekannte Herausforderungen bei der Agilisierung mittels recherchierter Studien und Casestudies zu geben. Andererseits wird der Ansatz einer hybriden Methodik, basierend auf Ergebnissen einer detaillierten Expertenbefragung, hergeleitet. Des Weiteren wird ein Ausblick auf die zukünftigen Forschungsarbeiten im Bereich einer situativen Entwicklungsmethodik im Technischen Design gegeben, welche den Nutzer des Produkts verstärkt in den Mittelpunkt des agilen Entwicklungsprozesses stellt.

In recent years, a continuous increase in the use of agile methods in physical hardware development could be recognized. Initially, this application occurs in pilot projects. Currently, the expansion of agile methods in a company-wide sense is taking place. For an organizational application of agile methods different frameworks exist, such as SAFe or LeSS. However, numerous studies and case studies increasingly show the limits of the current implementation of such transformation approaches, such as misunderstanding of agile values or organizational limitations. The aim of this contribution is to give on the one hand an overview of currently known challenges. Therefore, researched studies and case studies will be used. On the other hand, the approach of a hybrid methodology based on the results of a detailed expert survey is derived. Furthermore, an outlook on future research in the area of a situational development methodology in technical design is given, which takes the user more in the focus of the agile development process.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 3: AGILE PRODUKTENTWICKLUNG & WISSENSMANAGEMENT IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung, Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Requirements Engineering, Anforderungserhebung, mobile Endgeräte, Prozessmodell, Systemarchitektur

Topics: Knowledge Management within the Product Development, Reliable Product Development

Keywords: Requirements engineering, mobile device, product development, process model, system architecture

Erschließung der Potentiale des Requirements Engineerings auf mobilen Endgeräten

Kris Rudolph¹, Jannik Reichwein¹, Eckhard Kirchner¹,
Jörg Stahlmann², Christian Donges³

¹Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente

²ConSenses GmbH

³em engineering methods AG

Das Erzeugen einer vollständigen und präzisen Anforderungsliste stellt einen kritischen Erfolgsfaktor in der Produktentwicklung dar. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei die Einbindung von Kontextinformationen des zu entwickelnden Produkts. Für eine in situ Erhebung von Anforderungen liegen jedoch keine technischen Unterstützungswerkzeuge vor. Mobile Endgeräte bieten das Potential diese Lücke zu schließen und den Anforderungsingenieur während eines Kundenbesuchs zu unterstützen. In diesem Beitrag wird ein Prozessmodell des Requirements Engineerings vorgestellt. Es verknüpft die Teilprozesse Aufgabenklärung und Anforderungsmanagement miteinander. Anhand des Prozessmodells werden potentielle für die Aufgabenklärung nutzbare Anforderungsquellen aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden für die Entwicklung einer möglichen Systemarchitektur für eine Requirements Engineering-Anwendung genutzt. Damit wird die Grundlage zur Erschließung des Requirements Engineerings auf mobilen Endgeräten geschaffen.

Tapping the potentials of requirements engineering for mobile devices

Kris Rudolph¹, Jannik Reichwein¹, Eckhard Kirchner¹,
Jörg Stahlmann², Christian Donges³

¹Technical University Darmstadt, Institute for Product Development and Machine Elements

²ConSenses GmbH

³em engineering methods AG

The complete and precise elicitation of requirements plays a crucial factor for success in product development. Contextual inquiry is of particular importance to this success. However, there is no technical support to the requirements engineer for in situ analysis. Mobile devices offer the potential to close this gap and support the engineer during customer visits. This paper presents a model of the requirements engineering process, where the sub processes of requirements elicitation and requirements management are linked together. Using the process model potential requirement sources which are relevant for mobile requirements engineering are identified. A system architecture is derived from the obtained knowledge. It forms the foundation from which the potentials of requirements engineering for mobile devices can be developed.

Themen: Konstruktionsmethodiken, Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Wissenslandkarte, adaptive Bauwerke, interdisziplinäre Zusammenarbeit, Bildung

Topics: Design Methodology, Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Knowledge map, adaptive buildings, interdisciplinary teamwork, education

Unterstützung bei der interdisziplinären Zusammenarbeit – Personenneutrale Wissenslandkarten

Michael P. Voigt, Sinan Idrizi, Daniel Roth, Hansgeorg Binz
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Adaptive Bauwerke bieten die Möglichkeit, den steigenden Anforderungen hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zu begegnen, bedingen jedoch die enge Zusammenarbeit eines stark interdisziplinären Teams. Dieser Beitrag zeigt, wie das Verständnis über die Disziplinen verbessert und somit die Zusammenarbeit unterstützt werden kann. Der Ansatz ist dabei eine personen-neutrale, bildungsbasierte Wissenslandkarte, in der die Fertigkeiten und die Kenntnisse, die in unterschiedlichen Studiengängen erworben werden, dargestellt wird. Die Wissenslandkarten dienen als Ansatzpunkt für den interdisziplinären Exkurs und zeigen Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede zwischen den Stuttgarter Studiengängen der Disziplinen Architektur und Stadtplanung, Tragwerksplanung, Bauphysik, Maschinenbau, Systemdynamik und Umweltschutztechnik. Zusätzlich zu den Ergebnissen wird innerhalb des Beitrags auch auf das Vorgehen zur Erstellung bildungsbasierter Wissenslandkarten und die dabei auftretenden Herausforderungen eingegangen.

Supporting Interdisciplinary Teamwork – Person-unspecific Knowledge Maps

Michael P. Voigt, Sinan Idrizi, Daniel Roth, Hansgeorg Binz
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Adaptive buildings allow to meet the increasing requirements regarding the consumption of resources in the building industry but require a strong interdisciplinary teamwork. This paper shows how the understanding about the disciplines can be improved and thus the teamwork can be supported. The approach is a concept of a person-neutral, education-based knowledge map, in which the skills and knowledge that was learned during the studies are presented. The knowledge maps serve as a basis for the interdisciplinary exchange. They show the similarities and differences between the studies of Stuttgart regarding the disciplines of architecture and urban planning, structural design, building physics, mechanical engineering, system dynamics and environmental engineering. In addition to the results, the article also describes the procedure for the development of education-based knowledge maps and the challenges that arise from it.

TRACK 2: METHODEN UND PROZESSE DER PRODUKTENTWICKLUNG

SESSION 3: AGILE PRODUKTENTWICKLUNG & WISSENSMANAGEMENT IN DER PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Stichworte: Ziele, Anforderungen, Unsicherheit, Wissen, Extrapolation

Topics: Knowledge Management within the Product Development

Keywords: Objectives, Requirements, Uncertainty, Knowledge, Extrapolation

Zieleextrapolation bei Zielunsicherheit in der Produktentwicklung

Lukas Block¹, Hansgeorg Binz², Daniel Roth²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT und Graduate School of Excellence advanced
Manufacturing Engineering (GSaME)

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches
Design (IKTD)

Ziele und Anforderungen eines Entwicklungsprozesses sind inhärent dynamisch. Auf Seiten des Entwicklers resultiert daraus Unsicherheit. Er könnte versucht sein, zukünftige Anforderungsänderungen zu antizipieren und individuell ein erwartetes Zielsystem zu extrapolieren. Es wird untersucht, ob eine solche individuelle Zieleextrapolation unter Unsicherheit in der Praxis existiert und welche Informationen der Entwickler zur Extrapolation verwendet.

Hierzu werden eine Literaturrecherche sowie ergänzend eine empirische Studie durchgeführt. Die Existenz der unsicherheitsbedingten Zieleextrapolation kann bestätigt werden. Die extrapolierten Ziele basieren auf dem Wissen des Entwicklers und auf weiteren, externen Informationen. Dementsprechend wird über die Zieleextrapolation schnell und aufwandsarm neues Wissen und neue Informationen in den Entwicklungsprozess integriert. Da die Integration allerdings organisatorisch nicht geregelt ist, erfolgt sie ohne externe Kontrolle der Informationsqualität. Es werden drei Maßnahmen abgeleitet, um einer Aushöhlung der organisatorischen Anforderungen entgegenzuwirken. Eine gezielte Kontrolle der Zieleextrapolation weist nur geringe Erfolgchancen auf.

Extrapolation of Objectives in Product Development under Uncertainty

Lukas Block¹, Hansgeorg Binz², Daniel Roth²

¹Institute of Human Factors and Technology Management IAT at the
University of Stuttgart and Graduate School of Excellence advanced
Manufacturing Engineering (GSaME)

²University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial
Design

Objectives and requirements are inherently dynamic. This leads to uncertainty on the part of the executing engineer. Thus, he might forecast future changes and extrapolate the requirements towards his individual, expected system of objectives. Within the paper, we investigate whether such an individual extrapolation of objectives under uncertainty exists and what information the developer uses to extrapolate. A literature review and a supplementary empirical study is conducted. The existence of individual extrapolation of objectives can be confirmed. Furthermore, we find that the extrapolated objectives are based upon the developer's knowledge and outside information. As such, extrapolation of objectives subliminally and quickly integrates new knowledge and information in the development process. Yet, integration happens without external control of information quality. We suggest three measures to counteract an erosion of organizational requirements. However, extrapolation of objectives is inherently interweaved with dynamic requirements in a development process. Extrapolation can only be controlled to a limited extent.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND ZUVERLÄSSIGKEITSTECHNIK

SESSION 1: INNOVATIONS- UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Innovations- und Technologiemanagement, Wissensmanagement in der Produktentwicklung*

Stichworte: *Diffusionstheorie, Markteinführung, Frühe Phase der Produktentwicklung, Marktzugang, Marktzugangskonzept*

Topics: *Innovation and Technology Management, Knowledge Management within the Product Development*

Keywords: *Diffusion of Innovations, product launch, early phase of product development, market access, concept to access markets*

Go-To-Market Canvas – Ein Marktzugangskonzept für Inventionen in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

Manuel Niever¹, Felix Schulz¹, Jonas Heimicke², Carsten H. Hahn¹, Albert Albers²

¹Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

²Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung

Go-To-Market Canvas – Market access concept for invention in the early phase of product generation development

Manuel Niever¹, Felix Schulz¹, Jonas Heimicke², Carsten H. Hahn¹, Albert Albers²

¹Karlsruhe University of Applied Sciences

²Karlsruhe Institute of Technology, IPEK – Institute of Product Engineering

Kürzere Technologie- und Produktlebenszyklen erfordern häufigere und schnellere Markteinführungen. Für die Entwicklung von neuen Produkten mit hohem Innovationspotential bietet die Diffusionstheorie einen analytischen Ansatz zur Untersuchung von Erfolgs- und Einflussfaktoren der Markteinführung. Anhand dieser Kriterien können Methoden- und Marktzugangskonzepte entwickelt werden, um die Markteinführung bereits in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung zu berücksichtigen. Im Rahmen einer präskriptiven Studie wird ein Marktzugangskonzept für die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung entwickelt, das eine methodische Unterstützung bietet und wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung von technischen Produkten nimmt. Die empirische Validierung des Konzeptes in einem realitätsnahen Entwicklungsprojekt mit fünf studentischen Entwicklungsteams zeigt die praktische Anwendbarkeit und den wahrgenommenen Mehrwert auf. Das Marktzugangskonzept in Form eines Go-To-Market Canvas beinhaltet die Planung von Markteinführungsstrategien sowie Kommunikations- und Vertriebskanälen und fokussiert das Wertangebot aus dem Geschäftsmodell.

Shorter technology and product life cycles require more and faster product launches. To develop new products with high innovation potential, the diffusion theory offers an analytical approach to investigate success and to influence factors of a product launch. Based on these criteria, methods and a concept to access markets can be developed to consider the product launch already in the early phase of product generation development. Within a prescriptive study, a concept to access markets for the early phase of product generation development is developed. The concept to access markets provides methodological support and is significant for the development of technical products. The empirical validation of the concept in a real development project with five student development teams shows the practical applicability and the perceived added value. The concept to access markets is realized in form of the Go-To-Market Canvas which contains the planning of product launch strategies as well as communication and sales channels and focuses the value proposition from the business model.

Themen: Innovations- und Technologiemanagement

Stichworte: Digitale Plattform, Geschäftsmodell, IoT, Plattformökonomie, Wirtschaftlichkeit

Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle im Business-to-Business

Fabio Wortmann¹, Sina Kämmerling², Kai Ellermann¹, Arno Kühn¹, Christoph Plass², Roman Dumitrescu¹

¹Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM

²UNITY AG

Digitale Plattformen haben die Mechanismen vieler Märkte im Consumer Bereich grundlegend verändert. Durch die fortschreitende Digitalisierung, steht auch die Industrie nun an der Schwelle zur Plattformökonomie. Der Einstieg ins Plattformgeschäft ist jedoch für viele Unternehmen mit großen Herausforderungen verbunden. Digitale Plattformen folgen einer völlig anderen Geschäftslogik als klassische, lineare Geschäftsmodelle. In vielen Unternehmen mangelt es daher an Know-how und Erfahrung im Plattformgeschäft. Insbesondere die Entwicklung eines schlüssigen Geschäftsmodells ist ein Erfolgsfaktor in der frühen Phase der Geschäftsplanung. In diesem Beitrag stellen wir eine Methode zur Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle vor. Ausgehend von einer Plattformidee gilt es, in einem ersten Schritt ein Geschäftsmodell-Konzept zu entwickeln. Im zweiten Schritt werden zur Detail-Entwicklung drei Partialmodelle erarbeitet. Im dritten Schritt erfolgt schließlich die wirtschaftliche und die Risikobewertung des Geschäftsmodells. Die Ergebnisse werden in einer Management Summary zusammengefasst und dienen als Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung des Vorhabens.

Topics: Innovation and Technology Management

Keywords: Digital Platform, Business Model, IoT, Platform economy, profitability

Development and evaluation of IoT-based platform business models in business-to-business

Fabio Wortmann¹, Sina Kämmerling², Kai Ellermann¹, Arno Kühn¹, Christoph Plass², Roman Dumitrescu¹

¹Fraunhofer Institute for Mechatronic Systems Design IEM

²UNITY AG

Digital platforms have fundamentally changed the mechanisms of many consumer markets. Due to the advancing digitization, the industry is now on the threshold of the platform economy. However, entering the platform business is associated with major challenges for many companies. Digital platforms follow a completely different business logic than classic, linear business models. In many companies there is a lack of know-how and experience in the platform business. In particular, the development of a coherent business model is a success factor in the early phase of business planning. In this article, we present a method for developing and evaluating IoT-based platform business models. Based on a platform idea, the first step is to develop a business model concept. In the second step, three partial models are developed for detailed development. The third step is the economic and risk assessment of the business model. The results are summarized in a management summary and serve as a decision-making basis for the implementation of the project.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND ZUVERLÄSSIGKEITSTECHNIK

SESSION 1: INNOVATIONS- UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Digital Engineering, Innovations- und Technologiemanagement*

Stichworte: *Designplagiat, Produktpiraterie, Reverse-Engineering*

Topics: *Digital Engineering, Innovation and Technology Management*

Keywords: *Plagiarism, product piracy, reverse engineering*

Gefährdungsanalyse zum Einsatz optischer Verfahren in der Produktpiraterie

Franziska Kern, Lukas Schlamp, Thomas Maier

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Produktpiraterie verursacht alleine in Deutschland jedes Jahr Schäden in Milliardenhöhe. In diesem Paper wird die Gefährdung von Produkten durch optische Verfahren simuliert und analysiert. In drei Reverse-Engineering-Ansätzen, die realen Bedrohungsszenarien nachempfunden sind, nähern sich die Autoren aus Sicht potenzieller Plagiatoren. Hierbei werden Produktfotografien, eine Photogrammetrie-App für das Smartphone und ein professioneller 3DScanner verwendet, um physische und digitale Modelle eines Testproduktes nachzubilden. Die Plagiate werden anschließend qualitativ und quantitativ evaluiert. Aus den Erkenntnissen des Arbeitsprozesses und der Bewertung der erzeugten Plagiate erfolgt eine Gefährdungsanalyse. Es zeigt sich, dass jedes Verfahren ein individuelles Plagiatsprofil besitzt und an unterschiedlichen Stellen des Produktentwicklungsprozesses ein Risiko darstellen kann.

Risk Assessment of Optical Technologies in Product Piracy

Franziska Kern, Lukas Schlamp, Thomas Maier

University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Product piracy causes billions of euros in damage every year in Germany alone. In this paper, the risk to products induced by optical technologies is simulated and analyzed. In three reverse engineering approaches, which are modeled on real threat scenarios, the authors imitate the perspective of potential plagiarists. Product photographs, a photogrammetry app for smartphones and a professional 3D scanner are used to recreate physical and digital models of a test product. The plagiarism is then evaluated qualitatively and quantitatively. A risk analysis is carried out from the knowledge of the work process and the assessment of the plagiarism generated. It turns out that every approach has an individual plagiarism profile and can pose a risk at different points in the product development process.

Themen: *Innovations- und Technologiemanagement, Nutzerzentriertes Design*

Stichworte: *Frühe Innovationsphasen, radikale Innovation, Nutzerintegration, Storytelling, Produktkonzeption*

Nutzergetriebene Fahrzeugkonzepte: Ein neuartiger Ansatz zur Identifikation von Produktanforderungen

Maximilian Werner¹, Sebastian Stegmüller²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Die Adressierung der richtigen Nutzerbedürfnisse ist eine bekannte Herausforderung in der Produktentwicklung und -konzeption. Speziell radikale Innovationen, die mit technologischen und marktseitigen Veränderungen einhergehen, sind entsprechend schwer zu planen. Nutzern sind diese Produkte grundsätzlich unbekannt und folglich können sie diesbezüglich keine Anforderungen kommunizieren. Radikale Innovationen sind jedoch erfolgsentscheidend und sollten daher aktiv entwickelt werden. Dieser Beitrag stellt einen neuartigen Ansatz vor, um Nutzer in der frühen Innovationsphase einzubinden und mögliche Bedürfnisse zu antizipieren. Mithilfe von Storytelling und einer speziellen Befragung, basierend auf Expertenwissen, wird ein gewisser Lösungsraum vorgegeben und gleichzeitig die Kreativität der Befragten angeregt. Der Anwendungsfall eines autonomen, abrufbereiten Fahrzeugs dient zur Evaluation der Methode im Zuge einer umfassenden, internationalen Umfrage in China, Deutschland und den USA. Das Ergebnis der Fallstudie zeigt, wie mithilfe des neuartigen Ansatzes Nutzerbedürfnisse und Hauptmerkmale zukünftiger Produkte identifiziert werden können, die eine potenziell radikale Innovation sind.

Topics: *Innovation and Technology Management, User Centered Design*

Keywords: *Early innovation phases, radical innovation, user integration, storytelling, product design*

User-driven vehicle concepts: A novel approach to identify product requirements

Maximilian Werner¹, Sebastian Stegmüller²

¹Institute of Human Factors and Technology Management IAT at the University of Stuttgart

²Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

Meeting the right user needs for successful innovations is a well-known challenge in product design and development. Especially radical innovations that come along with both, technological change and new market conditions are difficult to plan. By nature, this type of innovation is completely unknown to future users. Consequently, they are unable to communicate possible requirements for a product they do not know. Yet, radical innovations are key to corporate success and thus should be actively initialized. In this paper, we present a novel approach to involve users in the early stage innovation process in order to anticipate possible future needs. We apply a storytelling methodology and a special questionnaire design, primed with expert-knowledge, to set a certain framework and enhance respondents' creativity at the same time. The use case of a future autonomous vehicle on-demand is employed to evaluate our methodology in the course of a large-scale international survey in China, Germany and the USA. The case study results show how our approach can help to anticipate future users' needs and to identify key features of a future product that can become a potentially radical innovation.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND ZUVERLÄSSIGKEITSTECHNIK

SESSION 2: ZUVERLÄSSIGE PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 13.00–14.30 Uhr

Themen: Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Lastkollektive, Repräsentativ, Methodik

Topics: Reliable Product Development

Keywords: Load Spectra, Representative, Methodology

Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven für eine belastungsgerechte Produktauslegung

Kevin Lucan, Bernd Bertsche

Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA)

Die Forderung nach Leichtbau und der zunehmende Kostendruck bei der Entwicklung technischer Produkte betrifft auch sicherheitskritische Systeme, bei denen die Zuverlässigkeit eine essentielle Anforderung für die Produktentwicklung darstellt. Um zuverlässige und gleichzeitig ressourceneffiziente Produkte zu entwickeln, werden repräsentative Lastkollektive benötigt, die das Kundenverhalten und damit die Belastung im Feld repräsentieren. In der Praxis fehlen repräsentative Lastkollektive häufig, weshalb nach wie vor hohe Sicherheitsfaktoren in der Dimensionierung von Produkten Anwendung finden. In diesem Beitrag eine Methodik vorgestellt, die eine systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektive ermöglicht. Die entwickelte Methodik wurde für die Nutzfahrzeugsbremse angewendet, woraus ein Laststandard resultierte, der neben repräsentativen Lastkollektiven auch Leitfäden für die Zuverlässigkeitserprobung beschreibt. Das erfolgreiche Anwendungsbeispiel demonstriert, dass die Methodik eine systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven ermöglicht, die für die belastungsgerechte und damit ressourceneffiziente Auslegung von Produkten benötigt wird.

Methodical Determination of Representative Load Spectra for a Load-Appropriate Product Design

Kevin Lucan, Bernd Bertsche

University of Stuttgart, Institute of Machine Components

The demand for lightweight construction and the increasing cost pressure in the development of technical systems also affects safety-critical systems, where reliability is an essential requirement for product development. In order to develop reliable and at the same time resource-efficient products, representative load spectra are required that represent customer behavior and thus the load in the field. In practice, representative load spectra are often missing, therefore high safety factors are still used in the dimensioning of products. For this reason, a methodology is presented in this paper that enables a systematic determination of representative load spectra. The developed methodology was applied to the commercial vehicle brake, resulting in a load standard, describing representative load spectra and a guideline for reliability demonstration testing. This successful application demonstrates that the methodology enables a systematic determination of representative load spectra, which are required for the load-appropriate and thus resource-efficient design of products.

Themen: Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Schadpartikelverträglichkeitstest, Elektronik, Frühausfälle, Zuverlässigkeit

Schadpartikelverträglichkeitstests zur Reduzierung von Frühausfällen bei elektronischen Komponenten

Patrick Brag, Markus Rochowicz

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Während der Produktentwicklung von elektronischen Komponenten kommt eine ganze Bandbreite standardisierter Testverfahren zum Einsatz, um die Zuverlässigkeit zu ermitteln und Ausfällen vorzubeugen. Das Risiko von Kurzschlüssen, als Folge partikulärer Verunreinigungen, wird hingegen nicht oder zu spät betrachtet. Dabei könnte die Zuverlässigkeit verbessert werden, wenn Partikel nicht nur als Problem der Produktion verstanden würden. In diesem Artikel wird eine neue Methode vorgestellt, um das partikelbedingte Kurzschlussrisiko experimentell zu ermitteln und so das Design zu erproben.

Topics: Reliable Product Development

Keywords: Fault injection test, electronic, early failures, reliability

Fault injection tests to reduce early failures in electronic components

Patrick Brag, Markus Rochowicz

Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA

A broad spectrum of standardized test methods is applied during product development in order to determine the reliability and prevent failures. The risk of short circuits, as a result of particulate contamination, is not considered or considered too late. Instead, reliability could be improved, if particles not only understood as problem of the production. A new method is introduced in this article to determine the particle-related short circuit risk experimentally and thus test the design.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND ZUVERLÄSSIGKEITSTECHNIK

SESSION 2: ZUVERLÄSSIGE PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 13.00–14.30 Uhr

Themen: Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Produktentwicklung, Automobilindustrie, V-Modell, regelbasierte Entscheidungsfindung

Topics: Reliable Product Development

Keywords: Product development, automotive industry, V Model, rule-based decision-making

Konzept für ein selbstlernendes Assistenzsystem zur Mensch-Computer- Interaktion in der Produktentwicklung

Matthias Müller¹, Prof. Dr. Bogdan Franczyk²

¹Hochschule Magdeburg-Stendal, Institut für Technische Betriebswirtschaft

²Universität Leipzig, Institut für Wirtschaftsinformatik

Concept for a self-learning assistance system for human-computer interaction in product development

Matthias Müller¹, Prof. Dr. Bogdan Franczyk²

¹Magdeburg-Stendal University of Applied Sciences, Institut für Technische Betriebswirtschaft

²Leipzig University, Business Information Systems Institute

Mit steigender Kollaboration der Entwicklungspartner aus dem Ingenieurs- und Informatikumfeld entstehen immer hochkomplexere Zusammenarbeitsmodelle, welche eine interdisziplinäre Interaktion zunehmend schwieriger machen. Der heute zwischen den beteiligten Fachbereichen der Produktentwicklung existierende Kommunikationsprozess bietet mit seinen schlecht vernetzten Arbeitsabläufen keine ganzheitliche IT-Systemsteuerung. Viel mehr führen monolithische Einzelsysteme in der Produktentwicklung häufig zu unerwünschten Unterbrechungen in den Arbeitsprozessen der Entwickler. Diese systemischen Insellösungen sind sehr ineffizient und ermöglichen zur Bewältigung der hohen Komplexität somit auch keine reibungslose Interaktion in der Produktentwicklung. In der Literatur zum Management der Produktentwicklung werden Vorgehensmodelle für eine fachbereichsübergreifende Zusammenarbeit beschrieben. Dennoch sind die Erkenntnisse der aktuellen Fachliteratur häufig nicht eindeutig, als dass sie für eine künftige Lösung zur Entwicklung eines selbstlernenden Entscheidungsfindungssystems in der Produktentwicklung in Betracht kämen. Die Autoren stellen eine erste Konzeptidee für ein smartes, regelbasiertes Assistenzsystem für Entscheidungen im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie vor. Dieser Ansatz soll die digitalen Interaktionen zwischen den Fachbereichen unterstützen, unvollständige Formalismen weiter ergänzen sowie die automatisierte Entscheidungsfindung effizienter machen.

With increasing collaboration between development partners from the engineering and IT environment more and more complex collaboration models are emerging, thus making interdisciplinary interaction increasingly difficult. The communication process that exists today between the involved product development departments with their poorly networked work processes does not offer a holistic means of steering an IT system. Instead, monolithic single-systems in product development often lead to undesirable interruptions in the work processes of developers. These systemic isolated solutions are very inefficient and therefore do not enable smooth interaction in product development to cope with the high level of complexity. The literature on the management of product development explains which procedural models exist for interdisciplinary cooperation. Nevertheless, the findings reported in the current literature are often not clear enough to be considered for the future development of a self-learning decision-making system in product development. The authors present an initial concept idea for a smart, rule-based assistance system for decisions in the product development process in the automotive industry. This approach is intended to provide greater support for digital interactions between the departments, to further supplement incomplete formalisms and to make automated decision-making more efficient.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: Nachhaltige Produktentwicklung, Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Elektromobilität, Getriebewirkungsgrad, Lastkollektiv,
Multifunktionsfahrzeug

Topics: Sustainable Product Development, Reliable Product Development

Keywords: Electromobility, transmission efficiency, load collective,
multifunctional vehicle

Wirkungsgraduntersuchungen am Antriebsstrang von Multifunktionsfahrzeugen unter Berücksichtigung von empirisch ermittelten Lastkollektiven

Leon Stütz, Patrick Beck, Markus Kley

Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik

Ein fortschreitender Transformationsprozess innerhalb der Branche stellt die Fahrzeugindustrie vor weitreichende Herausforderungen. In diesem Kontext soll die Optimierungen hinsichtlich der Getriebeeﬃzienz durch die Elektrifizierung von Antriebssträngen vorangetrieben werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden Wirkungsgraduntersuchungen am Getriebe eines elektrifizierten Multifunktionsfahrzeuges vorgenommen. Unter Berücksichtigung des empirisch ermittelten Gesamtlastkollektivs des Multifunktionsfahrzeugs wird aufgezeigt, in welchen Betriebspunkten der Wirkungsgrad des Getriebes optimal ist und in welchen Bereichen des Drehmoment-Drehzahl-Kennfelds die Verlustleistungen und Verlustenergien am größten sind. Es konnte aufgezeigt werden, inwieweit der Getriebewirkungsgrad vom übertragenen Drehmoment und der Antriebsdrehzahl abhängt. Des Weiteren wird aufgezeigt, dass vor allem die Betriebspunkte im oberen Drehzahlbereich des Gesamtlastkollektivs den größten Anteil am Energieverlust des Getriebes haben. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades in diesen Punkten bedeutet eine überproportionale Reduzierung der Energieverluste des Getriebes und damit des Fahrzeugs.

Driveline efficiency tests of multifunctional vehicles with regard to empirically determined load spectrums

Leon Stütz, Patrick Beck, Markus Kley

Aalen University, Institute for Drive Technology

An ongoing transformation process within the industry presents the automotive industry with far-reaching challenges. In this context, the optimization of efficiency through the electrification of powertrains is to be promoted. Within the scope of this publication, efficiency studies are carried out on the transmission of an electrified multi-functional vehicle. Considering the empirically determined total load collective of the multifunctional vehicle, it is shown at which operating points the efficiency of the transmission is optimal and in which areas of the torquespeed map the power losses and loss energies are the greatest. It could be shown to what extent the transmission efficiency depends on the transmitted torque and the input speed. Furthermore, it is shown that especially the operating points in the upper speed range of the total load spectrum have the largest share in the energy loss of the transmission. An improvement of the efficiency in these points means a disproportionate reduction of the energy loss of the transmission and thus of the vehicle.

TRACK 3: TECHNOLOGIEMANAGEMENT UND ZUVERLÄSSIGKEITSTECHNIK

SESSION 3: ZUVERLÄSSIGE PRODUKTENTWICKLUNG

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45 – 16.15 Uhr

Themen: Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Mensch-Maschine-System, Systemzuverlässigkeit, Belastungsverteilung, Regler-Mensch-Modell, Lastkollektiv

Topics: Reliable Product Development

Keywords: Human-Machine System, System Reliability, Load Distribution, Control-Human Model, Load Collective

Modellierung des Mensch-Maschine-Systems für Systemzuverlässigkeitstests: Ermittlung des Anwendereinflusses auf die Belastung der Maschine

Thomas Gwosch, Matthias Dörr, Sven Matthiesen

Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung

Modeling of Human-Machine Systems for System Reliability Testing: Investigation of the User Impact on the Load of the Machine

Thomas Gwosch, Matthias Dörr, Sven Matthiesen

Karlsruhe Institute of Technology, IPEK – Institute of Product Engineering

Für die Bewertung der Systemzuverlässigkeit bei Mensch-Maschine-Systeme ist die Kenntnis der Belastung auf das technische System notwendig. Dabei fehlen Simulationsmodelle, welche die Anwenderkräfte bei der Analyse der Systemzuverlässigkeit berücksichtigen.

In dieser Veröffentlichung werden zwei Ansätze zur Ermittlung der durch den Anwender verursachten Belastung auf die Maschine vorgestellt. Der erste Ansatz ist ein Open-Loop-Ansatz, mit dem eine Extraktion in den Kraft-Zeitverläufen möglich wird. Der zweite Ansatz ist ein Closed-Loop-Ansatz, der das Regler-Mensch-Modell als parametrischer, quasilinearer Regler abbildet. Es wird ein Regler-Mensch-Modell aus dem Stand der Forschung eingesetzt und unter Einbezug von experimentellen Daten parametrisiert.

Die Ergebnisse zeigen den Einfluss des Anwenders auf die Belastungsverteilung der Maschine in der Simulation und die Notwendigkeit zur Berücksichtigung des Menschen im Regelkreis. Durch die Modellierung des Regler-Mensch-Maschine-Systems wird es möglich, mit Hilfe von Simulationen Lastkollektive zu ermitteln, welche die Bewertung der Systemzuverlässigkeit für geänderte Systemparameter und damit unterschiedliche Betriebspunkte zulässt.

For the evaluation of system reliability in human-machine systems, knowledge of the load on the technical system is necessary. Simulation models for the consideration of user forces in the evaluation of system reliability are missing.

In this publication, two approaches for determining the load on the machine caused by the user are presented. The first approach is an open loop approach, which allows an extraction in the force-time courses. The second approach is a closed loop approach, which models the controller-human model as a parametric quasilinear controller. A controller-human model from the state of the art is used and parameterized with the use of experimental data.

The results show the influence of the user on the load distribution of the machine in the simulation and the necessity to consider the human in the control loop. By modelling the controller-human-machine system it is possible to use simulations to estimate the load collectives. This allows the evaluation of the system reliability for different system parameters and thus different operating points.

Themen: Nachhaltige Produktentwicklung, Zuverlässige Produktentwicklung

Stichworte: Adaptive Tragwerke, Auslegungsmethode, Nachhaltigkeit, SFB 1244

Topics: Sustainable Product Development, Reliable Product Development

Keywords: Adaptive Load-Bearing Structure, Design Method, Sustainability, SFR 1244

Methoden zur zuverlässigen, sicheren und nachhaltigen Auslegung adaptiver Tragwerke

Andreas Ostertag, Martin Dazer, Bernd Bertsche

Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente (IMA)

Adaptive Tragwerke sind eine vielversprechende Möglichkeit, den Verbrauch von Baumaterialien und die durch ihre Herstellung verursachte Umweltbelastung zu reduzieren. Diese ermöglichen die aktive Manipulation interner Kräfte, um dadurch eine Spannungshomogenisierung bzw. Dämpfung äußerer Einwirkungen, wie Wind- oder Erdbebenlasten zu erreichen. Bestehende Untersuchungen zur Auslegung beschränken sich auf statische Analysen und betrachten nicht den Zielkonflikt in der zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechten Entwicklung im Kontext der Nachhaltigkeit. Auf der Grundlage der Bewegungsgleichung wird eine interdisziplinäre Auslegungsmethode vorgestellt, welche die dynamische Simulation adaptiver Tragwerke mit Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit ermöglicht. Die aktive Kompensation dynamischer Lasten wird durch Last-Zeit-Verläufe auf Basis örtlicher Windlasten mittels eines Lastkollektivs zur Lebensdaueranalyse der Tragstruktur und Ermittlung des Energieverbrauchs der Adaption untersucht. In einem Anwendungsbeispiel wird das Potential adaptiver Tragwerke zur Einsparung von Treibhausgasen aufgezeigt und die Anwendbarkeit der Methode demonstriert.

A method for the reliable, safe and sustainable design of adaptive load-bearing structures

Andreas Ostertag, Martin Dazer, Bernd Bertsche

University of Stuttgart, Institute of Machine Components

Adaptive load-bearing structures are a promising way to decrease the consumption of building materials and the environmental impact caused by the production. They enable the structure to actively manipulate internal forces to achieve stress homogenization or damping of external effects such as wind or earthquake loads. Existing studies on design are limited to static analyses and do not consider the conflict of objectives in reliability and safety-related development in the context of sustainability. On the basis of the equation of motion, an interdisciplinary design method is presented, which allows the dynamic simulation of adaptive structures with regard to reliability, safety and sustainability. The active compensation of dynamic loads is investigated by load-time histories based on local wind loads using a load spectrum for life cycle analysis of the support structure and determination of the energy consumption of the adaptation. An example shows the potential of adaptive load-bearing structures to save greenhouse gases and demonstrates the applicability of the method.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Nutzerzentriertes Design*

Stichworte: Ultraschallbasiertes Feedback, taktiler Feedback, virtuelle Bedienelemente, Mensch-Maschine-Interaktion

Topics: *User Centered Design*

Keywords: *Ultrasonic based feedback, tactile feedback, virtual control elements, human-machine interaction*

Untersuchung zur nutzerzentrierten Feedbackgestaltung im Raum anhand virtueller Bedienelemente

Peter Schmid, Philipp Junger, Thomas Maier

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Obwohl durch die Gestenbedienung ein immer höherer Freiheitsgrad bei der Interaktion zwischen Mensch und Maschine ermöglicht wird, scheitert die Bedienung meist aufgrund des fehlenden haptischen Feedbacks. In dieser Studie wird deshalb das ultraschallbasierte Feedback bei der Gestenbedienung im Raum anhand zweier experimenteller Versuchsreihen untersucht. In der ersten Versuchsreihe wird die Eingabe über einen virtuellen Button im Raum während der Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe untersucht. Dazu wird ein Button mit und ohne Druckpunkt am Stellwegende im Raum implementiert. Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe werden anhand eines virtuellen Sliders vier verschiedene Feedbackmuster zur Informations-übermittlung im Raum untersucht. Hinsichtlich der subjektiven Nutzerbewertung als auch anhand der objektiven Messergebnisse kann in beiden Versuchsreihen nachgewiesen werden, dass das taktile Feedback im Raum bei der Ausführung einer Stellaufgabe via Gesten unterstützt und dadurch ein präzises Stellen ermöglicht wird. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse besitzt diese Technologie großes Potential für die Verbesserung der Akzeptanz bei der Interaktion mit Handgesten.

Investigation of User-centered Feedback Design in Space Using Virtual Control Elements

Peter Schmid, Philipp Junger, Thomas Maier

University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Although gesture-based operation allows an ever-increasing degree of freedom in the interaction between man and machine, operation usually fails due to the lack of haptic feedback. In this study, therefore, the ultrasound-based feedback of gesture control in space is investigated in two experimental test series. In the first test series, the input via a virtual button in the room during the execution of a main and secondary task is investigated. For this purpose, a button with and without a pressure point at the end of the stroke is implemented in the room. In the second series of experiments, four different feedback patterns for information transfer in space are investigated using a virtual slider. With regard to the subjective user evaluation as well as the objective measurement results, the tactile feedback in the air supports the execution of an adjustment task via gestures and thus enables a precise adjustment. Based on the test results, this technology has great potential for improving the acceptance of interaction with hand gestures.

Themen: Digital Engineering, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Ergonomie, digitale Menschmodellierung, neuro-muskuloskelettales Modell, PKW Einstieg, Biomechanik

Topics: Digital Engineering, User Centered Design

Keywords: Ergonomics, digital human modelling, neuro-muskuloskeletal model, car ingress, biomechanics

Menschorientiertes Design: Ein Vergleich der Einstiegsbewegung für zwei Fahrzeugkonzepte anhand eines muskuloskeletalen, digitalen Menschmodells

Johannes R. Walter^{1,2}, Patrick Lerge^{1,2}, Syn Schmitt^{1,2}

¹Universität Stuttgart, Institut für Modellierung und Simulation Biomechanischer Systeme (IMSB)

²Universität Stuttgart, Stuttgart Center for Simulation Science (SimTech)

Human-centred design: a comparison of ingress motion for two car concepts using a musculoskeletal, digital human body model

Johannes R. Walter^{1,2}, Patrick Lerge^{1,2}, Syn Schmitt^{1,2}

¹University of Stuttgart, Institute for Modelling and Simulation of Biomechanical Systems (IMSB)

²University of Stuttgart, Stuttgart Center for Simulation Science (SimTech)

Prospektiv einsetzbare digitale Menschmodelle für die Bewertung von Designentscheidungen, wie z. B. die Proportionen eines Türrahmens für einen optimalen PKW-Einstieg, sind immer noch selten. Bestehende Methoden stoßen an ihre Grenzen, wenn das Design künstlicher Natur ist und keine vergleichbaren Bewegungsdaten in den Datenbanken zur Verfügung stehen. Um diese Lücke zu schließen, stellen wir hier ein vorwärtsdynamisches, muskelgetriebenes Menschmodell und eine zugehörige Muskelregelungsarchitektur vor, die zur Bestimmung der lokalen Gelenkinematik und der internen Dynamik an den Gelenken verwendet werden, ohne dass eine Bewegungsdatenbank oder inverse Dynamik genutzt werden muss. Hierzu wird eine erste simulierte Bewegung mit den kinematischen Ergebnissen einer experimentellen Studie validiert. Im Folgenden wird auf Basis einer Designänderung die Einstiegsbewegung wiederholt und die Änderungen in Bezug auf die biomechanischen Parameter quantifiziert. Im Ergebnis sagt unser Modell voraus, dass die beispielhafte Konfiguration eines 50 mm höheren Türrahmens zu geringeren Muskelkräften und zu einem geringeren Arbeitsaufwand insbesondere in der Lateralflexion der Wirbelsäule führt.

Prospectively applicable digital human models for the evaluation of design decisions such as the proportions of a door frame for an optimal car ingress are still rare. Existing methods come to their limits at latest when the design is of purely synthetic nature and no comparable motion from real data reconstructions is available in motion databases. To close this gap, in this paper, we present a forward dynamical, muscle-driven human body model and an associated muscle control architecture that is used to determine the necessary range of motion, local joint kinematics and internal dynamics at the joints without neither a background motion database nor inverse dynamics. To do so, an initial simulated motion, generated for a real existing car design, is validated with the kinematic results of an experimental study. In the following, based on a design change, the same model is used to repeat the entry movement and to quantify the resulting change in terms of biomechanical parameters. In conclusion, our model predicts that the exemplary configuration of a 50 mm higher door frame leads to lower muscle forces and to less work effort, especially in the lateral flexion of the spine.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Nutzerzentriertes Design*

Stichworte: *Interface, Fahrzeug, Haptik, Komfort, Wertigkeit*

Methodischer Ansatz zur Analyse haptischer Bedienelemente im Kraftfahrzeug

Michael Tondera¹, Florian Reichelt², Markus Schmid², Thomas Maier²

¹Mercedes-Benz AG

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Das Human-Machine-Interface (HMI) im Pkw unterliegt einem stetigen Wandel. Als ein wesentlicher Trend kann die Zunahme von virtuellen Bedienmöglichkeiten beobachtet werden, wie beispielsweise beim Einsatz von Touchscreens. Handbetätigte Bedienelemente gelten aufgrund diverser Rückkoppelungsfunktionen als präzise und zuverlässig. Doch auch das reale HMI unterliegt diesem Wandel, insbesondere durch den steigenden Automatisierungsgrad. Neben der funktional-ergonomischen Betrachtung, ist speziell im Pkw-Innenraum die Komfortoptimierung und der Eindruck von Wertigkeit mit Blick auf die Nutzerzufriedenheit bedeutsam. Ziel dieses Beitrags ist neben der allgemeinen Darlegung des Stands der Technik und Forschung haptischer Bedienelemente die Analyse unterschiedlicher Modelle von Komfort und kundenrelevanter Wertigkeit. Darauf basierend wird ein methodischer Ansatz präsentiert, der v.a. die ergonomischen Vorteile handbetätigter Bedienelemente analysiert und somit eine nutzerzentrierte Entwicklung haptischer Bedienelemente ermöglicht. Darauf aufbauend werden Vorschläge für die konkrete Durchführung solcher Analysen aufgezeigt.

Topics: *User Centered Design*

Keywords: *Interface, passenger car, haptic, comfort, perceived quality*

Methodical approach to the analysis of haptic control elements in cars

Michael Tondera¹, Florian Reichelt², Markus Schmid², Thomas Maier²

¹Mercedes-Benz AG

²University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

The human-machine interface (HMI) in passenger cars is subject to constant change. The increase in virtual operating options such as the use of touchscreens, can be seen as a major trend. Due to their specific haptic feedback, manually operated controls have proven to be safe and precise while driving. However, the real HMI is also subject to these change constraints, especially in context of an increase in automation. In addition to the functional-ergonomic investigation, a design for comfort and perceived quality with regard to user satisfaction is especially important within the passenger car interior. The aim of this paper is to present the current state of research of haptic control elements and to analyze different models of comfort and customer-relevant value perception. Based on these considerations, a methodical approach is introduced, which analyzes the ergonomic benefits of manually operated controls and thus enables a user-centered development of haptic controls. Based on this, suggestions for the implementation of such analyses as well as concrete ideas for experimental setups are presented.

Themen: Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Produktentwicklung, Industriedesign, Entwicklungsprozess

Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern – die neue VDI 2424 - Richtlinie

Robert Watty¹, Thomas Maier², Gerhard Reichert³,
Christian Zimmermann⁴

¹Technische Hochschule Ulm

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

³Hochschule für Gestaltung Schwäbisch Gmünd

⁴Ludwig-Maximilians-Universität München

Erfolgreiche Produkte sind heute zunehmend digitaler und komplexer und müssen sich in globalen Märkten von Konkurrenzprodukten erkennbar abheben. Damit steigt die Bedeutung interdisziplinärer Zusammenarbeit zur Gewährleistung der funktionalen Aspekte erheblich, andererseits stehen Nutzer und ihre Interaktion mit dem Produkt verstärkt im Mittelpunkt der Entwicklung. Letzteres ist Kernkompetenz der Industriedesigner, die neben einem attraktiven und erkennbaren Design auch für eine gute Bedienbarkeit sorgen. Die weitgehend überarbeitete VDI-Richtlinie 2424 »Industrial Design - User-Centered Design in the Product Development Process« rückt die intensive Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren aus unterschiedlichen Bereichen mit Industriedesignern in den Mittelpunkt stellt aktuelle Methoden, Werkzeuge und Prozesse zusammenfassend bereit. Ergänzt durch zahlreiche Praxisbeispiele bekommen so alle an der Produktentwicklung Beteiligten eine Handreichung für die Zusammenarbeit. Der Artikel gibt einen Überblick über die Rahmenbedingungen für die Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Designern und beschreibt die Vorteile, Ziele, Struktur und Inhalte der jetzt neuen VDI-2424-Richtlinie.

Topics: User Centered Design

Keywords: Product development, industrial design, development process

Collaboration of engineers and industrial designers – the new VDI 2424 guideline

Robert Watty¹, Thomas Maier², Gerhard Reichert³,
Christian Zimmermann⁴

¹Ulm University of Applied Sciences

²University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

³Schwäbisch Gmünd University of Applied Sciences

⁴Ludwig-Maximilians-Universität Munich

Successful products are increasingly digital and complex today and must significantly stand out from competing products in global markets. This increases the importance of interdisciplinary cooperation to ensure functional aspects, while on the other hand users and their interaction with the product are increasingly at the centre of product development. The latter is the core competence of industrial designers, who, in addition to an attractive and recognizable design, also ensure good usability. The largely revised VDI guideline 2424 "Industrial Design - User-Centered Design in the Product Development Process" focuses on the intensive collaboration between engineers from different fields with industrial designers bringing up current methods, tools and processes. Numerous practical examples ensure that all those involved in product development receive an useful handout for cooperation. The article provides an overview of the boundary conditions for collaboration between engineers and designers and describes the benefits, objectives, structure and contents of the actual new VDI 2424 guideline.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Design-Technik-Konvergenz*

Stichworte: *Exterieur-Design, Sensorintegration, Designstrategie*

Integration von Sensoren in das Exterieur-Design automatisierter/autonomer Fahrzeuge

*Lutz Fischer, Daniel Holder, Stephan Krogmann, Thomas Maier
Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)*

Sicherheits- und Automatisierungsfunktionen im Fahrzeug erfordern heute eine Vielzahl von Sensoren. Mit ihnen werden Umgebungseinflüsse erfasst und die jeweilige Fahrfunktion geregelt. Viele dieser Sensoren müssen Anforderungen bezüglich Position und Funktionsbauraum erfüllen und beeinflussen so das Exterieur-Design. Mit zusätzlichen Funktionen aus dem Bereich des automatisierten und autonomen Fahrens wird sich die Sensoranzahl deutlich erhöhen. Im vorliegenden Beitrag wird die design-technische Integration von Sensoren in das Pkw-Exterieur-Design erstmalig methodisch und design-strategisch betrachtet. Aus dem aktuellen Stand der Sensortechnik werden Randbedingungen für die Positionierung der Sensoren abgeleitet. Im Anschluss werden Fahrzeuge und Fahrzeugkonzepte verschiedener Hersteller hinsichtlich realer Positionen untersucht. Aus der Analyse wird eine kumulierte Häufigkeitsverteilung abgeleitet, die als Grundlage für strategische Überlegungen zum Fahrzeugdesign und Gestaltungsempfehlungen mit Beispielen dient.

Topics: *Design Technology Convergence*

Keywords: *Exterior-design, sensorintegration, strategic design*

Integration of Sensors in the exterior design of automated/autonomous vehicles

*Lutz Fischer, Daniel Holder, Stephan Krogmann, Thomas Maier
University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design*

Safety and automation functions in vehicles require a large number of sensors today. They are used to detect environmental influences and control the respective driving function. Many of these sensors have to meet requirements regarding position and functional installation space, thus influencing the exterior design. With additional functions from the field of automated and autonomous driving, the number of sensors will increase significantly. In this paper, the design-technical integration of sensors into the exterior design of passenger cars is considered methodically and strategically. Boundary conditions for the positioning of the sensors are derived from the current state of sensor technology. Subsequently, vehicles and vehicle concepts of different manufacturers are examined with regard to real positions. A cumulative position distribution is derived from the analysis, which serves as a basis for strategic considerations on vehicle design and design recommendations including examples.

Themen: Design-Technik-Konvergenz

Stichworte: Produktentwicklung, Industriedesign, interdisziplinäre und cross-funktionale Zusammenarbeit, Wissensbrücken, Heterogenität

Brücken schlagen zwischen Technik und Design in der Produktentwicklung – Erkenntnisse einer Metaanalyse über Heterogenität

Alexandra Göhring^{1,2}, Werner Engeln¹

¹Hochschule Pforzheim, Institut for Human Engineering & Empathic Design (HEED)

²Technische Universität Dresden, Professur für Technisches Design

Seit vielen Jahren wird in der Produktentwicklung auf interdisziplinäre, cross-funktionale Teams gesetzt, um den Herausforderungen und der Komplexität der Produktentwicklung gerecht werden zu können. In den Fokus rückt insbesondere die Zusammenarbeit der Ingenieurwissenschaften mit dem Industriedesign, da sie gemeinsam maßgeblich die Eigenschaften technischer Produkte bestimmen und damit auch den Erfolg des Produktes im Markt.

Aufbauend auf einer qualitativen Metaanalyse zur Zusammenarbeit in fachlich und funktional heterogenen Teams zeigt dieser Beitrag, wie wichtig es in Produktentwicklungsteams ist, Brücken zwischen den Disziplinen zu bauen. Wesentliche Ergebnisse der Metaanalyse zu Konflikten, Kommunikation, Kooperation und Wissensintegration in heterogenen Teams sowie der Produktentwicklungsbezug der Metaanalyse werden dargestellt. Es wird gezeigt, dass Brücken in Form von Wissen und Kompetenzen dazu beitragen können, die Zusammenarbeit an der Schnittstelle Technik-Industriedesign zu verbessern, indem sie das gegenseitige Verständnis fördern. Ein Ausblick auf die weitere Forschung schließt den Beitrag ab.

Topics: Design Technology Convergence

Keywords: product development, industrial design, interdisciplinary and cross-functional cooperation, knowledge bridges, heterogeneity

Building bridges between engineering and industrial design in product development – findings from a meta-analysis on heterogeneity

Alexandra Göhring^{1,2}, Werner Engeln¹

¹Hochschule Pforzheim, Institut for Human Engineering & Empathic Design (HEED)

²Technical University Dresden, Chair of Industrial Design Engineering

For many years, interdisciplinary, cross-functional teams have been used in product development in order to meet the challenges and complexity of product development. The focus is particularly on the collaboration between engineering and industrial design, as they jointly determine the properties of technical products and thus also the success of the product in the market.

Building on a qualitative meta-analysis of collaboration in teams with educational and functional heterogeneity, this article shows how important it is in product development teams to build bridges between the disciplines. Essential results of the meta-analysis on conflicts, communication, cooperation and knowledge integration in heterogeneous teams as well as the product development relation of the meta-analysis are presented. It is shown that bridges in the form of shared knowledge and competencies can help improve collaboration between engineers and industrial designers by promoting mutual understanding. The article concludes with an outlook on further research.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 10.30–12.00 Uhr

Themen: *Design-Technik-Konvergenz*

Stichworte: *Visuelle Ähnlichkeitsbewertung, Betrachtungsmethode, Saliente Formmerkmale, Corporate Product Design*

Untersuchung zu Betrachtungsmethode und salienten Formmerkmalen bei visuellen Ähnlichkeitsbewertungen

Matthias Sebastian Fischer, Stefan Weißer, Thomas Maier

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

Visuelle Ähnlichkeit ist elementar wichtig für die Markenzuordnung von technischen Produkten. Dieser Beitrag untersucht dafür, ob zwei unterschiedliche Betrachtungsmethoden (simultan und sequenziell) und der Einsatz von identischen salienten (bzw. nicht-salienten) Formmerkmalen Einfluss auf den wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad bei Paarvergleichen hat. Dafür wurde eine Online-Studie (n = 134) mit dem Produktbeispiel Toaster durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der wahrgenommene Ähnlichkeitsgrad bei simultaner und sequenzieller Betrachtungsabfolge unterscheidet. Tendenziell wird bei sequenzieller Betrachtungsabfolge die Ähnlichkeit höher als bei simultaner Betrachtungsabfolge bewertet. Die Existenz von identischen salienten Formmerkmalen führt nicht zu einer höheren Ähnlichkeit im Vergleich zu identischen nicht-salienten Formmerkmalen.

Topics: *Design Technology Convergence*

Keywords: *Visual Similarity Evaluation, Viewing Method, Salient Shape Features, Corporate Product Design*

Investigation of the viewing method and salient shape features in visual similarity ratings

Matthias Sebastian Fischer, Stefan Weißer, Thomas Maier

University of Stuttgart, Institute for Engineering Design and Industrial Design

Visual similarity is elementary important for the brand allocation of technical products. This paper examines whether two different viewing methods (simultaneous and sequential) and the use of identical salient (or non-salient) shape features, have an influence on the perceived degree of similarity in pair comparisons. Therefore, an online study (n = 134) with the product example Toaster was conducted. The results show that the perceived degree of similarity differs in simultaneous and sequential viewing sequences. The similarity tends to be rated higher for sequential viewing sequences than for simultaneous viewing sequences. The existence of identical salient shape features does not lead to a higher similarity compared to identical non-salient shape features.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: Produktentwicklung, Mass Personalization, Potentiale, Product Journey, User Journey

Ermittlung von Potentialen zur Personalisierung von Produkten

Manfred Dangelmaier^{1,2}, Lesley-Ann Mathis¹, Daniel Ziegler², Anette Weisbecker^{1,2}

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Individualisierung gilt als Megatrend in postmodernen Gesellschaften. Die Märkte reagieren mit der Individualisierung von Produkten. Viele Ansätze scheitern jedoch, nachdem bereits beträchtliche Summen investiert wurden. Der Beitrag stellt deshalb eine nutzenorientierte Methode zur Ermittlung von Potentialen für die Personalisierung von Produkten vor. Sie begleitet das Produkt von der Wiege bis zur Bahre (Product Journey), um die Nutzer zu identifizieren und anschließend die Nutzer auf ihrer User Journey, um die Produkterfahrungen zu ermitteln. Aus diesen wird eine Menge von Ideen zur Personalisierung abgeleitet, die mit dem zugehörigen Nutzen das Personalisierungspotential repräsentieren. Zudem wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis für den Hersteller bzw. Provider abgeschätzt. Die Methode wurde von Einzelpersonen und Teams im Rahmen von Präsenzworkshops und Online-Veranstaltungen für Beispiele aus den Bereichen Mobilität, Bauwirtschaft und Dienstleistungen erprobt und hat sich dort bewährt. Der Lernaufwand ist gering. Der Personaleinsatz pro Analyse beträgt ca. 150 Stunden. Die Methode soll anhand konkreter Unternehmensbeispiele in der industriellen Praxis weiter evaluiert werden.

Topics: Innovation and Technology Management, User Centered Design

Keywords: Product development, Mass Personalization, Potentials, Product Journey, User Journey

Identification of Potentials for the Personalization of Products

Manfred Dangelmaier^{1,2}, Lesley-Ann Mathis¹, Daniel Ziegler², Anette Weisbecker^{1,2}

¹Institute of Human Factors and Technology Management IAT at the University of Stuttgart

²Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

Individualization is considered a megatrend in postmodern societies. The markets react with the individualization of products. However, many approaches fail after considerable sums have already been invested. Therefore, this paper presents a benefit-oriented method to identify potentials for the personalization of products. It accompanies the product from the cradle to the grave (product journey) to identify the users. It then travels with the users on their user journeys to observe the product experience. From these observations, a set of ideas for personalization is derived, which together with the associated benefits represent the personalization potential. In addition, the benefit-cost ratio for the manufacturer or service provider is estimated. The method has been tested by individuals and teams in face-to-face workshops and online events for examples from the mobility, construction and services sectors and has proven to be successful. The learning effort is low. The personnel input per analysis amounts to approx. 150 hours. The method is to be further evaluated using concrete use cases in industrial practice.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: *Innovations- und Technologiemanagement, Nutzerzentriertes Design*

Stichworte: *Corporate Coworking, Designforschung, Innovationsmanagement, Zusammenarbeit*

Corporate Coworking – ein Entwurf für die Erprobung neuer Formen der Zusammenarbeit in Industrieunternehmen

Eva Höfer¹, Jens Krzywinski²

¹*Robert Bosch GmbH*

²*Technische Universität Dresden, Professur für Technisches Design*

Unsere bisherige Arbeit unterliegt durch die im Frühjahr 2020 in Europa angekommene COVID-19-Pandemie radikalen Veränderungen. War das Arbeiten im Homeoffice bisher für viele Mitarbeitende in Unternehmen eine Möglichkeit des gezielten Rückzugs, wurde es in kürzester Zeit zur temporären Pflicht. Für Unternehmen stellt sich, insbesondere in Bezug auf Arbeitsweisen und Unternehmensstandorte, die Frage nach einem »neuen Normalzustand«. Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben macht es sich zum Ziel, Corporate Coworking als potenzielle neue Möglichkeit der Zusammenarbeit von Mitarbeitenden an Unternehmensstandorten zu erproben. Neben einem Rückblick in die Entwicklung von Coworking steht der Entwurf eines internen Corporate Coworking-Ökosystems im Fokus. Es wird beschrieben, welchen Einfluss die COVID-19-Pandemie auf das Forschungsvorhaben hat und wie Anpassungen umgesetzt wurden. Abschließend folgt eine Darstellung erster Nutzungszahlen und ein Ausblick auf nächste Schritte des Vorhabens. Langfristig soll das hier vorgestellte Forschungsvorhaben Unternehmen dabei unterstützen, ihr nutzerzentriertes Arbeitsökosystem der Zukunft mit den eigenen Mitarbeitenden selbst zu gestalten.

Topics: *Innovation and Technology Management, User Centered Design*

Keywords: *Corporate Coworking, Design Research, Innovation Management, Collaboration*

Corporate Coworking – a concept to explore new ways of collaboration in industrial companies

Eva Höfer¹, Jens Krzywinski²

¹*Robert Bosch GmbH*

²*Technical University Dresden, Chair of Industrial Design Engineering*

The COVID-19-Pandemic, which started in spring 2020 in Europe, changed the way we work radically. While working from home used to be a possibility of focused retreat for employees, it quickly became a temporary obligation. For companies, the question of a "new normal state" arises especially with regard to working methods and company locations. The presented research approach aims to explore corporate coworking as a potential new way of collaboration at companies. Besides a review of the development of coworking, the focus is on the design of a corporate coworking ecosystem. It will be described how the COVID-19 pandemic affects the research approach and how adaptations have been implemented. Finally, a presentation of first usage results and an outlook on next steps in the project follows. In long-term, the research project can help companies to design their company-specific user-centered workecosystem for the future with their own employees.

Themen: Innovations- und Technologiemanagement, Nutzerzentriertes Design

Stichworte: MatchUT, Virtuelle kontextuelle Fokusgruppen, UX-Potenzial von Technologien, Bedürfnisbasierte UX-Entwicklung, Potenzialbewertung von Technologien

Topics: Innovation and Technology Management, User Centered Design

Keywords: MatchUT, Virtual contextual focus groups, UX potential of technologies, Need-based UX development, potential assessment of technologies

MatchUT: Matching bedürfnisbasierter Nutzeranforderungen und Bewertung neuer Technologien aus Nutzersicht für einen UX-Fokus bei der Produktentwicklung

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Frederik Diederichs³

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT

²AUDI AG Ingolstadt

³Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Durch die zunehmende Automatisierung von Fahrfunktionen steigt die Bedeutung positiver User Experience (UX) im Fahrzeuginterieur. Hierzu wird das MatchUT-Modell von Rittger und Schrader (im Druck) vorgestellt, welches bedürfnisbasierte User-Anforderungen mit Technologie-Impacts matcht, um positive UX zu generieren. Der Beitrag untersucht die Erweiterung der bisherigen Methodik um den Ansatz »virtuelle kontextuelle Interviews und Fokusgruppen«, welcher eine pandemiesichere Alternative zur Anforderungserhebung darstellt und die Erhebung im typischen Nutzungskontext erlaubt. Zudem prüft der Beitrag eine erweiterte Auswahl von psychologischen Bedürfnissen (Fronemann und Peissner, 2014), um hedonische Anforderungen für mögliche zukünftige Aktivitäten im Fahrzeuginterieur zu erheben. Die Methodik wird anhand der Use Cases »Gaming« und »Esports (zusammen schauen« angewandt. Die erfolgreiche Durchführung (jeweils über 115 Anforderungen) sowie eine hohe Zufriedenheit der Teilnehmenden in der Nachbefragung deuten auf die Verwendbarkeit der Methodik hin. Im Ausblick wird ein Ansatz für die Erhebung und UX-Bewertung von Technologie-Impacts vorgestellt.

MatchUT: Matching Need-Based User Requirements and Technology Impacts to Create UX

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Frederik Diederichs³

¹Institute of Human Factors and Technology Management IAT at the University of Stuttgart

²AUDI AG Ingolstadt

³Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

As the automation of driving functions increases, positive user experience (UX) in vehicle interiors becomes more and more. Hence, the MatchUT model of Rittger and Schrader (in print) is presented, which matches need-based user requirements with technology impacts to generate positive UX. The paper examines the extension of the existing methodology by the approach "virtual contextual interviews and focus groups", which represents a pandemic-proof alternative to elicit requirements in a typical usage context. In addition, the paper examines an extended selection of psychological needs (Fronemann and Peissner, 2014) to collect hedonic requirements for possible future activities in vehicle interiors. The methodology is applied for the use cases "Gaming" and "Watching esports (together)". The successful implementation (over 115 requirements per use case) and a high satisfaction of the participants in the post-study survey indicate that the method is feasible for MatchUT. In the outlook section, an approach for the collection and UX-evaluation of technology impacts is presented.

DONNERSTAG, 20.5.2021, 14.45–16.15 Uhr

Themen: Nutzerzentriertes Design, Adaptive Bedienung für automatisiertes Fahren

Stichworte: Nudging, HMI, hoch-automatisiertes Fahren, Transition, Stress

Wie 'nudged' man einen gestressten Fahrer, die Kontrolle an die Automatisierung abzugeben?

Verena Lisa Kaschub¹, Simon Albrecht², Frederik Diederichs²

¹Universität Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Automatisiertes Fahren wird in der Zukunft ein sichereres Fahren ermöglichen. Wenn eine Level 4 Automatisierung verfügbar ist, ist es empfehlenswert in dieses zu wechseln, insbesondere für gestresste oder schläfrige Fahrer. Dennoch muss die Wahlfreiheit erhalten bleiben. Nudging-Elemente können Fahrer zu bestimmten Optionen bewegen/lenken. Für einen sicheren und freiwilligen Übergang zum automatisierten Fahren wurden Nudging-Prinzipien für eine ganzheitliche HMI-Strategie verwendet, die iterativ im 3x12 subject-design in einem Fahrsimulator entwickelt wurden. Stress und Schläfrigkeit wurden als realistische Umgebung für das Nudging HMI induziert. Die iterative Entwicklung führte zu einer HMI-Strategie mit Nudging-Elementen und kohärenten multimodalen HMI-Elementen, die sich aus Ambient-light, Sitzvibrationen, Sounds und Fahrerzustand-Icons zusammensetzen. Die Studie stellt dar, wie das Potenzial der Nudging-Theorie genutzt werden kann, um die Wahrscheinlichkeit der Nutzung automatisierten Fahrens zu erhöhen.

Topics: User Centered Design, Adaptive Operation for Automated Driving

Keywords: Nudging, HMI, highly automated driving, transition, stress

How to nudge a stressed driver to use automation?

Verena Lisa Kaschub¹, Simon Albrecht², Frederik Diederichs²

¹University of Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME)

²Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO

Automated driving will offer safer driving. If level 4 automation is available, it will be recommendable to use it, especially for stressed or sleepy drivers. Still, the freedom of choice needs to be preserved, so it is likely that the use will depend on the driver's choice. Nudging elements can push/direct drivers towards specific options/outcomes. For a safe and voluntary transition into automated driving we used nudging principles for a holistic HMI strategy that was iteratively developed with 3x12 subject design in a driving simulator. Stress and sleepiness were induced as a realistic environment for the nudging HMI. The iterative development resulted in an HMI strategy with nudging and coherent multimodal HMI elements, composed by ambient light, seat vibration, sounds and driver state icons. The paper describes in a case study how the potential of nudging theory can be used to increase the likelihood of using automated driving.

Vorträge im virtuellen Plenum

Keynotes

Digitalisierung der Produktentwicklung bei Fahrzeugantrieben (Dr.-Ing. Peter Fietkau)

Ein projektkulturbewusstes Management-Modell für interorganisationale F&E-Projekte
(Katharina Dieterich, Verena Lisa Kaschub, Peter Ohlhausen)

Track 1: Virtuelle Produktentwicklung

Session 1: Digital Engineering

Towards Customized Digital Engineering: Herausforderungen und Potentiale bei der Anpassung von Digital Engineering Methoden für den Produktentwicklungsprozess

(Benjamin Gerschütz, Christopher Sauer, Anne Wallisch, Jan Mehlstäubl, Andreas Kormann, Benjamin Schleich, Bettina Alber-Laukant, Kristin Paetzold, Frank Rieg, Sandro Wartzack)

Modellbasierte Validierung der Prüfstandsdynamik zur Erprobung von Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge mithilfe eines digitalen Zwillings
(Lukas Bauer, Manuel Bauer, Markus Kley)

Automatische Erstellung von Drahtgittermodellen aus Topologieoptimierungen
(Christian Gomes Alves, Tjark Siefkes)

3D-Skizzen in Virtual Reality zur Unterstützung der frühen Phasen der Produktentwicklung
(Carsten Seybold, Frank Mantwill)

Session 2: Digital Engineering & Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering

Digitaler Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung in der Produktion – Physikbasierte Modellierung und Simulation zur Optimierung datengetriebener Modelle
(Andreas Werner, Joachim Lentjes, Nikolas Zimmermann)

Spezifikationen einer Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte (Patrik Müller, Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer)

Durchgängige Systemmodellierung - Integration von Zielen in technische Systemmodelle im Kontext des Anforderungsmanagements
(Dennis Horber, Fabian Wilking, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack)

Die Rolle von MBSE für die nachhaltige Forschung und Entwicklung
(Michaela Kesselring, Jonathan Masior, Oliver Riedel)

Session 3: Advanced Systems Engineering / Model-Based Systems Engineering

Referenzarchitektur für Smart Services
(Arthur Wegel, Philipp Sahrhage, Fabio Worthmann, Martin Rabe, Roman Dumitrescu)

Vorgehen zur systematischen Verknüpfung von Produktanforderungen und Systemarchitektur unter Berücksichtigung der PGE (Moritz Wäschle, Marcel Timucin, Aline Radimersky, Constantin Mandel, Joshua Fahl, Tobias Hirscher)

Integration von Produktportfolios in die funktionsorientierte modellbasierte Systementwicklung
(Christian Wyrwich, Georg Jacobs, Kathrin Spütz, Thilo Zerwas, Christian Konrad)

Integration von Mission Profiles in die modellbasierte Systementwicklung zur Förderung der Kollaboration in automobilen Wertschöpfungsnetzen
(Damun Mollahassani, Sven Forte, Jens C. Göbel)

Track 2: Methoden und Prozesse der Produktentwicklung

Session 1: Konstruktionsmethodiken

Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen am Beispiel der Sportwagenentwicklung (Joshua Fahl, Tobias Hirschter, Albert Albers)

Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für mechanische Bauteile (Kevin Herrmann, Tim Brockmöller, Paul Gembarski, Iryna Mozgova, Roland Lachmayer)

Konzept eines Konstruktionskatalogs für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen (Enno Garrelts, Daniel Roth, Hansgeorg Binz)

Bauteiltrennung zur Reduzierung der Prozesszeit und -kosten in der Additiven Fertigung (Jannik Reichwein, Kay-Eric Steffan, Eckhard Kirchner)

Session 2: Leichtbau in der Produktentwicklung

Eine Methodik zur Identifizierung der leichtbaugetriebenen Massenpotenziale für die frühe Konzeptphase (Felix Laufer, Daniel Roth, Hansgeorg Binz)

Performancesteigerung von Faserverbundstrukturen in Schienenfahrzeugen (Robert Winkler-Höhn, Lars Trampe, Kay-Uwe Kohlshorn, Peer Heß, Jörg Bünker, Friedrich von Dungern, Stefan Lindner)

Überwindung der Herausforderungen beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich (Patrick Hommel, Daniel Roth, Hansgeorg Binz)

Session 3: Agile Produktentwicklung & Wissensmanagement in der Produktentwicklung

Entwicklung einer situativen Entwicklungsmethodik – ein hybrider Ansatz zur agilen Transformation im Technischen Design (Florian Reichelt, Daniel Holder, Thomas Maier)

Erschließung der Potentiale des Requirements Engineerings auf mobilen Endgeräten (Kris Rudolph, Jannik Reichwein, Eckhard Kirchner, Jörg Stahlmann, Christian Donges)

Unterstützung bei der interdisziplinären Zusammenarbeit – Personenneutrale Wissenslandkarten (Michael P. Voigt, Sinan Idrizi, Daniel Roth, Hansgeorg Binz)

Zielextrapolation bei Zielunsicherheit in der Produktentwicklung (Lukas Block, Hansgeorg Binz, Daniel Roth)

Track 3: Technologiemanagement und Zuverlässigkeitstechnik

Session 1: Innovations- und Technologiemanagement

Go-To-Market Canvas – Ein Marktzugangskonzept für Inventionen in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

(Manuel Niever, Felix Schulz, Jonas Heimicke, Carsten H. Hahn, Albert Albers)

Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle im Business-to-Business

(Fabio Wortmann, Sina Kämmerling, Kai Ellermann, Arno Kühn, Christoph Plass, Roman Dumitrescu)

Gefährdungsanalyse zum Einsatz optischer Verfahren in der Produktpiraterie

(Franziska Kern, Lukas Schlamp, Thomas Maier)

Nutzergetriebene Fahrzeugkonzepte: Ein neuartiger Ansatz zur Identifikation von Produktanforderungen (Maximilian Werner, Sebastian Stegmüller)

Session 2: Zuverlässige Produktentwicklung

Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven für eine belastungsgerechte Produktauslegung (Kevin Lucan, Bernd Bertsche)

Schadpartikelverträglichkeitstests zur Reduzierung von Frühausfällen bei elektronischen Komponenten (Patrick Brag, Markus Rochowicz)

Konzept für ein selbstlernendes Assistenzsystem zur Mensch-Computer- Interaktion in der Produktentwicklung (Matthias Müller, Prof. Dr. Bogdan Franczyk)

Session 3: Zuverlässige Produktentwicklung

Wirkungsgraduntersuchungen am Antriebsstrang von Multifunktionsfahrzeugen unter Berücksichtigung von empirisch ermittelten Lastkollektiven (Leon Stütz, Patrick Beck, Markus Kley)

Modellierung des Mensch-Maschine-Systems für Systemzuverlässigkeitstests: Ermittlung des Anwendereinflusses auf die Belastung der Maschine

(Thomas Gwosch, Matthias Dörr, Sven Matthiesen)

Methode zur zuverlässigen, sicheren und nachhaltigen Auslegung adaptiver Tragwerke

(Andreas Ostertag, Martin Dazer, Bernd Bertsche)

Track 4: DES=ING & Technologiemanagement

Session 1: Nutzerzentriertes Design

Untersuchung zur nutzerzentrierten Feedbackgestaltung im Raum anhand virtueller Bedienelemente (Peter Schmid, Philipp Junger, Thomas Maier)

Menschorientiertes Design: Ein Vergleich der Einstiegsbewegung für zwei Fahrzeugkonzepte anhand eines muskuloskelettalen, digitalen Menschmodells (Johannes R. Walter, Patrick Lerge, Syn Schmitt)

Methodischer Ansatz zur Analyse haptischer Bedienelemente im Kraftfahrzeug (Michael Tondera, Florian Reichelt, Markus Schmid, Thomas Maier)

Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern – die neue VDI 2424 - Richtlinie (Robert Watty, Thomas Maier, Gerhard Reichert, Christian Zimmermann)

Session 2: Design-Technik-Konvergenz

Integration von Sensoren in das Exterieur-Design automatisierter/autonomer Fahrzeuge (Lutz Fischer, Daniel Holder, Stephan Krogmann, Thomas Maier)

Brücken schlagen zwischen Technik und Design in der Produktentwicklung – Erkenntnisse einer Metaanalyse über Heterogenität (Alexandra Göhring, Werner Engeln)

Untersuchung zu Betrachtungsmethode und salienten Formmerkmalen bei visuellen Ähnlichkeitsbewertungen (Matthias Sebastian Fischer, Stefan Weißer, Thomas Maier)

Session 3: Innovations- und Technologiemanagement

Ermittlung von Potentialen zur Personalisierung von Produkten (Manfred Dangelmaier, Lesley-Ann Mathis, Daniel Ziegler, Anette Weisbecker)

Corporate Coworking – ein Entwurf für die Erprobung neuer Formen der Zusammenarbeit in Industrieunternehmen (Eva Höfer, Jens Krzywinski)

MatchUT: Matching bedürfnisbasierter Nutzeranforderungen und Bewertung neuer Technologien aus Nutzersicht für einen UX-Fokus bei der Produktentwicklung (Valeria Bopp-Bertenbreiter, Lena Rittger, Frederik Diederichs)

Wie 'nudged' man einen gestressten Fahrer, die Kontrolle an die Automatisierung abzugeben? (Verena Lisa Kaschub, Simon Albrecht, Frederik Diederichs)



PORSCHE

Digitalisierung der Produktentwicklung bei Fahrzeugantrieben

Dr.-Ing. Peter Fietkau





01

02

03

Einleitung

Wandel in der Fahrzeugindustrie

Bisherige Produktentwicklung

Digitalisierung in drei Stufen

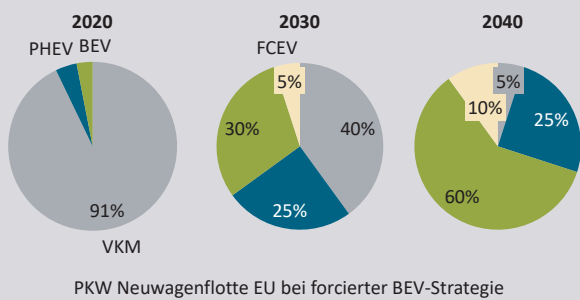
1. Virtuelle Mechanikentwicklung und virtuelle Softwareapplikation
2. Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten
3. Gesamtheitliche Absicherung

Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

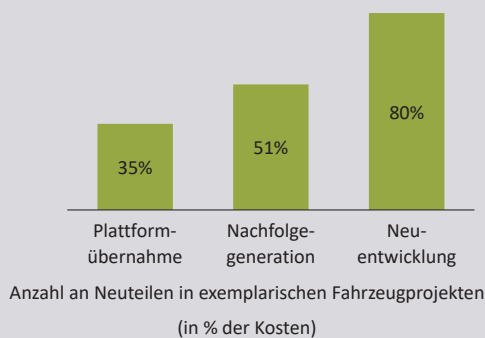
Die Fahrzeugindustrie befindet sich in starkem Wandel

Wandelnde Technologien und hohe Variantenvielfalt



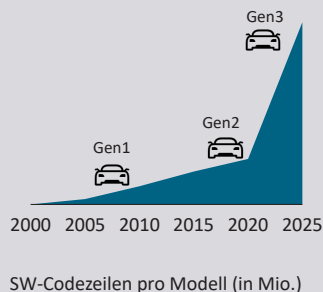
Quelle: Deutsche Energie-Agentur: E-Fuels Study - The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU

Neue Antriebsarten mit hohem Neuentwicklungsanteil

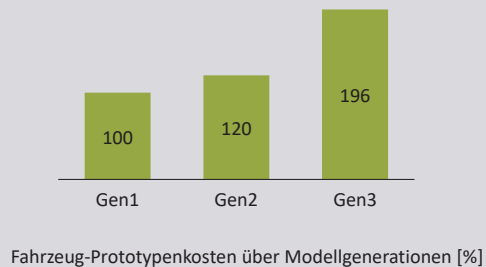


Die Fahrzeugindustrie befindet sich in starkem Wandel

Komplexe Systeme mit stark steigendem Softwareanteil

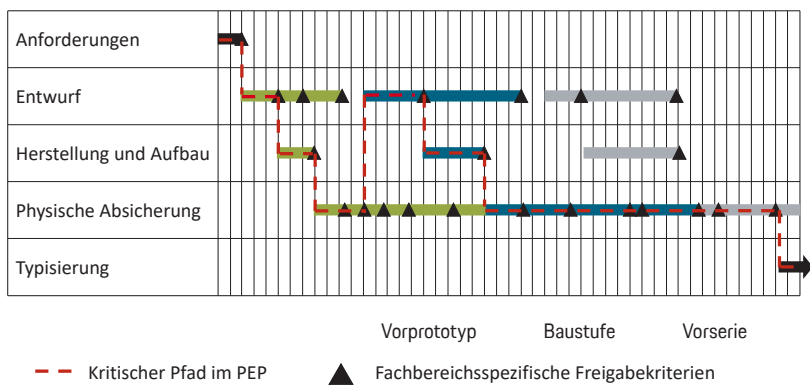


Stark steigende Prototypenkosten



Bisherige Produktentwicklung

Produktentwicklungsprozess (PEP) Antrieb (schematisch)

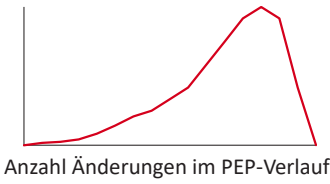


Fazit

- Hohe Abhängigkeit von Hardware
- Keine durchgängige Systemsicht
- Digitale Absicherung wird überwiegend als Dienstleister gesehen
- Keine vollständige Vernetzung zwischen physischen und digitalen Absicherungsteams

Bisherige Produktentwicklung

Kenngößen



Motivation zur Veränderung

- Hoher Änderungsanteil in späten Entwicklungsphasen
- Später Ressourceneinsatz ineffektiv und bindet Kapazitäten, die nicht für nächstes Projekt zur Verfügung stehen
- Gestiegene Möglichkeiten der virtuellen Entwicklung
- Sinkende Rechenzeiten und -kosten

Optimierung Entwicklungsprozess

- Forcierung der virtuellen Entwicklung
- Frühere Validierung
- Stärkung des Systemgedankens



01 Einleitung

Wandel in der Fahrzeugindustrie

02 Digitalisierung in drei Stufen

1. Virtuelle Mechanikentwicklung und virtuelle Softwareapplikation

03 Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

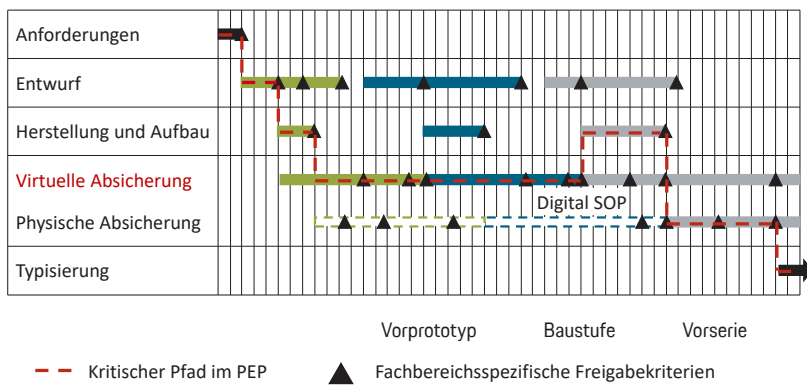
Bisherige Produktentwicklung

2. Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten

3. Gesamtheitliche Absicherung

Virtuelle Mechanikentwicklung und Softwareapplikation

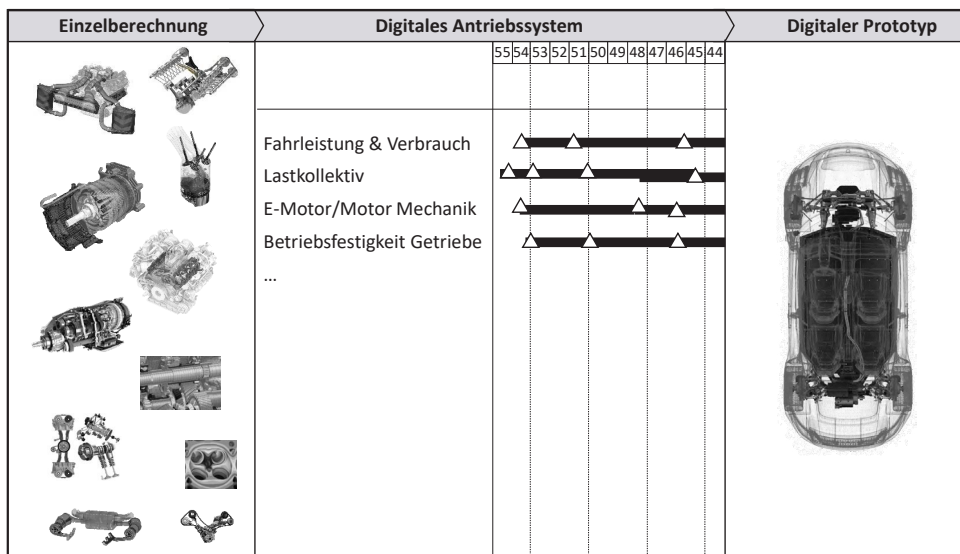
Produktentwicklungsprozess (PEP) Antrieb (schematisch)



Kernelemente

- Virtuelle Absicherung als eigenständiger Prozess
- Eigene Meilensteine und Freigabekriterien
- Digitaler Hauptpfad bis Vorserie
- Ausbau früher Validierungen
- Deutliche Reduktion von Prototypen in früher Phase

Virtuelle Mechanikentwicklung



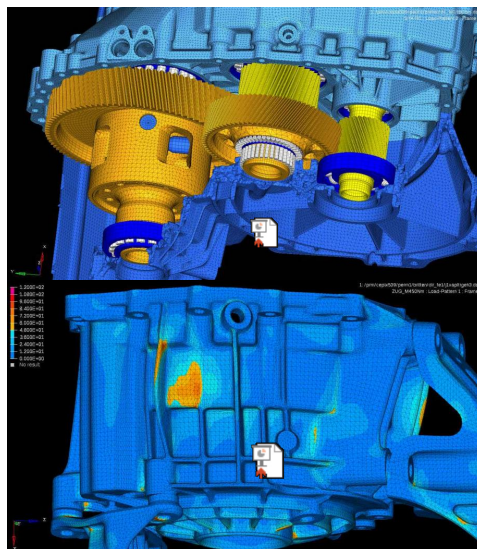
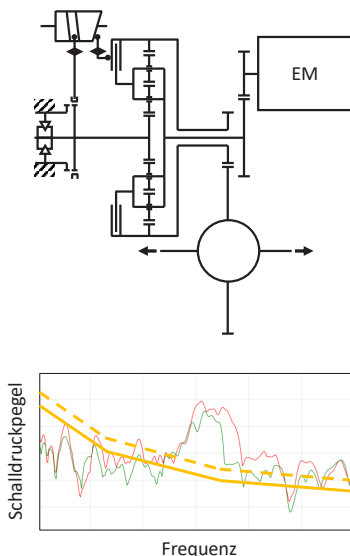
Kernelemente

- Aktive Ausplanung für den ganzen PEP
- Def. Meilensteine für Datenbereitstellung
- Definierter Modelreifegrad und Freigabekriterien

Anwendungsbeispiel virtuelle Mechanikentwicklung: BEV Getriebe

Digitales Abbild des Taycan HAG

- Aufbau eines FE-Systemmodells
- Bewegungssimulation
- Verzahnungs-, Lager- und Gehäuseoptimierung
- Einbindung Noise Transfer Functions zu Innenraum
- Freigabe Lebensdauer und Akustik



Virtuelle Softwareapplikation

Komponentenmodelle	Systemmodelle	Fzg. Modellverbund
<p>Funktionsmodelle</p>	<p>Systemmodelle</p> <p>55 54 53 52 51 50 49 48 47 46 45 44</p>	<p>Fzg. Modellverbund</p>
<p>Aktormodelle</p>	<p>Applikationsaufgaben</p> <p>Grundapplikation VKM</p> <p>Emissionen VKM</p> <p>OBD VKM</p> <p>Grundapplikation EM & PWR</p> <p>...</p>	
<p>Sensormodelle</p>		
<p>Streckenmodelle</p>		

Kernelemente

- Bereitstellung von MiL-, SiL- und HiL-Systemmodellen über den PEP
- Fahrzeug-Modellverbund für Aussagen zum Gesamtfahrzeug

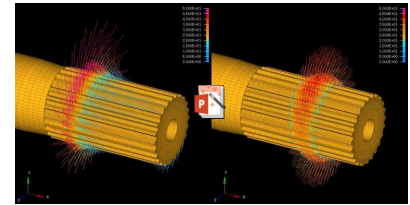
Kontinuierliche Weiterentwicklung über Produktgenerationen

Methoden und Prozesse

- Lessons Learned Prozess
- Generationenübergreifende Berechnungsmodelle
- Nutzung der Vorgängergeneration als technische Referenz
- Automatisierte Gestaltung z.B. in Form von Topologieoptimierung von Strukturbauteilen
- Automatische Bedatungsanpassung bei Software
- Vergleich einer hohen Anzahl an Varianten möglich

Beispiel

- Brummen Motor-Getriebe Verbund



- Systematische Variation von Lagerkonzept, Makrogeometrie/ Breitenballigkeit und Gehäusetoleranz
- Reduktion Anregung Nachfolgenergeneration um ca. 10 dB

Herausforderungen virtuelle Mechanikentwicklung und Softwareapplikation



Umsetzungsgrad

Methodisch

- Systematisierung der Möglichkeiten der virtuellen Verfahren
- Risikomanagement: Ausweisen von „blinden Flecken“ der virtuellen Verfahren
- Ausbau der virtuellen Verfahren von reinen Validierungsmethoden zu Entwicklungsmethoden



Prozessual

- Geändertes Rollenverständnis der Berechnungsingenieure
- Nur konsistente und sinnvolle Subsysteme und Systeme für virtuelle Absicherung



01

02

03

Einleitung

Wandel in der Fahrzeugindustrie

Bisherige Produktentwicklung

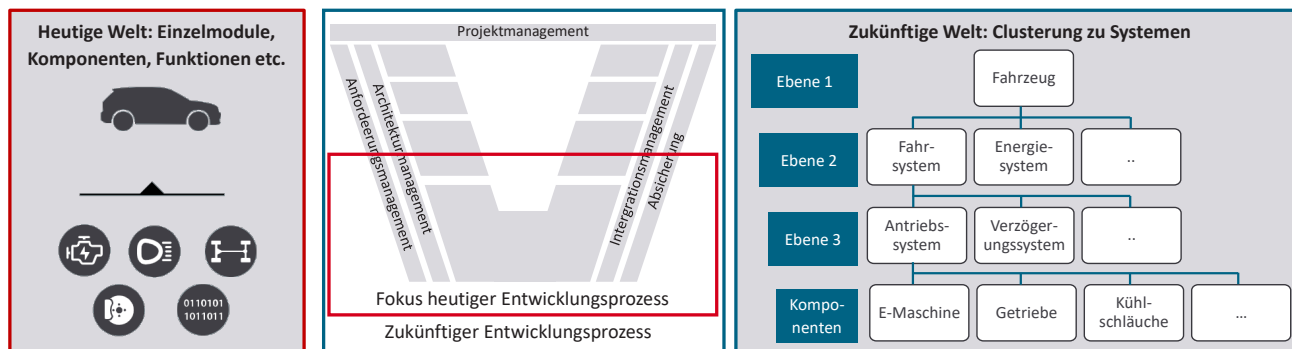
Digitalisierung in drei Stufen

1. Virtuelle Mechanikentwicklung und virtuelle Softwareapplikation
2. **Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten**
3. Gesamtheitliche Absicherung

Fazit

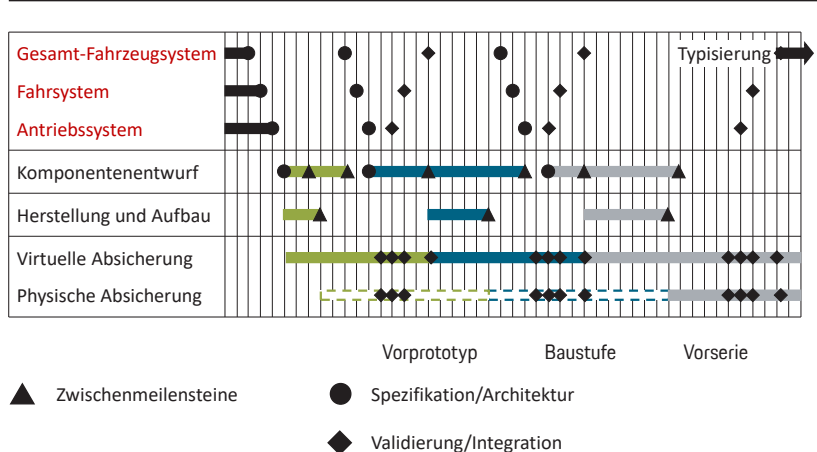
Zusammenfassung und Ausblick

Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten



Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten

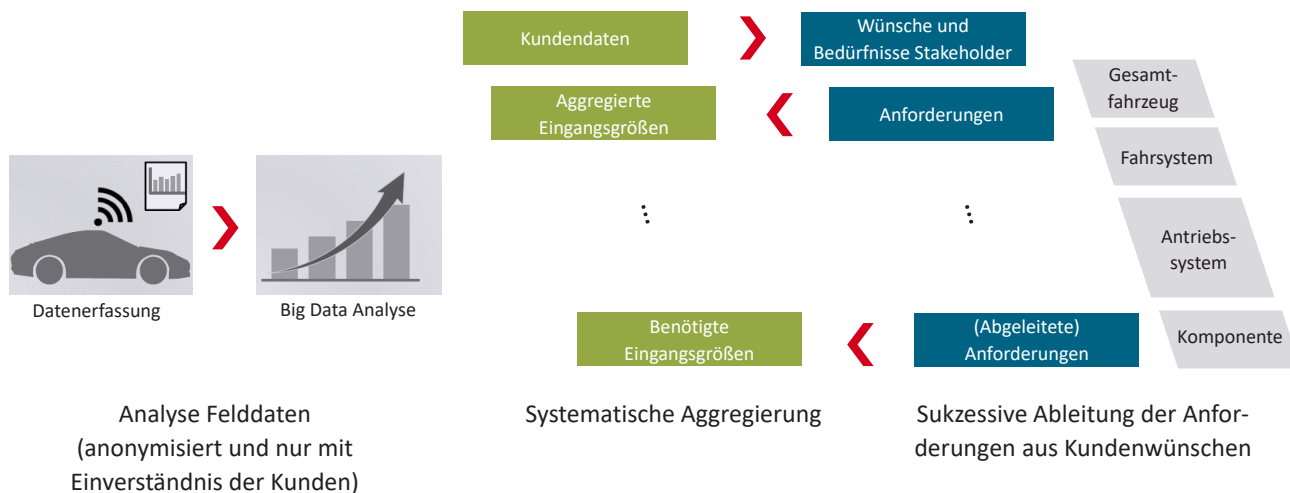
Produktentwicklungsprozess (PEP) Antrieb (schematisch)



Kernelemente

- Strukturierung des PEP in Systemen und Funktionen
- Alle Spezifikationen sind auf Stakeholder-Anforderungen der obersten Ebene zurückzuführen
- Quantifizierung der Anforderungen durch Kundendaten

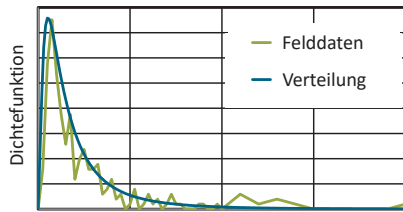
Einbindung von Kundendaten



Anwendungsbeispiel Einbindung von Kundendaten: BEV Getriebe

Erfassung Getriebebelastung im Feld

- Bestimmung der Feldverteilung der Schädigungen (z.B. Max. Likelihood Schätzung einer Lognormal-Verteilung)



Relative Schädigung Grübchen Stufe 1

Komponentenschädigungen

Anforderungen

Keine Defekte am Fahrzeug

Fahrzeulebensdauer, Nutzung, Fahrleistungen Nachfolger...

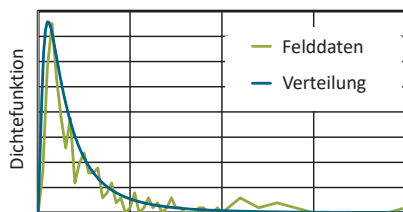
⋮

Komponenten Belastung, Lebensdauer, Temperaturen...

Anwendungsbeispiel Einbindung von Kundendaten: BEV Getriebe

Erfassung Getriebebelastung im Feld

- Bestimmung der Feldverteilung der Schädigungen (z.B. Max. Likelihood Schätzung einer Lognormal-Verteilung)

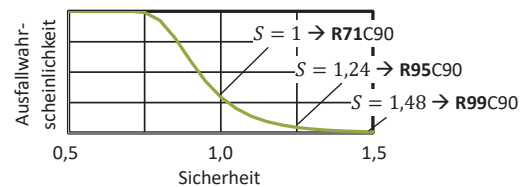


Relative Schädigung Grübchen Stufe 1

Komponentenschädigungen

Anwendung in virtueller Mechanikabsicherung

- Statistische Auslegung mit definierter Ausfall- und Ausfallwahrscheinlichkeit (z.B. R95C90)



Anwendung in physischer Mechanikabsicherung

- Statistische Absicherung einer definierten Ausfall- und Ausfallwahrscheinlichkeit (z.B. R90C90) mit vorgegebener Kundenbelastung (z.B. 95%-Kunden)

Weitere Anwendungsbeispiele Einbindung von Kundendaten

Beispiele

- Streckenverteilung (Stadt, Land, Autobahn)
- Anzahl und Dauer von Regenfahrten
- Anzahl Betätigungen Knöpfe und Schalter
- Anzahl Sondermanöver
- Anzahl an Schlaglochdurchfahrten
- ...



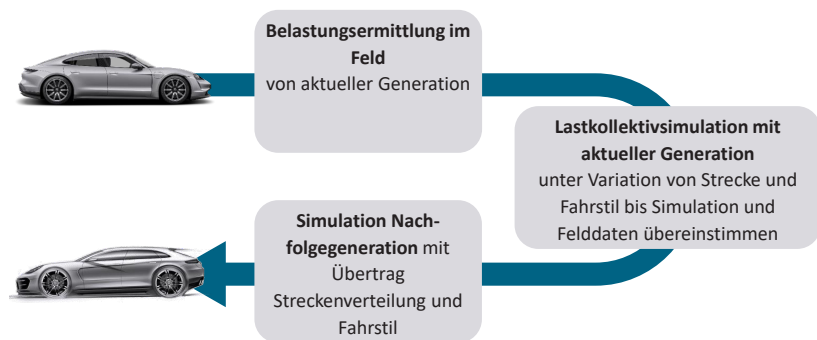
Kontinuierliche Weiterentwicklung über Produktgenerationen

Methoden und Prozesse

- Aktuelle Generation als Referenzarchitektur für Nachfolger
- Systematische Erfassung der Kundenwünsche für Nachfolgeneration aus Kundendaten

Beispiel

- Ermittlung Getriebebelastung für Nachfolgeneration



Herausforderungen Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten



Umsetzungsgrad

Methodisch

- Methodische Auswertung großer Datenmengen
- Übertrag von Kundendaten aus aktuellem Fahrzeug zu Anforderungen von Nachfolgeneration



Prozessual

- Restrukturierung des Zusammenarbeitsmodells
- Verknüpfung aller Anforderungen mit oberster Stakeholder-Ebene



01 Einleitung

Wandel in der Fahrzeugindustrie

Bisherige Produktentwicklung

02 Digitalisierung in drei Stufen

1. Virtuelle Mechanikentwicklung und virtuelle Softwareapplikation

2. Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten

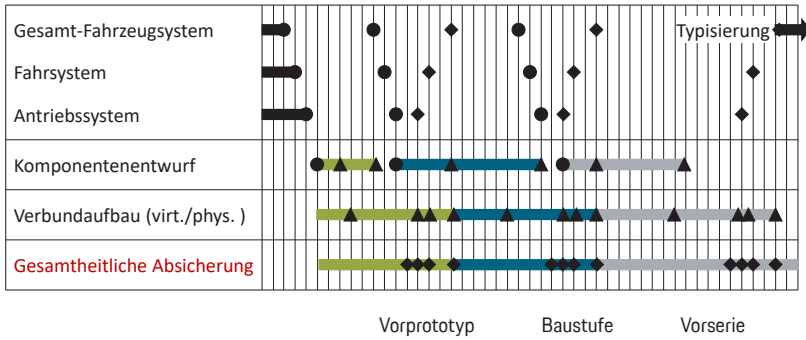
3. Gesamtheitliche Absicherung

03 Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

Gesamtheitliche Absicherung

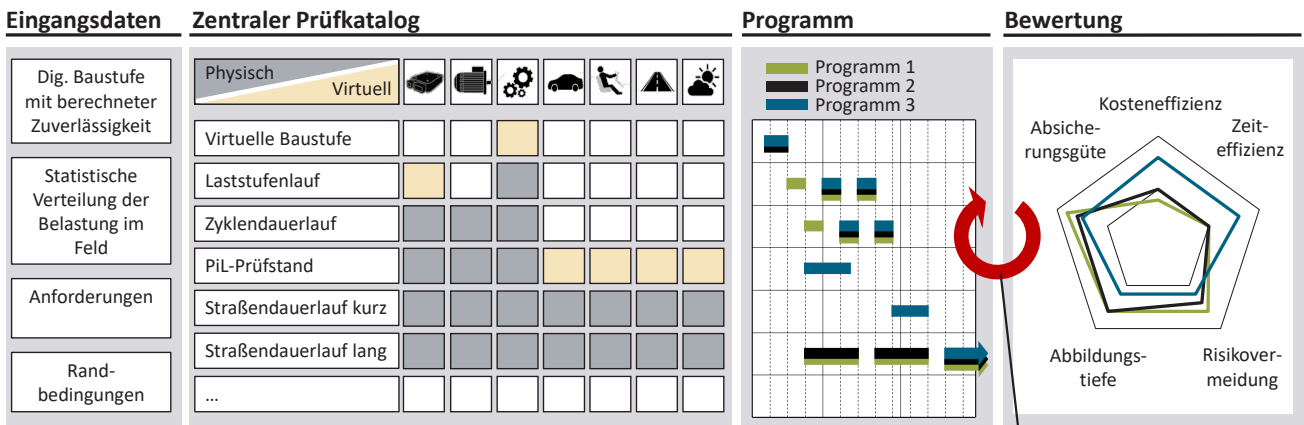
Produktentwicklungsprozess (PEP) Antrieb (schematisch)



Kernelemente

- Methodische/organisatorische Zusammenlegung virtueller und physischer Absicherung
- Budget und Freigabe in einer Hand
- Gemeinsamer Bereitstellungsplan für virtuelle und reale Erprobungsträger
- Validierungsprogramm optimiert nach gegebenen Zielkriterien

Gesamtheitliche Absicherung am Beispiel mechanische Absicherung Getriebe



Iterativer Prozess zur Zusammenstellung des optimierten Validierungsprogramms

Gesamtheitliche Absicherung am Beispiel mechanische Absicherung Getriebe

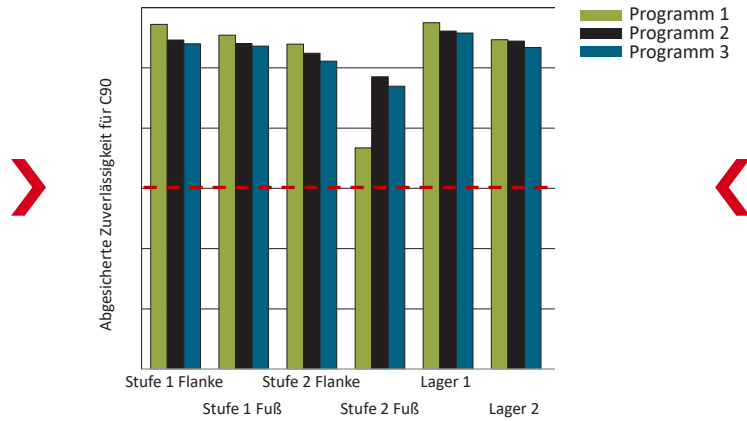
Eingangsdaten

Dig. Baustufe mit berechneter Zuverlässigkeit

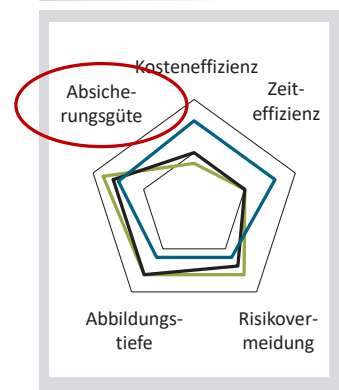
Statistische Verteilung der Belastung im Feld

Anforderungen

Randbedingungen



Bewertung



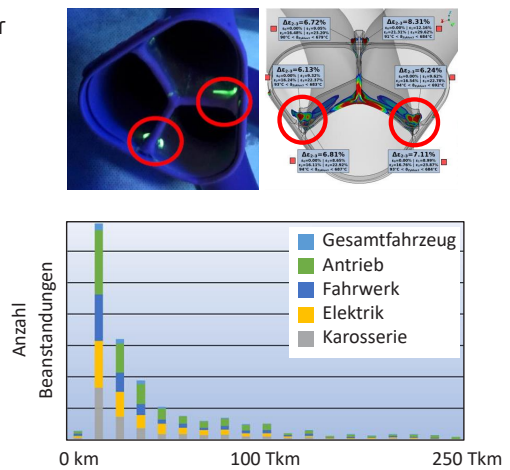
Kontinuierliche Weiterentwicklung über Produktgenerationen

Methoden und Prozesse

- Analyse abgeschlossener Validierungsprogramme
- Einbindung von Rückmeldung aus Serienbetreuung
- Kontinuierliche Überprüfung der Notwendigkeit physischer Absicherung

Beispiele

- Abgleich realer und virtueller Thermochock-Dauerlauf
- Auswertung Fehlerarten im Fahrzeug-DL



Herausforderungen gesamtheitliche Absicherung



Umsetzungsgrad

Methodisch

- Systematische Identifikation von redundanten Absicherungen
- Objektive Analyse der Validierungsprogramme
- Optimierung der Validierungsprogramme



Prozessual

- Organisatorische Zusammenlegung virtueller und physischer Absicherung
- Bereitstellung konsistenter Systeme zur Validierung auf allen Ebenen



01 Einleitung

Wandel in der Fahrzeugindustrie

Bisherige Produktentwicklung

02 Digitalisierung in drei Stufen

1. Virtuelle Mechanikentwicklung und virtuelle Softwareapplikation

2. Systemorientierung und Einbindung von Kundendaten

3. Gesamtheitliche Absicherung

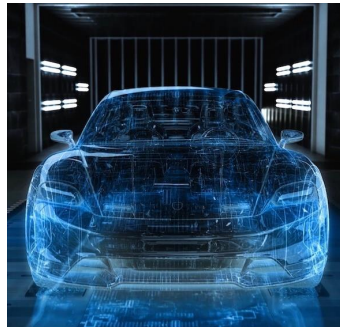
03 Fazit

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Defizite des bisherigen PEPs aufgezeigt
- Systematisch Optimierungen durch Digitalisierung erarbeitet:
 - Virtuelle Mechanikentwicklung und Softwareapplikation
 - Systemorientierung und systematische Einbindung von Kundendaten
 - Gesamtheitliche Absicherung
- Methodische und prozessuale Herausforderungen identifiziert



Ausblick

- Ausrollen der beschriebenen Ansätze auf alle Projekte
- Weiterentwicklung der Methoden und Prozesse über Produktgenerationen
- **Vision: Erstes reales Fahrzeug kann direkt zum Kunden gehen!**



Digitalisierung der Produktentwicklung bei Fahrzeugantrieben

Digitalization of Product Development for Vehicle Powertrains

Dr.-Ing. Peter Fietkau

Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Porschestraße 911, 71287 Weissach
peter.fietkau@porsche.de

Abstract (deutsch): Die Automobilindustrie befindet sich in einem großen Wandel. Es kommen neue elektrische Antriebstechnologien hinzu und die Vielfalt im Produktportfolio wird größer. Zeitgleich steigen die Elektronik- und Softwareumfänge und damit die Systemkomplexität massiv an. Dies bedingt auch stark steigende Prototypenkosten. Aus diesen Gründen sind Optimierungen am bisher üblichen Produktentstehungsprozess (PEP) von Fahrzeugantrieben sinnvoll. Eine große Möglichkeit bietet dabei die Digitalisierung von Entwicklungstätigkeiten.

Zunächst werden die virtuelle Mechanikentwicklung und die virtuelle Softwareapplikation in ihrer Bedeutung gestärkt und intensiviert. Eigene Meilensteine und Freigabekriterien ermöglichen eine frühe Validierung und eine Reduktion von Prototypen. In der zweiten Stufe wird der PEP mit Hilfe des Systems Engineering neu strukturiert und alle Anforderungen von der Kundenebene abgeleitet. Hierdurch besteht das Potential, Felddaten gezielt zur Auslegung und Validierung auf allen Systemebenen zu nutzen. Eine logische dritte Stufe der Digitalisierung könnte die methodische und organisatorische Zusammenlegung virtueller und physischer Absicherung sein. Somit wäre es möglich, ein gemeinsames Validierungsprogramm zu erstellen und nach gegebenen Zielkriterien zu optimieren.

Zu allen Stufen der Digitalisierung werden Anwendungsbeispiele aus der Praxis vorgestellt und die kontinuierliche Weiterentwicklung über die Produktgenerationen aufgezeigt. Ebenso werden aktuelle Herausforderungen sowohl methodischer als auch prozessualer Natur skizziert.

Keywords (deutsch):

Digitalisierung, Produktentstehungsprozess, Fahrzeugantriebe, digitaler Prototyp, virtuelle Entwicklung, Systems Engineering, gesamtheitliche Absicherung

Abstract (english): The automotive industry is in a state of great change. New electric drive technologies are introduced and the variety in the product portfolio is growing. At the same time, the scope of electronics and software, and thus the system complexity, are increasing massively. This also means that prototype costs will rise sharply. For these reasons, it makes sense to optimize the product development process (PDP) of vehicle drives that has been common up to now. The digitization of development activities offers a great opportunity.

First, the significance of the virtual mechanical development and the virtual software calibration is increased. Own milestones and approval criteria enable early validation and a reduction of prototypes. In the second stage, the PDP is restructured with the help of systems engineering and all requirements are derived from the customer level. This has the potential to use field data specifically for design and validation on all system levels. A logical third stage of digitization could be the methodical and organizational merging of virtual and physical validation. Thus it would be possible to create a common validation program and to optimize it according to given target criteria.

Application examples from practice are presented for all stages of digitization and the continuous further development over the product generations is shown. Current challenges of both a methodological and a procedural nature are outlined.

Keywords (english):

Digitization, product development process, vehicle powertrains, digital prototyp, virtual development, systems engineering, holistic validation

Ein projektkulturbewusstes Management-Modell für interorganisationale F&E-Projekte

A project-culture-aware management model for interorganizational R&D-projects

Katharina Dieterich¹, Verena Lisa Kaschub¹, Peter Ohlhausen²

¹Universität Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME), Stuttgart
katharina.dieterich@gsame.uni-stuttgart.de

verena.kaschub@gsame.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart und Hochschule Reutlingen, Reutlingen

peter.ohlhausen@iao.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Die zunehmende Technologie- und Produktkomplexität führen dazu, dass sich immer mehr Unternehmen für ihre F&E mit externen Organisationen vernetzen. So entstehen interorganisationale F&E-Projekte, welche temporäre Organisationen darstellen. Forschungsfragen zu diesen Projekten sind u. a. hinsichtlich der Praktiken und Verhaltensregeln offen. Über ein kulturbewusstes Projektmanagement können kooperations- und innovationsförderliche Praktiken und Verhaltensregeln aufgebaut werden, die für diese F&E-Projekte essenziell sind. So ist die Forschungsfrage dieses Beitrags, wie ein projektkulturbewusstes Management interorganisationaler F&E-Projekte erfolgen kann. Dafür wird auf Basis der theoretischen Grundlagen zum F&E-Projektmanagement, zu menschlichen Handlungssystemen und Ebenen der Zusammenarbeit, zu Kultur und Verhalten ein projektkulturbewusstes Management-Modell entwickelt. Das Modell umfasst zwei Teile. Im ersten Teil wird der Bereich aufgezeigt, in welchem sich die Projektkultur entwickelt. Im zweiten Teil wird aufgezeigt, wie die Faktoren für ein wahrscheinlich kooperatives und innovatives Verhalten innerhalb dieses Bereiches gestaltet werden sollten.

Keywords (deutsch):

Interorganisationale Projekte, Projektkultur, Kooperation in Netzwerken, Forschung und Entwicklung

Abstract (english): Due to the increasing technology and product complexity more and more companies cooperate for their R&D activities with external organizations. This leads to interorganizational R&D-projects representing temporary organizations. Research questions on these projects are amongst others open concerning the practices and rules of conduct. With a culture-aware project management, practices and rules of conduct which are beneficial for cooperation as well as for innovation can be build. These are essential for interorganizational R&D-projects. Thus, the research question is how interorganizational R&D-projects can project-culture-aware be managed. To answer this question, an overview of the theoretical background about R&D-project management, human action systems and levels of collaboration, as well as about culture and behavior is given. Based on this theoretical background the project-culture-aware management model is developed. This model has two parts. At the first part, the area is shown in which the project culture results. The second part shows how the factors for a probably cooperative and innovative behavior can be designed within this area.

Keywords (english):

Interorganizational projects, project culture, collaboration in networks, research and development

1 Ausgangssituation und Forschungsfrage

Komplexität, Umweltdynamik und Unsicherheit prägen den Kontext vieler Unternehmen (Spath 2017). Vor allem die hohe Technologie- und Produktkomplexität führen dazu, dass der Innovationsprozess nicht mehr allein zu bearbeiten ist (Bullinger und Warschat 2007). So beziehen immer mehr Unternehmen externe Partner in ihre Forschung und Entwicklung (F&E) mit ein (Fraunhofer-Verbund Innovationsforschung 2018). Zur Lösung komplexer Probleme vernetzen sich Unternehmen mit externen, komplementären Organisationen (Bagherzadeh et al. 2019). So entstehen zunehmend interorganisationale F&E-Projekte, die über die Organisationsgrenzen hinweg eine temporäre Organisation darstellen (Sydow und Braun 2018). In einer Meta-Analyse zeigen vom Brocke und Lippe (2015) auf, dass bisherige Forschung zu kollaborativen Projekten sich hauptsächlich auf die zugrundeliegenden Managementaufgaben und Prozesse sowie auf Richtlinien, Tools und Techniken fokussiert. Um Netzwerkpotenziale zu entfalten, sind jedoch der Aufbau netzwerkeigener Kooperationspraktiken und Verhaltensregeln notwendig (Thoma 2018). In interorganisationalen Projekten sind aber vor allem Forschungsfragen zu Praktiken, Routinen, Governance und dem Verhalten offen (Sydow und Braun 2018). So stellt die Entwicklung konkreter Formen der Zusammenarbeit in Projekten/Netzwerken eine Herausforderung dar (Achleitner et al. 2019).

Interorganisationale Projekte haben aufgrund der für Netzwerke charakteristischen Abkehr der Markt- bzw. Hierarchielogik eine hohe Komplexität (Thoma 2018). Denn die Koordination interorganisationaler Projekte erfolgt durch Kooperation, Vertrauen oder Reziprozität (Sydow und Braun 2018; Powell 1990). Nach der Norm der Reziprozität sollten Menschen diejenigen unterstützen, die sie unterstützt haben (Gouldner 1960). Thoma (2018) zeigt auf, dass Reziprozität im weiteren Verlauf der Netzwerkforschung jedoch auf das Schlagwort „Vertrauen“ verkürzt wurde. Vertrauen kann aber bei der Gestaltung und Entwicklung von Netzwerken im Innovationskontext nicht vorausgesetzt werden (Thoma 2018). So ist das interpersonale Vertrauen an ein kulturelles Band geknüpft, wodurch die Kooperationskultur als zentrales Steuerungsinstrument in Netzwerken hervortritt (Thoma 2018). Im Kontext kollaborativer F&E-Projekte wird Kultur bisher hauptsächlich im Kontext der Heterogenität der Projektpartner betrachtet (Barnes et al. 2000; vom Brocke und Lippe 2015). Die Projektkultur interorganisationaler Projekte wird bisher hingegen wenig betrachtet. Kultur ist jedoch gerade für interorganisationale Projekte relevant, da dadurch die für diese Projekte wichtige Dualität von Strukturen und Akteuren (Sydow und Braun 2018) Beachtung findet. Zudem kann Kultur komplexitätsreduzierend, innovationsförderlich und zugleich unterstützend hinsichtlich des Aufbaus von Vertrauen zu bislang fremden Partnern wirken (Sackmann 2017; Bullinger und Warschat 2007; Thoma 2018). Folglich ist ein kulturbewusstes Management der interorganisationalen F&E-Projekten anzustreben. Daraus leitet sich folgende zentrale Forschungsfrage ab: „Wie kann ein projektkulturbewusstes Management interorganisationaler F&E-Projekte erfolgen?“

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird ein projektkulturbewusstes Management-Modell auf Basis theoretischer Grundlagen entwickelt. Diese gliedern sich wie folgt. Zunächst werden für ein grundlegendes Verständnis die relevanten Begrifflichkeiten definiert. Anschließend werden Phasen- und Ebenen-Modelle des F&E-Projektmanagements betrachtet, die einen Überblick über die Zusammenhänge und Abläufe innerhalb von F&E-Projekten geben. Da F&E-Projektarbeit im Team, welches sich aus mehreren Individuen zusammensetzt, erfolgt, wird danach auf die menschlichen Handlungssysteme und die Ebenen der Zusammenarbeit eingegangen. Bei der Zusammenarbeit im Team/im Projekt entwickelt sich eine Kultur. Deshalb werden anschließend Kultur- und Verhaltens-Modelle erläutert. Das projektkulturbewusste Management-Modell ist aus den oben beschriebenen Teilen zusammengesetzt und fokussiert auf den Bereich der Projektkulturentwicklung und die zu gestaltenden Faktoren innerhalb dieses Bereiches. Diese Faktoren sollten in interorganisationalen F&E-Projekten sowohl förderlich für die Kooperation als auch für die Innovation gestaltet werden. Zuletzt werden die Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Begrifflichkeiten

Nach der ISO/TR 21506:2018-11 ist ein **Projekt** ein zeitlich begrenztes Unterfangen, das zum Hervorbringen vereinbarter Lieferobjekte gegründet wurde. Durch das kollaborative Hervorbringen dieser Lieferobjekte in interorganisationalen Projekten entstehen Netzwerke. **Netzwerke** sind Beziehungsgeflechte, die sich durch die Interaktion von mehr als zwei Knoten herausbilden und sich über ihre Knoten und Verbindungen definieren (Evers 1998; Brass et al. 2004). So bilden sich in interorganisationalen Projekten auf Unternehmensebene Netzwerke, deren Knoten die Organisationen und deren Verbindungen die Kooperationen darstellen. Auf Projektebene bilden sich somit Netzwerke, deren Knoten die Mitarbeitenden und die Verbindungen die Zusammenarbeit im Rahmen der Kooperationen darstellen. **Kooperation** ist die auf freiwilliger Basis eingegangene, vertraglich vereinbarte, befristete Zusammenarbeit zwischen rechtlich und wirtschaftlich selbstständigen Organisationen. Mit Eingehen der Kooperation bezwecken die Organisationen einen höheren Grad ihrer Individualzielerreichung mittels Realisierung des gemeinsamen Kooperationsziels (Bidlingmaier 1967; Scherer 1995; Rotering 1990). In Netzwerken spielt das interpersonale Vertrauen eine große Rolle (siehe Kap. 1). **Vertrauen** ist im Kern „der Wille, sich verletzlich zu zeigen“ (Osterloh und Weibel 2006, S.35). Dieser Satz umfasst die drei Vertrauensdimensionen Verletzlichkeit (der Vertrauensgebende kann in der Situation mehr verlieren als gewinnen), Vertrauenssprung (der Vertrauensgebende ist dem Vertrauensnehmenden ausgeliefert) und positive Erwartungen (Grund für das Vertrauen) gegenüber dem Vertrauensnehmenden (Osterloh und Weibel 2006).

In dieser Forschungsarbeit liegt der Fokus auf der oben beschriebenen Projektebene, da sich hier die Projektkultur entwickelt. **Kultur** ist das komplexe und dynamische System der gemeinsam getragenen Grundannahmen, gewählten Überzeugungen und Werte sowie Artefakte, das sich in einem sozialen System (= Spiel) als die selbstverständlichen Spielregeln über die Zeit herausbildet (Köppel 2007; Schein und Schein 2018; Grubendorfer 2016). Eine grundlegende Form der Kultur ist ein hinreichender Wertekonsens, welcher für das Überleben eines sozialen Systems die Voraussetzung darstellt (Grubendorfer 2016; Parsons 1951). Denn **Werte** geben Orientierung und umfassen wünschenswerte, abstrakte Handlungsleitlinien (Frey et al. 2016). Aus Werten leiten sich **Normen** ab, welche situationsabhängig Erwartungen wiedergeben und damit aufzeigen, welches Verhalten in der jeweiligen Gruppe (nicht) erwünscht ist. Sie sind somit konkrete Verhaltensmaßregeln, die für die Effektivität von Teams entscheidend sind (Frey et al. 2016; Wageman et al. 2009).

2.2 F&E-Projektmanagement

Grundsätzlich gliedert sich die F&E in die Aktivitäten Grundlagenforschung, Technologieentwicklung, Vorentwicklung und Produkt- und Prozessentwicklung (Specht und Beckmann 1996). Entwicklungsprozesse können nach den drei Ebenen Ergebnis, operative Planung und strategische Planung (siehe Abb. 1) unterschieden werden (Giapoulis 1998; Lindemann 2009). Die Ergebnisebene wird durch die Ausführung der Arbeitsschritte auf der operativen Ebene erreicht. Die operative Ebene umfasst die konkreten Arbeitsschritte innerhalb der strategisch geplanten Phasen. Auf dieser Ebene erfolgt die Problemlösung, die nach den drei Hauptschritten Zielsuche, Lösungssuche und Auswahl abläuft (Lindemann 2009). Diese können komplett oder teilweise mehrmals ablaufen. Dabei ist Anzahl und Umfang der Wiederholzyklen von dem Problem und den Problemlösenden abhängig (VDI 2221 Blatt 1:2019-11). Die strategische Ebene umfasst die Projektphasen, Arbeitspakete und das Projektmanagement (Lindemann 2009).

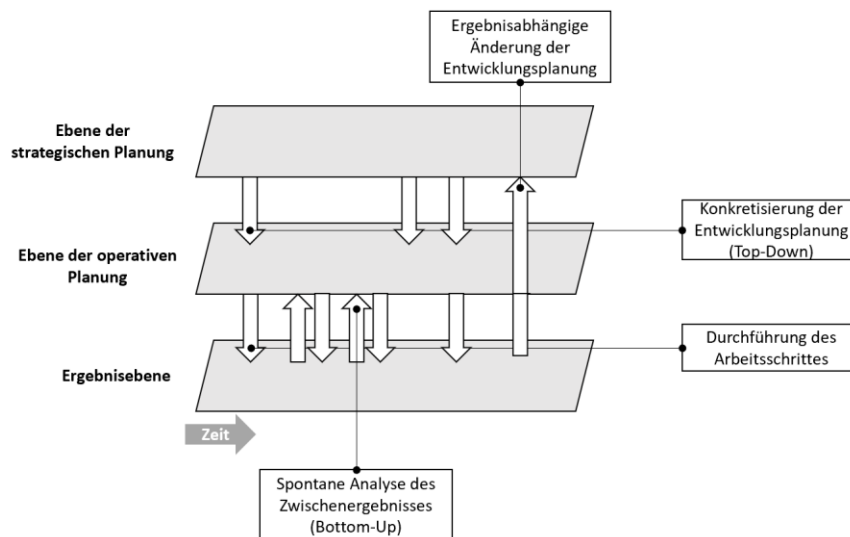


Abbildung 1: Drei-Ebenen-Modell für Entwicklungsprozesse, in Anlehnung an (Giapoulis 1998; Lindemann 2009)

Nach dem Project Management Body of Knowledge spannt sich der allgemeine Projektlebenszyklus vom Beginn über die Vorbereitung und Strukturierung sowie Durchführung der Arbeit bis hin zum Beenden eines Projekts (Project Management Institute 2017). In der Regel sind Projekte in einzelne Phasen unterteilt, die zusammen den Projektlebenszyklus bilden (Project Management Institute 2017; DIN ISO 21500:2016-02). Gewöhnlich werden diese nach der zu erledigenden Arbeit beschrieben (Project Management Institute 2017). So werden in jeder Projektphase unterschiedliche Vorgänge durchgeführt, die festgelegte Arbeitsaufgaben (Arbeitspakete) darstellen (DIN ISO 21500:2016-02). Am Ende jeder Phase findet eine Phasenüberprüfung statt, im Rahmen derer der Fortschritt und die Leistung des Projekts (z.B. Arbeitsergebnisse) überprüft wird (Project Management Institute 2017). Wird ein Projekt kollaborativ durchgeführt, werden zusätzlich die Phasen der Kooperation relevant. Diese sind nach Barnes et al. (2000) Initiierung, Durchführung und Output. Sie umfassen beispielsweise die Findung des Projektpartners, das Management und das Ergebnis des kollaborativen Projekts (Barnes et al. 2000). Gesteuert wird der Projektlebenszyklus durch die Ausführung von Projektmanagementprozessen, die nach fünf Prozessgruppen gegliedert werden können und unabhängig von den übergeordneten Projektphasen sind (Project Management Institute 2017). Diese sind Initiierung, Planung, Umsetzung, Controlling und Abschluss (DIN ISO 21500:2016-02).

2.3 Menschliche Handlungssysteme und Ebenen der Zusammenarbeit

Menschliche Handlungssysteme lassen sich in die vier Hierarchiestufen Weltgesellschaft (Megasystem), Gesellschaft (Makrosystem), Organisation (Mesosystem) und Individuum (Mikrosystem) unterteilen, wobei zwischen Mikro- und Makrosystem in große bzw. kleine Mesosysteme weiter differenziert werden kann (Ropohl 2009). In diesem Beitrag werden Mesosysteme (groß: Interorganisationales F&E-Projekt als temporäre Organisation, klein: Team[s]) und Mikrosysteme (Individuen) näher betrachtet. Die Handlungsstruktur eines Handlungssystems besteht aus Zielsetzungssystem (Maxime des Handelns), Informationssystem (Aufnahme, Verarbeitung und Weitergabe von Informationen) und Ausführungssystem (Arbeit im engeren Sinn) (Ropohl 2009). Da auf der Mikroebene das personale Handlungssystem dem Menschen (Individuum) entspricht, sind das Zielsetzungs-, Informations- und Ausführungssystem dessen Motivation, Sensorik, Kognition und operative Motorik. Die Handlungsstruktur der Mesosysteme findet sich in ihrer Organisation wieder (Ropohl 2009).

Die Subsystemmenge der Mesosysteme besteht aus personalen Systemen. So bewirken Mesosysteme Situationstransformationen, welche einzelne, von einander isolierte Mikrosysteme nicht

zustande brächten (Ropohl 2009). Dies zeigt auf, dass Teamarbeit ein wesentlicher Erfolgsfaktor von Projekten ist (Kuster et al. 2019). Kuster et al. (2019) zeigen für die Anforderungen an die Teamarbeit drei Ebenen der Zusammenarbeit auf, die nach der Arbeit im und am System gegliedert werden (siehe Abb. 2). Die Arbeit im System umfasst die inhaltliche Ebene, zu der z.B. die produktive Arbeit gehört. Die Arbeit am System umfasst die Organisationsebene, auf der z.B. die Positionen geregelt werden und die Beziehungsebene, zu welcher z.B. die Projektkultur zugeordnet werden kann (Kuster et al. 2019).

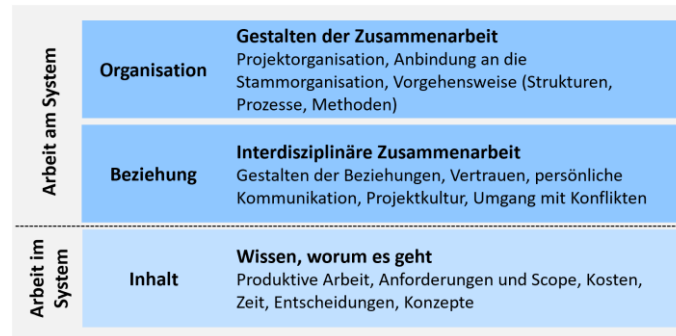


Abbildung 2: Drei Ebenen der Zusammenarbeit, in Anlehnung an (Kuster et al. 2019)

2.4 Kultur und Verhalten

Eine zentrale Besonderheit von Organisationen (z.B. Unternehmen) liegt im Zusammenspiel von formalen und informalen Wegen (Kühl 2018). Dieses Zusammenspiel gilt durch den Charakter der temporären Organisation auch in interorganisationalen Projekten. So lässt sich die Sichtweise von Kultur als dynamisches Konstrukt (Sackmann 2017) auf diese anwenden. Nach diesem Kulturverständnis sind Organisationen Kulturen und haben zugleich eine Kultur, die von Kulturträgern und -prägen in der Organisation geschaffen werden (Sackmann 2017). Jedes Organisationsmitglied kann somit Quelle für Veränderung sein, wobei Führungskräften aufgrund der Machtverhältnisse eine wichtigere Rolle zugeschrieben wird. Denn durch ein kulturbewusstes Management können Führungskräfte in der Organisation Bedingungen für ein wahrscheinliches Verhalten schaffen (Sackmann 2017). Schein und Schein (2018) zeigen für Kultur die drei Ebenen Artefakte (z.B. Prozesse), gewählte Überzeugungen und Werte (z.B. Normen) sowie grundlegende Annahmen (kulturelle Essenz) auf. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die drei Kulturebenen.

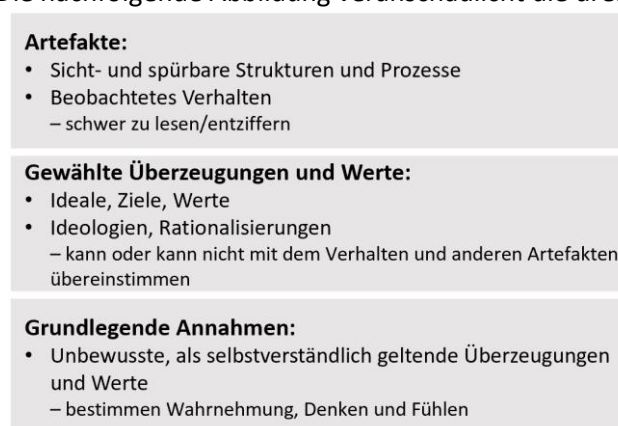


Abbildung 3: Drei Ebenen der Kultur, in Anlehnung an (Schein und Schein 2018)

Den Spielregeln in einem sozialen System liegen das Leben und die Entwicklung von Werten zugrunde. Diese werden immer wieder neu durch Kommunikation erzeugt (Grubendorfer 2016). So gibt es in einem sozialen System die Möglichkeit, einen Wertekonsens zu erarbeiten (Grubendorfer 2016; Parsons 1951). Vom beobachtbaren Verhalten mehrerer Akteure lässt sich auf die geltenden

Werte in einem sozialen System schließen (Grubendorfer 2016). So ist das Verhalten der Menschen ein großer Teil der Kulturentwicklung.

Der „reasoned action approach“ (siehe Abb. 4) zeigt auf, wie Verhalten beeinflusst werden kann (Fishbein und Ajzen 2010). Nach diesem Ansatz entwickelt jede Person Ansichten über ihr mögliches Verhalten. Diese werden durch Hintergrundfaktoren beeinflusst, zu denen individuelle Faktoren (wie z.B. Persönlichkeit, Stimmung oder Emotionen), soziale Faktoren (wie z.B. Alter, Bildung oder Geschlecht) und Informationen, denen die Person (z.B. durch Medien, Interventionen oder Wissen) ausgesetzt ist, gehören (Fishbein und Ajzen 2010). Fishbein und Ajzen (2010) unterscheiden zwischen Verhaltensansichten, im Rahmen derer die Person positive oder negative Konsequenzen des betreffenden Verhaltens evaluiert, normativen Ansichten, die aufzeigen, wie für die Person wichtige Individuen/Gruppen das betreffende Verhalten beurteilen und Kontrollansichten, im Rahmen derer eine Person die persönlichen und umweltbezogenen Faktoren beurteilt, die deren Verhalten unterstützen bzw. behindern können.

Aus den Verhaltensansichten entwickelt sich die Einstellung gegenüber dem Verhalten, welche positiv oder negativ sein kann. Die normativen Ansichten beeinflussen die wahrgenommene Norm, welche den von einer Person wahrgenommenen sozialen Druck darstellt, sich dementsprechend (nicht) zu verhalten. Die Kontrollansichten wirken auf die wahrgenommene Verhaltenskontrolle, die das Ausmaß darstellt, in welchem eine Person glaubt, dass sie fähig ist bzw. die Kontrolle darüber hat, sich entsprechend zu verhalten (Fishbein und Ajzen 2010). Die Ansichten, Einstellung, wahrgenommene Norm bzw. Verhaltenskontrolle beeinflussen die Intention bezüglich des Verhaltens. Je stärker die Intention, desto wahrscheinlicher, dass sich die Person entsprechend ihrer Intention verhält. Jedoch können fehlende Fähigkeiten oder beschränkende Umwelteinflüsse (tatsächliche Kontrolle) dies verhindern (Fishbein und Ajzen 2010).

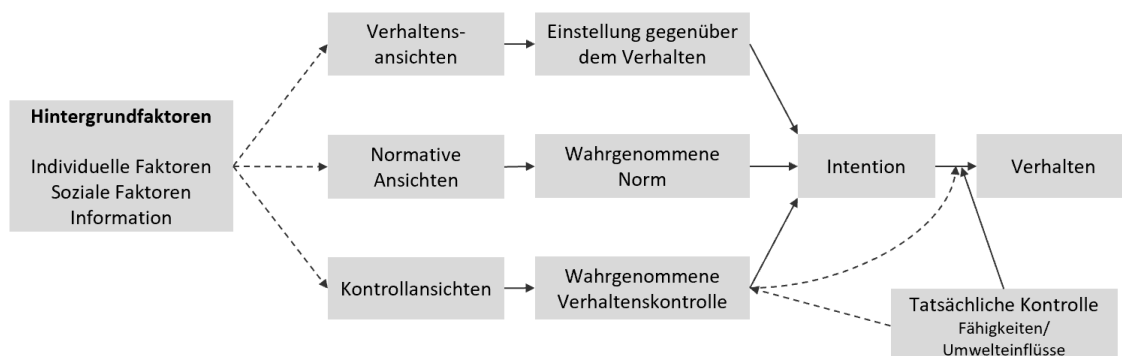


Abbildung 4: The reasoned action approach, in Anlehnung an (Fishbein und Ajzen 2010)

3 Projektkulturbewusstes Management-Modell

Auf Basis der theoretischen Grundlagen wird ein projektkulturbewusstes Management-Modell für interorganisationale F&E-Projekte entwickelt. Das Modell umfasst zwei Teile. Der erste Teil zeigt den Bereich der Projektkulturentwicklung auf. Dafür wird das drei Ebenen-Modell von Giapoulis (1998) durch die Betrachtung der Phasen und Prozessgruppen im F&E-Projektmanagement sowie der menschlichen Handlungssysteme und Ebenen der Zusammenarbeit detaillierter aufgeschlüsselt und in Relation zu den F&E-Aktivitäten gestellt. So werden die Zusammenhänge in dem interorganisationalen F&E-Projekt deutlich und damit der Bereich, in welchem sich die Projektkultur entwickelt. Der zweite Teil zeigt auf, wie innerhalb dieses Bereiches die Bedingungen für ein wahrscheinliches Verhalten gestaltet werden können. Dafür wird das „reasoned action approach“-Modell für interorganisationale F&E-Projekte spezifiziert und den drei Ebenen der Kultur von Schein und Schein (2018) zugeordnet. So werden die Faktoren und ihre Beziehungen deutlich, aus denen sich ein kooperatives und innovatives Verhalten entwickeln kann.

3.1 Bereich der Projektkulturentwicklung

Die strategische Ebene wird durch Zuordnung und Gliederung der Kooperationsphasen, des Projektlebenszyklus, der Projektmanagement-Prozessgruppen und der Arbeitspakete detailliert (siehe Abb. 5). Die Kooperationsphasen können über den gesamten Projektlebenszyklus oder über Teile davon ablaufen. In jeder Projektphase, die summiert den Projektlebenszyklus bilden, laufen die fünf Projektmanagement-Prozessgruppen und die jeweiligen Arbeitspakete ab.

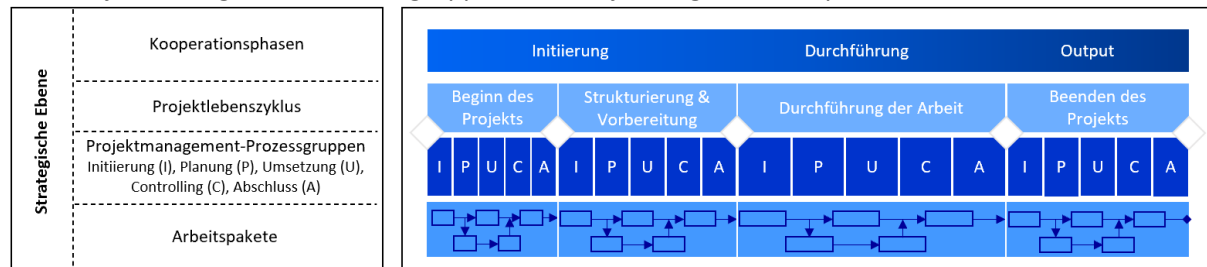


Abbildung 5: Strategische Ebene (detailliert)

Zur Detaillierung der operativen Ebene werden den drei iterativen Hauptschritten der Problemlösung die Ebenen der Zusammenarbeit zugeordnet, da Probleme im Rahmen der Projektarbeit meist im Team (kleines Mesosystem) gelöst werden (siehe Abb. 6). Diesen drei Ebenen wird die Mikroebene hinterlegt, da ein Team sich aus mehreren Individuen zusammensetzt, die die Iterationshäufigkeit der Problemlösung beeinflussen können (siehe Kap. 2.2).

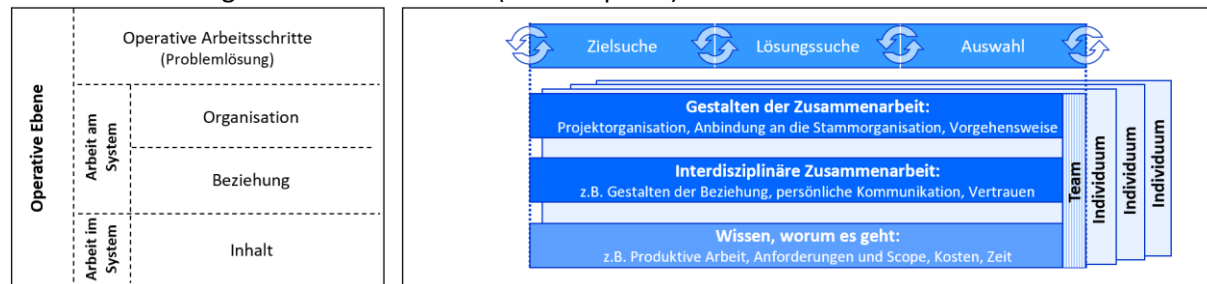


Abbildung 6: Operative Ebene (detailliert)

Die detaillierte strategische Ebene ist über die Arbeitspakete mit der detaillierten operativen Ebene verbunden. Denn innerhalb dieser finden die operativen Problemlösungsschritte statt. So finden die personalen Handlungssysteme der Individuen und die Ebenen der Zusammenarbeit im Team sowohl in den operativen Arbeitsschritten als auch in den Projektmanagement-Prozessgruppen Beachtung. Dadurch kann auf beiden Ebenen auf das Team als kleines Mesosystem sowie auf die Individuen eingegangen werden. Auf der inhaltlichen Ebene findet die produktive Arbeit statt, durch welche die Ergebnisse generiert werden. Daher ist die detaillierte operative Ebene über die inhaltliche Ebene mit der Ergebnisebene verbunden. Diese interagieren regelmäßig.

Die detaillierte strategische Ebene (Abb. 5) und detaillierte operative Ebene (Abb. 6) sowie die Ergebnisebene können in Relation zu den F&E-Aktivitäten gesetzt werden. So können in jeder F&E-Aktivität bzw. über mehrere der Aktivitäten hinweg interorganisationale F&E-Projekte stattfinden. Aus dem Zusammenspiel der verschiedenen Ebenen und Aktivitäten entwickelt sich dann eine Projektkultur im interorganisationalen F&E-Projekt (siehe Abb. 7). Diese ist abhängig von der jeweiligen F&E-Aktivität, den Abläufen auf der strategischen und operativen Ebene und von den Ebenen der Zusammenarbeit im Team unter Berücksichtigung der Individuen mit ihren personalen Handlungssystemen. Auf der Beziehungsebene manifestiert sich die Projektkultur, denn dort werden die Beziehungen zwischen den Projektmitgliedern, welche maßgeblich durch die resultierenden Spielregeln geprägt werden, betrachtet. Abbildung 7 zeigt den ersten Teil des projektkultur-bewussten Management-Modells.

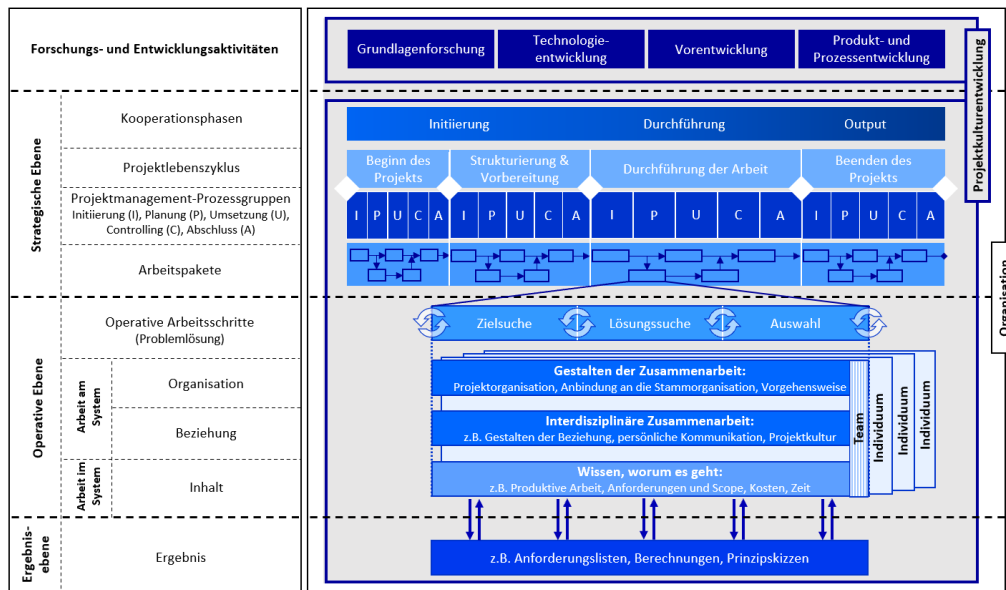


Abbildung 7: Projektkulturbewusstes Management-Modell (Teil 1)

3.2 Gestaltbare Hintergrundfaktoren innerhalb des Bereichs der Projektkulturentwicklung

Innerhalb des Bereichs der Projektkulturentwicklung wird das Verhalten über die Hintergrundfaktoren beeinflusst. Die Hintergrundfaktoren umfassen zum einen das Umfeld der temporären Organisation, welches die Mitarbeitenden prägt und zum anderen das Umfeld der Mitarbeitenden innerhalb der temporären Organisation. Die Mitarbeitenden werden im Umfeld der temporären Organisation durch individuelle Faktoren und ihr soziales Umfeld sowohl privat als auch beruflich geprägt. Das Umfeld der temporären Organisation liegt jedoch nicht im Fokus dieses Beitrags, da das projektkulturbewusste Management-Modell unabhängig von der jeweiligen Person und ihrer Organisationszugehörigkeit Einsatz finden sollte. Deshalb werden die individuellen Faktoren sowie das personenspezifische soziale Umfeld, zu dem auch die organisationskulturelle Prägung gehört, im weiteren Verlauf dieses Beitrags für dieses Modell als fixe Variablen betrachtet. Somit liegt der Fokus auf der Gestaltung des Umfelds der Mitarbeitenden innerhalb der temporären Organisation. Dadurch können auf der operativen Ebene die Bedingungen für ein wahrscheinlich kooperatives und innovatives Verhalten über die Gestaltung der Ablauf- und Aufbauorganisation, der Werte und Normen geschaffen werden. Die Beziehungen zwischen diesen Hintergrundfaktoren sind wie folgt:

1. **Werte:** Werte bilden den Startpunkt für die Gestaltung, da ein Wertekonsens die grundlegende Form der Kultur darstellt (siehe Kap. 2.1). Für ein kooperatives und innovatives Verhalten sollten diese Werte einer Kooperations- und Innovationskultur sein.
2. **Normen:** Normen leiten sich aus den Werten ab (siehe Kap. 2.1) und geben Projektmitgliedern so einen Überblick über das (un)erwünschte Verhalten.
3. **Ablauf- und Aufbauorganisation:** Normen sollten sich in der Projektorganisation manifestieren. Da für die Organisationsgestaltung das Prinzip „der Aufbau folgt dem Ablauf“ (Spath 2017, S.16) gilt, folgen den Normen die Ablauforganisation und dieser zuletzt die Aufbauorganisation.

Aus den Hintergrundfaktoren und den daraus resultierenden Ansichten, der Einstellung, wahrgenommenen Norm bzw. Verhaltenskontrolle entwickelt sich die Intention. Für ein kooperatives Verhalten ist diese das Vertrauen. Einem innovativen Verhalten liegt eine innovative Intention zugrunde. Vertrauen wirkt indirekt auch auf das innovative Verhalten, da dieses für einen Informationsaustausch zur gemeinsamen Ideengenerierung essenziell ist. Das kooperative und innovative Verhalten koexistieren während der F&E-Zusammenarbeit und regen sich über indirekte Wechselwirkungen an. So manifestiert sich als Projektkultur eine kooperative Innovationskultur. Abbildung 8 zeigt das spezifiziertere „reasoned action approach“-Modell.

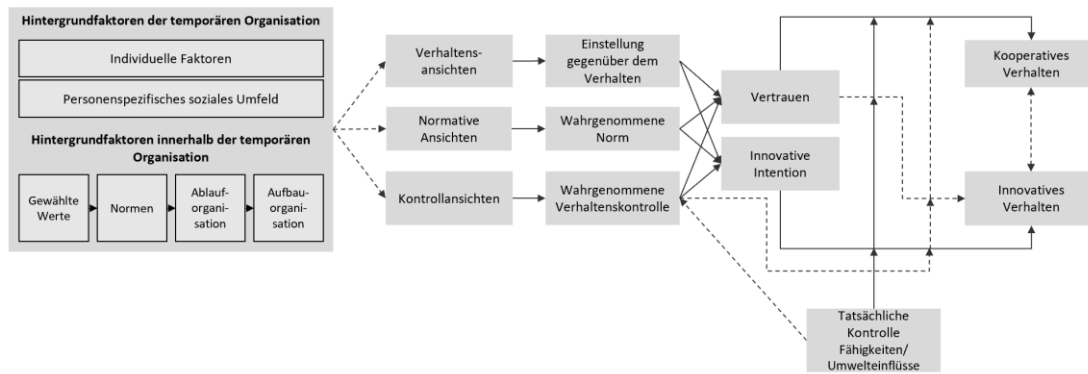


Abbildung 8: The reasoned action approach, spezifiziert für interorganisationale F&E-Projekte

Dieses Modell (siehe Abb. 8) lässt sich den drei Ebenen der Kultur nach Schein und Schein (2018) (siehe Abb. 3) zuordnen (siehe Abb. 9). Die Faktoren des personenspezifischen sozialen Umfelds und die individuellen Faktoren können den Grundannahmen zugeordnet werden. Denn diese sind die selbstverständlichen Annahmen, denen entsprechend sich die jeweiligen Personen verhalten und die in diesem Modell als fixe Variablen angesehen werden. Die gestaltbaren Hintergrundfaktoren lassen sich den gewählten Werten und Überzeugungen sowie den Artefakten zuordnen (siehe Abb. 9). Diese müssen somit erst als die geltenden Faktoren im Projekt erlernt werden, bis sie zu grundlegenden Annahmen werden (siehe hierzu Schein und Schein 2018). Die Projektmitglieder in die Gestaltung der Hintergrundfaktoren mit einzubeziehen, erhöht deren Wissen über den Gestaltungsprozess. Dies steigert deren Akzeptanz und Engagement und gibt ihnen die Möglichkeit sich besser, entsprechend ihrer persönlichen Belange, zu entscheiden (DIN EN ISO 9241-210:2020-03; Fishbein und Ajzen 2010). Die resultierenden drei Ansichten und die daraus sich entwickelnde Einstellung, wahrgenommene Norm bzw. Verhaltenskontrolle sowie das Vertrauen und die innovative Intention laufen in den einzelnen Personen ab und sind somit nicht von außen erkennbar. Deshalb können sie, wie auch die tatsächliche Verhaltenskontrolle, den Grundannahmen zugeordnet werden. Sichtbar werden diese erst durch das Verhalten der Personen. Das Verhalten kann deswegen der Ebene der Artefakte zugeordnet werden. So springt der Betrachtungsfokus von der Mesoebene, auf der die Gestaltung der Hintergrundfaktoren stattfindet, auf die Mikroebene. Das Verhalten der mehreren Akteure lässt auf die geltenden Werte in dem Mesosystem schließen. Somit liegt der Betrachtungsfokus für das Verhalten wieder auf der Mesoebene (siehe Abb. 9). Abbildung 9 visualisiert die erläuterten Zusammenhänge und stellt den zweiten Teil des projektkulturbewussten Management-Modells dar.

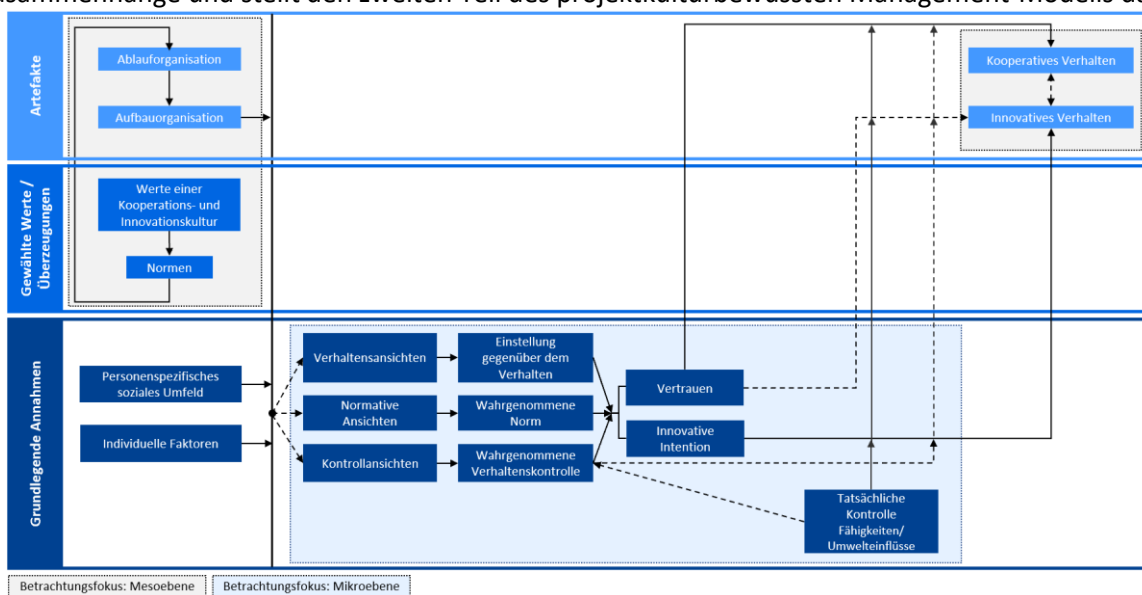


Abbildung 9: Projektkulturbewusstes Management-Modell (Teil 2)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Forschungsarbeit war die Entwicklung eines projektkulturbewussten Management-Modells für interorganisationale F&E-Projekte. Dieses wurde auf Basis der theoretischen Grundlagen entwickelt und umfasst zwei Teile. Der erste Teil zeigt auf, wie sich der Bereich der Projektkulturentwicklung aufschlüsselt. Hierbei wird aufgezeigt, dass die Ebenen der Zusammenarbeit im Team und die Individuen sowohl bei der Problemlösung als auch in den Projektmanagement-Prozessgruppen berücksichtigt werden sollten. Der zweite Teil zeigt auf, welche Hintergrundfaktoren auf der operativen Ebene für ein wahrscheinlich kooperatives und innovatives Verhalten wie gestaltet werden sollten. Diese Hintergrundfaktoren müssen mit der Zeit als die im Projekt geltenden Faktoren von allen Projektmitgliedern iterativ erlernt werden, so dass sie sich als grundlegende Annahmen der kooperativen Innovationskultur in dem Projekt verankern können. Denn zu Beginn der Projektarbeit sind vor allem die individuellen Faktoren und das personenspezifische soziale Umfeld die grundlegenden Annahmen. So visualisiert das projektkulturbewusste Management-Modell die Problematik der Kulturunterschiede, die aus der Heterogenität der Projektpartner resultiert (siehe hierzu Barnes et al. 2000; vom Brocke und Lippe 2015).

Hinsichtlich der offenen Forschungsfragen, die Sydow und Braun (2018) aufzeigen, gibt dieses Modell erste Ansätze zur Beantwortung. Denn es zeigt einen Managementansatz auf, wie sich, sowohl im klassischen als auch agilen Projektmanagement, abhängig von dem Bereich der Projektkulturentwicklung, den gestaltbaren Hintergrundfaktoren und den Projektmitgliedern netzwerkeigene Kooperationspraktiken und Verhaltensregeln entwickeln. Diese sind für die Potenzialentfaltung von Netzwerken essenziell (Thoma 2018). Damit kann mit dem projektkulturbewussten Management-Modell auf den „one size does not fit all“-Ansatz eingegangen werden, der im Kontext kollaborativer Projekte hohe Relevanz erfährt (Barbosa 2020). Denn das entwickelte Modell zeigt ein Grundgerüst auf, welches an die Gegebenheiten der jeweiligen Projekte angepasst werden kann. In einem nächsten Schritt sollte dieses Modell evaluiert, und konkrete Anwendungsszenarien sollten ermittelt werden. Dafür wäre die Identifikation der Netzwerkcharakteristika besonders interessant. Denn diese beeinflussen die Projektkulturentwicklung und damit auch die Gestaltung der Hintergrundfaktoren. Zudem könnte zukünftige Forschung den Einfluss der, in diesem Beitrag als fix betrachteten, personenspezifischen und individuellen Faktoren auf das projektkulturbewusste Management-Modell näher untersuchen.

Literatur

- Achleitner et al. 2019 ACHLEITNER, Ann-Kristin; BRAUN, Reiner; BEHRENS, Jan Henning; LANGE, Thomas: Innovationskraft in Deutschland verbessern: Ökosystem für Wachstumsfinanzierung stärken. In: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *acatech Studie*, 2019
- Bagherzadeh et al. 2019 BAGHERZADEH, Mehdi; GURCA, Andrei; BRUNSWICKER, Sabine: *Problem Types and Open Innovation Governance Modes: A Project-Level Empirical Exploration*. In: *IEEE Transactions on Engineering Management* (2019), S. 1–15
- Barbosa 2020 BARBOSA, Ana Paula F. Paes Leme: Managing Collaborative R&D Projects with Different Types of Knowledge Sources. In: TYNHAMMAR, Marcus (Hrsg.): *The Crest of the Innovation Management Research Wave*. Wilmington, DE: Vernon Press, 2020 (Series in Innovation Studies), S. 17–29
- Barnes et al. 2000 BARNES, T. A.; PASHBY, I. R.; GIBBONS, A. M.: Collaborative R&D projects: a best practice management model. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology. ICMIT 2000. 'Management in the 21st Century' (Cat. No.00EX457)*: IEEE, 2000, S. 217–223

- Bidlingmaier 1967 BIDLINGMAIER, Johannes: Begriff und Formen der Kooperation im Handel. In: BIDLINGMAIER, Johannes; JACOBI, Helmut; UHEREK, Edgar W. (Hrsg.): *Absatzpolitik und Distribution: Karl Christian Behrens zum 60. Geburtstag*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1967, S. 353–395
- Brass et al. 2004 BRASS, Daniel J.; GALASKIEWICZ, Joseph; GREVE, Henrich R.; TSAI, Wenpin: *Taking Stock of Networks and Organizations: A Multilevel Perspective*. In: *Academy of Management Journal* 47 (2004), Nr. 6, S. 795–817
- vom Brocke und Lippe 2015 VOM BROCKE, Jan; LIPPE, Sonia: *Managing collaborative research projects: A synthesis of project management literature and directives for future research*. In: *International Journal of Project Management* 33 (2015), Nr. 5, S. 1022–1039
- Bullinger und Warschat 2007 BULLINGER, Hans-Jörg; WARSCHAT, Joachim: Innovationsmanagement in Netzwerken. In: GARCIA SANZ, Francisco J.; SEMMLER, Klaus; WALTHER, Johannes (Hrsg.): *Die Automobilindustrie auf dem Weg zur globalen Netzwerk-kompetenz: Effiziente und flexible Supply Chains erfolgreich gestalten*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, S. 199–214
- DIN EN ISO 9241-210:2020-03 Norm DIN EN ISO 9241-210:2020-03. *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2019); Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2019*
- DIN ISO 21500:2016-02 Norm DIN ISO 21500:2016-02, *Leitlinien Projektmanagement (ISO 21500:2012)*
- Evers 1998 EVERS, Michael: *Strategische Führung mittelständischer Unternehmens-netzwerke*. Zugl.: Essen, Univ., Diss., 1998. München: Hampp, 1998
- Fishbein und Ajzen 2010 FISHBEIN, Martin; AJZEN, Icek: *Predicting and changing behavior: The reasoned action approach*. New York, NY, Hove: Psychology Press, 2010
- Fraunhofer-Verbund Innovationsforschung 2018 FRAUNHOFER-VERBUND INNOVATIONSFORSCHUNG: *Wandel verstehen - Zukunft gestalten: Impulse für die Zukunft der Innovation*. Stuttgart, 2018
- Frey et al. 2016 FREY, Dieter; HENNINGER, Mirka; LÜBKE, Ricarda; KLUGE, Anja: Einführung und konzeptionelle Klärung. In: FREY, Dieter (Hrsg.): *Psychologie der Werte: Von Achtsamkeit bis Zivilcourage - Basiswissen aus Psychologie und Philosophie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 1–12
- Giapoulis 1998 GIAPOULIS, Anthimos: *Modelle für effektive Konstruktionsprozesse*. Aachen: Shaker 1998. (Konstruktionstechnik München, Band 27) Zugl. München: TU, Diss. 1996.
- Gouldner 1960 GOULDNER, Alvin W.: *The Norm of Reciprocity: A Preliminary Statement*. In: *American Sociological Review* 25 (1960), Nr. 2, S. 161
- Grubendorfer 2016 GRUBENDORFER, Christina: *Einführung in systemische Konzepte der Unternehmenskultur*. Erste Auflage. Heidelberg: Carl-Auer Verlag GmbH, 2016 (Carl-Auer Compact)
- ISO/TR 21506:2018-11 Norm ISO/TR 21506:2018-11. *Project, programme and portfolio management – Vocabulary*
- Köppel 2007 KÖPPEL, Petra: *Konflikte und Synergien in multikulturellen Teams: Virtuelle und face-to-face-Kooperation*. Zugl.: Potsdam, Univ., Diss., 2007. 1. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2007
- Kühl 2018 KÜHL, Stefan: *Organisationskultur*. In: *Managementforschung* 28 (2018), Nr. 1, S. 7–35

- Kuster et al. 2019 KUSTER, Jürg; BACHMANN, Christian; HUBER, Eugen; HUBMANN, Mike; LIPPMANN, Robert; SCHNEIDER, Emil; SCHNEIDER, Patrick; WITSCHI, Urs; WÜST, Roger: *Handbuch Projektmanagement: Agil - klassisch - hybrid*. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Gabler, 2019
- Lindemann 2009 LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., korrigierte Aufl. Berlin: Springer, 2009 (VDI-Buch)
- Osterloh und Weibel 2006 OSTERLOH, Margit; WEIBEL, Antoinette: *Investition Vertrauen: Prozesse der Vertrauensentwicklung in Organisationen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2006
- Parsons 1951 PARSONS, T. a. E. A. Shils (eds.): *Toward a general theory of action*. Cambridge: Harvard University Press, 1951.
- Powell 1990 POWELL, Walter W.: *Neither Market Nor Hierarchy: Network Forms of Organization*, *Research in Organizational Behavior* 12 (1990), S. 295–336
- Project Management Institute 2017 PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (Hrsg.): *A guide to the project management body of knowledge: (PMBOK® guide)*. Sechste Ausgabe. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute Inc, 2017 (PMI global standard)
- Ropohl 2009 ROPOHL, Günter: *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarbeitete Auflage. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009
- Roterling 1990 ROTERLING, Christian: *Forschungs- und Entwicklungskooperationen zwischen Unternehmen: eine empirische Analyse*, 1990
- Sackmann 2017 SACKMANN, Sonja A.: *Unternehmenskultur: Erkennen - Entwickeln - Verändern: Erfolgreich durch kulturbewusstes Management*. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017
- Schein und Schein 2018 SCHEIN, Edgar H.; SCHEIN, Peter: *Organisationskultur und Leadership*. 5. Auflage. München: Franz Vahlen, 2018
- Scherer 1995 SCHERER, Norbert: *Kooperationsentscheidungen in Forschung und Entwicklung*, 1995
- Spath 2017 SPATH, Dieter: *Grundlagen der Organisationsgestaltung*. In: SPATH, Dieter; WESTKÄMPER, Engelbert; BULLINGER, Hans-Jörg; WARNECKE, Hans-Jürgen (Hrsg.): *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*. Berlin, Heidelberg: Vieweg, 2017 (VDI-Buch Ser), S. 3–29
- Specht und Beckmann 1996 SPECHT, Günter; BECKMANN, Christoph: *F-&-E-Management*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996 (UTB für Wissenschaft)
- Sydow und Braun 2018 SYDOW, Jörg; BRAUN, Timo: *Projects as temporary organizations: An agenda for further theorizing the interorganizational dimension*. In: *International Journal of Project Management* 36 (2018), Nr. 1, S. 4–11
- Thoma 2018 THOMA, Jules: *Zur Kultur von Netzwerken - Wie die neue Form der Wertschöpfung in Netzwerken gelingen kann*. In: REDLICH, Tobias; MORITZ, Manuel; WULFSBERG, Jens Peter (Hrsg.): *Interdisziplinäre Perspektiven zur Zukunft der Wertschöpfung*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018 (Research), S. 33–50
- VDI 2221 Blatt 1:2019-11 Norm VDI 2221 Blatt 1:2019-11, *Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*
- Wageman et al. 2009 WAGEMAN, Ruth; FISHER, Colin M.; HACKMAN, J. Richard: *Leading Teams When the Time is Right*. In: *Organizational Dynamics* 38 (2009), Nr. 3, S. 192–203

Towards Customized Digital Engineering: Herausforderungen und Potentiale bei der Anpassung von Digital Engineering Methoden für den Produktentwicklungsprozess

Towards Customized Digital Engineering: Challenges and potentials of adapting digital engineering methods for the product development process

Benjamin Gerschütz^{1,*}, Christopher Sauer¹, Anne Wallisch², Jan Mehlstäubl², Andreas Kormann³, Benjamin Schleich¹, Bettina Alber-Laukant³, Kristin Paetzold², Frank Rieg³, Sandro Wartzack¹

¹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen
*gerschuetz@mfk.fau.de

²Universität der Bundeswehr München, Institut für Technische Produktentwicklung, München

³Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Bayreuth

Abstract (deutsch): Die Transformation der virtuellen Produktentwicklung zum Digital Engineering hat begonnen und ist unabdingbar für den zukünftigen wirtschaftlichen Erfolg der Unternehmen. Allerdings sind die Organisations- und IT Strukturen unterschiedlicher Unternehmen nicht identisch, so dass eine Anpassung (Customization) bestehender Digital Engineering Methoden notwendig wird. Der Beitrag grenzt die virtuelle Produktentwicklung vom Digital Engineering ab, um darauf aufbauend die Potentiale dieses neuen Entwicklungsparadigmas zu ermitteln. Da durch neue Methoden auch neue Werkzeuge eingeführt werden müssen, kommt der Analyse datengetriebener Methoden und Werkzeuge auf die Anwendbarkeit im Produktentwicklungsprozess und deren Einordnung im Kontext der VDI 2206 eine zentrale Bedeutung zu. Die Herausforderungen, die bei Einführung dieser Methoden bewältigt werden müssen, reichen von technologisch und organisatorischen Problemen bis hin zu sozialpsychologischen Aspekten. Zur zielgerichteten Bewältigung der Herausforderungen erfolgt eine detaillierte Analyse der Hemmnisse.

Keywords (deutsch):

Digital engineering, Produktentwicklung, Industrie 4.0

Abstract (english): The transformation of virtual product development to digital engineering has begun and is indispensable for the continued economic success of the companies. However, the organisational as well as the IT structures of the companies are not identical, making customizing of existing methods necessary. This article differentiates virtual product development from digital engineering in order to determine the potential of the new development paradigm. Since new methods require the introduction of novel tools, the analysis of data-driven methods and tools in respect to their applicability in the product development process and their classification in the context of VDI 2206 is essential. The challenges when introducing these methods range from technological and organisational problems to social psychological aspects. A detailed analysis of the barriers will be carried out in order to enable a target oriented solving of the problems.

Keywords (english):

Digital engineering, product development, industry 4.0

1 Einleitung und Motivation

Der digitale Wandel verändert die Art wie wir leben (BMW 2020) und das so tiefgreifend wie zuletzt die Erfindung des PKW oder der Elektrizität. Der Nutzen dieser neuen digitalen und datengetriebenen Technologien wurde auch von der Bundesregierung erkannt, die den Slogan „Artificial Intelligence made in Germany“ zum weltweit anerkannten Gütesiegel machen möchte (Bundesregierung 2018). Im Bereich der Produktentwicklung finden sich bisher größtenteils ungenutzte Potentiale der digitalen Transformation. So zeigt eine Studie des Marktforschungsinstituts Bitkom Research (Grimm und Gentemann 2020), dass nur etwa 21% der kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) Big-Data-Analytics verwenden. Bei dem Einsatz künstlicher Intelligenz sind es lediglich 23% bei Großunternehmen und unter 3% der KMU. Trotzdem sehen Unternehmen in der Digitalisierung von Prozessen einen wesentlichen Faktor des zukünftigen Erfolgs (Item 2020). Hierzu ist eine digitale Revolution von der virtuellen Produktentwicklung hin zum Digital Engineering (oder auch: digitale Produktentwicklung) notwendig. Durch eine über alle Produktentwicklungsphasen durchgängige und ganzheitliche digitale Produktbeschreibung lassen sich Optimierungspotentiale, insbesondere durch Nutzbarmachung bestehender Daten, voll ausnutzen. Daraus ergibt sich für Anwender ein Wettbewerbsvorteil, da diese schneller und flexibler auf disruptive Veränderungen des Marktes reagieren können. Zentrale Voraussetzung zur erfolgreichen Transformation der virtuellen Produktentwicklung ist die Kenntnis über bestehende Methoden und Werkzeuge und deren mögliche Einsatzgebiete in klassischen Produktentwicklungsprozessen. Darüber hinaus ist auch die Auseinandersetzung mit kritischen Gelenkstellen, den eigenen Ressourcen und Zielvorstellungen unverzichtbar für einen erfolgreichen Einsatz angepasster datengetriebener Methoden.

Aus den angeführten Punkten leiten sich folgende Forschungsfragen ab, die im Verlauf des Beitrags beantwortet werden:

1. In welchen Phasen des Produktentwicklungsprozesses lassen sich welche datengetriebenen Methoden zielgerichtet einsetzen?
2. Welche Herausforderungen müssen bei der Transformation des Produktentwicklungsprozesses gelöst werden?

Hierzu soll der Begriff Digital Engineering zuerst gegen die etablierte virtuelle Produktentwicklung abgegrenzt werden. Nach einer Analyse der Potentiale datengetriebener Methoden, erfolgt eine Analyse ausgewählter Methoden und Werkzeuge auf die Anwendbarkeit im Produktentwicklungsprozess und eine Einordnung der Methoden auf mögliche Anwendungsbereiche im Kontext der VDI 2206. Die Identifikation von bestehenden Herausforderungen, insbesondere bei der Anpassung (Customization) und Integration der Methoden in den Produktentwicklungsprozess und ein Ausblick auf mögliche Bewältigungsstrategien schließen den Beitrag ab.

2 Abgrenzung und Potentiale des Digital Engineering

2.1 Abgrenzung des Digital Engineerings vom Virtual Engineering

Der Begriff der virtuellen Produktentwicklung (engl. Virtual Engineering oder Virtual Product Development) beschreibt generell die Entwicklung physischer Artefakte in virtuellen Umgebungen und hat sich in den letzten Jahren zur Beschreibung einer rechnerunterstützten Modellierung etabliert. Ziel ist hierbei die rechnerinterne Repräsentation eines Produkts und seiner Eigenschaften (Pahl et al. 2013). Vajna et al. (2018) erweitert diese Beschreibung hin zu einer Vorhersage oder Bestimmung aller relevanten Eigenschaften eines in der Entwicklung stehenden Produktes, ohne dass das Produkt oder Teile davon physisch existieren müssen. Ausgangspunkt für virtuelle Absicherung von Produkten stellt in der virtuellen Produktentwicklung in der Regel ein CAD-Modell dar, das anschließend im Rahmen des Computer-Aided-Engineering analysiert wird. Zur Abgrenzung der virtuellen Produktentwicklung

hin zum Digital Engineering werden im Folgenden die aktuell gängigsten Definitionen angeführt. Eine der ersten Definitionen liefern Schumann et al. (2011), die Digital Engineering als durchgängige Nutzung digitaler Methoden und Werkzeuge über den Produktentstehungs- und Produktionsprozess hinweg definieren. Ziel ist eine verbesserte Produktqualität und Prozessbeherrschung über den gesamten Produktlebenszyklus. Künzel et al. (2016) greifen die vorangegangene Definition auf und erweitern diese um relevante Anforderungen. Zentraler Aspekt ist die Nachverfolgbarkeit aller Daten, speziell im Hinblick auf das Änderungs- und Variantenmanagement. Außerdem werden Daten zur Optimierung und Weiterentwicklung der Produkte verwendet. Hierzu wird die systematische Bereitstellung von Wissen aus späteren Phasen des Produktlebenszyklus und Nutzung dieser Informationen in früheren Phasen als Kernelement des zukünftigen Engineerings herausgestellt. Duigou et al. (2012) bringen das Digital Engineering ebenfalls in den Kontext einer ganzheitlichen Betrachtung vorhandener Daten während des gesamten Produktentwicklungsprozesses. Ausgehend von den Charakteristika der virtuellen und der digitalen leiten die Autor*innen ab, dass die digitale Produktentwicklung als konsequente Weiterentwicklung der virtuellen Produktentwicklung zu sehen ist, wie auch von Schumann et al. (2011) festgestellt. Allerdings endet im Verständnis der Autor*innen das Digital Engineering mit dem Ende der Prozessplanung und Beginn der Produktion, da ab hier der Begriff der Digital Production angesiedelt werden kann. Insbesondere die konsequente Auswertung und Nutzung bestehender Daten aus Konstruktion, Versuch und Realbetrieb stellt im Digital Engineering ein Novum im Vergleich zur virtuellen Produktentwicklung dar. Zusammenfassend lässt sich demnach feststellen, dass ab dem Zeitpunkt die virtuelle Produktentwicklung ins Digital Engineering übergeht, wenn konsequent Wissen oder Informationen aus Daten extrahiert und in der Produktentwicklung angewendet werden.

2.2 Potentiale des Digital Engineering für KMU

In einer sich konsequent weiterentwickelnden und zunehmend vernetzten Produktentwicklung steigen die Aufgaben und Anforderungen an den Produktentwickler der Zukunft. Insbesondere die Auswertung, Analyse und Interpretation großer Datenmengen stellt eine zentrale zukünftige Herausforderung dar (Davenport 2014), die mithilfe von Digital Engineering effizient unterstützt werden kann. Insbesondere große Unternehmen haben es bereits erkannt: Das Berufsfeld des „Data-Scientists“ gewinnt zunehmend an Bedeutung und wurde bereits als „the sexiest Job of the 21st century“ (Davenport und Patil 2012) bezeichnet. Die zunehmende Komplexität von Produkten bei einer gleichzeitigen Verkürzung der Produktlebenszyklen erhöht zusätzlich die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit bestehender Produktentwicklungsmethoden. Insbesondere der zunehmende Anteil eingebetteter Elektronik und Software in mechatronischen Produkten fordert neue Methoden abseits der klassischen Abfolge mechanische – elektronische – elektrische Entwicklung (Schenk 2015). Besonders im Fall von disruptiven Veränderungen oder der Transformation hin zu mechatronischen Produkten, bei deren Entwicklung eine Vielzahl an Daten entstehen, können sich Unternehmen durch Digital Engineering einen enormen Wettbewerbsvorteil verschaffen. Obgleich kleine und mittelständische Unternehmen einen entscheidenden Wirtschaftsfaktor darstellen, stellt die generelle Digitalisierung diese Unternehmen vor Herausforderungen, da der Einführungsaufwand den potentiellen Nutzen überwiegt (Bundesregierung 2018). Hier sind maßgeschneiderte datengetriebene Methoden der Schlüssel zum Erfolg.

3 Analyse und Zuordnung datengetriebener Methoden im Hinblick auf Einsatzmöglichkeiten im Produktentwicklungsprozess

3.1 Datengetriebene Methoden

Eine datengetriebene Methode ist eine Methode, die basierend auf Daten Entscheidungen ermöglicht oder auch autonom trifft und besitzt als Grundlage der Entscheidungsfindung innerhalb der Methode

daher immer ein Modell (Montáns et al. 2019). Aufgrund der großen Anzahl datengetriebener Methoden wird im Rahmen dieses Papers nur eine Auswahl behandelt. Im Folgenden werden das Data-Mining, das Machine Learning und die Metamodellierung, vorgestellt und anschließend im Produktentwicklungsprozess verortet. Diese Methoden werden aufgrund ihrer aktuellen Präsenz, sowie ihres hoch eingeschätzten Einflusses bei der Transformation ins Digital Engineering gewählt.

3.1.1 Data Mining

Der Begriff Data-Mining hat sich in den frühen 1990er Jahren aus dem breiteren Themenfeld der Knowledge Discovery in Databases (KDD) gebildet und beschreibt heute als Teilschritt des KDD-Prozesses die Anwendung spezieller Algorithmen zur Extraktion von Mustern aus Daten (Fayyad et al. 1996). Das Themenfeld des Data-Mining ist deshalb relevant, weil die anfallenden Daten in den meisten Unternehmen nicht mehr sinnvoll ohne Computerunterstützung verarbeitet werden können und ein großer Teil von implizitem Wissen innerhalb der Daten in vorhandenen Datenbanksystemen ungenutzt bleibt, obwohl dies mehr oder weniger kostenlos zur Verfügung steht (Mohr 2002). Nach Tan et al. (2006) gibt es in einem KDD-Prozess drei Hauptschritte: Preprocessing, Processing und Postprocessing. Im Preprocessing, dem Schritt der Datenvorbereitung, werden die Eingangsdaten vereinigt, bereinigt und ggf. auch normiert, so dass strukturierte Daten entstehen. Im zweiten Schritt, dem Processing, werden diese strukturierten Daten mit Hilfe von Data-Mining-Methoden verarbeitet und zur Erzeugung von Vorhersage- oder Metamodellen verwendet. Im letzten Schritt, dem Postprocessing oder der Nachbereitung werden die Vorhersagen aus den Modellen dann ausgewertet und interpretiert. Neben dem von Tan et al. (2006) beschriebenen KDD-Prozess zum Einsatz von Data-Mining haben sich in der Zwischenzeit zwei weitere Prozesse etabliert. Dies sind zum einen der KDD-Prozess nach Fayyad et al. (1996) und der Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) (Chapman et al. 2000). Der KDD-Prozess nach Fayyad et al. (1996) besteht dabei aus neun Schritten. Dem gegenüber steht der CRISP-DM, der in sechs Phasen aufgeteilt wird. In den Schritten 6. und 7. (Data-Mining-Methode auswählen & Data-Mining) nach Fayyad et al. (1996) und Phase 4 nach CRISP-DM (Umsetzung) kommen dabei die eigentlichen Data-Mining-Methoden zum Einsatz. In den letzten Jahren hat sich für die operative Umsetzung von Data-Mining vor allem die Programmiersprache Python und verschiedene andere Softwaretools wie z.B. Weka (Mariscal et al. 2010) durchgesetzt.

3.1.2 Machine-Learning

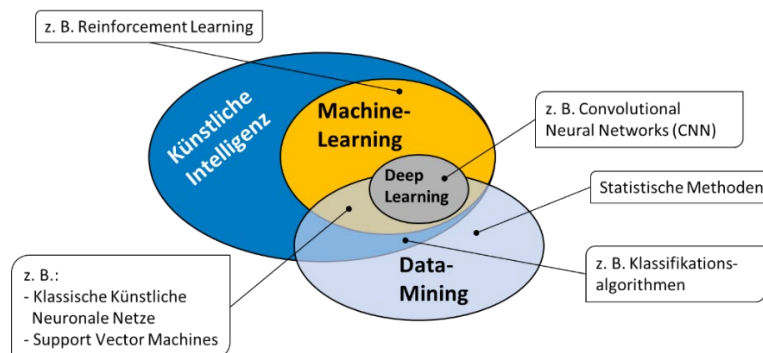


Bild 1: Einordnung der Begriffe Machine-Learning und Data-Mining in Anlehnung an (Stack Exchange 2020)

Bild 1 zeigt die Einordnung und ungefähre Verortung der beiden Themengebiete Machine-Learning und Data-Mining. Eine wichtige Unterscheidung zum Bereich des Data-Mining ist, dass bei Machine-Learning der Algorithmus selbst lernt und dabei nicht nur auf bestehenden Datensätzen aufbaut und versucht Muster zu finden. Daneben bedient sich Data-Mining oft statistischer Methoden. Im Machine-Learning lernt das System so lange bis ein Abbruchkriterium oder eine gewisse Vorhersagegüte auf Basis bestehender Daten erreicht ist (Witten et al. 2017). Die Verfahren des maschinellen Lernens lassen sich in drei Gruppen unterteilen. Diese sind unüberwachtes Lernen (Unsupervised Learning),

überwachtes Lernen (Supervised Learning) und Lernen durch Verstärkung (Reinforcement Learning) (Witten et al. 2017). Für eine weitere Nutzung von Machine-Learning im Kontext des Digital Engineering eignen sich prinzipiell überwachte Lernverfahren am besten, da sich mit Hilfe dieser Verfahren prognosefähige Vorhersagemodelle erzeugen lassen (Vajna et al. 2018). Dabei kommen meist Algorithmen wie Regressionspolynome, Entscheidungsbäume oder künstliche neuronale Netze zum Einsatz.

3.1.3 Metamodellierung

Allgemeines Ziel der Metamodellierung ist die Erstellung von prognosefähigen mathematischen Modellen, die eine Inter- bzw. Extrapolation über den zugrundeliegenden Datensatz oder das zugrundeliegende Simulationsmodell hinaus erlauben. Dabei wird auch meist das implizite Verhalten von Simulationsmodellen versucht abzubilden. Zur Erstellung wird dabei unter anderem Wissen aus bestehenden Datensätzen mit Hilfe von Data-Mining extrahiert und dann in einem kombinierten maschinellen Lernverfahren zur Erstellung der Vorhersagemodelle angewandt. Um ein solches Metamodell zu erzeugen muss es auf Basis der Eingangsdaten „trainiert“ werden. Nach dem Training wird die resultierende Performanz der Metamodelle mit Hilfe von verschiedenen Fehlerarten bewertet, dem Trainingsfehler und dem Generalisierungsfehler. Der Trainingsfehler beschreibt dabei die Genauigkeit, mit dem das Metamodell in der Lage ist die Trainingsdaten vorherzusagen, der Generalisierungsfehler beschreibt die Genauigkeit, mit welcher bisher unbekannte Daten, die dem Training vorenthalten werden, vorhergesagt werden können. Beide Fehler erlauben es die Qualität eines Metamodells von außen her zu beurteilen. Ist die Qualität für den Ersteller zufriedenstellend, kann das Metamodell für den Produktiveinsatz ausgerollt werden und innerhalb eines Projektes zum Einsatz kommen.

3.2 Zuordnung der Methoden zu den Phasen des Produktentwicklungsprozesses

Um nun die vorgestellten datengetriebenen Methoden dem Produktentwicklungsprozess zuordnen zu können lohnt ein Blick auf die einzelnen Phasen. Grundsätzlich ist der Produktentwicklungsprozess ein Teil des Produktlebenszyklus. Das V-Modell der Mechatronik beschreibt diesen. Dabei lässt es sich in folgende Bereiche unterteilen:

- Systementwurf zur Definition des Gesamtkonzepts
- Domänenspezifischer Entwurf zur Detaillierung
- Zusammenführung der domänenspezifischen Entwürfe in der Systemintegration
- Abgleich der erzielten mit den geforderten Produkteigenschaften in der Eigenschaftsabsicherung

In jeder dieser Phasen können die oben beschriebenen datengetriebenen Methoden im Rahmen des Digital Engineering verwendet werden, um die Entwicklungszeit zu verkürzen und Kosten zu senken. Die Eignung der Methoden unterscheidet sich jedoch stark nach Entwicklungsstand des Produktes. Die Anwendungsmöglichkeiten der vorab vorgestellten datengetriebenen Methoden im Produktentwicklungsprozess sind in Bild 2 dargestellt.

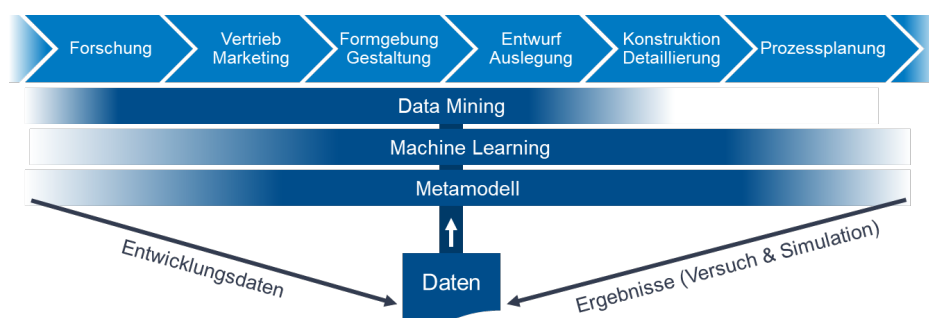


Bild 2: Anwendungsmöglichkeiten datengetriebener Methoden im Produktentwicklungsprozess in Anlehnung an die CAX-Landkarte basierend auf Vajna et al. (2018)

3.2.1 Data-Mining

Als Datenquellen für Data-Mining können Produktdatenmanagementsysteme sowie Informationssysteme in der Betriebsphase bestehender Maschinen dienen. Die Datenquellen aus der Betriebsphase haben derzeit selten Verbindung mit denen der Produktentwicklung (Klement et al. 2018). Diese Verbindung kann mittels gezielter Datenverarbeitung hergestellt werden. Aufgrund des hohen Bedarfs an Informationen zu Beginn des Projektes eignet sich Data-Mining während der Domänenspezifischen Entwurfsphase, sowie während der Phase des Systementwurfs, um Informationen aus früheren Produktentwicklungen als Basis für die aktuelle Produktentwicklung nutzbar zu machen. Somit ist die Methode des Data-Mining insbesondere zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses verwendbar.

3.2.2 Machine-Learning

In frühen Phasen des PEP ist die Entscheidungsfindung trotz unterstützender Berechnungswerkzeuge und -methoden komplex. Machine-Learning kann daher helfen die Kosten für die Untersuchung des Entwurfsraums zu minimieren (Bertoni et al. 2018). „Machine-Learning hat sein Potenzial zur Unterstützung der Wissensextraktion innerhalb der Entwicklungsprozesse und insbesondere in den frühen Phasen, in denen kritische Entscheidungen getroffen werden müssen, unter Beweis gestellt“, gehen Shabestari et al. (2019) sogar noch einen Schritt weiter. Die Verwendung von Verfahren des Machine-Learning ist somit zwar nicht auf die frühen Phasen des PEP begrenzt, jedoch bieten Sie dort das größte Verwendungspotential. Neben den Vergleich von Zahlenwerten gilt es in diversen Anwendungsfällen auch qualitative Daten zu verwerten. Machine-Learning Algorithmen ermöglichen den Umgang sowohl mit qualitativen als auch mit quantitativen Daten (Bertoni et al. 2018). Gerade im Bereich der Eigenschaftsabsicherung wird von konventionellen Methoden wie der FEM oft nur eine quantitative Einschätzung getroffen und es obliegt dem Anwender diese zu bewerten. Hier kann Machine-Learning mit einer qualitativen Abschätzung ebenfalls einen Mehrwert bieten.

3.2.3 Metamodellierung

Metamodelle ermöglichen Ingenieuren unter anderem zeitaufwändige Simulationen zu approximieren, indem sie das komplexe Verhalten der zugrunde liegenden Simulationsanalyse nachahmen (Bertoni et al. 2018). In der Phase der Eigenschaftsabsicherung können Metamodelle verwendet werden, um Rechenzeit zu sparen. Auch sind sie in der Systemintegration hilfreich, um Eigenschaften des Modells domänenübergreifend zu speichern. Um den Ansatz einer ganzheitlichen Entwicklung zu verfolgen, eignet sich ein integriertes Produktmodell, welches darauf ausgerichtet ist, Produktinformationen aus allen Phasen des Entwicklungsprozesses zu erfassen. Hierfür ist das Metamodell so zu gestalten, dass alle Produktaspekte, welche im Entwicklungsprozess relevant sind, abgedeckt werden (Günzler 2005). Daneben findet Metamodellierung unter anderem Anwendung z.B. innerhalb der Blechmassivumformung zur Vorhersage von Bauteileigenschaften aus bestehenden Bauteilparametern wie der Geometrie (Wartzack et al. 2017), wie auch im Bereich der Entwicklung von Windenergieanlagen zur Unterstützung der lärmreduzierten Auslegung (Küstner und Wartzack 2015).

4 Implementierungshürden und förderliche Maßnahmen

Die Zuordnung datengetriebener Methoden zu den Phasen der Produktentwicklung kann nur ein erster Schritt bei der Anwendung im Produktentwicklungsprozess sein. Zur erfolgreichen Integration der innovativen neuen Möglichkeiten sind insbesondere die Identifikation genauer Anwendungsfälle in den bestehenden Unternehmensprozessen, sowie die Anpassung (Customization) der Methoden notwendig. Dies gewährleistet, dass die verfügbaren Methoden individuell an die unternehmerischen Bedürfnisse und Problemstellungen angepasst werden, wodurch ein effizienter Einsatz im Unternehmen ermöglicht wird.

Da es sich bei den Methoden im Normalfall lediglich um Algorithmen handelt, die nicht „out-of-the-box“ verwendet werden können, ist dieses Customizing nötig, um Schnittstellen zwischen den bewährten Methoden und den vorliegenden IT- und Organisationsstrukturen im Unternehmen zu schaffen. Zusätzlich kann es nötig werden, die eigentliche Methode den Anwendungsfall anzupassen oder zu erweitern. Durch dieses Customizing ist zusätzlich sichergestellt, dass die Methoden selbst relativ allgemein gehalten werden können, um eine Adaption auf verschiedenste Anwendungsfälle und Problemstellungen zu ermöglichen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass datengetriebene Methoden nicht ohne weiteres erworben und eingesetzt werden können. Stattdessen müssen sie speziell für die im Unternehmen vorliegenden Randbedingungen entwickelt oder zumindest an diese angepasst (customized) werden. Bei diesem Prozess müssen sich Unternehmen einer Vielzahl an technologischen, organisatorischen und sozialen Herausforderungen stellen, welche im Folgenden näher erläutert werden.

4.1 Technologisch und organisatorisch

Der Ausgangspunkt für die Einführung datengetriebener Methoden in Unternehmen sollte nicht die Einstellung von Datenanalysten sein (Davenport 2014), sondern es ist zuerst eine geeignete Strategie sowie ein methodischer Prozess erforderlich. Dabei sollte nicht nur die eigentliche Datenverarbeitung betrachtet, sondern auch die Ziele, Rollen, Verantwortlichkeiten sowie Anwendungsfälle festgelegt werden. Dadurch wird ein systematisches Vorgehen und effizienter Ressourcennutzung ermöglicht (Wilberg et al. 2017). Vor der eigentlichen Datenanalyse müssen als erstes die Daten gesammelt und zentral gespeichert werden. In Unternehmen werden in allen Bereichen Daten erzeugt und oft dezentral abgelegt. Aufgrund einer mangelnden Datentransparenz ist die Beschaffung der erforderlichen Daten oft mit großen Aufwendungen verbunden (Lauer 2010). Daher müssen die Unternehmen für eine Transparenz in ihren Datenstrukturen sorgen und wissen in welchen Abteilungen und mit welchen IT-Tools die Daten erzeugt und gespeichert werden. Außerdem ist möglichst früh im Prozess eine Abschätzung über die nötige Menge der erforderlichen Daten zu treffen. Die Datenbereinigung und -analyse stellt vor allem aufgrund der Charakteristiken der Daten eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Ein Teil der technischen und organisatorischen Herausforderungen resultiert direkt aus den Charakteristiken der Daten selbst. Hier kann das Datenvolumen, die Datenvariabilität, die Datengeschwindigkeit und die Datenrichtigkeit unterschieden werden (L'Heureux et al. 2017). Das Datenvolumen beschreibt die Größe des verfügbaren Datensatzes. Durch die zunehmende Digitalisierung in allen Unternehmensbereichen werden immer mehr Daten erzeugt und deren Analyse zeit- und kostenaufwendiger. Die Datenvarietät bezieht sich auf die strukturelle Heterogenität in den Daten. Diese spiegelt sich in den verschiedenen Datenformaten mit strukturierten, semi-strukturierten und unstrukturierten Informationen wider. Die Schwierigkeit hierbei ist die semi-strukturierten und unstrukturierten Daten in ein strukturiertes Format zu konvertieren, damit sie von einem Algorithmus gelesen und verarbeitet werden können. Die Datengeschwindigkeit charakterisiert die Rate, mit der die Daten erzeugt und verarbeitet werden müssen. Dies ist vor allem herausfordernd, wenn durch Smart Devices kontinuierlich Sensordaten erzeugt und diese in Echtzeit ausgewertet werden müssen. Die Datenrichtigkeit beschreibt die Unzuverlässigkeit von Daten. Daten können unter anderem Vorurteile, Unsicherheiten, Eindrücke, Unwahrheiten sowie fehlende Werte enthalten, welche eine Analyse erschweren. Allgemein muss sichergestellt werden, dass alle erforderlichen Daten mit einer hinreichenden Qualität erzeugt und gespeichert werden. Hierfür müssen die diese durch Menschen oder entsprechende Sensorik an Produkten, Prüfständen oder Produktionsanlagen generiert werden.

Für die Datenvorverarbeitung sind Kenntnisse über Strategien zum Umgang beispielsweise mit fehlenden und fehlerhaften Datenpunkten notwendig. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls und der damit verbundenen Zielsetzung müssen die Merkmale auf die bedeutendsten reduziert und aus einer großen Auswahl an Algorithmen ein geeignetes Modell ausgewählt werden. Für die Analyse selbst ist ein Wissen über Algorithmen und deren Fähigkeiten erforderlich. Eine zentrale Anforderung ist eine ausreichende Speicherkapazität und Rechenleistung, um die Daten zentral abzulegen und

anschließend verarbeiten zu können. Hierfür können entweder eigene Ressourcen eingesetzt oder auch auf Cloud Services zurückgegriffen (Al-Jaroodi und Mohamed 2016). Eine weitere Herausforderung ist die Visualisierung und Interpretation der Analyseergebnisse. Oft werden die Ergebnisse fehlinterpretiert, da die Daten aus anderen Unternehmensbereichen stammen und Kontextinformationen fehlen. Für die Visualisierung und anschließende Interpretation der Ergebnisse sind ebenfalls geeignete Visualisierungstools erforderlich.

4.2 Sozial und organisationspsychologisch

Neben den technischen Aspekten der digitalen Transformation ist eine weitere Hürde nicht technischer, sondern menschlicher Natur (von Hahn 2018). Aus der Methodenforschung ist bekannt, dass viele Methoden in der Produktentwicklung ihr Ziel verfehlen, weil sie schlichtweg nicht eingesetzt werden (Birkhofer et al. 2015). Die Gründe hierfür sind vielfältig, einige Entwickler beispielweise empfinden die Methode als Beschneidung ihrer eigenen Kompetenz (Rohpohl 1983), andere überschätzen den Mehraufwand der Übergangsphase (Braun und Lindemann 2004), die nächsten bezweifeln grundsätzlich die Wirksamkeit des Methodeneinsatzes (Jänsch 2007), und wieder andere orientieren sich an Kultur und Entscheidungsstil des Unternehmens (Lichtenthaler 2008). Ein Schlüsselfaktor für den Erfolg eines neuen digitalen Prozesses ist daher seine Akzeptanz in der Entwicklungsabteilung.

Im Kontext der Einführung neuer Technologien wird Akzeptanz oftmals als das Ausbleiben von Widerstand gegenüber den zu betrachtenden Veränderungen, seltener auch ihre wohlwollende Duldung durch potentielle Nutzer verstanden (Petermann und Scherz 2005). Diese Einordnung greift im vorliegenden Kontext allerdings zu kurz: An vielen Stellen der aktuellen Transformation von einem technologischen Pfad zum anderen ist Akzeptanz darüber hinaus im Sinne aktiver Handlungsbereitschaft und Mitwirkung erforderlich. Auch sind möglicherweise weniger die potentiellen Methodenanwender selbst, sondern Unsicherheit und mangelnde Kommunikation ihrer Vorgesetzten, Datensilos bildende Kollegen oder die Prozesskette torpedierende Nachbarabteilungen das akzeptanzkritische Moment. In technologiegetriebenen Kontexten bieten Akzeptanzmessungen, die das vorhandene Wissen, Verständnis und die grundsätzliche Anwendungsbereitschaft entsprechender Methoden und Tools im Unternehmen bereits vor und während der Methodenentscheidung bzw. ihrer Entwicklung offenlegen, zentrale Ansatzpunkte für eine erfolgreiche Gestaltung der Implementierung.

Für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen ist von entscheidender Bedeutung, dass möglichst viele ihrer Mitarbeiter in der Lage sind zu erkennen, welche Digitalisierungspotentiale im Entwicklungsprozess vorhanden sind. Führungskräfte sollten daher nicht nur die Fähigkeit besitzen, den Mehrwert der Transformation abteilungsübergreifend kommunizieren zu können, sondern zu Beginn der Entscheidung, datengetriebene Methoden einzusetzen, sollten tatsächlich relevante Probleme identifiziert und zum Ausgangspunkt der Methodenauswahl gemacht werden. Mit dem aktuellen Stand der Technik beispielsweise lässt sich datengetrieben hauptsächlich bei routinierten Entscheidungsaufgaben die Effizienz steigern: Im Menschen verankertes Erfahrungswissen soll durch regelbasiertes Wissen ersetzt und entsprechenden Entscheidungen datengestützt getroffen werden. Wird die Formel „weniger lästige Routinearbeiten = mehr kreativer Freiraum“ jedoch vorschnell pauschalisiert, fallen all diejenigen aus dem Raster, die in der Sicherheit einer bestimmten Handlungsroutine erst kreativ werden können. Arbeitsplatzunsicherheit aufgrund einer wahrgenommenen Konkurrenzsituation kann die Folge sein (Lim 1996). Auf Wissens- und Verständnismangel basierende Unsicherheit begünstigt kognitive Verzerrungen (Tversky und Kahnemann 1982) bei der Beurteilung einer Technologie und ihrer Nützlichkeit. Um sich nicht in mangelnder Nutzungsbereitschaft zu manifestieren, müssen diese im Dialog mit dem Mitarbeiter identifiziert und aufgelöst werden.

Die digitale Transformation ist ein Managementthema. Im Vordergrund sollte nicht die Technologie an sich stehen, sondern ihre strategische Nutzung zum Erreichen der Unternehmensziele. Dafür gilt es herauszufinden, welche datengetriebene Lösung besser als die gegenwärtige Lösung sein könnte, und

welche Werkzeuge Mitarbeiter brauchen, um diesen Wandel aktiv mitgestalten zu können. Bereits vermeintliche Kleinigkeiten wie die einheitliche Begriffsverwendung unterstützen die erfolgreiche Strategiekommunikation (Neuberger 1992), und damit das Zielverständnis und Relevanzbewusstsein. Workshops zur Erarbeitung strategischer Use Cases und Szenarien zum Erreichen eines fachlichen Ziels bzw. Mini-Piloten mit datengetriebenen Methoden geben Mitarbeitern Raum zum Kennenlernen bzw. Experimentieren mit der neuen Technologie. Zugleich erlauben sie einen ersten Blick auf bereits im Unternehmen vorhandene und noch benötigte Kompetenzen, die es durch Personalentwicklung oder externe Expertise im Unternehmen aufzubauen gilt.

5 Diskussion & Ausblick

Abschließend lässt sich feststellen, dass Digital Engineering das Rad nicht neu erfindet. Vielmehr ist es als konsequente Weiterentwicklung und Erweiterung der etablierten virtuellen Produktentwicklung um Datennutzung und Datenauswertung zu sehen. Dies bietet insbesondere bei stark interdisziplinären Entwicklungsprozessen entscheidende Vorteile. Die eingangs gestellte Frage, in welcher Phase des Produktentwicklungsprozesses datengetriebenen Methoden eingesetzt werden können, lässt sich nicht abschließend eindeutig beantworten. Wie dargestellt, bieten datengetriebene Methoden ein großes Potential im gesamten Produktentwicklungsprozess, wenngleich sie aktuell hauptsächlich in den früheren Phasen der Entwicklung der nächsten Produktgeneration Anwendung finden. Hier öffnen die Methoden Möglichkeiten, Wissen aus vorangegangenen Entwicklungen zu verwerten. Um eine stetige Weiterverbreitung anzustoßen, ist jedoch die Lösung bestehender Hindernisse nötig. Die Steigerung der Akzeptanz dieser Methoden bei den zukünftigen Anwendern und Entscheidern stellt eine erste Bewältigung aktueller Hemmnisse dar. Zusätzlich kommt dem Datenmanagement in allen Phasen des Produktlebenszyklus zentrale Bedeutung zu. Zentrale Herausforderung ist jedoch die Entwicklung von Strategien, die eine zielgerichtetes Customizing der Methoden zur Anpassung an individuelle Rahmenbedingungen und Bedürfnisse einzelner Unternehmen und Anwender ermöglichen. So können zukünftig weitere Bereiche des Produktentwicklungsprozesses von Customized Digital Engineering Methoden profitieren. Dafür müssen zusätzlich klare rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, um eine Datenauswertung, insbesondere bei der Verarbeitung von Felddaten, zu ermöglichen. Auch eine Integration der Methoden im Kontext des digitalen Zwillings ist von großer Bedeutung. Die weitere Forschung fokussiert sich auf die Verfeinerung des präsentierten Verwendungsschlüssels datengetriebener Methoden und die Erweiterung um explizite Methoden. Außerdem werden gezielt die Hemmnisse der Methodenintegration erforscht, um ein zielgerichtetes Gegensteuern mithilfe entsprechender Maßnahmen zu ermöglichen.

Danksagung

Die vorgestellte Forschungsarbeit ist Teil des bayerischen Forschungsverbundes „FORCuDE@BEV - Customized Digital Engineering für Bayerische KMU“ und gefördert durch die Bayerische Forschungsförderung (BFS).

Für den Inhalt dieser Publikation sind die Autoren verantwortlich. Die Autoren danken der Bayerischen Forschungsförderung (BFS) für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

Al-Jaroodi und Mohamed 2016 AL-JAROODI, JAMEELA; MOHAMED, NADER: Characteristics and requirements of big data analytics applications. *2016 IEEE 2nd International Conference on Collaboration and Internet Computing: IEEE CIC 2016: proceedings: 1-3 November 2016, Pittsburgh, Pennsylvania, USA., 2016, S. 426–432*

- Bertoni et al. 2018 BERTONI, ALESSANDRO; DASARI, SIVA KRISHNA; HALLSTEDT, SOPHIE I.; ANDERSSON, PETTER: MODEL-BASED DECISION SUPPORT FOR VALUE AND SUSTAINABILITY ASSESSMENT: APPLYING MACHINE LEARNING IN AEROSPACE PRODUCT DEVELOPMENT. In: Proceedings of the 15th International Design Conference, ICED15, 2018, S. 2585–2596
- Birkhofer et al. 2005 BIRKHOFFER, H.; JÄNSCH, J.; KLOBERDANZ, H.: AN EXTENSIVE AND DETAILED VIEW OF THE APPLICATION OF DESIGN METHODS AND METHODOLOGY IN INDUSTRY. In: SAMUEL, A.; LEWIS, W. (Hrsg.): *DS 35: Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, ICED*. Melbourne, Australia : Design Society, 2005, S. 276–277
- BMW 2020 BMW: *Den digitalen Wandel gestalten*. URL: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Dossier/digitalisierung.html> - abgerufen am 2020-11-17.
- Braun und Lindemann 2004 BRAUN, THOMAS; LINDEMANN, UDO: Method Adaptation - A way to improve methodical product development. In: *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference*. Dubrovnik, Croatia, 2004
- Chapman et al. 2000 CHAPMAN, PETE; CLINTON, JULIAN; KERBER, RANDY; KHABAZA, THOMAS; REINARTZ, THOMAS; SHEARER, COLIN; WIRTH, RÜDIGER: CRISP-DM 1.0 Step-by-step data mining guide (2000), S. 76
- Davenport und Patil 2012 DAVENPORT, T. H.; PATIL, D. J.: Data Scientist: The Sexiest Job of the 21st Century. In: *Harvard Business Review* (2012)
- Davenport 2014 DAVENPORT, THOMAS H.: *Big data @ work: dispelling the myths, uncovering the opportunities*. Boston, Mass : Harvard Business Review Press, 2014
- Bundesregierung 2018 DIE BUNDESREGIERUNG: *Nationale KI Strategie*, 2018
- Duigou et al. 2012 DUIGOU, JULIEN LE; BERNARD, ALAIN; PERRY, NICOLAS; DELPLACE, JEAN CHARLES: Generic PLM system for SMEs: application to an equipment manufacturer. In: *International Journal of Product Lifecycle Management* Bd. 6 (2012), Nr. 1, S. 51
- Fayyad et al. 1996 FAYYAD, USAMA; PIATETSKY-SHAPIRO, GREGORY; SMYTH, PADHRAIC: From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. In: *AI Magazine* Bd. 17 (1996), Nr. 3, S. 37–37
- Grimm und Gentemann 2020 GRIMM, F.; GENTEMANN, L.: *Digital Engineering - Agile Produktentwicklung in der deutschen Industrie* : Bitkom Research, 2020
- Günzler 2005 GÜNZLER, ANDREAS ROBERT: Integrationskonzepte in der modellbasierten Produktentwicklung. München, Technische Universität München, 2005
- von Hahn 2018 VON HAHN, NANNE: Die digitale Zukunft wird nicht von alleine gut – Der essenziell menschliche Faktor der Digitalisierung und Führung in digitaler Transformation. In: CIESIELSKI, M. A.; SCHUTZ, T. (Hrsg.): *Digitale Führungskräfteentwicklung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2018
- Item 2020 ITEM: *Wie digital ist der Maschinenbau 2020?*, 2020
- Jänsch 2007 JÄNSCH, JUDITH: *Akzeptanz und Anwendung von Konstruktionsmethoden im industriellen Einsatz: Analyse und Empfehlungen aus kognitionswissenschaftlicher Sicht, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1, Konstruktionstechnik/Maschinenelemente*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl, 2007

- Klement et al. 2018 KLEMENT, SEBASTIAN; SASKE, BERNHARD; ARNDT, STEPHAN; STELZER, RALPH: Prozessmodell für Datenanalysen in der Produktentwicklung. In: *16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik*. Bayreuth, 2018, S. 168–179
- Künzel et al. 2016 KÜNZEL, MATTHIAS; SCHULZ, JENS; GABRIEL, PETER: *Engineering 4.0 Grundzüge eines Zukunftsmodells*, 2016
- Küstner und Wartzack 2015 KÜSTNER, CHRISTOF; WARTZACK, SANDRO: The realization of an engineering assistance system for the development of noise-reduced rotating machines. In: WEBER, C.; HUSUNG, S.; CANTAMESE, M.; CASCINI, G.; MARJANOVIC, D.; GRAZIOSI, S. (Hrsg.): *DS 80-4 Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)*. Glasgow : Design Society, 2015
- Lauer 2010 LAUER, WOLFGANG M.: *Integrative Dokumenten- und Prozessbeschreibung in dynamischen Produktentwicklungsprozessen, Produktentwicklung*. München : Verl. Dr. Hut, 2010
- L'Heureux et al. 2017 L'HEUREUX, ALEXANDRA; GROLINGER, KATARINA; ELYAMANY, HANY F.; CAPRETZ, MIRIAM A. M.: Machine Learning With Big Data: Challenges and Approaches. In: *IEEE Access* Bd. 5 (2017), S. 7776–7797
- Lichtenthaler 2008 LICHTENTHALER, ECKHARD: Methoden der Technologie-Früherkennung und Kriterien zu ihrer Auswahl. In: MÖHRLE, M. G.; ISENMANN, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping, VDI-Buch*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008
- Lim 1996 LIM, VIVIEN K. G.: Job Insecurity and Its Outcomes: Moderating Effects of Work-Based and Nonwork-Based Social Support. In: *Human Relations* Bd. 49 (1996), Nr. 2, S. 171–194
- Mariscal et al. 2010 MARISCAL, GONZALO; MARBÁN, ÓSCAR; FERNÁNDEZ, COVADONGA: A survey of data mining and knowledge discovery process models and methodologies. In: *The Knowledge Engineering Review* Bd. 25 (2010), Nr. 2, S. 137–166
- Mohr 2002 MOHR, H.: Wissensnetze heute. In: BEYRER, K.; ANDRITZKY, M. (Hrsg.): *Das Netz: Sinn und Sinnlichkeit vernetzter Systeme*. Heidelberg : Braus, 2002, S. 125–129
- Montáns et al. 2019 MONTÁNS, FRANCISCO J.; CHINESTA, FRANCISCO; GÓMEZ-BOMBARELLI, RAFAEL; KUTZ, J. NATHAN: Data-driven modeling and learning in science and engineering. In: *Comptes Rendus Mécanique* Bd. 347 (2019), Nr. 11, S. 845–855
- Neuberger 1992 NEUBERGER, OSWALD; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALORDNUNG (Hrsg.): *Miteinander arbeiten – miteinander reden*. 12. Aufl. München, 1992
- Pahl et al. 2013 PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2013
- Petermann und Scherz 2005 PETERMANN, THOMAS; SCHERZ, CONSTANCE: TA und (Technik-)Akzeptanz(-forschung). In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* Bd. 14 (2005), Nr. 3, S. 45–53
- Rohpohl 1983 ROHPOHL, GÜNTHER: Konstruktionswissenschaft und allgemeine Techniklehre. In: HUBKA, V.; ADREASEN, MOGENS M. (Hrsg.): *Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 1983*, 1983, S. 327–336
- Schenk 2015 SCHENK, M. (Hrsg.): *Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation, VDI-Buch* : Springer Vieweg, 2015

- Schumann et al. 2011 SCHUMANN, MARCO; SCHENK, MICHAEL; SCHMUCKER, ULRICH; SAAKE, GUNTER: Digital Engineering - Herausforderungen, Ziele und Lösungsbeispiele. In: *Digital Engineering*. Magdeburg, 2011
- Shabestari et al. 2019 SHABESTARI, SEYED SINA; HERZOG, MICHAEL; BENDER, BEATE: A Survey on the Applications of Machine Learning in the Early Phases of Product Development. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design* Bd. 1 (2019), Nr. 1, S. 2437–2446
- Stack Exchange 2020 artificial intelligence - Distinction between AI, ML, Neural Networks, Deep learning and Data mining. URL <https://softwareengineering.stackexchange.com/questions/366996/distinction-between-ai-ml-neural-networks-deep-learning-and-data-mining>. - abgerufen am 2020-11-17. — Software Engineering Stack Exchange
- Tan et al. 2006 TAN, PANG-NING; STEINBACH, MICHAEL; KUMAR, VIPIN: *Introduction to data mining*. 1st ed. Boston : Pearson Addison Wesley, 2006
- Tversky und Kahneman 1982 TVERSKY, AMOS; KAHNEMAN, DANIEL: Causal schemas in judgments under uncertainty. In: KAHNEMAN, D.; SLOVIC, P.; TVERSKY, A. (Hrsg.): *Judgment under Uncertainty*. 1. Aufl. : Cambridge University Press, 1982 S. 117–128
- Vajna et al. 2018 VAJNA, SÁNDOR; WEBER, CHRISTIAN; ZEMAN, KLAUS; HEHENBERGER, PETER; GERHARD, DETLEF; WARTZACK, SANDRO: *CAX für Ingenieure: eine praxisbezogene Einführung*. 3., vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Germany : Springer Vieweg, 2018
- Wartzack et al. 2017 WARTZACK, SANDRO; SAUER, CHRISTOPHER; KÜSTNER, CHRISTOF: What does Design for Production mean? – From Design Guidelines to Self-learning Engineering Workbenches. In: MEYER, A.; SCHIRMEYER, R.; VAJNA, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Workshop on Integrated Design Engineering*. Magdeburg, Germany, 2017, S. 93–102
- Wilberg et al. 2017 WILBERG, JULIAN; TRIEP, ISABELL; HOLLAUER, CHRISTOPH; OMER, MAYADA: Big Data in Product Development : Need for a Data Strategy. In: PICMET; KOCAOGLU, D. F.; PORTLAND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANAGEMENT OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY; PICMET (Hrsg.): *Technology management for the interconnected world PICMET '17: Portland International Conference on Management of Engineering and Technology*, 2017
- Witten et al. 2017 WITTEN, IAN H.; FRANK, EIBE; HALL, MARK A.: *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. Fourth Edition. Amsterdam : Elsevier, 2017

Modellbasierte Validierung der Prüfstandsdynamik zur Erprobung von Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge mithilfe eines digitalen Zwillings

Model-based validation of test rig dynamics for testing components of electrified powertrains using a digital twin

Lukas Bauer¹, Manuel Bauer¹, Markus Kley¹

¹Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik, Aalen
Lukas.Bauer@hs-aalen.de

Abstract (deutsch): In der Fahrzeugtechnik ist ein zunehmender Trend zur Elektromobilität erkennbar. Diese Entwicklung bringt neben neuartigen Potentialen auch Herausforderungen mit sich. So müssen sämtliche neuen Funktionen mithilfe von Versuchen abgesichert werden. Neben klassischen Straßenversuchen erfolgt eine Verlagerung zu Prüfstandsversuchen. Die erhöhte Dynamik elektrischer Maschinen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren erfordert dabei auch eine höhere Dynamik der Prüfstandstechnik. Aufgrund der gesteigerten Komplexität der Systeme sowie der sich wandelnden Einsatzbedingungen ist bestehendes Erfahrungswissen aus verbrennungsmotorischen Antriebssträngen nur noch bedingt übertragbar. Geplante Versuche können das dynamische Potential der Prüfstände im Betrieb überschreiten. Zur Validierung geplanter Testfälle beschreibt diese Arbeit ein digitales Abbild eines Antriebsstrangprüfstandes. Dieser bildet das dynamische Verhalten des realen Prüfstands ab und ermöglicht eine frühzeitige Aussage über die Auslastung der Prüftechnik für geplante Versuche. Dadurch können Risiken und Kosten in der Durchführung gemindert werden. Durch den Abgleich mit einfachen Versuchen des realen Systems wird Potential zur weiteren Optimierung aufgezeigt.

Keywords (deutsch):

Nachhaltige Erprobung, digitaler Prüfstand, Modellbildung, Lastkollektiv, Elektromobilität

Abstract (english): An increasing trend towards electromobility can be seen in vehicle technology. This development brings innovative potentials as well as challenges. For example, all new functions must be validated by means of tests. In addition to classic road tests, there is a shift towards test bench tests. The increased dynamics of electric machines compared to combustion engines also requires a higher dynamic of the test bench technology. Due to the increased complexity of the systems as well as the changing operating conditions, existing knowledge from combustion engine drive trains can only be transferred to a limited extent. Planned tests can exceed the dynamic potential of the test benches during operation. For the validation of planned test cases this paper describes a digital model of a powertrain test bench. It reproduces the dynamic behaviour of the real test bench and allows an early statement about the utilisation of the test technology for planned investigations. As a result, risks and costs in the implementation can be reduced. By comparison with simple tests of the real system, potential for further optimisation is shown.

Keywords (english):

Sustainable testing, digital test bench, modelling, load cycle, electromobility

1 Motivation und Problemstellung

In der Fahrzeugtechnik ist ein Trend zur zunehmenden Verbreitung der Elektrifizierung und damit eine Steigerung der Antriebsstrangkomplexität (siehe Bild 1) erkennbar. Dies bringt neben den elektrischen Traktionsantrieben weitere elektrifizierte Antriebe mit sich. Die elektrischen Antriebe bieten ein größeres Potential zur automatisierten Steuerung als verbrennungsmotorische oder hydraulische Antriebe. So können durch die elektrifizierte Lenkung autonome Fahrfunktionen umgesetzt werden. Diese Potentiale bringen neben den Vorteilen auch eine Steigerung der Komplexität in der Erprobung mit sich. So besteht die Notwendigkeit zur Absicherung sämtlicher Funktionen durch entsprechende Versuche. Zur vollständigen Absicherung autonomer Systeme sind bis zu einer Milliarde zu fahrenden Kilometern nötig (Beine und Rasche2018).

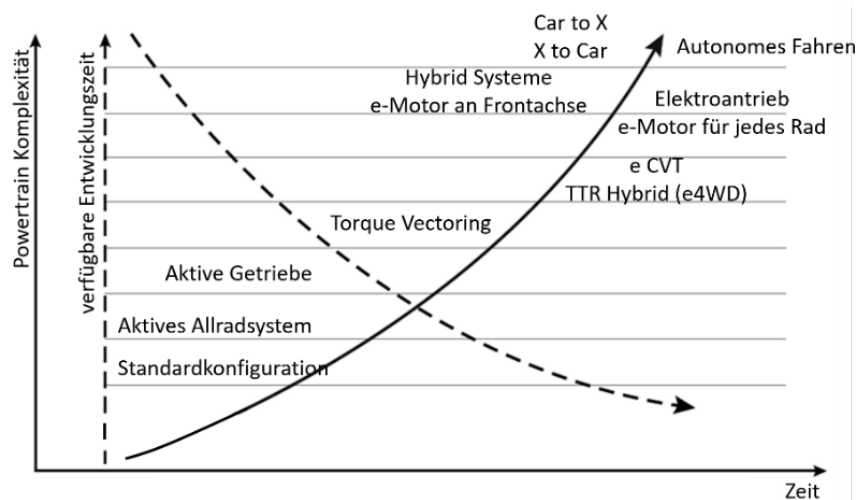


Bild 1: Entwicklung der Komplexität nach Paulweber und Lebert (2014)

Die elektrischen Traktionsantriebe weisen ein wesentlich dynamischeres Betriebsverhalten in einem deutlich elastischeren Betriebsbereich auf, als Verbrennungsmotoren.

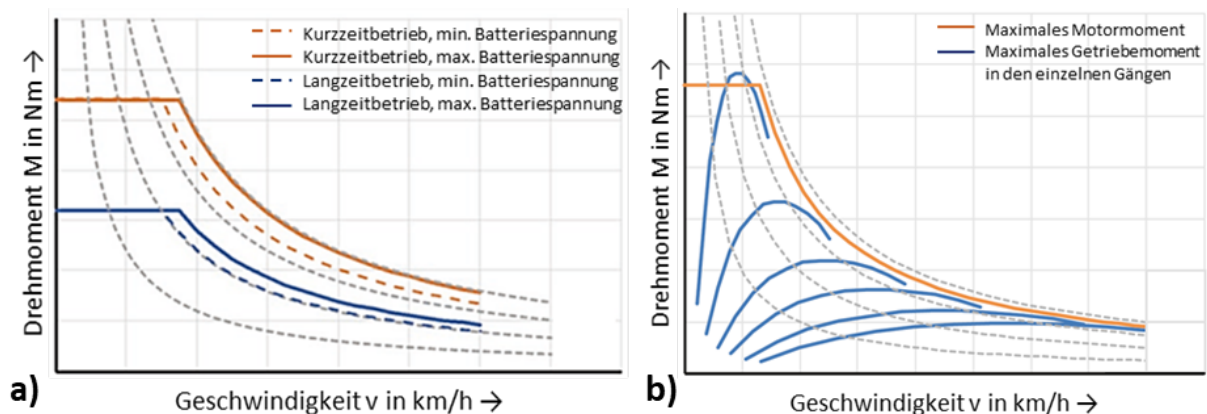


Bild 2: Qualitativer Vergleich des Drehmomentverhaltens von a) E-Motoren und b) Verbrennungsmotoren nach Doppelbauer (2020)

Bereits bei niedrigen Drehzahlen ist das abgegebene Drehmoment annähernd maximal verfügbar. Das Drehmoment bleibt bis zu hohen Drehzahlen erhalten. Bisher konnten sich im Gegensatz zu Verbrennungsantrieben, einstufige Getriebe ohne Kupplung mit starrer Übersetzung durchsetzen (siehe Bild 2). In der Umsetzung von schaltbaren Getriebe ist weiteres Potential zur Steigerung der Energieeffizienz erkennbar (Küçükay 2012). So ermöglicht die hohe Dynamik elektrischer Motoren

einen Gangwechsel, ohne Kupplung, durch die externe Synchronisierung der Drehzahl. Diese hohe Dynamik muss zur Absicherung der Eigenschaften jedoch am Prüfstand abgebildet werden. Vor allem bei bestehenden Prüfständen, die für die Erprobung konventioneller Antriebsstränge ausgelegt sind, herrscht eine Unsicherheit über die gegebene Dynamik vor. Bezüglich der Machbarkeit geplanter Prüfungen bringt dies Risiken mit sich. Eine zu späte Kenntnis über die gegebene Dynamik kann zu Verzögerungen vor dem Testbeginn oder eine nicht durchführbare Entwicklung und Umsetzung von Prüflingsaufbauten führen. Dies ist kosten- und ressourcenintensiv.

2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Kostenreduktion sowie die Risikoreduktion in der Erprobung von Antriebsstrangkomponenten auf dafür vorgesehenen Prüfständen (siehe Bild 3).

Diese Reduktionen erfolgen durch die Bewertung von Lastkollektiven in der Erprobung hinsichtlich ihrer Auslastung der Prüfstandsdynamik. Hierfür sollen Probleme in der Umsetzbarkeit von Prüfläufen detektiert werden. Eine ausführliche Kenntnis zum Prüfstand sowie seines Verhaltens ist hierfür eine wesentliche Grundlage.

Zu diesem Zweck wird ein digitaler Zwilling eines gegebenen Antriebsstrangprüfstandes aufgebaut. Ziel des Vorhabens ist die Modellbildung und Parametrisierung sowie die Validierung des Modells anhand des gegebenen Systems. Das Modell soll die physikalischen Grenzen, insbesondere die Dynamik, abbilden und mithilfe des realen Prüfstandes validiert werden. Der geplante Aufbau des Prüflings kann modelliert und in den digitalen Zwilling integriert werden. Mithilfe dieses Gesamtmodells ist eine Simulation und Validierung des Testvorhabens durchführbar. Aus dem Modell kann weiteres Optimierungspotentiale abgeleitet werden.



Bild 3: Darstellung der Projektziele

Das mittelfristige Ziel ist die Optimierung des Modells durch eine umfangreichere Abbildung der Realität. Langfristig ist eine Methode zu entwickeln, mit der sich die Modellbildung auf weitere Prüfstände übertragen lässt.

Des Weiteren ermöglicht der digitale Prüfstand das Erreichen von Nebenzielen. Beispielhaft sei die Anwendung des Modells zur Validierung neuer Entwicklungen genannt. So beschreibt Stütz et al. (2019) einen Ansatz zur dynamischen Lastkollektivermittlung am Prüfstand sowie den Bedarf einer Vorabvalidierung anhand eines Modells.

3 Erprobung in der Fahrzeugtechnik

Eine wesentliche Aufgabe der Fahrzeugtechnik ist die Erprobung von Komponenten und (Teil-) Systemen. Sie dient zur Absicherung der geforderten Produkteigenschaften sowie zum Auffinden möglichst vieler Fehler in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses (Baumann 2006).

3.1 Erprobung in der Antriebstechnik

In der Erprobung von Antriebssträngen werden drei Bereiche unterschieden. Dabei handelt es sich um die Betriebsfestigkeit, die Fahrmanöver und die Noise Vibration Harshness Untersuchung (NVH). Den größten Teil nimmt dabei die Erprobung der Betriebsfestigkeit ein. Dabei werden möglichst

realitätsnahe Lastzyklen eines Systems durchfahren, um dessen Lebensdauer zu untersuchen. Bei den Fahrmanövern werden reale Fahrscenarien des Systems, die sogenannten Nachfahrtsignale, gebildet. Dabei liegt der Fokus zum Beispiel auf der Untersuchung der Fahrbarkeit, des Verbrauchs und den Emissionen. Die NVH-Erprobung untersucht das Geräusch- und Vibrationsverhalten des Prüflings. (Dohmen et al. 2009)

Insbesondere für die Erprobung der Betriebsfestigkeit und die Erprobung mit Fahrmanövern werden Lastkollektive benötigt. Lastkollektive sind die wesentliche Grundlage zur Beschreibung von Betriebslasten im Betrieb des Systems. Sie werden neben der Auslegung vor allem auch zur Absicherung der Produkteigenschaften und -funktionen eingesetzt. In der Erprobung von Antriebsstrangkomponenten bestehen die Lastkollektive insbesondere aus Blockprogrammen mit einer Drehzahl- und Drehmomentvorgabe über die Zeit. Die Ermittlung der Lastkollektive erfolgt aus Rohdaten, die im Betrieb gemessen oder durch Simulationen rechnerisch ermittelt werden. Für die Auslegung und Betriebsfestigkeit werden die Rohdaten in der Regel durch die Klassierung auf die Häufigkeitsverteilung der Lasten reduziert. (Eckstein 2017, Maisch 2007)

Für eine fahrmanöverbasierte Erprobung, zum Beispiel zur Absicherung von Funktionen, ist diese Reduktion nicht zielführend. Es werden stattdessen relevante Betriebszustände bzw. Zustandsänderungen aus den Rohdaten ermittelt. Dabei kann es sich beispielsweise um Schaltvorgänge zur Abstimmung von Getriebesteuergeräten handeln.

3.2 Erprobung im Produktentstehungsprozess

Zur Beschreibung des Produktentstehungsprozesses bietet sich insbesondere das V-Modell an (siehe Bild 4). Dabei können bereits im linken Teil des V-Modells Simulationen durchgeführt werden. Diese ermöglichen Tests ohne physikalischen Prüfling. (Stütz et al. 2019)

Mit zunehmender Entwicklungszeit nimmt die Anzahl der verfügbaren physischen Prüflinge zu. Dies ermöglicht die zunehmende, reale Erprobung im rechten Teil des V-Modells. Mit zunehmender Anzahl an verfügbaren Prüflingen steigt der Umfang der getesteten Systeme, beispielsweise von einzelnen Komponenten zum vollständigen Antriebsstrang. Letztendlich erfolgt der Test des vollständigen Fahrzeugs auf der Straße. Eventuell nötige Änderungen werden iterativ in Optimierungsschleifen umgesetzt. (Dohmen et al. 2009)

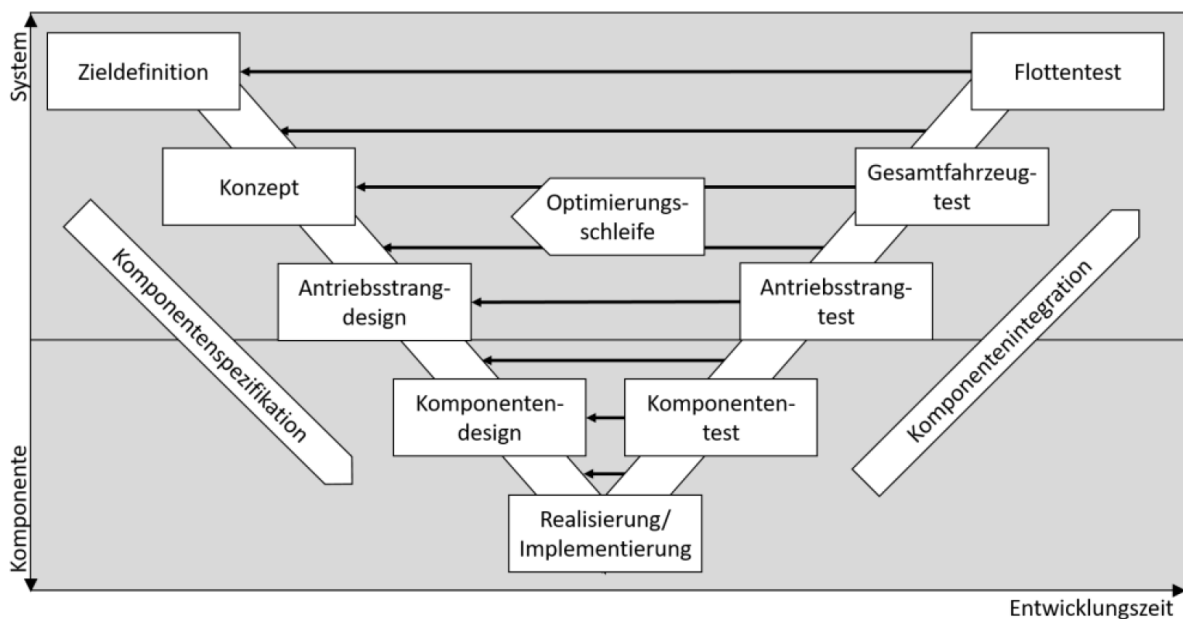


Bild 4: V-Modell nach Stütz et al. (2019), basierend auf Dohmen et al. (2009) und Paulweber und Lebert (2014)

Zur vollständigen Absicherung von Produkteigenschaften wird ein Mindestwert an zu fahrenden Kilometern benötigt. Typische Werte für das Beispiel des autonomen Fahrens reichen dabei von einer Million Kilometer zur Absicherung einer Funktion bis hin zu einer Milliarde Kilometer zur vollständigen Absicherung des Systems. Eine entsprechende Absicherung durch Fahrten auf der Straße ist in der verfügbaren Entwicklungszeit kaum umsetzbar. Ein Verfahren mit steigender Relevanz ist deshalb die Erprobung auf dem Prüfstand (vgl. Road to Rig). (Beine und Rasche 2018)

Aktuell ist außerdem ein zunehmender Trend der weiteren Verlagerung von Straße und Prüfstand auf den Rechner erkennbar (vgl. Road to Rig to Desktop). Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass zur Absicherung der geforderten Produkteigenschaften die physische Erprobung auch zukünftig erforderlich sein wird (Dismon 2017, Küçükay 2018). Sie ist dabei nicht als Konkurrenz zur Simulation zu sehen, sondern als Erweiterung synergetisch anzuwenden, um optimierte Ergebnisse zu erzielen (Guggenmos et al. 2015). Willmerding und Häckh (2017) beschreiben beispielweise die Kombination von Fahrzeugsimulation und Prüfstandssteuerung zur Abbildung hochdynamischer Fahrzyklen auf Prüfständen. Das verwendete Tool winEVA ermöglicht somit realitätsnähere Ergebnisse durch Fahrmanöverbasierte Testszenarien. Die Absicherung auf dem Prüfstand lässt sich durch den Einsatz derartiger numerischer Werkzeuge optimieren.

3.3 Modellbasierte Erprobung

Ein wesentlicher Bestandteil des simulativen Testens sind virtuelle Modelle konzipierter oder gegebener Systeme. Im Kontext der Fahrzeugerprobung werden Simulationen bisher insbesondere aus Sicht des Fahrzeugentwicklers, also mit dem Fokus auf das Fahrzeug, eingesetzt. Entsprechende Anwendungen zur Antriebsstrangsimulation, zur Kalibrierung von Steuergeräten oder zur Betriebsfestigkeitsrechnung sind kommerziell erhältlich und deren Verwendung ist gängige Praxis. Simulationen aus Sicht des Prüfstandanwenders, mit Fokus auf den Prüfstand beziehungsweise dessen Modellbildung sind in der Fachliteratur spärlich vorhanden. Entsprechende Erkenntnisse sind im Folgenden aufgeführt.

Die Entwicklung eines digitalen Zwillings für einen Achsprüfstand in Form eines Mehrkörpermodells wird von Speckert et al. (2005) und Speckert et al. (2006) beschrieben. Der modellierte Prüfstand besteht aus zwei Hexapoden, der Hydraulik, der Regelung sowie Schnittstellen für den Prüfling. Die Schnittstellen übertragen rotatorische und translatorische Bewegungen an den Prüfling. Mit dem modular austauschbaren Prüfling ergibt sich ein Gesamtmodell. Dieses wird rein qualitativ validiert. Dabei konnte das Verhalten des realen Prüfstands hinreichend nachgebildet werden. Die grundsätzliche Umsetzbarkeit digitaler Zwillinge von Prüfständen kann damit als gegeben angesehen werden. Als Weiterentwicklung beschreibt Landersheim et al. (2018) einen digitalen Zwilling für den Prüfstand eines mechatronischen Wankstabilisators. Die Umsetzung erfolgt mit einem Whitebox-Modell, also mit ausführlicher Kenntnis über die inneren Vorgänge. Der Prüfstand besteht aus zwei servohydraulischen Aktoren, der Hydraulik, der Regelung sowie den Schnittstellen zum Prüfling. Über die Schnittstellen wird eine translatorische Bewegung an das Prüflingsmodell übertragen. Die Validierung des modellierten Systems erfolgt quantitativ. Die Abweichung zwischen modelliertem und realem System wurde anhand verschiedener Faktoren untersucht. Dabei wurde stets ein Unterschied von unter 3 % festgestellt. Des Weiteren wird das Potential von Machine Learning zur Optimierung des Modells in Ausblick gestellt. Pillas (2017) beschreibt die Verwendung eines einfachen, stark abstrahierten Modells eines Antriebsprüfstandes zur Optimierung von Fahrmanövern auf Prüfständen. Das Modell wird in einer Co-Simulation mit verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugmodellen betrieben. Der Fokus liegt dabei vor allem auf dem Fahrzeugmodell.

Aufgrund der gesteigerten Komplexität der Systeme sowie der sich wandelnden Einsatzbedingungen ist bestehendes Erfahrungswissen aus verbrennungsmotorischen Antriebssträngen nur noch bedingt übertragbar. Dies führt sowohl zu einer Unsicherheit in der Ermittlung von Lastkollektiven sowie zu einer Unsicherheit bezüglich der Übertragbarkeit auf den Prüfstand. Für Untersuchungen zur verfügbaren Dynamik von Antriebsstrangprüfständen ist die Arbeit an entsprechenden Modellen erforderlich.

4 Konzept

Das vorliegende Konzept dient insbesondere zur Überprüfung bzw. Optimierung entwickelter Lastkollektive hinsichtlich ihrer Kompatibilität zum Prüfstand (siehe Bild 5). Die ermittelten Kollektive sollen dabei auf dem digitalen Prüfstand abgefahren werden. Dabei wird das Verhalten des realen Prüfstandes nachgebildet. Anhand von wesentlichen, simulierten Parametern kann die Auslastung der real gegebenen Kapazität bewertet werden. Bei ausreichend vorhandener Kapazität kann das Lastkollektiv auf dem Prüfstand abgefahren werden. Bei nicht ausreichender oder kritischer Kapazität kann das Kollektiv in einer weiteren Entwicklungsschleife angepasst und nochmals auf dem digitalen Prüfstand überprüft werden.

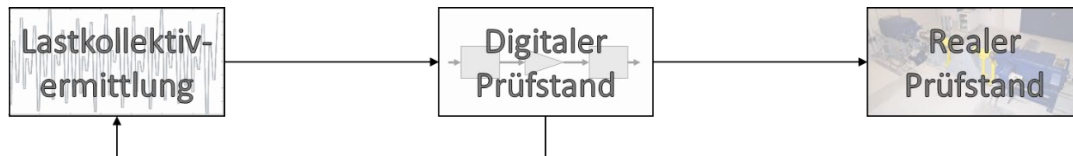


Bild 5: Einordnung des digitalen Prüfstandes in das Konzept

Bei dem digitalen Prüfstand handelt es sich um ein physikalisches Modell des gegebenen Systems. Dieses soll die Eigenschaften möglichst real abbilden. Als Input des Systems dient das zu überprüfende Lastkollektiv sowie das Modell des Prüflings. Aus diesem wird der Verlauf von wesentlichen Daten errechnet. Dabei handelt es sich vor allem um die jeweiligen Drehzahlen, Drehmomente, Leistungen, Spannungen und Ströme. Die Bewertung der Dynamik erfolgt dabei vor allem anhand der Drehzahl. Als weiteres Kriterium dient außerdem das Drehmoment.

5 Modellbildung

Für die Modellbildung wird der gegebene Prüfstand als Vorbild herangezogen. Es erfolgt eine Einteilung in Untersysteme. Die Einteilung ist in Bild 6 ersichtlich.

Bei den Untersystemen handelt es sich um die Gleichstrommaschinen GSM1 als Antrieb und GSM2 als Abtrieb, dem Prüfling, dem Messsystem sowie der Steuerung. Die Untersysteme werden im Folgenden detailliert beschrieben.

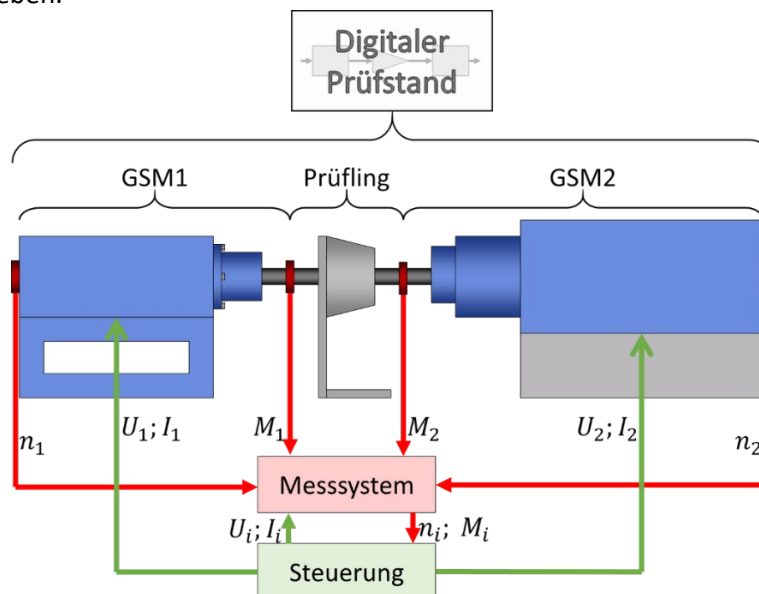


Bild 6: Unterteilung und Signalfluss im Modell mit Messsignalen (rote Verbindungen) und Steuersignalen (grüne Verbindungen)

5.1 Steuerung und Messsystem

Bei der Steuerung des Prüfstandes handelt es sich um ein eigens entwickeltes System. Sie ist unterteilt in die Sollwertvorgabe sowie die Regelung für die beiden elektrischen Maschinen. Die Sollwertvorgabe verarbeitet das Lastkollektiv und gibt die geforderten Drehzahlen und Drehmomente an die Regelungen der elektrischen Maschinen weiter. Bei den Regelungen handelt es sich um einfache Regelkreise, die auf das reale Systemverhalten abgestimmt wurden. Die zu regelnden Parameter sind die Ankerspannung sowie die prozentuale Feldschwächung beider elektrischen Maschinen.

Das Messsystem des realen Prüfstandes wird unterteilt in einen mechanischen, elektrischen und thermischen Teil. Der mechanische Teil besteht im Wesentlichen aus den Drehzahlmessern sowie den Drehmomentmesswellen an der Ausgangswelle der Gleichstrommaschinen. Die elektrischen Messwerte Strom und Spannung werden direkt aus dem Frequenzumrichter ermittelt. Die thermischen Messwerte können durch frei positionierbare Thermoelemente ermittelt werden. Da in der vorliegenden Arbeit noch kein thermisches Modell gebildet wird, werden diese vorerst nicht weiter betrachtet.

Das modellierte Messsystem verarbeitet die berechneten, mechanischen und elektrischen Signale. Dabei handelt es sich insbesondere um Drehzahlen, Drehmomente, Spannungen und Ströme. Eventuelle Messfehler des Systems, insbesondere Nullpunkt- und Empfindlichkeitsabweichungen können durch eine Nachbearbeitung des Signals nachgebildet werden. Dies erfolgt beispielsweise durch Addition mit einem Offset oder Multiplikation mit einem Korrekturwert zur Modifikation der Empfindlichkeit. Dadurch kann der Einfluss möglicher Fehler auf das System untersucht werden. Weitere Werte, wie die Leistung oder der Wirkungsgrad, werden im Nachgang berechnet.

5.2 Gleichstrommaschinen

Der An- und Abtrieb des Prüfstandes erfolgt mithilfe von zwei fremderregten Gleichstrommotoren. Diese ermöglichen neben der Drehzahlregelung mit der Ankerspannung auch eine Regelung über die prozentuale Feldschwächung $\Phi\%$. Der Antrieb (GSM1) ist vor allem auf relativ hohe Drehzahlen ausgelegt, während der Abtrieb (GSM2) auf relativ hohe Drehmomente ausgelegt ist. Der Antrieb verfügt über ein Anpassgetriebe (APG1) mit fester Übersetzung $i_1=3,2$. Der Abtrieb verfügt über ein schaltbares Anpassgetriebe (APG2) mit 2 Übersetzungen $i_{2,1}=1$ und $i_{2,2}=3,47$. Das Drehmoment ab Abtrieb des APG2 ist auf maximal 3000 Nm begrenzt. Die wesentlichen Kennwerte der Motoren sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Kennwerte der elektrischen Maschinen

Konfiguration	GSM1		GSM2	
	ohne APG	mit APG1	APG2, Stufe 1	APG2, Stufe 2
Leistung [kW]	300		361	
Übersetzung	1	3,2	1	3,47
Nenn Drehzahl [min^{-1}]	1540	4940	840	2915
Maximaldrehzahl [min^{-1}]	2500	8000	2305	8000
Nennmoment [Nm]	1856	580	3000	1610

Die Modellbildung erfolgt über ein physikalisch beschriebenes Whitebox-Modell, also mit ausführlicher Kenntnis über die inneren Vorgänge. Die Systeme werden dabei jeweils in Teilsysteme gegliedert. Die Unterteilung ist in Bild 7 dargestellt. Die Berechnung erfolgt nach Hagl (2015). Die Massenträgheit der Maschinen wird für die Beschleunigungsvorgänge berücksichtigt. Daraus ergibt sich die Aufteilung des induzierten Drehmoments in das Beschleunigungsdrehmoment und das abgeführte Drehmoment.

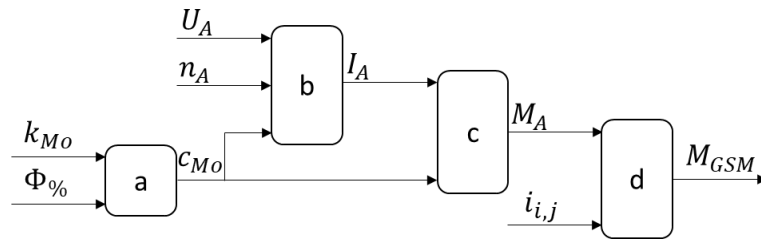


Bild 7: Unterteilung der Elektrischen Maschinen: a) Motorkonstante; b) Ankerstrom; c) Ankerdrehmoment; d) Ausgangsdrehmoment

5.3 Schnittstelle zum Prüfling

Wie im realen Prüfstand muss im Modell der Einbau diverser Prüflinge möglich sein. Der Einbau muss unabhängig und abgekapselt vom restlichen System erfolgen, d. h. es darf keine Notwendigkeit zur Modifikation anderer Teilsysteme bestehen. Entsprechend liegt ein Fokus auf möglichst wenigen und simplen Schnittstellen. Diese werden durch bidirektionale Signale für rotatorische Eigenschaften umgesetzt. Die rotatorischen Größen Winkelgeschwindigkeit und Drehmoment werden richtungsunabhängig zwischen zwei Teilsystemen übertragen. Weitere relevante Größen, wie die Leistung, lassen sich daraus ableiten. Sowohl die Antriebs- als auch die Abtriebsmaschine geben ein solches Signal aus. Diese können als digitale Gelenkwellen angesehen werden. Je nach Detaillierungsgrad können sämtliche Massenträgheiten, Wirkungsgrade, Elastizitäten und resultierende Torsionen, auch von Einzelkomponenten, im Prüflingsmodell abgebildet werden. Für schaltbare Getriebe können Schaltsignale aus der Sollwertvorgabe übernommen werden. Mit einer entsprechenden Detaillierung ist außerdem der Schaltvorgang sowie die dazugehörige Aktuatorik modellierbar. Damit wird die Vorhersage von Schaltzeiten im Modell, vor allem im Kontext des gesamten Prüfaufbaus, ermöglicht.

Durch eine direkte Verbindung des Antriebssignal mit dem Abtriebssignal kann ein Betrieb ohne Prüfling erfolgen. Zur Abbildung der Gelenkwelle kann auf das Signal zusätzlich ein entsprechendes Massenträgheitsmoment angewendet werden.

6 Validierung

Die Validierung des digitalen Prüfstandes erfolgt mithilfe von Versuchen mit dem real gegebenen Prüfstand.

Um den Einfluss weiterer Systeme zu mindern erfolgt die Validierung mit Versuchen ohne Prüfling. Dafür werden die elektrischen Maschinen direkt mit einer Gleichlaufgelenkwelle verbunden. Der Versuchsaufbau ist in Bild 8 dargestellt.

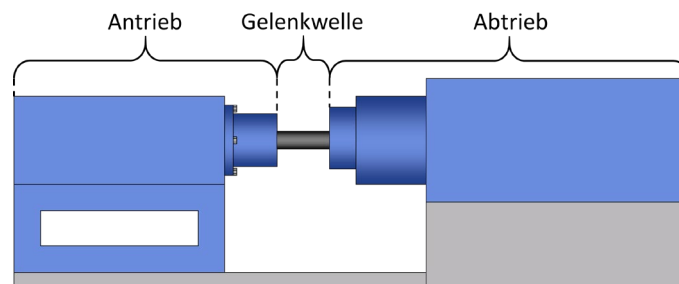


Bild 8: Versuchsaufbau für die Versuche am realen Prüfstand

Das verwendete Kollektiv besteht aus quasizufallsverteilen Punkten im Kennfeld der Antriebsmaschine. Ein Ausschnitt des Kollektivs in Form von Drehmoment und Drehzahl ist in Bild 9 dargestellt. Es wird unterschieden in dynamisches Anfahren und statisches Halten der Punkte. Die Zeit zum dynamischen Anfahren (siehe Bild 9, orange Färbung) wird in Abhängigkeit der zu erwartenden

Winkelbeschleunigung gewählt. Die Zeitdauer des statischen Haltens (siehe Bild 9, grüne Färbung) beträgt 30 Sekunden.

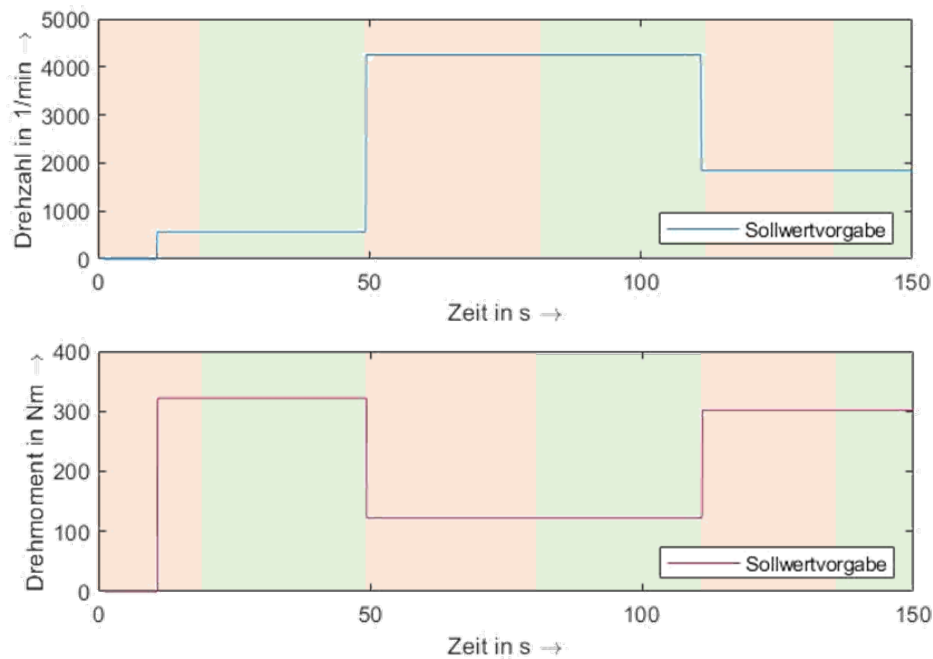


Bild 9: Verlauf der Drehzahl und des Drehmoments im Lastkollektiv sowie Einteilung in dynamisches Anfahren (orange) und statisches Halten (grün)

Zur Vergleichbarkeit wird dasselbe Kollektiv am realen Prüfstand sowie am digitalen Zwilling abgefahren. Die ermittelten, simulierten und gemessenen Daten aus den Versuchen im Vergleich zum Sollwert sind in Bild 10 dargestellt.

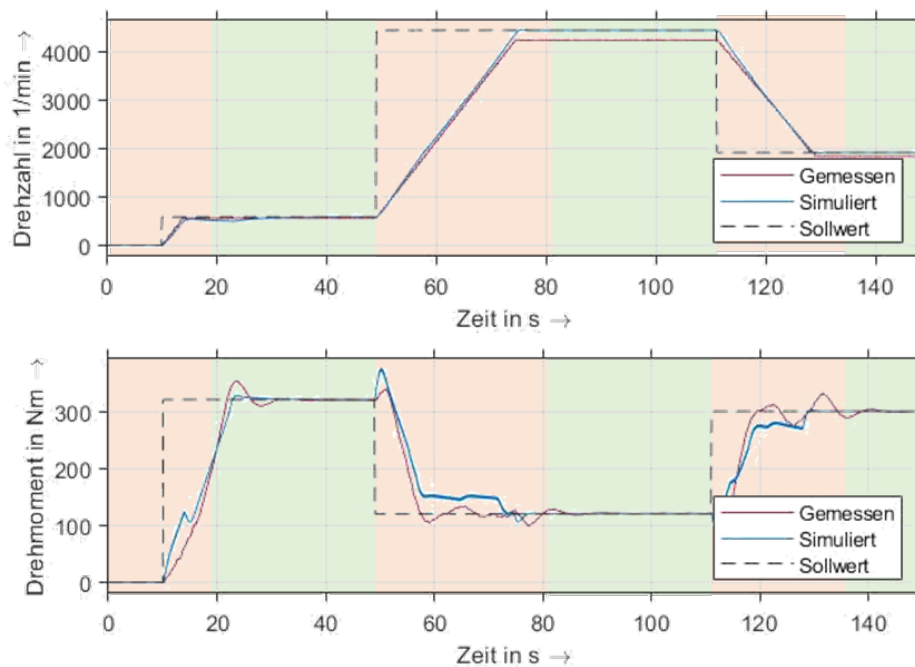


Bild 10: Drehzahl und Drehmomentverlauf der gemessenen und simulierten Werte im Vergleich mit den Sollwerten sowie Einteilung in dynamisches Anfahren (orange) und statisches Halten (grün)

Bei der Drehzahl ist sowohl beim dynamischen Anfahren als auch beim statischen Halten der Punkte eine weitgehende Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Daten erkennbar. Bei höheren Drehzahlen ist eine Abweichung erkennbar. Bei einem Sollwert von 4450 1/min liegen die gemessenen

Werte des realen Prüfstands etwa 5% unter dem Sollwert. Die Ursache der Drehzahlabweichung wird in der idealisierten Abbildung des Prüfstands gesehen. So bildet das Modell den Prüfstand ideal ab. Verluste in den elektrischen Maschinen oder den Getrieben sind nicht berücksichtigt. Die simulierte Leistung liegt entsprechend über der realen Leistung. Sowohl in der Simulation als auch in der Berechnung wird die Drehzahl schneller erreicht, als erwartet.

Das Drehmoment hat vor allem beim dynamischen Anfahren der Punkte eine Abweichung. Dabei liegt die Simulation näher am Sollwert als die Versuche. Im Bereich des statischen Haltens der Punkte stimmen die Simulation und der Messwert mit dem Sollwert weitgehend überein. Die gemittelte Abweichung liegt dabei bei bis zu etwa 25%. Eine wesentliche Ursache der Drehmomentabweichung im dynamischen Bereich wird in der Steuerung vermutet. Das Modell bildet vor allem die Regelung nur vereinfacht ab. Eine vollständige Abbildung der realen Steuerung führt zu einer Annäherung der simulierten an die gemessenen Werte. Sowohl in der Simulation als auch in der Berechnung ist ein Einschwingverhalten auch im Bereich des statischen Haltens der Punkte erkennbar. Der Einfluss steigt dabei mit der Höhe des Drehmomentsprungs im Kollektiv.

Für die Dynamik ist der Einfluss der Drehzahl dem Einfluss des Drehmoments übergeordnet. Zusammenfassend bilden die simulierten Werte den realen Prüfstand mit hinreichender Genauigkeit ab. Die gegebene Abweichung kann durch weitere Optimierung des Modells gesenkt werden. Die Optimierung erfolgt dabei insbesondere durch eine Detaillierung von Teilsystemen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit wurde ein gegebener Prüfstand als physikalisches Modell nachgebildet. Das Modell umfasst neben den elektrischen Maschinen auch die Steuerung und das Messsystem sowie Schnittstellen zum Prüfling. Durch den Aufbau als Whitebox-Modell können wesentliche Vorgänge eingesehen und wesentliche Größen ausgelesen werden.

Im Folgenden wird das Potential zur Zeiteinsparung durch Vorabvalidierung der Prüfläufe dargelegt. Der potentielle Aufwand zur Anpassung ist in Bild 11 dargestellt.

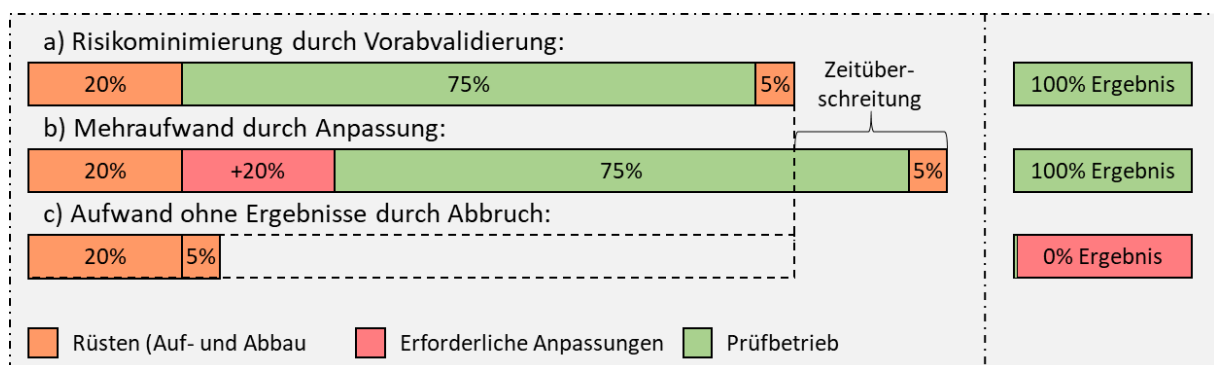


Bild 11: Mehraufwand ohne Vorabvalidierung

Die geplante Zeit bei ausreichender Dynamik entspricht dabei 100% der Prüfstandsbelegung. Dies ist durch die Vorabvalidierung mit dem digitalen Prüfstand gewährleistet. Dabei werden für den Aufbau 20%, für den Betrieb 75% und für den Abbau 5% der Prüfstandsbelegung angenommen (siehe Bild 11 a). Verfügt der Prüfstand nicht über die Dynamik, um das geplante Szenario zu durchfahren, ist eine Anpassung des Szenarios oder der Abbruch des Versuchs erforderlich. Dabei reicht der Aufwand von geringfügigen Anpassungen im Kollektiv bis zur mechanischen Modifikation des Aufbaus. Hierfür wird ein Mehraufwand von 20% angenommen (siehe Bild 11 b). In dieser Zeit ist der Prüfstand ohne Mehrwert belegt. Ergebnisse können erst danach erzeugt werden. Der Anteil der prozentualen, tatsächlichen Laufzeit nimmt ab. Sollte eine Anpassung nicht ausreichend sein, wird von einem Abbruch ohne Ergebnisse ausgegangen (siehe Bild 11 c). Der Prüfstand ist 25% der geplanten Zeit belegt, generiert dabei jedoch keine Ergebnisse.

Durch das Modell konnte das Potential zur Validierung von Prüfläufen mithilfe von Modellen aufgezeigt werden. Die frühzeitige Kenntnis über die Durchführbarkeit ermöglicht eine rechtzeitige Anpassung der Prüfläufe an die gegebene Hardware. Aufbauten, die nicht umsetzbar sind, können so vermieden oder angepasst werden. Das Risiko die Grenzen des Prüfstands zu überschreiten wird somit gemindert. Hohe Folgekosten durch Arbeitszeit, Prüfstandbelegung und materielle Investitionen werden verhindert.

Zur besseren Abbildung der Realität ist das Modell weiter zu optimieren. Potentiale hierfür sind im Folgenden aufgelistet:

- Insbesondere hinsichtlich der Regelung ist großes Potential erkennbar. Diese ist bisher vereinfacht abgebildet. Vorliegende Fehler aus der Regelung können durch eine vollständige Nachbildung gemindert werden.
- Komplexe Vorgänge können mithilfe von black-box Modellen auf Basis von künstlichen, neuronalen Netzen optimiert werden (Isermann 2008). Dafür sind entsprechende Teilkomponenten zu ermitteln, deren innere Vorgänge nicht von Bedeutung sind. Beispielhaft hierfür wäre die Verlustleistung der elektrischen Maschinen in Abhängigkeit von Drehzahl, Drehmoment und verschiedenen Temperaturen. Die Folgen in Form der geminderten abgegebenen, mechanischen Leistung sind für die Dynamik von hoher Relevanz. Somit ist der Wirkungsgrad indirekt berücksichtigt. Mithilfe eines thermischen Modells kann die Temperaturentwicklung auch in der Simulation ermittelt werden. Die Möglichkeiten zur Umsetzung sind zu untersuchen.
- Bisher wird das System als völlig steif betrachtet. Durch eine Betrachtung der jeweiligen Elastizitäten in den Wellen und im Getriebe und des damit verbundenen Schwingverhaltens können weitere Einflüsse untersucht werden.
- Um den Einfluss auf das zu erprobende Fahrzeug zu berücksichtigen, können außerdem Co-Simulationen in den digitalen Prüfstand integriert werden. Hierbei wird der Antrieb des Prüfstandes mit dem Antrieb des Fahrzeugs gleichgesetzt, während der Abtrieb die Fahr- und Systemwiderstände abbildet. Dadurch ist die Ermittlung von simulierten Lastkollektiven mit einer direkten Überprüfung möglich.

Das langfristige Ziel ist die Übertragbarkeit auf andere Antriebsstrangprüfstände. Hierfür ist eine Methodik zu entwickeln, die variierende Arten der elektrischen Maschinen oder variierende Kenngrößen des Systems berücksichtigt.

8 Literaturverzeichnis

- | | |
|--------------------|--|
| Baumann 2006 | BAUMANN, Gerd: <i>Was verstehen wir unter Test? Abstraktionsebenen, Begriffe und Definitionen</i> . Stuttgart, 2006 (1. AutoTest; Fachkonferenz zum Thema Test und Diagnose) |
| Beine et al. 2018 | BEINE, Michael ; RASCHE, Rainer: <i>Datenmanagement für das Szenariobasierte Testen</i> . In: <i>ATZextra 23</i> (2018), S. 20–25 |
| Dismon 2017 | DISMON, Heinrich: „ <i>Wir sind gefordert, Entwicklungen schnell und treffsicher umzusetzen</i> “. In: <i>MTZextra 22</i> (2017), S. 8–11 |
| Dohmen et al. 2009 | DOHMEN, Hans-Peter ; PFEIFFER, Klaus ; SCHYR, Christian: <i>Antriebsstrangprüftechnik : Vom stationären Komponententest zum fahrmanöverbasierten Testen</i> . München : Verl. Moderne Industrie, 2009 (Die Bibliothek der Technik 317) |
| Doppelbauer 2020 | DOPPELBAUER, Martin: <i>Grundlagen der Elektromobilität : Technik, Praxis, Energie und Umwelt</i> . 1st ed. 2020, 2020 |

- Eckstein 2017 ECKSTEIN, Christian: *Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern. Dissertation. 2017
- Guggenmos et al. 2015 GUGGENMOS, Johannes ; RÜCKERT, J. ; THALMAIR, S. ; WAGNER, M.: *Das Prüffeld der Antriebsentwicklung im Wandel*. In: LIEBL, Johannes; BEIDL, Christian (Hrsg.): *VPC - Simulation und Test 2015 : Methoden der Antriebsentwicklung im Dialog 17. MTZ-Fachtagung*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (Proceedings), S. 1–13
- Hagl 2015 HAGL, Rainer: *Elektrische Antriebstechnik*. 2., neu bearb. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl., 2015
- Isermann 2008 ISERMANN, Rolf: *Mechatronische Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- Küçükay 2012 KÜÇÜKAY, Ferit: *Das Getriebe hat auch in Elektrofahrzeugen Zukunft*. URL <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/antriebstechnik/das-getriebe-in-elektrofahrzeugen-zukunft/> – Überprüfungsdatum 26.11.2020
- Küçükay 2018 KÜÇÜKAY, Ferit: „*Ein hybrider Antriebsstrang fordert die Prüfstandstechnik heraus*“. In: *MTZextra 23* (2018), S. 8–10
- Landersheim 2018 LANDERSHEIM, Volker ; FISCHER, Felix ; MÖLLER, Riccardo ; HUANG, Hua ; AWAD, Hasan: *Digitaler Zwilling eines servohydraulischen Prüfstands zur Durchführung virtueller Prüfungen an mechatronischen Wankstabilisatoren*. 2018 (45. Tagung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit)
- Maisch 2007 MAISCH, Matthias: *Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2007. Stuttgart : IMA, 2007 (Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, Antriebstechnik, CAD, Dichtungen, Zuverlässigkeit Bericht Nr. 124)
- Paulweber und Lebert 2014 PAULWEBER, Michael ; LEBERT, Klaus: *Mess- und Prüfstandstechnik : Antriebsstrangentwicklung, Hybridisierung, Elektrifizierung*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 (Der Fahrzeugantrieb)
- Pillas 2017 PILLAS, Julien: *Modellbasierte Optimierung dynamischer Fahrmanöver mittels Prüfständen*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau. Dissertation. 2017
- Speckert et al. 2005 SPECKERT, Michael ; DREBLER, K. ; MAUCH, H. ; LION, A. ; WIERDA, G. J.: *Simulation eines neuartigen Prüfsystems für Achserprobungen durch MKS-Modellierung einschließlich Regelung*. 2005 (Berichte des Fraunhofer ITWM)
- Speckert et al. 2006 SPECKERT, Michael ; DREBLER, K. ; MAUCH, H.: *MSB Simulation of a hexapod based suspension rig*. 2006 (ASIM Mitteilung)
- Stütz et al. 2019 STÜTZ, Julian ; BAUER, Lukas ; KLEY, Markus: *Intelligente Lastkollektivoptimierung für Erprobungen von elektrischen und hybriden Antriebssträngen*. In: ROTH, Daniel (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019*, 2019, S. 93–102
- Willmerding und Häckh 2017 WILLMERDING, Günter ; HÄCKH, Jakob: *Echtzeitsimulation hochdynamischer Fahrzeugantriebe*. In: COMMERELL, Walter; PAWLETTA, Thorsten (Hrsg.): *ASIM-Treffen STS/GMMS 2017 : Workshop der ASIM/GI Fachgruppen STS und GMMS : 9./10. März 2017 in Ulm : Tagungsband*. Wien : ARGESIM Verlag, 2017 (ASIM Mitteilung, 161), S. 192–198

Automatische Erstellung von Drahtgittermodellen aus Topologieoptimierungen

Automatic Generation of Wireframe Models from Topology Optimizations

Christian Gomes Alves¹, Tjark Siefkes²

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
christian.gomesalves@dlr.de

²Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
tjark.siefkes@dlr.de

Abstract (deutsch): Die Erstellung von CAD-Strukturen aus Topologieoptimierungsergebnissen ist ein ingenieurstechnisch aufwändiger und damit zeit- und kostenintensiver Schritt in vielen Produktentwicklungsprozessen. In diesem Beitrag wird eine neue Methode vorgestellt, die diesen Prozessschritt automatisiert und so wesentlich beschleunigen kann. Nach einer initialen Voxelisierung des FE-Netzes wird das topologische Modell ausgedünnt. Um die Topologie abzubilden, werden anschließend Strukturknoten erkannt, mit Linien verbunden und geglättet. Am Ende steht ein Drahtgittermodell aus Punkten und Linien, das sich für parametrische top-down-Konstruktionen im CAD eignet. Die Methode hebt sich von anderen Arbeiten auf diesem Gebiet durch die Verwendung eines Voxelmodells zur Diskretisierung von FE-Modellen ab. Dadurch werden die nachfolgenden Schritte unabhängig vom ursprünglichen Netz aus finiten Elementen und es können effiziente Bildverarbeitungsalgorithmen eingesetzt werden. Das Verfahren wird beispielhaft auf einen Schienenfahrzeugwagenkasten angewandt, ist jedoch prinzipiell auf Topologieoptimierungsergebnisse von Bauteilen aus vielen Disziplinen anwendbar.

Keywords (deutsch):

Topologieoptimierung, Bildverarbeitung, virtueller Produktentwicklungsprozess

Abstract (English): The generation of CAD structures from topology optimization results is a complex and therefore time and cost intensive step in many product development processes. In this paper, a new method is presented which automates this step and can thus save significant time. After an initial voxelization of the FE-mesh, the topological model is thinned out. To map the topology, structural nodes are then detected, connected with lines and smoothed. The result is a wireframe model consisting of points and lines, which is suitable for parametric top-down designs in CAD. The method differs from other work in this field by using a voxel model to discretize FE models. This makes the subsequent steps independent from the original mesh of finite elements and allows the use of efficient image processing algorithms. The method is applied to a rail vehicle body, but, in principle, is applicable to topology optimization results of components from many disciplines.

Keywords (English):

Topology optimization, image processing, virtual product development process

1 Einleitung

Topologieoptimierungen (TO) halten immer mehr Einzug in moderne Produktentwicklungsprozesse. Bei TOs von großen Bauteilen, wie Schienenfahrzeugstrukturen, Flugzeugtragflächen oder organischen Gebäudestrukturen, entstehen oft komplexe und fachwerkartige Strukturen. Deren Interpretation und Übertragung in erste CAD-Konzepte können durch das Erstellen von Drahtgitterskeletten unterstützt werden. Die Erstellung solcher Skelette ist aufgrund der Komplexität der optimierten Strukturen aufwändig und damit kostenintensiv.

Industrie und Wissenschaft entwickeln bereits Lösungen, um Teile der damit verbundenen Tätigkeiten zu vereinfachen oder zu automatisieren (Altair Engineering Inc.; Larsen und Jensen 2009). Diese Lösungsansätze verwenden oft direkt das Netz aus finiten Elementen der TO, wodurch sie abhängig von dessen Netzqualität sind (Ju et al. 2007; Nana et al. 2017). Weitere Lösungen erstellen aus dem Netz Freiformflächen und überspringen die Drahtgitterskeletterstellung (Hsu und Hsu 2005; Koguchi und Kikuchi 2006; Lin und Chao 2000; Tang und Chang 2001). Skelette sind jedoch als Zwischenschritt vor dem eigentlichen CAD-Modellieren sinnvoll, um parametrisierbare Modelle zu erstellen und so eine systematische Konstruktion, womöglich mit Standardteilen, zu ermöglichen.

In diesem Beitrag wird eine Prozesskette vorgestellt, die die Ableitung von Drahtgitterskeletten aus TOs von großen Komponenten mittels Voxelmodellen löst und so eine Auswertung ermöglicht, die von den Eigenschaften des finite Elemente Netzes unabhängig ist. Im Folgenden wird zunächst die Bedeutung von TOs im virtuellen Produktentwicklungsprozess herausgestellt sowie ihre Funktionsweise erläutert. Anschließend wird der manuelle Skeletterstellungsprozess analysiert bevor der automatisierte Prozess und die Einzelschritte hergeleitet werden. Die Anwendung der vorgestellten Prozesskette wird an einem Schienenfahrzeugwagenkasten demonstriert.

2 Topologieoptimierung im Produktentwicklungsprozess

Heutige Produktentwicklungen im Maschinen- und Fahrzeugbau kommen selten ohne eine virtuelle Repräsentation des Produktes aus. Der virtuelle Produktentwicklungsprozess ist mittlerweile selbst in kleinen und mittelständischen Unternehmen in verschiedenen Ausprägungen Standard (Bild 1). Entwicklerteams stehen mit Verfahren wie Mehrkörpersimulation, Finite Elemente Methode (FEM), Strukturoptimierung, Lebensdauerberechnung oder CAD-Modellierung viele Möglichkeiten zur Verfügung, um Bauteile und Systeme noch vor dem ersten Prototypen umfänglich auszulegen. Die Produkte werden so kostengünstiger, leichter und sicherer.

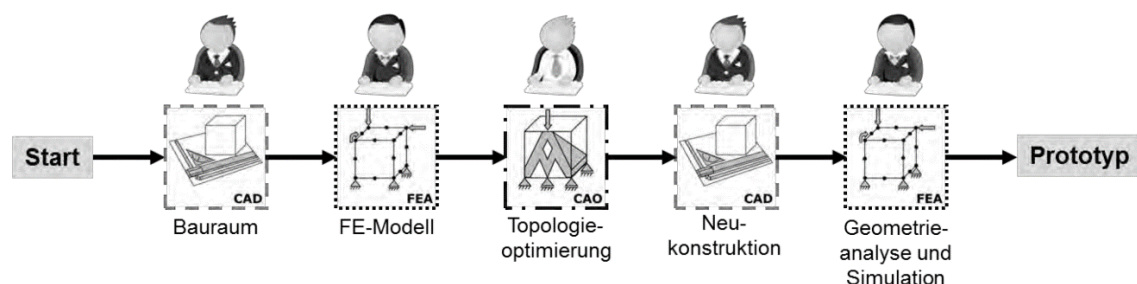


Bild 1: Virtueller Produktentwicklungsprozess mit TO in mittelständischen Unternehmen (Frisch et al. 2016)

Einen immer wichtiger werdenden Baustein für Leichtbau und somit auch Rohstoffeinsparung in der frühen Produktentwicklungsphase stellen TOs mittels FE-Simulationen dar. Sie erleichtern es, kraftflussgerechte Strukturen mit höchsten Leichtbauansprüchen zu entwickeln. TOs haben seit verhältnismäßig kurzer Zeit Einzug in Produktentwicklungsprozesse gefunden. Mit steigenden Leichtbauanforderungen und verbesserter Nutzerfreundlichkeit werden sie sich künftig weiter verbreiten. Neben den reinen FEM-basierten Systemen bieten auch viele CAD-Anwendungen

mittlerweile integrierte Schnittstellen oder gar komplette Optimierungen an. Während dies die Durchführung einer TO vereinfacht, ist für die vollumfängliche Integration in den Produktentwicklungsprozess ein großes Fachwissen notwendig (Billenstein et al. 2017).

Das Ziel des Beitrags ist es, die Einbindung von TOs in den Produktentwicklungsprozess zu vereinfachen. Hierzu werden die notwendige Anwenderexpertise und der notwendige manuelle Aufwand für die Auswertung von TO-Ergebnissen und die Übertragung in CAD-Strukturen verringert.

2.1 Finite Elemente Methode

Die FEM ist ein numerisches Verfahren und wird im Maschinenbau häufig verwendet, um Spannungen und Verformungen in Bauteilen bei gegebenen Belastungen zu berechnen. Sie bildet die Grundlage für viele computerbasierte, strukturelle Untersuchungen und Optimierungen.

Um eine FE-Rechnung durchführen zu können, muss ein Bauteil mit einem Netz aus endlich kleinen (finiten) Elementen repräsentiert werden und es müssen Lagerungsbedingungen und aufgeprägte Kräfte/Beschleunigungen definiert werden. Ein finites Element besteht dabei, je nach Konfiguration, aus einer bestimmten Anzahl Eckpunkten (Knoten) im Raum, die ihm seine Form geben. Ein Dreieckselement ist mit drei Knoten räumlich und geometrisch definiert, ein Quader mit acht. Teilen sich zwei Elemente einen oder mehrere Knoten, dann sind sie miteinander verbunden und können Kräfte und Verformungen untereinander weiterleiten. Für jedes der finiten Elemente in einer Struktur werden in einer FE-Rechnung Systemantworten berechnet. Diese sind beispielsweise Verschiebungen im Raum, Spannungen oder Frequenzen.

Das Ergebnis einer FE-Rechnung sind sowohl lokale Spannungen und Verformungen als auch globale Steifigkeiten. So können Bauteile mit Hilfe von FE-Rechnungen etwa dimensioniert werden oder es kann ihre Festigkeit unter den gegebenen Lasten nachgewiesen werden. (Schumacher 2013)

2.2 Topologieoptimierung

Eine TO ist ein sehr allgemeines und flexibles Strukturoptimierungsverfahren. Es erlaubt die freie Veränderung des gesamten definierten Bauraums. Das Ziel einer TO ist es, Kraftflüsse innerhalb von Bauteilen zu identifizieren und so optimale Strukturen für die auf ein Bauteil wirkenden Lasten zu finden (Bild 2). Sie basiert auf der FEM. Die dort berechneten Systemantworten werden genutzt, um mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen die Materialverteilung im gegebenen Bauraum anzupassen.

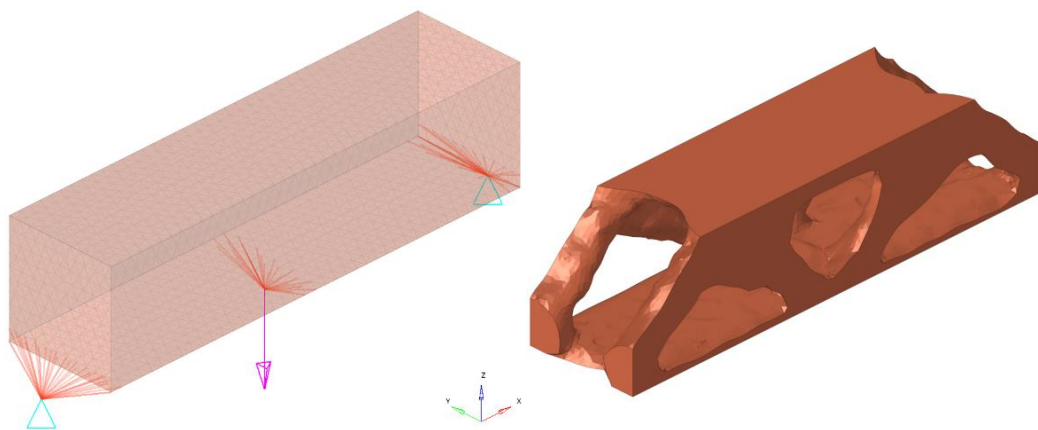


Bild 2: Topologieoptimierung einer einfachen Brücke: Bauraum (links) und Optimierungsergebnis (rechts)

Eine TO arbeitet mit einer Optimierungsschleife (Bild 3). Im Preprocessing wird der Bauraum eines Bauteils wie für eine FE-Rechnung vorbereitet. Zusätzlich wird eine Designvariable definiert, die während der Optimierung variiert wird. Außerdem wird das Optimierungsziel festgelegt (bspw. Masseminimierung oder Steifigkeitsmaximierung) sowie Nebenbedingungen angelegt (bspw. maximale Verformung). Mit dem FE-Solver werden die Systemantworten im Bauteil berechnet. Diese

dienen dem Optimierungsalgorithmus als Eingangsdaten. Er verändert unter Berücksichtigung von Systemantworten, Zielfunktion und Nebenbedingungen den Bauraum so, dass die Randbedingungen besser erfüllt werden. Diese optimierte Struktur wird einer erneuten FE-Berechnung unterzogen. Diese Optimierungsschleife wird so lange durchlaufen bis ein Konvergenzkriterium für das Optimierungsziel erreicht wird (bspw. Änderung der Masse zur vorigen Iteration). Ist das Konvergenzkriterium erfüllt, wird ein Designvorschlag ausgegeben. Im anschließenden Postprocessing wird der Designvorschlag analysiert, ausgewertet und weiterverarbeitet. (Sander et al. 2013; Schumacher 2013)

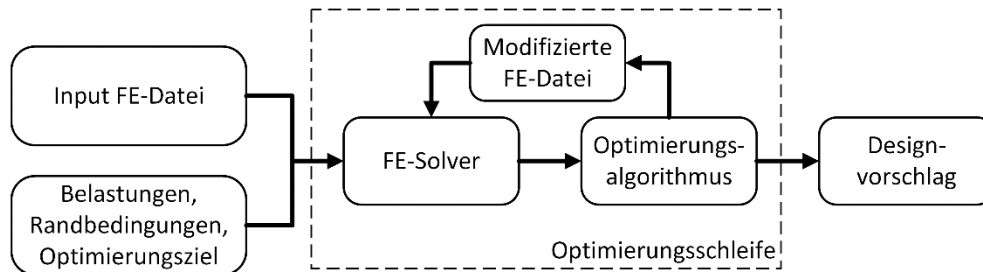


Bild 3: Typischer Topologieoptimierungsprozess (nach Sander et al. 2013)

Während der Optimierung wird die Designvariable so variiert, dass die Zielfunktion unter Einhaltung aller Nebenbedingungen maximiert oder minimiert wird. In einer TO ist die Designvariable die relative Materialdichte der finiten Elemente, das heißt die aktuelle Dichte bezogen auf die Ursprungsdichte (tatsächliche Dichte des Werkstoffs). Das heißt, die Designvariable kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Eine relative Materialdichte von 0 bedeutet, dass das finite Element keine Dichte besitzt. Es trägt nicht zur Steifigkeit der Gesamtstruktur bei. Bei einer relativen Dichte von 1 liegt Vollmaterial vor, das Element ist sehr wichtig für die Struktur. Das Ergebnis einer TO ist also eine Dichteverteilung des Materials im Bauteil, die Lastpfade innerhalb des Bauteils veranschaulicht. (Schumacher 2013)

So etabliert FE-Rechnungen und auch TO in vielen Produktentwicklungsprozessen bereits sind, so aufwendig ist deren Aus- und Bewertung nach wie vor. Die Information über die relative Dichteverteilung im Bauteil ist maschinenbautechnisch nicht ohne Weiteres verwendbar. Reale Werkstoffe haben eine feste Dichte, die sich in der Regel nicht frei variieren lässt. Die abstrakten Ergebnisse einer TO müssen also ganzheitlich strukturell ausgewertet werden, um die Erkenntnisse in eine fertigmögliche Konstruktion überführen zu können. Dieser anspruchsvolle und aufwändige Schritt erfordert viel Expertise und erfolgt nach wie vor hauptsächlich manuell durch erfahrene Ingenieurteams.

3 Vom manuellen zum automatisierten Prozess

Aufgrund der Komplexität beansprucht der Übergang zwischen TO und CAD-Konstruktion viel Zeit und Know-How. Auch kommerzielle Softwareanbieter haben das wirtschaftliche Potential erkannt, das sie ihren Kunden durch eine Vereinfachung dieses Prozessschritts bieten können. Die detaillierten Arbeitsweisen von kommerziell verfügbaren Programmen, die TOs und Geometrieerstellung kombinieren (beispielsweise TOSCA von Dassault Systèmes oder solidThinking und C123 von Altair Engineering), sind oft Firmengeheimnisse und somit dem wissenschaftlichen Diskurs nicht zugänglich. Ihre Funktionen sind zudem in der Regel stark eingeschränkt. Nichtsdestotrotz zeugt die Existenz von solchen kommerziellen Programmen davon, dass der Übergang von TOs hin zu CAD-Modellen ein wichtiges (und wirtschaftlich interessantes) Feld darstellt. (Cuillière et al. 2018)

Je größer die Struktur ist, die mit Hilfe einer TO optimiert werden soll, desto aufwändiger ist auch ihre Weiterverarbeitung. Schienenfahrzeugwagenkästen beispielsweise können eine Länge von über 28 m bei einer Höhe von bis zu 4 m und einer Breite von rund 3 m haben (DIN EN 15273 Teil 3 2017). Die TO-Strukturen ergeben bei qualitativ hochwertigen Optimierungen feine stabartige Strukturen und lassen sich somit als Fachwerk ansehen (vgl. Bild 2). Mit dieser Betrachtung wird es ermöglicht, die Konzeptkonstruktion aus Balkenelementen zusammenzusetzen, wodurch beispielsweise eine hohe

Gleichteildichte erreicht wird (König et al. 2012). Die Basis für solche Fachwerkkonstruktionen können Drahtgitterskelette bilden, deren Aufbau und Vorteile im folgenden Kapitel vorgestellt werden. Im darauffolgenden Kapitel wird ein üblicher Prozessablauf für die Überführung von TO-Ergebnissen hin zu CAD-Modellen beschrieben. Diese Beschreibung dient als Grundlage für die Analyse des Automatisierungspotentials.

3.1 Skelette bei der Erstellung von CAD-Modellen großvolumiger Komponenten

Es gibt verschiedene Strategien für den Aufbau und die Abhängigkeitsdefinition in großen und komplexen CAD-Strukturen, die aus mehreren verschachtelten Baugruppen und Bauteilen bestehen, die aufeinander referenzieren. Beim Top-Down-Vorgehen beispielsweise wird das Produkt von der Grobebene zur Feinebene definiert und modelliert. Das bedeutet, dass übergeordnet die groben Rahmenbedingungen die (Detail-)Konstruktionen vorgeben. Dies kann beispielsweise der gesamte Bauraum sein oder eine Grobstruktur, wie sie aus TOs abgelesen werden kann. In weiteren Produktentwicklungsphasen wird das Modell stets detaillierter, Bauteile werden hinzugefügt und auskonstruiert. Wichtig hierbei ist, dass die Einbaureferenz aller Bauteile letztlich nach oben zeigt und somit die anfängliche Grobstruktur die maßgebliche Referenz darstellt. (Feldhusen und Grote 2013) Gerade beim initialen Entwurf von Konzepten für große Strukturen, wie beispielsweise Schienenfahrzeugwagenkästen oder auch Flugzeugrümpfen und -tragflächen, sind Details der späteren Konstruktion gänzlich unbekannt. Hier ist der Einsatz von flexiblen und parametrischen Geometrieskeletten (Bild 4, rechts) im Top-Down-Vorgehen ideal, da sie eine schnelle Modellerstellung erlauben, ohne dass sich im Vorfeld Gedanken über Detailkonstruktionen gemacht werden muss (Ostrosi et al. 2020). Wenn im Vorfeld zur Konstruktion eine TO durchgeführt wurde, kann aus ihr ein Skelett abgeleitet werden. Es folgt dabei den Strukturen der TO (vgl. Bild 4) und dient als Basis für die weitere Modellierung. Es vereinfacht die Erstellung eines parametrischen Modells, bei dem die Geometrie auch nach erfolgter Detailkonstruktion einfach verändert werden kann (beispielsweise Änderung der Außenkontur oder Lage eines Skelettknotens). Dadurch ergeben sich automatische Anpassungen bei allen untergeordneten Baugruppen und -teilen. Die Ableitung eines Skeletts von einer TO kann also der erste und zentrale Schritt beim Übergang vom Prozessschritt der TO zum Prozessschritt der CAD-Modellierung sein.

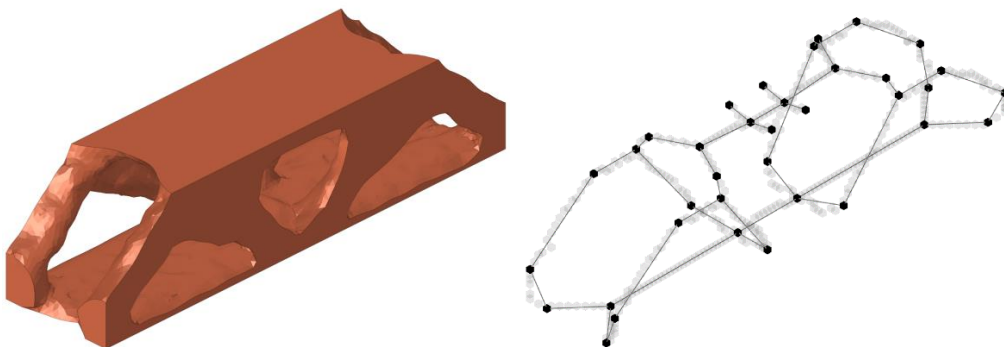


Bild 4: Topologieoptimierungsergebnis einer einfachen Brücke (links) und Drahtgitterskelett (rechts)

Ein Skelett (Bsp. Bild 4, rechts) besteht dabei in der Regel aus Punkten, Linien und eventuell Flächen und dient im späteren Entwicklungsprozess als Orientierung für das Erstellen höherer Geometrie, wie Volumenkörper. Den Linien können im späteren Verlauf Querschnitte oder Flächen Wanddicken gegeben werden. Der Fokus liegt jedoch zunächst auf der Skeletterstellung selbst.

3.2 Prozessablauf von Skelettableitungen

Für die manuelle Ableitung eines Skeletts aus TO-Ergebnissen ist fachliche Expertise aus zwei Disziplinen notwendig: FE-Berechnung und Konstruktion. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte

dieser zwei Abteilungen beschrieben und deren Aufwand auf der Basis von drei Domänenexperten geschätzt. Tabelle 1 zeigt die Prozessschritte in der Übersicht mit Erfahrungswerten für die Dauer der manuellen Erstellung bezogen auf TOs von großen Komponenten, wie Schienenfahrzeugwagenkästen oder -fahrwerken.

Tabelle 1: Stundenbedarf bei manueller Skeletterstellung

Arbeitsschritt	Expertise	Dauer (h)
1. Aufarbeitung des TO-Ergebnisses & Export in Austauschformat	Berechnung	1-5
2. Import in CAD-Programm & ggf. initiale Geometriaufbereitung	Konstruktion	0,5-2
3. Skelettableitung	Konstruktion	8-14
	Gesamt	9,5-21

Im Detail enthalten die Prozessschritte folgende Tätigkeiten:

1. Die Berechnungsabteilung muss das Ergebnismodell der TO zunächst aufbereiten. Hierzu gehört die Auswahl eines geeigneten Elementdichtenschwellwerts, um aus der Materialdichteverteilung der TO eine konkrete Struktur zu erhalten. Elemente, deren relative Dichte unter dem Schwellwert liegen, werden ausgeblendet, sodass eine Struktur sichtbar wird. Danach erfolgt gegebenenfalls der Re-Import des TO-Ergebnisses in den Preprocessor, um das FE-Netz des Modells unter Umständen aufzubereiten, etwa durch Glättung der Oberfläche. Hierdurch wird die Elementqualität verbessert und idealerweise die Anzahl an Elementen verringert, um spätere Performanceprobleme zu vermeiden. Bei großen Modellen von Schienenfahrzeugwagenkästen geht die Elementanzahl leicht in die hunderttausende. Das aufbereitete Modell wird anschließend in ein Geometriaustauschformat (bspw. .step) exportiert, damit das CAD-Programm die Geometriedaten einlesen kann. Für die Berechnungsabteilung ergibt sich hier je nach Modellgröße und Netzqualitätsansprüchen ein Arbeitsaufwand von einer bis zu fünf Stunden.
2. Im nächsten Schritt übernimmt die Konstruktionsabteilung die Exportdatei und importiert sie in ein CAD-Programm. Je nach Modellgröße und Elementanzahl kann bereits dieser Import längere Zeit benötigen. Falls im Vorfeld keine händische Neuvernetzung oder Netzqualitätspflege durch die Berechnung erfolgte, ist an dieser Stelle zwingend das Prüfen des Netzes notwendig, um Performanceprobleme zu vermeiden. Diese Prüfung wird mit 0,5 bis zwei Stunden Arbeitsaufwand durch die Konstruktion geschätzt.
3. Anschließend folgt die Skeletterstellung selbst. Hierbei werden einzelne Punkte innerhalb der TO erstellt. Bei großen Modellen mit komplexen Topologien kann die Anzahl der Knoten dreistellig sein (vgl. Bild 7 in Kap. 5). Die Punkte werden anschließend mit Linien entsprechend den Verstreungen der Topologie verbunden. Gegebenenfalls werden auch Flächen erstellt, falls die Topologie flächige Bereiche ausgebildet hat (Elementdichte ist nicht zu 0 oder 1 konvergiert) oder wo beispielsweise Fußböden, Wände oder andere Funktionselemente im Modell vorhanden sein sollen. Das Ergebnis ist nun das grundlegende Geometrieskelett. Als Zeitbedarf werden hierfür 8-14 Stunden geschätzt. Die längere Schätzung muss angesetzt werden, wenn das Skelett parametrisch aufgebaut sein soll.

Die Prozessanalyse zeigt, dass die Skelettableitung aus TOs mehrere Mitarbeiter aus verschiedenen Disziplinen involviert und sie für eine lange Zeit bindet. Automatisierung bietet hier das Potential, Arbeitnehmer zu entlasten und die Prozessqualität zu erhöhen.

3.3 Potential für Prozessautomatisierung

Durch die Automatisierung von Prozessschritten kann die Produktentwicklungszeit im Gesamten reduziert und/oder die Qualität des Produkts gesteigert werden. Automatisierte Prozesse sind oft schneller als die manuelle Ausführung und verbessern die Produktqualität durch eine höhere Präzision. Auch bei gleichem Zeitaufwand des automatisierten Prozesses ermöglicht die Freigabe von

Personalressourcen, dass Mitarbeiter anderen, kreativen Tätigkeiten nachgehen können und so das Produkt verbessern. Der automatisierte Prozess muss also nicht zwingend schneller sein als der Mensch, um wirtschaftlich attraktiv zu sein.

Der gesamte Skelettableitungsprozess, der im vorigen Kapitel vorgestellt wurde, bietet das Potential automatisiert zu werden. Die Skeletterstellung ist monotone Arbeit, die zwar Aufmerksamkeit, jedoch nur wenig Kreativität erfordert. Durch deterministische Algorithmen können gleichbleibende hochqualitative Ergebnisse erzeugt werden. Monotone und lang andauernde Tätigkeiten sind außerdem fehleranfällig und reduzieren die Mitarbeiterzufriedenheit. Durch den Wegfall der manuellen Hauptarbeit im CAD entfällt zudem die Vorarbeit der Berechnungsabteilung. Zusammenfassend bietet eine Prozessautomatisierung viele Vorteile:

- Reduzierung des manuellen Arbeitsaufwands, Freigabe von Personalressourcen
- Reduzierung monotoner und fehleranfälliger Arbeitsabläufe
- Erzeugung deterministischer Ergebnisse gleichbleibend hoher Qualität

4 Automatisierte Skelettableitung aus Topologieoptimierungen

Im Folgenden wird die automatisierte Skelettableitung aus TOs beschrieben. Die Prozesskette ist in Bild 5 dargestellt. Um die Skeletterstellung zu automatisieren, müssen mehrere Zwischenschritte eingeführt werden, die bei manueller Bearbeitung nicht nötig sind oder vom Anwender unbewusst durchgeführt werden, wie beispielsweise das Ausdünnen der Geometrie (Thinning). Die einzelnen Schritte werden im Folgenden beschrieben. Als einfaches Anschauungsbeispiel dient das Brückenmodell aus Bild 2.



Bild 5: Automatisierte Prozesskette der Skelettableitung aus Topologieoptimierungsergebnissen

4.1 Voxelisierung des Topologieoptimierungsergebnisses

Die Voxelisierung ist der zentrale Unterschied der Prozesskette gegenüber anderen Implementierungen. Ein Voxel ist ein Würfel auf einem Gitterpunkt in einem äquidistanten Gitter in einem dreidimensionalen Bild. Analog werden Quadrate auf Gitterpunkten eines zweidimensionalen Bilds als Pixel bezeichnet. Das Voxelgitter wird als dreidimensionaler Datenspeicher abgebildet, der Informationen als binäre Repräsentation enthält, ob an der Stelle des Voxels Material vorhanden ist (Wert 1) oder nicht (Wert 0). Er dient als Grundlage für alle nachfolgenden Prozessschritte.

Als Input für den Prozess dient das unbearbeitete Ergebnis einer TO (Bild 2 und Bild 4), das die Verteilung der Struktur im Raum vorgibt. Das Modell kann dabei aus 2D- und 3D-Elementen (Dreiecke, vierseitige Elemente oder Tetraeder) bestehen. Die Geometrieinformationen werden geladen und in ein Voxelmodell konvertiert (Bild 6, links). Durch optional zuschaltbare Symmetrieunterstützung um bis zu drei Ebenen lässt sich sowohl bei der Voxelisierung als auch in fast allen späteren Schritten Rechenzeit einsparen. Dies stellt eine Besonderheit im Vergleich zu ähnlichen Arbeiten dar.

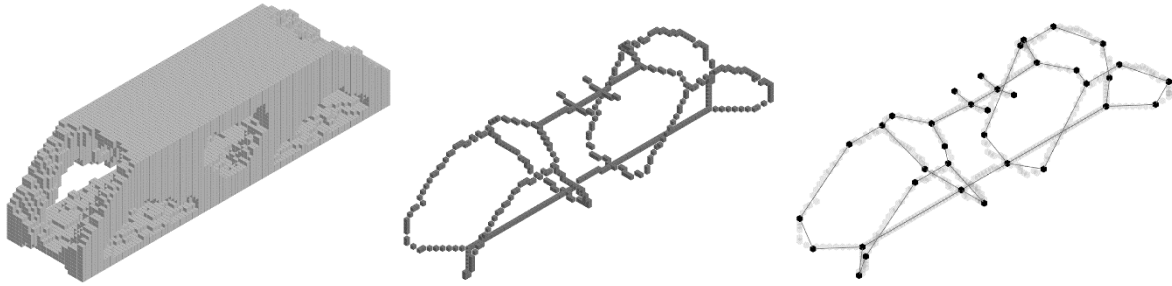


Bild 6: Voxelisierte TO des Brückenmodells (links), Voxelskelett (Mitte) und Drahtgitterskelett (rechts)

4.1.1 Voxelisierung der finiten Elemente

Zu Beginn muss die Voxelgittergröße vorgegeben werden. Sie sollte sich an der durchschnittlichen Elementgröße des FE-Netzes orientieren. Für das gesamte Volumen des FE-Modells wird anschließend ein dreidimensionaler Tensor erstellt, der das Voxelgitter repräsentiert. Es werden unterschiedliche Herangehensweisen für 2D- und 3D-Elemente verwendet. Die Voxelisierung für zweidimensionale Elemente basiert auf der Methode von Huang et al. (1998). Vierseitige 2D-Elemente werden zunächst in zwei Dreiecke geteilt. Für alle Dreieckselemente im Modell werden dann zuerst die Voxel aktiviert, die einen Eckpunkt eines finiten Elements umschließen. Danach werden die Elementkanten betrachtet. Ein Voxel wird dabei aktiv gesetzt, wenn der Abstand des Voxelzentrums zur Elementkante einen von der Voxelgittergröße abhängigen Abstandswert unterschreitet. Zuletzt werden die Elementflächen ähnlich wie die Elementkanten mit Hilfe eines Abstandswerts untersucht.

Bei dreidimensionalen Elementen wird zuerst das eingeschlossene Volumen der Tetraeder betrachtet. Die Flächenorientierung der vier begrenzenden Dreiecksflächen des Tetraeders wird so gewählt, dass die Normalenvektoren nach außen zeigen. Ein Voxel wird aktiviert, sofern der Abstand des Voxelzentrums zu allen vier begrenzenden Ebenen negativ ist, es also innerhalb des Elements liegt. Sollte ein Tetraederelement durch dieses Vorgehen keinen Voxel aktivieren, werden zusätzlich seine Elementkanten analysiert, wie im zweidimensionalen Fall. Durch dieses Vorgehen wird Rechenzeit eingespart.

4.1.2 Vorteile des Voxelansatzes

Viele andere Verfahren, die eine Geometrieableitung aus TOs zum Ziel haben, basieren auf dem FE-Netz selbst, etwa Nana et al. (2017). Sie verwenden direkt das FE-Netz des TO-Ergebnisses, müssen dieses jedoch zunächst glätten, um anschließende Prozessschritte ausführen zu können. Aufgrund der uneinheitlichen Größe der finiten Elemente und deren unregelmäßiger Form, ist die Glättung aufwendig.

Die Verwendung eines Voxelmodells bietet viele Vorteile gegenüber der direkten Verwendung des FE-Netzes. Zum einen können die Daten im Voxelmodell mit bewährten, sehr performanten und frei verfügbaren Bildverarbeitungsalgorithmen verarbeitet werden. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung eines Voxelmodells kann Speicher- und Zugriffseffizienz sein. Ein FE-Netz besteht aus Knoten und Elementen. Jeder Knoten hat eine eindeutige Nummer und drei Raumkoordinaten. Elemente haben ebenfalls eine eindeutige Nummer und drei oder vier Knoten, die sie im Raum definieren. Verschiedene Elemente verweisen auf gleiche Knoten, wodurch sie miteinander fest verbunden sind. Für die Speicherung der Geometriedaten sind also mindestens zwei Datenstrukturen erforderlich und bei jedem Aufruf eines Elements müssen gleichzeitig die Knotennummern in der Datenstruktur der Knoten nachgeschlagen werden. Das Voxelmodell ist in einem dreidimensionalen Tensor gespeichert. Jeder Tensoreintrag ergibt direkt über seine drei Achsen die Lage des Voxels im Raum wieder. Durch die genaue und einfache Adressierbarkeit einzelner Voxel eröffnen sich viele Vorteile und Möglichkeiten, das TO-Voxelmodell zu analysieren und weiterzuverarbeiten.

Zuletzt ist die Abkoppelung des Modells vom FE-Netz selbst ein entscheidender Vorteil. Verschiedene FE-Solver verwenden unterschiedliche Formate für die Beschreibung des FE-Netzes. Durch die

Abstrahierung im Voxelmodell sind alle nachfolgenden Berechnungsschritte unabhängig vom für die TO verwendeten FE-Solver. Für die Unterstützung verschiedener Optimierungsverfahren und FE-Formate muss lediglich einmalig der Voxelisierungsschritt angepasst werden.

4.2 Erstellung des Voxelskeletts durch Thinning

Das Voxelmodell ist eine Repräsentation des FE-Netzes und enthält daher auch den Querschnitt der Stäbe. Diese geometrischen Informationen werden im Thinning entfernt und das Modell so auf ein Voxelskelett reduziert, bei dem die Skelettäste genau einen Voxel breit sind. Für die Skelettierung kommt der Thinning-Algorithmus nach Park und Lee (1997) zum Einsatz, da er selbst für große Datenmengen schnelle und valide topologische Skelette liefert. Zudem ist er in den open-source Bildverarbeitungsmodulen von scikit-image verfügbar (van der Walt et al. 2014). Nachteilig ist, dass der Algorithmus keine symmetrischen Skelette erzeugt, was jedoch durch Beschneiden, Spiegeln und Prüfdurchläufe speziell im Bereich der Symmetrieebenen des Voxelmodells korrigiert werden kann. Die Skelettierung im Sinne der Bildverarbeitung ist damit erfolgreich abgeschlossen und es liegt ein Voxelskelett vor (Bild 6, rechts).

4.3 Strukturknotenerkennung

Aus dem topologischen Skelett müssen Strukturknotenpunkte abgeleitet werden, also Bereiche erkannt, an denen mehrere Äste des Skeletts aufeinandertreffen. An diesen Stellen befinden sich Voxelcluster. Deren Detektion im Voxelskelett erfolgt mit Hilfe eines Algorithmus nach Klette (2006). Hierbei werden Nachbarschaftseigenschaften der Skelettvoxel untersucht, um Voxelcluster zu detektieren. Anschließend wird der jeweilige Schwerpunkt der Voxelcluster berechnet und die Voxel, die diesen am nächsten sind, als Strukturknotenpunkte ausgewählt. Auch dieser Prozessschritt unterstützt Symmetriebedingungen.

4.4 Herstellung von Knotenverbindungen und CAD-Import

Nachdem die Strukturknotenpunkte des Stabwerks im Voxelmodell identifiziert sind, wird mit Hilfe einer Flood-Filling-Methode herausgefunden, welche Knotenpunkte miteinander verbunden sind. Hierbei wird ein Knotenpunkt auf dem Voxelskelett ausgesucht und von ihm ausgehend nacheinander die Voxel der Äste abgesprochen, die von ihm wegführen. Wenn auf einem Ast ein anderer Knotenpunkt vorgefunden wird, wird dieser mit dem Startknotenpunkt über eine Linie verbunden. Dies wird für alle Strukturknotenpunkte durchgeführt bis jeder Ast des Voxelskeletts mindestens einmal abgesprochen wurde. Am Ende ist bekannt, welche Knotenvoxel es gibt und welche untereinander verbunden sind. Dadurch ergibt sich ein erstes Drahtgittermodell. Allerdings bilden die erstellten Linien lediglich die direkte Verbindung zwischen zwei Strukturknotenpunkten dar. Krümmungen der Äste im Voxelskelett wurden ignoriert. Daher erfolgt im Anschluss eine Linienglättung. Jeder Voxel des Voxelskeletts wird dazu abgesprochen und sein Abstand zur Linie des Drahtgittermodells ermittelt. Ist der Abstand über einem Schwellenwert, wird ein Zwischenknoten im Drahtgittermodell eingefügt. So wird sichergestellt, dass das Drahtgittermodell dem Voxelskelett ausreichend gut folgt. Das Ergebnis ist das fertige Drahtgittermodell (Bild 6, rechts). Es kann nun in das bevorzugte CAD-Format konvertiert und dort importiert werden. In CATIA kann dies zum Beispiel mit Hilfe der Visual Basic Schnittstelle erfolgen.

5 Anwendung am Beispiel eines Schienenfahrzeugwagenkastens

Der entwickelte automatisierte Prozess zielt spezifisch auf große Modelle ab, für die die händische Erstellung von Drahtgitterskeletten sehr aufwändig ist. Der Prozess wird beispielhaft auf das TO-Ergebnis eines Schienenfahrzeugwagenkastens angewendet (Bild 7, oben). Der Wagen ist symmetrisch

um die x-z- und die y-z-Ebene. Die Abmessungen des Wagens betragen 20 m x 3 m x 4,4 m. Das TO-Ergebnis enthält 2.825.400 FE-Knoten. Im Unterbodenbereich (grün) befinden sich 586.200 dreidimensionale Tetraederelemente. Die zweidimensional vernetzten Außenhüllen des Wagens (blau) bestehen aus 82.824 Dreieckselementen. Die durchschnittliche Elementgröße der Vernetzung beträgt 40 mm. Die Gittergröße des Voxelmodells beträgt 20 mm, wodurch das initiale Voxelgitter insgesamt etwa 33 Millionen Voxel enthält. In Bild 7 ist das automatisch erstellte Drahtgittermodell zu sehen. Das erstellte Drahtgittermodell enthält 2.107 Strukturknoten mit 3.653 Linienverbindungen dazwischen.

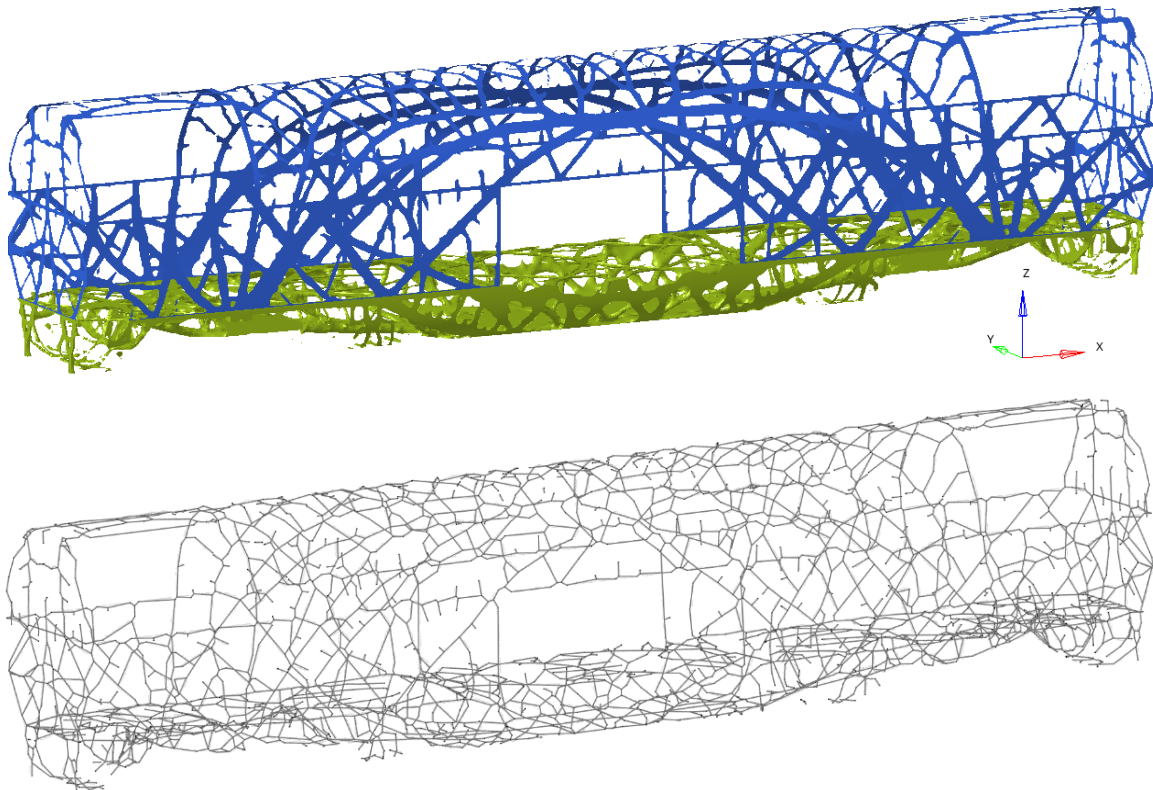


Bild 7: TO-Ergebnis (oben) und Drahtgitterskelett (unten) eines Schienenfahrzeugwagenkastens

Tabelle 2 enthält die Rechenzeiten bei Ausführung des Prozessprogramms auf einem Desktoprechner mit einem Intel Xeon E5-1660 Prozessor mit 3,2 GHz Basistaktrate. Das Programm läuft auf einem Kern. Die Laufzeiten bilden den Median aus fünf Durchläufen. Stellt man die Gesamtzeit von 3.810 s (ca. 1 h) in Relation zu den in Kapitel 3.2 vorgestellten Schätzungen der manuellen Arbeitszeit von mindestens neun Stunden, wird deutlich, wie viel Potential in der Prozessautomatisierung allein durch die Reduktion der Bearbeitungszeit realisiert werden kann. Hierbei ist zudem zu beachten, dass die Laufzeit des Programmcodes in Zukunft vermutlich weiter reduzieren werden kann.

Tabelle 2: Rechenzeiten des Wagenkastenmodells (Median aus fünf Durchläufen)

Prozessschritt	Zeit (s)
Einlesen des FE-Modells	25
Voxelisierung 2D-Elemente	265
Voxelisierung 3D-Elemente	2.973
Thinning zu Voxelskelett	7
Strukturknotenerkennung	343
Herstellung von Knotenverbindungen	197
Gesamtlaufzeit	3.810

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt eine Methode vor, die den aufwändigen manuellen Prozess der Ableitung von Drahtgittermodellen aus Topologieoptimierungen automatisiert und beschleunigt. In Kontrast zu anderen Arbeiten auf diesem Gebiet wird ein Topologieoptimierungsergebnis zunächst in ein Voxelmodell umgewandelt, wodurch weitergehende Verarbeitungsschritte nicht mehr direkt vom ursprünglichen finite Elemente Netz abhängig sind, weniger Ressourcen beansprucht und effiziente Bildverarbeitungsalgorithmen für die Weiterverarbeitung eingesetzt werden können. Nach der Voxelisierung wird das topologische Modell mit einem Thinning-Algorithmus ausgedünnt. Es werden Strukturknoten erkannt und mit Linien verbunden. Das Skelett wird geglättet, um die Topologie genauer abzubilden. Am Ende steht ein Drahtgittermodell aus Punkten und Linien, das sich für parametrische top-down-Konstruktionen im CAD eignet.

Der Fokus der Arbeit liegt auf großen Strukturkomponenten wie Schienenfahrzeugwagenkästen oder Flugzeugtragflächen, bei denen die Weiterverwendung von Topologieoptimierungen viele Personalressourcen beanspruchen kann. Anwendungen sind jedoch für alle Arten und Größen von Topologieoptimierungen denkbar. Am Beispiel eines Schienenfahrzeugwagenkastens konnte gezeigt werden, dass sich die Bearbeitungszeit bei Betrachtung von Symmetriebedingungen mit dem automatisierten Prozess um den Faktor neun reduzieren lässt.

Das vorgestellte Verfahren stellt den ersten Schritt in einer größeren automatisierten Prozesskette dar, die die Interpretation und Weiterverarbeitung von Topologieoptimierungsergebnissen vereinfachen und beschleunigen soll. Potentielle Weiterentwicklungen beinhalten neben Performanceverbesserungen das Erkennen struktureller Besonderheiten wie zusammenhängende Flächen, das Analysieren von Querschnitten aus Optimierungen, das anschließende Erstellen und Neuberechnen von FE-Modellen auf Basis der extrahierten Skelette und Querschnitte, sowie letztlich den Aufbau eines parametrischen CAD-Modells, um frühe Konstruktionsprozesse im Produktentwicklungsprozess zu unterstützen.

Literatur

- | | |
|--------------------------|--|
| Altair Engineering Inc. | ALTAIR ENGINEERING INC.: <i>C123: Making Simulation a Collaborative Partner for Concept Development</i> . https://web.altair.com/c123 . Zugriff: 29.09.2020 |
| Billenstein et al. 2017 | BILLENSTEIN, Daniel; DINKEL, Christian; GLENK, Christian; RIEG, Frank: Bewertungswerkzeug zur effizienten Einbindung der Topologieoptimierung in den virtuellen Produktentwicklungsprozess. In: <i>Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017</i> . Stuttgart : Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau, 2017, S. 117–126 |
| Cuillière et al. 2018 | CUILLIÈRE, Jean-Christophe; FRANÇOIS, Vincent; NANA, Alexandre: <i>Automatic construction of structural CAD models from 3D topology optimization</i> . In: <i>Computer-Aided Design and Applications</i> 15 (2018), Nr. 1, S. 107–121 |
| Feldhusen und Grote 2013 | FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: <i>Pahl/Beitz Konstruktionslehre</i> . Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013 |
| Frisch et al. 2016 | FRISCH, Michael; GLENK, Christian; DÖRNHÖFER, Andreas; RIEG, Frank: <i>Topologieoptimierung in kleinen und mittelständischen Unternehmen</i> . In: <i>ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb</i> 111 (2016), Nr. 5, S. 243–246 |
| Hsu und Hsu 2005 | HSU, Ming-Hsiu; HSU, Yeh-Liang: <i>Interpreting three-dimensional structural topology optimization results</i> . In: <i>Computers & Structures</i> 83 (2005), 4-5, S. 327–337 |

- Huang et al. 1998 HUANG, Jian; YAGEL, Roni; FILIPPOV, Vassily; KURZION, Yair: An accurate method for voxelizing polygon meshes. In: *IEEE Symposium on Volume Visualization (Cat. No.989EX300)* : IEEE, 1998, S. 119–126
- Ju et al. 2007 JU, Tao; BAKER, Matthew L.; CHIU, Wah: *Computing a family of skeletons of volumetric models for shape description*. In: *Computer aided design* 39 (2007), Nr. 5, S. 352–360
- Klette 2006 KLETTE, Gisela: Branch Voxels and Junctions in 3D Skeletons, Bd. 4040. In: *Combinatorial Image Analysis*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006 (Lecture Notes in Computer Science), S. 34–44
- Koguchi und Kikuchi 2006 KOGUCHI, Atsushi; KIKUCHI, Noboru: *A surface reconstruction algorithm for topology optimization*. In: *Engineering with Computers* 22 (2006), Nr.1, S.1-10
- König et al. 2012 KÖNIG, Jens; KOPP, Gerhard; WINTER, Joachim; FRIEDRICH, Horst E.; SCHÖN, Martin: Methodology for force flow optimised car body structures and implementation, Volume 1. In: *Proceedings 12th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology : 13 and 14 March 2012, Stuttgart, Germany*. Wiesbaden : ATZlive, 2012
- Larsen und Jensen 2009 LARSEN, Shane; JENSEN, C. Greg: *Converting Topology Optimization Results into Parametric CAD Models*. In: *Computer-Aided Design and Applications* 6 (2009), Nr. 3, S. 407–418
- Lin und Chao 2000 LIN, C.-Y.; CHAO, L.-S.: *Automated image interpretation for integrated topology and shape optimization*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 20 (2000), Nr. 2, S. 125–137
- Nana et al. 2017 NANA, Alexandre; CUILLIÈRE, Jean-Christophe; FRANCOIS, Vincent: *Automatic reconstruction of beam structures from 3D topology optimization results*. In: *Computers & Structures* 189 (2017), S. 62–82
- DIN EN 15273 Teil 3 2017 Norm DIN EN 15273 Teil 3 Oktober 2017. *Lichttraumprofile*
- Ostrosi et al. 2020 OSTROSI, Egon; BLUNTZER, Jean-Bernard; STJEPANDIĆ, Josip: A CAD Material Skeleton-Based Approach for Sustainable Design. In: *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems – Real-life Applications* : IOS Press, 2020 (Advances in Transdisciplinary Engineering).
- Park und Lee 1997 PARK, Kyu in; LEE, Sang Uk: Geometric modeling from scattered 3-D range data, Bd. 2. In: *Proceedings of International Conference on Image Processing, 1997*, S. 712-715 vol.2
- Sander et al. 2013 SANDER, C.; PETRICH, D.; ALBERS, A.: *Extended Topology Optimization - two factors to decrease energy consumption of structural parts during dynamic movements*. In: Open Access am KIT. 2194-1629 (2013).
- Schumacher 2013 SCHUMACHER, Axel: *Optimierung mechanischer Strukturen : Grundlagen und industrielle Anwendungen. 2., aktualisierte und erw. Aufl.* Berlin : Springer Vieweg, 2013
- Tang und Chang 2001 TANG, Poh-Soong; CHANG, Kuang-Hua: *Integration of topology and shape optimization for design of structural components*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 22 (2001), Nr. 1, S. 65–82
- Van der Walt et al. 2014 VAN DER WALT, Stéfan; SCHÖNBERGER, Johannes L.; NUNEZ-IGLESIAS, Juan; BOULOGNE, François; WARNER, Joshua D.; YAGER, Neil; GOUILLART, Emmanuelle; YU, Tony: *scikit-image: image processing in Python*. In: *PeerJ* 2 (2014), e453

3D-Skizzen in Virtual Reality zur Unterstützung der frühen Phasen der Produktentwicklung

3D Sketching in Virtual Reality to support the early phases of product development

Carsten Seybold¹, Frank Mantwill¹

¹Helmut Schmidt Universität, Maschinenelemente und Rechnergestützte Produktentwicklung, Hamburg
carsten.seybold@hsu-hh.de

Abstract (deutsch): Die Handskizze stellt derzeit immer noch das Standardwerkzeug für die Erstellung von Konzept- und Entwurflösungen dar. In der fortschreitenden Digitalisierung des Produktentwicklungsprozesses werden solche analog erstellten Inhalte selten dokumentiert und sind für Folgekonstruktionen nicht verfügbar. Eine Alternative kann die Nutzung von digitalen Verfahren sein. In diesem Beitrag wird die Erstellung von 3D-Skizzen in den frühen Phasen der Produktentwicklung unter Nutzung von Virtual Reality untersucht. Unter der Nutzung eines eigens hierfür entwickelten Demonstrators wurden Probanden mit der Lösung von zwei unterschiedlichen Problemstellungen beauftragt. Die hier erstellten Lösungen sind nach den Faktoren konstruktive Weiterverwendbarkeit, Interpretier- & Nachvollziehbarkeit, Eignung als Bewertungshilfe und Lösungsgüte empirisch bewertet worden. Die Untersuchung ergab, dass Skizzen in VR in den benannten Bereichen Vorteile gegenüber der herkömmlichen Skizzenerstellung bei mindestens gleichbleibender Lösungsgüte bieten können. Folglich können 3D-Skizzen zur Unterstützung der im Produktentwicklungsprozess nachfolgenden Prozesse beitragen.

Keywords (deutsch):

3D Skizzen, Virtual Reality, Konzeptphase, Entwurfsphase, Probandenversuche

Abstract (english): Hand-drawn sketches are the standard tool for the creation of concept and design solutions. During the digital transformation of the product development process, such analogue content is rarely documented and it is not available for subsequent designs. An alternative could be the use of digital methods. This article examines the creation of 3D sketches in the early phases of product development using virtual reality. Using a developed demonstrator tool, test subjects were assigned to solve two different design problems. The solutions created here have been empirically evaluated according to the factors constructive reusability, clarity, suitability for assessment and solution quality. As a result, sketches in VR can offer advantages in the named areas compared to conventional sketching with at least the same solution quality. Therefore, 3D sketches can contribute to the support of the subsequent processes in the product development process.

Keywords (english):

3D sketches, virtual reality, conceptual design, embodiment design, proband experiment

1 Einleitung

Die Produktentwicklung ist bereits seit einigen Jahren sehr stark durch die Rechnerunterstützung geprägt. Viele der angewendeten Methoden und Arbeitsweisen werden nach Feldhusen und Grothe (2013) erst durch diese Rechnerunterstützung ermöglicht. Datenbanksysteme, wie die Produktdatenmanagementsysteme (PDM-Systeme), können durchgängig eine Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses über alle Phasen hinweg bereitstellen. Bei der Unterstützung durch konkrete Arbeitsanwendungen sieht das zum Teil anders aus. Die Bearbeitung in den gestaltenden Phasen wird durch CAD und andere CAx-Systeme bis hin zur digitalen Fabrik mit dezidierten Anwendungen unterstützt. In den Arbeitsschritten der frühen Phasen der Produktentwicklung kommen häufig ausschließlich Office-Anwendungen zum Einsatz. Notwendige Skizzen zur Lösungsfindung fertigt der Produktentwickler größtenteils in Handarbeit ohne digitale Unterstützung an. Nach Robertson und Radcliffe (2009) tendiert immer noch ein Großteil der Entwickler zum Arbeiten mit Papier und Bleistift. Dies führt dazu, dass die Unterstützungsmöglichkeiten von PDM-Systemen in den frühen Phasen der Produktentwicklung nicht ausreichend genutzt werden können. Während Anforderungen an Produkte sich gut digitalisieren und damit in PDM-Systemen abbilden lassen, so entsteht ein Problem bei Handskizzen, handgeschriebenen Notizen zu diesen Skizzen oder gar bei physischen Modellen aus Pappe, Papier oder anderen Hilfsmitteln. Ein Dokumentieren von handgefertigten Skizzen ist durch eine Digitalisierung möglich, die Weiterverwendungsmöglichkeiten sind aber sehr stark eingeschränkt. Durch den Medienbruch entsteht ein zusätzlicher Aufwand. Das Modell muss digital aus den zweidimensionalen Ansichten nachmodelliert werden. Entsprechend findet das nachträgliche Digitalisieren und eine anschließende Weiterverarbeitung nach Müller (2007) kaum Anwendung. Bei dem Einsatz von PDM-Systemen in Unternehmen ist es allerdings unter anderem das Ziel, bei der Entwicklung neuer Modellreihen, Anpassungs- oder Variantenkonstruktionen auf die Daten vorheriger Konstruktionen zurückgreifen zu können. Dies ist wie dargestellt im Bereich der Handskizzen und Modelle bisher nicht der Fall.

Folglich stellt sich die Frage, ob der Skizzenerstellung im Produktentwicklungsprozess genügend Bedeutung zu kommt die einen Implementierungsaufwand rechtfertigt. Wie Sachse und Leinert (2002) herausgestellt haben, stellen Skizzen eine Unterstützung des geistigen Handelns dar. Sachse et al. (1999) geben an, dass Skizzen als Analyse-, Lösungs-, Kommunikations- und Dokumentationshilfe verwendet werden. Einzig als Bewertungshilfe für Lösungskonzepte finden Handskizzen bisher kaum Anwendung. Die Bewertung findet in der Regel während der Arbeit in CAD statt. Eine Unterstützung erfolgt jedoch nicht nur durch die fertige Skizze oder das physische Modell, sondern bereits während der Skizzen-, bzw. Modellerstellung. Ein Vervollständigen des Lösungsgedankens erfolgt erst während der Tätigkeit des Skizzierens. Zudem führt das Skizzieren nach Sachse und Leinert (2002) nachweislich zu einer Beschleunigung der Arbeit in der Produktentwicklung.

2 Zielsetzung

Die Dokumentation von Skizzen und Modellen in PDM-Systemen ist nach den herausgearbeiteten Eigenschaften folglich anzustreben. Hiermit gilt es eine verbesserte Durchgängigkeit im Produktentwicklungsprozess zu erreichen. Dies ist mit analog erstellten Skizzen bisher nicht gelungen. Eine Lösung kann die Verwendung von digitalen Skizzen darstellen, da diese bereits aus technischer Sicht mit einem geringeren Aufwand in PDM-Systemen gespeichert werden können.

Durch das Speichern von Konzept- und Entwurfslösungen in PDM-Systemen lassen sich diese Informationen bei Folgekonstruktionen weiterverwenden. Des Weiteren kann durch den Zugriff auf vorhandene Entwurfslösungen die unnötige Wiederholung von Arbeitsschritten verringert werden. Entsprechend gilt es nun eine geeignete Plattform für die digitalisierte Skizzenerstellung herauszuarbeiten.

3 Der Einsatz von CAD und Virtual Reality in der Produktentwicklung

Robertson und Radcliffe (2009) haben herausgestellt, dass CAD-Systeme unter anderem geeignete Systeme für die Visualisierung und die Kommunikation sind. Dies sind Funktionen, die auch für Skizzen von hoher Relevanz sind. Die Verwendung von CAD-Systemen zur Skizzenerstellung ist möglich und wird teilweise in der Industrie angewendet. Die Forderungen solcher Systeme, genaue Parameter wie Längenmaße oder Lagebedingungen anzugeben, widersprechen allerdings nach Müller (2007) dem Grundsatz der gewollten Ungenauigkeit innerhalb von Skizzen. Einzelnen Linien wird innerhalb von Skizzen keine zu hohe Bedeutung beigemessen und es bleibt Raum für Veränderungen. Robertson und Radcliffe (2009) raten aus diesen Gründen von dem Einsatz der CAD-Systeme zur Skizzenerstellung ab. Müller (2007) geht davon aus, dass der Einsatz von CAD zur Skizzenerstellung sogar kreativitätshemmende Wirkungen haben kann. Die frühen Phasen der Produktentwicklung werden durch gängige CAD-Software also nicht sinnvoll unterstützt.

Eine mögliche Alternative stellt die 3D-Skizzenerstellung in Virtual Reality (VR) dar. Der Begriff VR umfasst einen äußerst umfangreichen Bereich. Die Nutzung von CAD oder anderen CA-Systemen stellt ebenfalls eine Art von Virtual Reality dar. Es wird bei diesen Desktop-Systemen von nicht immersiver VR gesprochen. Die in dieser Arbeit verfolgten Ansätze befassen sich mit immersiven virtuellen Techniken. Burdea und Coiffet (1994) definieren die VR über die Faktoren Interaktion, Immersion und Imagination. Der Nutzer der Virtuellen Realität hat die Möglichkeit, die virtuelle Welt zu beeinflussen oder zu verändern (Interaktion). Über das Ansprechen der Sinne des Nutzers, taucht dieser in die Umgebung ein (Immersion) und wie gut die virtuelle Umgebung funktioniert hängt in hohem Maße von der Vorstellungskraft des Nutzers ab (Imagination). Dörner et al. (2013) ordnen Head-Mounted-Displays (HMDs) und CAVE-Systeme (auf Projektionen basierende VR-Umgebungen) als solche immersive VR-Systeme ein.

Die Technologie VR findet bereits in verschiedenen Bereichen in der Produktentwicklung Anwendung. Es ist aber festzustellen, dass sich die Anwendungen gemäß Rademacher (2014) auf die Darstellung und Evaluation von hauptsächlich visuellen Produkteigenschaften beschränken. Dies können beispielsweise nach Ovtcharova (2010) und Dörner et al. (2013) Design-Review Prozesse sein. Schenk und Schumann (2017) sowie Bruns (2015) nennen die Produktpräsentation im Kundenumfeld oder das Marketing. Hausstädtler (2010) und Encarnacao et al. (2000) geben hier Montage- und Verbauuntersuchungen an. Auch von Dörner et al. (2013) und Bruns (2015) herausgestellte Anwendungsfälle wie die Ausbildung von Instandhaltungspersonal, Montageuntersuchungen oder Trainings dienen lediglich dem Anwenden von im Vorfeld meist aufwendig außerhalb der VR erstellten Abläufen.

Aus den genannten Anwendungsfeldern ist ersichtlich, dass bisher in der Praxis kaum neue Inhalte in Virtual Reality erzeugt werden. VR wird in einzelnen Branchen wie der Automobilindustrie bereits langfristig eingesetzt. Es handelt sich hierbei allerdings um Einzelanwendungen. Ein flächendeckender oder gar branchenübergreifender Einsatz findet bisher nicht statt. Dies gilt für den Bereich der Produktentwicklung aber auch für den Bereich der Produktion, bzw. Digitalen Fabrik, in denen nach Runde (2007) sehr ähnliche Anwendungsfelder anzutreffen sind. Erst mit den technologischen Entwicklungen der letzten 5 Jahre besteht die Möglichkeit für Unternehmen Inhalte in VR zu erschaffen ohne umfangreiche Investitionen, wie beispielsweise in CAVE-Systeme, zu tätigen.

Ansätze, VR auch im Bereich des Skizzierens einzusetzen, gibt es bereits. Beispielsweise erarbeitete Pache (2005) auf der Grundlage der Entwicklung eines 3-D-Skizzierers welche Funktionalitäten ein solches System für den Nutzer aufweisen sollte. Fechter und Wartack (2016) erarbeiteten ebenfalls eine 3D-Skizzenumgebung in VR mit dem Ziel der Entwicklung eines Hard- und Softwarekonzepts für zukünftige Systeme. Mit der Entwicklung eines Hybridmodelliersystems setzt Deisinger (2002) den Fokus auf die Werkzeuge für Modellier- und Skizziertechniken. Zahlreiche weitere Forschungen befassen sich mit der hardware- und softwareseitigen Umsetzung von Skizziermöglichkeiten in VR oder die Effekte auf den Menschen. Beispielhaft sind hier Fechter et al. (2020) genannt. Diese beschäftigen sich mit der Erlernbarkeit sowie der kognitiven Belastung durch Ein- und Ausgabesysteme wie dem Fingertracking bei der Erstellung von Vorentwürfen.

4 Forschungsvorgehen

Im Gegensatz zu den voraus genannten Ansätzen ist es das Ziel des hier verwendeten Ansatzes, das Unterstützungspotential von 3D-Skizzen in VR und dessen Einfluss auf den Produktentwicklungsprozess empirisch zu untersuchen. Hierfür ist die Unterstützung der weiteren Prozessschritte in der Produktentwicklung entscheidend. Im weiteren Verlauf bilden Skizzen die Grundlage für die Entscheidungsfindung und die Ausdetaillierung in CAD. Aus diesem Grund soll ermittelt werden, ob mit der 3D-Skizzenerstellung in VR eine höhere konstruktive Weiterverwendbarkeit für die Ausdetaillierung in CAD, sowie eine höhere Eignung als Bewertungshilfe gegenüber Handskizzen erreicht werden kann. Um Skizzen und deren Informationen auch bei Folgekonstruktionen als Gestaltungsgrundlage nutzen zu können, ist es ebenfalls von Bedeutung, ob diese durch Personen, die nicht an der Entwicklung beteiligt waren, verstanden werden können. Auch dies wird hier untersucht. Als Rahmenbedingung ist es hierbei zu erreichen, dass 3D-Skizzen in VR mindestens eine gleichbleibende Lösungsqualität oder –güte aufweisen wie entsprechende Handskizzen.

4.1 Die 3D-Skizzierumgebung und das Forschungsdesign

Um die Ziele des hier verwendeten Ansatzes erreichen zu können wurde ein Demonstrator entwickelt. Mit diesem Demonstrator soll dem Nutzer ein Tool zur Verfügung gestellt werden, welches zahlreiche Skizzier- und Modellierwerkzeuge zur Verfügung stellt.

Den Kern der Hardware bildet das Head-Mounted-Display (HMD) *HTC Vive*. Dieses System wurde für die Untersuchung ausgewählt, da es neben der eigentlichen HMD-Hardware ebenfalls zwei Bedienelemente und einen vergleichsweise großen Bewegungsraum von 12m² bietet.



Bild 1: Skizzierfunktionen des Demonstrators an einem der Bedienelemente (l.) und das Mixed Reality Setup (r.)

Die Software wurde in der Entwicklungsumgebung Unity erstellt und stellt dem Nutzer Funktionen zum zeichnerischen Skizzieren und zur Modellbildung über Grundkörper zur Verfügung. Ausgewählte Skizzierfunktionen sind beispielsweise das Freihandskizzieren, das Zeichnen von geraden Linien oder Kreisbögen. Über verschiedene Skizzieroptionen lassen sich beispielsweise die Strichstärke, die Farbe und die Strichform anpassen. Ein Ausrichten von Skizzierelementen an zweidimensionalen Hilfsebenen ist ebenfalls möglich. Neben den Skizzierfunktionen werden geometrische Grundkörper wie Rechtecke, Kugeln, Zylinder und andere Körper zur Modellierung bereitgestellt. Diese Objekte können in der virtuellen Umgebung frei positioniert, kopiert, gruppiert und in ihren Abmessungen manipuliert werden. Die Bereitstellung der unterschiedlichen Skizzier- und Modellierfunktionen soll dem Nutzer eine möglichst freie Arbeitsweise ermöglichen. Beide Funktionsgruppen können auch gemischt eingesetzt werden.

Das Messen von Abständen und das Einfügen von Audiokommentaren über Speech-to-Text stellen weitere unterstützende Hilfsmittel dar. Diese und weitere Funktionen stehen dem Nutzer in Form eines Auswahlménüs direkt an einem der Bedienelemente zur Verfügung, sodass mit dem anderen Bedienelement diese ausgewählt und anschließend in der Umgebung angewendet werden können (vgl. Bild 1). Neben der internen Möglichkeit Arbeitsfortschritte zu speichern und zu laden, können diese auch im STL-Format und FBX-Format exportiert werden. Eine Weiterverwendung in CAD ist hierdurch grundsätzlich möglich.

Um den Nutzen eines solchen 3D Skizziertools in VR für den Produktentwicklungsprozess ermitteln zu können, ist der Demonstrator neben den eigentlichen Skizzier- und Modellierfunktionen ebenfalls auf die Evaluation ausgelegt worden. Die Evaluation erfolgte durch Probanden, welche unterschiedliche konstruktive Problemstellungen unter Nutzung des Demonstrators zu bearbeiten hatten. Für eine spätere Auswertung sind die Probanden während der Bearbeitung per Video aufgezeichnet worden. Um die Handlungen der Probanden im virtuellen Kontext auswerten zu können, wurde am Demonstrator ein Greenscreen für eine Mixed Reality (MR) Umgebung eingerichtet. Hierbei verfügt der Demonstrator über ein drittes Bedienelement der *HTC Vive*, welches an einer realen Kamera angebracht ist und ein Tracking dieser Kamera ermöglicht. Die Position der realen Kamera wird so mit einer virtuellen Kamera in der VR überlagert. Bild 1 zeigt auf der rechten Seite den MR-Aufbau. Dieser Aufbau ermöglicht eine Videoaufzeichnung des realen Kameraabbildes des Probanden eingebettet in die virtuelle Umgebung. Zusätzlich wird das Sichtfeld des Probanden aufgezeichnet. Bild 2 zeigt beispielhaft eine Mixed Reality Aufnahme eines Probanden während der Bearbeitung.



Bild 2: Mixed Reality Aufnahme eines Probanden während der Bearbeitung der Problemstellung *Konstruktion Motorprüfstand*, inkl. Sichtfeld des Probanden

Die Probanden sind vor der Benutzung des 3D Skizziertools in dessen Funktionsumfang und Bedienung einzuweisen gewesen. Aus diesem Grund verfügt der Demonstrator über ein zweiteiliges Tutorial. Hier werden im ersten Schritt nach dem Gamification-Ansatz nach Kapp (2002) spielerisch die grundsätzliche Bedienung des HMD und dessen Bedienelemente vermittelt. Im zweiten Teil erfolgt die Vermittlung des Funktionsumfangs des Tools spielerisch anhand einer Beispielaufgabe.

Für die Evaluation sind zwei unterschiedliche konstruktive Problemstellungen entwickelt worden, welche durch insgesamt 27 Probanden bearbeitet wurden.

Hierbei gilt es in der ersten Problemstellung, einen Entwurf für einen Motorprüfstand zu entwickeln. Auf diesem soll ein Pkw-Motor inklusive aller nötigen Anbaugeräte untergebracht und betrieben werden können. Durch den Probanden sind auch weitere Anforderungen wie die Mobilität des

Prüfstandaufbaus zu berücksichtigen. Neben dieser konstruktiv geprägten Problemstellung ist in der zweiten Problemstellung der Fokus in Richtung Anlagenplanung und Arbeitsplatzgestaltung gelegt. Bei dieser Problemstellung ist es das Ziel, einen Bereich von Prüfstandsaufbauten neu zu planen. Neben der Positionierung der Prüfstände und der zugehörigen Ventil- und Pumpeneinheiten, gilt es auch das Verlegen der Hydraulikleitungen, Fluchtwege und beispielsweise auch die Erreichbarkeit mit einem Kran zu berücksichtigen. Eine solche Problemstellung wurde bewusst gewählt, da Anordnungsprobleme auch problemstellungsübergreifend einen großen Anteil in der frühen Produktentwicklung darstellen.

Die Problemstellungen für die Probanden haben ihren Ursprung in realen Fragestellungen und orientieren sich auch in der Struktur möglichst nah an der realen Arbeitsweise und dem Arbeitsumfeld von Produktentwicklern und Anlagenplanern. So liegen beispielsweise die konstruktiven Anforderungen nicht strukturiert und klar erkennbar aufbereitet für den Probanden vor, sondern dieser muss sich die Anforderungen selbstständig aus den gegebenen Informationen erarbeiten und priorisieren. Dabei wird ebenfalls darauf Wert gelegt, dass der Proband für die Lösungsfindung kein spezielles Fachwissen benötigt. Ist dies dennoch der Fall, dann werden entweder die nötigen Informationen bereitgestellt oder die Problemstellung ist vereinfacht worden.

Außerdem muss darauf hingewiesen werden, dass das Ziel für die Probanden keine fertige und in CAD ausdetaillierte Lösung ist. Es soll durch die Probanden eine Entwurfsskizze, bzw. ein Entwurfsmodell erstellt werden, welches ein Weiterarbeiten und Ausdetaillieren in CAD ermöglicht. Die für die Bearbeitung der Problemstellungen notwendigen CAD-Modelle und Umgebungen werden im Demonstrator bereitgestellt.

4.2 Bewertungsfaktoren

Für die Evaluation wurden die Aufzeichnungen der Versuche, die durch die Probanden erstellten Lösungen und Fragebögen an die Probanden herangezogen. Die Entwurfslösungen der Probanden wurden anhand der Fragestellung nach verschiedenen Faktoren bewertet. Bewertet wurden die Lösungsgüte, die Interpretier- & Nachvollziehbarkeit, die Weiterverwendbarkeit und die Eignung als Bewertungshilfe der Skizzen und Modelle. Hierbei werden diese Bewertungsfaktoren wie folgt definiert:

- **Lösungsgüte:** Die Bewertung der Entwurfslösungen anhand gewichteter Kriterien abgeleitet aus den Anforderungen an die Konstruktionen mit Hilfe von Nutzwertanalysen. Die Bewertung ist bewusst so ausgeführt, wie sie im Produktentwicklungsprozess zur Entscheidungsfindung im weiteren Verlauf Anwendung finden kann. Für die Bewertung der Lösungsgüte wurden neben den eigentlichen Entwurfsskizzen ebenfalls die schriftlichen oder verbalen Anmerkungen der Probanden gegenüber der Versuchsleitung berücksichtigt.
- **Interpretier- & Nachvollziehbarkeit:** Es erfolgt eine Bewertung der Entwurfslösung, ob die konstruktiven Ausprägungen und Entscheidungen durch eine außenstehende, an der Entwicklung nicht beteiligten Person, nachvollzogen werden können. Dies ist beispielsweise dann von Bedeutung, wenn sich Zuständigkeitsbereiche von Arbeitsgruppen über Schnittstellen angrenzen oder Entscheidungsträger in den Entwicklungsprozess eingebunden werden. Auch das Speichern und Verwalten von Skizzen und Modellen in PDM-Systemen als Grundlage für Anpassungs-, Varianten- und Folgekonstruktionen ist nur dann sinnvoll, wenn diese durch andere Produktentwickler interpretiert werden können. Die Bewertung erfolgt anhand eines Kriterienkataloges, in dem die einzelnen Teilfunktionen und Ausprägungen einer Lösung bewertet werden. Die Lösungsgüte des Entwurfs wird für diese Bewertung nicht betrachtet. Es ist lediglich relevant ob die einzelnen Ausprägungen der Lösungen verstanden werden können.
- **Weiterverwendbarkeit:** Bei diesem Bewertungsfaktor stehen die Weiterverwendungsmöglichkeiten der Entwurfslösungen für eine Ausdetaillierung in CAD im Fokus. Es wird der Aufwand bewertet, in wie weit sich die Skizzen und Modelle als Grundlage für die Arbeit in CAD eignen. Der Fokus liegt hier nicht auf der systemseitigen technischen Umsetzung, wie beispielsweise die verfügbaren

Datenformate und IT-Schnittstellen zu CAD. Vielmehr soll herausgestellt werden, in welchem Maße der Produktentwickler in seinen Arbeitsschritten unterstützt werden kann. Beispielhaft lassen sich hier das direkte Übernehmen von Abmessungen, Objektpositionen und –anordnungen aus den Entwurfslösungen als Vorlage in CAD und die erforderliche Nacharbeit aufführen. Auch für diese Bewertung wird die Lösungsgüte des Entwurfs nicht berücksichtigt.

- Eignung als Bewertungshilfe: Wie bereits dargestellt, folgt in den nächsten Schritten des Produktentwicklungsprozesses nach Feldhusen und Grothe (2013) die Entscheidungsfindung, ob eine Entwurfslösung und welche dieser Lösungen weiterverfolgt wird. Dies erfolgt in der Regel arbeitsgruppenübergreifend unter Einbindung übergeordneter Entscheidungsinstanzen im Unternehmen. Nicht immer sind die Teilnehmer dieses Entscheidungsprozesses an den vorherigen Entwicklungsprozessen beteiligt. Mit diesem Faktor wird bewertet, ob in der jeweiligen Entwurfslösung alle benötigten Informationen für eine schnelle Entscheidungsfindung bereitgestellt werden. Die tatsächliche Lösungsgüte der jeweiligen Lösung ist hier nicht von Bedeutung.

Die Interpretier- & Nachvollziehbarkeit, sowie die Weiterverwendbarkeit wurden von zwei unabhängigen Experten aus der Produktentwicklung getrennt voneinander bewertet. Es handelt sich dabei um aktive CAD-Konstrukteure mit langjähriger Berufserfahrung. Alle Bewertungsfaktoren wurden nach Kriterienkatalogen bewertet. Für die Eignung als Bewertungshilfe basieren diese beispielsweise auf den Anforderungen an die Lösungen.

5 Beschreibung der Stichprobe

Problemstellung eins, *„Konstruktion Motorprüfstand“*, wurde insgesamt durch 15 Probanden in VR bearbeitet, Problemstellung zwei, *„Umgestaltung Servohydraulikprüfstände“*, durch 12 Probanden. Eine Verteilung der Probanden an die Problemstellungen erfolgte nach Dörner et al. (2013) bewusst zufällig. Die Probanden lassen sich mit 14 Personen der Altersgruppe 20 bis 29 Jahre zuordnen, das minimale Alter beträgt hier 24 Jahre. 11 Probanden zählen zu der Altersgruppe 30 bis 39 Jahre. Die übrigen zwei Probanden sind mit 40 und 59 Jahren älter. Des Weiteren sind 8 Probanden, also knapp 30% der Probanden, weiblichen Geschlechts.

Die Probanden lassen sich in drei verschiedene Berufsgruppen einteilen. Eine große Gruppe bilden Studenten aus dem Bereich Produktentwicklung. Die Gruppe umfasst 12 Probanden und diese befanden sich ausschließlich kurz vor Ende des Masterstudiums. Erwartungsgemäß verfügen die Probanden dieser Gruppe nur über vergleichsweise wenig Berufserfahrung im Umfeld der Produktentwicklung (Mittelwert $\mu = 0,6$ Jahre; Standardabweichung $\sigma = 0,6$ Jahre). Weitere 12 Probanden gaben an als Ingenieur tätig zu sein. Bei dieser Berufsgruppe ergab sich eine durchschnittliche konstruktive Berufserfahrung von $\mu = 2,5$ Jahren ($\sigma = 2,2$ Jahre). Die letzte Berufsgruppe mit 3 Probanden verfügt über keine akademische Ausbildung. Es handelt sich hier um zwei ausgebildete Konstrukteure und einen ausgebildeten Technischen Zeichner. Die Berufserfahrung liegt hier bei durchschnittlich $\mu = 15,7$ Jahren ($\sigma = 4,9$ Jahre). Gegenüber der in VR erstellten Entwurfslösungen steht für jede Problemstellung eine herkömmlich erstellte Vergleichslösung. Diese wurde durch einen unabhängigen Probanden, im Alter von 57 Jahren und mit 30 Jahren Berufserfahrung als Konstrukteur erstellt. Während der Lösungserstellung nutzte der Proband mehrere Handskizzen zur Visualisierung der Lösung und ein CAD-System, um gegebene Komponenten im Raum vor zu positionieren.

6 Ergebnisse der Untersuchung & Beurteilung

Bei der Betrachtung der Lösungsgüte ergibt sich für die Problemstellung *„Konstruktion Motorprüfstand“* kein signifikanter Unterschied zwischen den Entwurfslösungen, die durch die Probanden in VR erstellt worden sind und der herkömmlich erstellten Vergleichslösung (One-Sample t-Test; $t(14) = -1,1$; $p = 0,286$). Für die Problemstellung *„Umgestaltung Servohydraulikprüfstände“* liegt ein Unterschied

vor. Die Lösungsgüte der in VR erstellten Entwurflösungen ist signifikant besser ($t(11) = 8,6; p < 0,001$). Dies ist ein unerwartetes Ergebnis, da sich unter den Probanden in VR ein hoher Anteil von in der Produktentwicklung wenig erfahrenen Teilnehmern befindet. Folglich wird die Lösungsgüte der Gruppe *Studenten* und der Gruppe *Ingenieure / Konstrukteure* miteinander verglichen. Zwischen den einzelnen Gruppen liegt bei der Problemstellung *„Konstruktion Motorprüfstand“* in Bezug auf die Lösungsgüte kein signifikanter Unterschied vor (Two-Sample t-Test; $t(13) = -0,5; p = 0,297$). Bei der Problemstellung *„Umgestaltung Servohydraulikprüfstände“* ist die Lösungsgüte der Ingenieure und Konstrukteure signifikant besser als die der Studenten ($t(8) = -3,7; p = 0,003$).

Tabelle 1: Testergebnisse

Bewertungsfaktor & Problemst.	Experte	Testergebnis	Signifikanz	Korrelation
Interpretier- & Nachvollziehbarkeit <i>„Konstruktion Motorprüfstand“</i>	1	$t(14) = 3,2; p = 0,005^1$	signifikant	$r(13) = 0,53$
	2	$t(14) = 2,2; p = 0,042$	signifikant	$p = 0,044^2$
Interpretier- & Nachvollziehbarkeit <i>„Servohydraulikprüfstände“</i>	1	$t(11) = 4,5; p < 0,001$	signifikant	$r(10) = 0,58$
	2	$t(11) = 8,0; p < 0,001$	signifikant	$p = 0,048$
Weiterverwendbarkeit <i>„Konstruktion Motorprüfstand“</i>	1	$t(14) = 2,2; p = 0,047$	signifikant	$r(13) = 0,83$
	2	$t(14) = 2,2; p = 0,041$	signifikant	$p < 0,001$
Weiterverwendbarkeit <i>„Servohydraulikprüfstände“</i>	1	$t(11) = 5,9; p < 0,001$	signifikant	$r(10) = 0,75$
	2	$t(11) = 4,2; p = 0,002$	signifikant	$p = 0,005$
Eignung als Bewertungshilfe <i>„Konstruktion Motorprüfstand“</i>	-	$t(14) = -0,3; p = 0,734$	n. signifikant	-
Eignung als Bewertungshilfe <i>„Servohydraulikprüfstände“</i>	-	$t(11) = 7,7; p < 0,001$	signifikant	-

¹Alle Tests: One-Sample t-Test, Signifikanzniveau: $\alpha = 0,05$

²Korrelation nach Pearson, entspricht nach Cohen (1992) jeweils einem starken Effekt

Bezogen auf die Interpretier- & Nachvollziehbarkeit der Entwurflösungen ergibt sich ein eindeutiges Bild. Die Entwurflösungen der Probanden aus den Problemstellungen *„Konstruktion Motorprüfstand“* und *„Umgestaltung Servohydraulikprüfstände“* wurden durch beide Experten als signifikant stärker nachvollziehbar bewertet. Die statistischen Ergebnisse sind für eine bessere Übersichtlichkeit in Tabelle 1 zusammengefasst. Hierbei korrelieren die Bewertungen der beiden Experten signifikant. Die Bewertung der konstruktiven Weiterverwendbarkeit wurde im Ergebnis ähnlich bewertet. Auch hier liegt für beide Problemstellungen eine signifikant bessere Eignung für eine Weiterbearbeitung in CAD aus konstruktiver Sicht vor. Die Bewertungen der einzelnen Experten korrelieren auch für diesen Bewertungsfaktor. Eine Eignung der Skizzen als Bewertungshilfe für Lösungsansätze fällt jedoch unterschiedlich aus. Im Vergleich zu herkömmlichen Handskizzen konnte sich die Eignung als Bewertungshilfe von 3D-Skizzen in VR bei der Problemstellung *„Umgestaltung Servohydraulikprüfstände“* als signifikant besser erweisen. Bei der Problemstellungen *„Konstruktion Motorprüfstand“* liegt hingegen kein signifikanter Unterschied vor. Neben einem Gesamtvergleich wurde für die einzelnen Bewertungsfaktoren ebenfalls statistisch überprüft, ob sich Unterschiede zwischen den Teilnehmergruppen *Studenten* und *Ingenieure / Konstrukteure* ergeben. Hier konnten allerdings keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Interpretier- & Nachvollziehbarkeit, Weiterverwendbarkeit und Eignung als Bewertungshilfe zwischen diesen beiden Gruppen ermittelt werden.

Die Bewertungsergebnisse zeigen, dass die Verwendung von 3D-Skizzen in VR eine Unterstützung der im Produktentwicklungsprozess nachfolgenden Prozessschritte bieten kann. Eine eindeutige Aussage lässt sich über den Einsatz von 3D-Skizzen als Bewertungshilfe aufgrund der Ergebnisse nicht treffen. Unter der Berücksichtigung, dass die Vergleichslösungen von einem Probanden mit wesentlich höherer Erfahrung im Bereich der Produktentwicklung erstellt worden sind, ist aber eine positive Tendenz erkennbar.

Aufgrund der geringen Stichprobengröße und bedingt durch den Umstand, dass in dieser Untersuchung nur zwei unterschiedliche Problemstellungen untersucht werden konnten, bleibt eine

kritische Betrachtung der Ergebnisse notwendig. Zudem konnte in dieser Untersuchung nur eine kleine Auswahl an Bewertungsfaktoren betrachtet werden. Auch umfasst die Varianz möglicher Problemstellungen in der Produktentwicklung ein sehr umfangreiches Spektrum. Dies bedeutet, dass die Anwendung von VR zur Skizzenerstellung in den untersuchten Bereichen Vorteile bringen kann, in anderen Bereichen ggf. aber nicht. Eine Generalisierung der Aussagekraft dieser Ergebnisse wird daher erschwert. Folglich ist die Durchführung von weiteren Untersuchungen mit größeren Stichprobenumfängen, anderen Problemstellungen und eine Erweiterung der Bewertungsfaktoren empfehlenswert. Als tendenzielle Ausrichtung behalten die in dieser Untersuchung erzielten Ergebnisse aber ihre Gültigkeit und haben das Potential der Skizzenerstellung in VR aufgezeigt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die 3D-Skizzenerstellung in Virtual Reality untersucht. Hierbei wurde ein Demonstrator in VR erstellt, welcher verschiedene Skizzier- & Modellierfunktionen für den Nutzer zur Verfügung stellt. Das Ziel war es, das Unterstützungspotential von 3D-Skizzen in VR und den Einfluss dieser auf den Produktentwicklungsprozess zu untersuchen. Insgesamt wurden 27 Probanden mit der Bearbeitung von zwei verschiedenen Problemstellungen in VR beauftragt.

Durch die Probandenversuche konnte ermittelt werden, dass die Skizzenerstellung in VR im Vergleich zur klassischen Handskizze nach Einschätzung der Experten eine höhere Weiterverwendbarkeit für die Weiterbearbeitung in CAD aus konstruktiver Sicht bietet. Die Lösungsqualität ist, im Vergleich zu herkömmlich erstellten Handskizzen, auf gleichbleibendem Niveau. Auch zeigt sich, dass die in VR erstellten Skizzen durch an der Erstellung unbeteiligte Experten gut verstanden und als Grundlage zur weiteren Bearbeitung in CAD verwendet werden können. Auch ein Einsatz von 3D-Skizzen als Bewertungshilfe ist tendenziell bereits vor der Nutzung von CAD möglich.

Um die 3D-Skizzenerstellung in VR vollständig in den Entwicklungsprozess einbinden zu können, sind allerdings noch weitere Anpassungen notwendig. Aus technischer Sicht besteht weiterhin Handlungsbedarf bei der Modellqualität der 3D-Skizzenmodelle. Diese befindet sich noch nicht auf einem praxistauglichen Niveau. Auch die prozessuale Integration in PDM-Systeme muss an die Erfordernisse von 3D-Skizzen angeglichen werden. Die Auswertung der Versuchsreihe nach weiteren Bewertungsfaktoren und die Entwicklung eines Prozessmodells für die Integration von 3D-Skizzen in PDM-Systeme ist Bestandteil weiterer Untersuchungen.

Literatur

- | | |
|-------------------------|---|
| Bruns 2015 | BRUNS, Matthias: <i>Virtual Reality: Eine Analyse der Schlüsseltechnologie aus der Perspektive des strategischen Managements</i> . Hamburg: Diplomica, 2015. |
| Burdea und Coiffet 1994 | BURDEA, Grigore; COIFFET, Philippe: <i>Virtual reality technology</i> . New York: Wiley, 1994. |
| Cohen 1992 | COHEN, Jacob: <i>A power primer</i> . In: <i>Psychological Bulletin</i> (1992), Nr. 112, S. 155–159. |
| Deisinger 2002 | DEISINGER, Joachim: <i>Entwicklung eines hybriden Modellersystems zur immersiven konzeptionellen Formgestaltung</i> . Heimsheim: Jost-Jetter, 2002. |
| Dörner et al. 2013 | DÖRNER, Ralf; BROLL, Wolfgang; GRIMM, Paul; JUNG, Bernhard: <i>Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität</i> . Heidelberg: Springer, 2013. |
| Encarnacao et al. 2000 | ENCARNACAO, Jose; BENÖLKEN, Paul; KNÖPFLE, Christian: <i>Virtuelle Realität: Perspektiven für den Einsatz in der Produktentstehung</i> . In: <i>Virtuelle Produktentstehung: Innovationsform Vorträge</i> (2000), S. 287–302. |

- Fechter et al. 2020 FECHTER, Marius; SCHLEICH, Benjamin; WARTZACK, Sandro: *CAD-Gestaltmodellierung in VR für die frühe Entwurfsphase*. In: *Konstruktion* (2020), Nr. 72, S. 69–74.
- Fechter und Wartzack 2016 FECHTER, Marius; WARTZACK, Sandro: *Konzept für ein VR-System zur intuitiven Modellierung durch natürliche Interaktion*. In: Stelzer, Ralf (Hrsg.): *Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung & Konstruktionstechnik* (2016), S. 561–570.
- Feldhusen und Grothe 2013 FELDHUSEN, Jörg; GROTHE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- Hausstädtler 2010 HAUSSTÄDTLER, Uwe: *Der Einsatz von Virtual Reality in der Praxis: Handbuch für Studenten und Ingenieure*. 2. Aufl. Berlin: Rhombos-Verl., 2010.
- Kapp 2002 KAPP, Karl M.: *The gamification of learning and instruction: Game-based methods and strategies for training & education*. San Francisco: Pfeiffer, 2012.
- Müller 2007 MÜLLER, Franz Daniel: *Intuitive digitale Geometriemodellierung in frühen Entwicklungsphasen*. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2007.
- Ovtcharova 2010 OVTCHAROVA, Jivka G.: *Virtual Engineering: principles, methods and applications*. In: *International Design Conference - Design 2010* (2010), S. 1267–1274.
- Pache 2005 PACHE, Martin Walter: *Sketching for conceptual design: Empirical results and future tools*. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2005.
- Rademacher 2014 RADEMACHER, Martin H.: *Virtual Reality in der Produktentwicklung: Instrumentarium zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel der Automobilindustrie*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- Robertson und Radcliffe 2009 ROBERTSON, Brett F.; RADCLIFFE, David F.: *Impact of CAD tools on creative problem solving in engineering design*. In: *Computer-Aided Design* (2009), Nr. 41, S. 136–146.
- Runde 2007 RUNDE, Christoph: *Konzeption und Einführung von virtueller Realität als Komponente der digitalen Fabrik in Industrieunternehmen*. Stuttgart: Jost-Jetter, 2007.
- Sachse et al. 1999 SACHSE, Pierre; HACKER, Winfried; LEINERT, Sven; RIEMER, Simone: *Prototyping als Unterstützungsmöglichkeit des Denkens & Handelns beim Konstruieren*. In: *Zeitschrift für Arbeits- & Organisationspsychologie* (1999), Nr. 43, S. 71–82.
- Sachse und Leinert 2002 SACHSE, Pierre; LEINERT, Sven: *Skizzen und Modelle - Wieso Hilfsmittel des Denkens und Handelns beim Konstruieren?* In: HACKER, Winfried (Hrsg.): *Denken in der Produktentwicklung: Psychologische Unterstützung der frühen Phasen*. München: Hochsch.-Verl. an der ETH, 2002, S. 63–82.
- Schenk und Schumann 2017 SCHENK, Michael; SCHUMANN, Marco: *Angewandte Virtuelle Techniken im Produktentstehungsprozess: AVILUSplus*. Berlin: Springer Vieweg, 2017.

Digitaler Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung in der Produktion – Physikbasierte Modellierung und Simulation zur Optimierung datengetriebener Modelle

Digital Twin for Predictive Maintenance in Production – Physics-based Modelling and Simulation to Optimize Data-driven Models

Andreas Werner¹, Joachim Lentjes², Nikolas Zimmermann²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Nobelstraße 12,
70569 Stuttgart

andreas.werner@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer IAO, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

joachim.lentjes@iao.fraunhofer.de

nikolas.zimmermann@iao.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Die Analyse von Produktionssystemen und Produkten während des Betriebs beziehungsweise der Nutzung ist ein zentraler Wettbewerbsfaktor für Unternehmen. Digitale Zwillinge von Produkten und Produktionssystemen gewinnen dabei an Bedeutung, weil sie neben der Analyse von Betriebsdaten zur Berechnung der Restnutzungsdauer potenzielle Ausfallmechanismen identifizieren, sodass Versagensursachen einfacher lokalisiert werden können. In diesem Beitrag wird ein Konzept zum Digitalen Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung vorgestellt. Das Konzept dient als Grundlage für ein schrittweises Vorgehen zur Entwicklung physikbasierter und datengetriebener Modelle sowie deren Harmonisierung. Insbesondere wird die Generierung von Daten mittels eines physikbasierten Simulationsmodells zur Optimierung eines datengetriebenen Modells beleuchtet. Das Konzept wurde in einem konkreten Anwendungsfall zur Vorhersage einer Filterverstopfung eines Wärmeregulators realisiert. Das Vorgehen soll produzierende Unternehmen bei der Implementierung einer vorausschauenden Instandhaltung unterstützen, sodass sie in die Lage versetzt werden, neben der Lebensdauer von Anlagen die nächste Produktgeneration zu optimieren.

Keywords (deutsch): Digitaler Zwilling, Vorausschauende Instandhaltung, Physikbasierte und Datengetriebene Modellierung

Abstract (english): The analysis of production systems and products during operation or usage is a key competitive factor for companies. Digital twins of products and production systems are gaining in importance here since, in addition to the analysis of operating data to estimate remaining useful life, they identify potential failure mechanisms, making it easier to locate the causes of failure. This paper outlines a concept of digital twins for predictive maintenance. The concept serves as a basis for an approach for the development of physics-based and data-driven models and their harmonization. In particular, the generation of data using a physics-based simulation model for the optimization of a data-driven model is highlighted. The concept was realized in a concrete use case for the prediction of filter clogging of a thermal regulator. The procedure is intended to support manufacturing companies in the implementation of predictive maintenance in order to optimize not only the lifetime of machines but also the next product generation.

Keywords (english): Digital Twin, Predictive Maintenance, Physics-based and Data-driven Modelling

1 Einführung

Zur Sicherstellung ihrer Wettbewerbsfähigkeit sind produzierende Unternehmen gerade in Krisenzeiten gezwungen, ihre Produktivität und damit auch die Anlagenverfügbarkeit, die Lebensdauer von Anlagen sowie die Produkt- und Prozessqualität zu erhöhen. Ein erfolgversprechender Ansatz dazu ist die vorausschauende Instandhaltung unter Verwendung Digitaler Zwillinge. Im Gegensatz zu reaktiven beziehungsweise präventiven Instandhaltungsstrategien zielt der Einsatz der vorausschauenden Instandhaltung auf eine Berechnung der Restnutzungsdauer (*Remaining Useful Life* – RUL) von Maschinenkomponenten und somit zur Bestimmung des geeigneten Wartungszeitpunktes ab (Mikat 2015, S. 16). Die Verwendung Digitaler Zwillinge als digitales Abbild eines Produktes, einer Maschine oder eines Prozesses, welches über seinen gesamten Lebenszyklus durch Verhaltensanalysen, Simulationen und Betriebsdaten angereichert wird (Eigner 2020, S. 3), ist für die vorausschauende Instandhaltung in dieser Form bisher wenig in Literatur oder Praxis zu finden. Neben weiteren Anwendungsfällen, wie der Absicherung von Maschinensteuerungen im Zuge der virtuellen Inbetriebnahme (Scheifele 2019, S. 399), stellt der Anwendungsfall der vorausschauenden Instandhaltung, unter anderem aufgrund der Vielschichtigkeit von Versagensfällen, ein komplexes Forschungs- und Anwendungsfeld für den Digitalen Zwilling dar (Werner et al. 2020, S. 336). Zur Nutzung der Potenziale der vorausschauenden Instandhaltung benötigen Unternehmen konzeptionelle Vorgehensweisen zur Harmonisierung datengetriebener und physikbasierter Modelle von Maschinen beziehungsweise deren Komponenten, um neben der Analyse von Betriebsdaten auch Ursachen und Wirkungen zur Ermittlung weiterer Erkenntnisse zu untersuchen. Dies führt auf der Grundlage einer erweiterten Datenmenge zu einer verbesserten Identifizierung potenzieller Ausfallmechanismen und somit zu einer einfacheren Lokalisierung von Fehlern.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zunächst kurz auf den Stand der Technik zum Digitalen Zwilling sowie hierfür zugrundeliegende relevante Begriffe eingegangen. Weiterhin werden der Begriff der Instandhaltung und deren Ziel beschrieben sowie verschiedene Instandhaltungsstrategien kurz skizziert. Abschließend werden Methoden des *Prognostics and Health Managements* (PHM) vorgestellt.

2.1 Digitaler Zwilling und relevante Begriffe

Eigner (2020) geht zum Stand der Technik des Digitalen Zwillings insbesondere auf das Verhältnis zwischen Digitalem Modell zu Digitalem Zwilling sowie zwischen Digitalem Zwilling und physischem Objekt ein. Im Zuge dessen wird aufgezeigt, wie das in *Product Lifecycle Management* (PLM)-Systemen verwaltete Digitale Modell über den Lebenszyklus eines Produktes beziehungsweise dessen Digitalen Zwillings anwendungsspezifisch fokussiert werden kann. Der *Digitale Thread* erfüllt dabei die Aufgabe, alle Teilmodelle über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu verbinden sowie weitere produktrelevante Informationen aus anderen informationstechnischen Systemen einzuschließen. In Eigner et al. (2019) wird auf die Elemente eines Digitalen Zwillings mit Fokus auf den dazugehörigen Digitalen Schatten eines Objektes eingegangen. Ausgehend von einer variantenfreien auftragsspezifischen Instanziierung eines Digitalen Modells können unter dem Begriff des Digitalen Schattens verschiedene Datenströme subsummiert werden, wobei der bidirektionale Datenaustausch zwischen Digitalem Zwilling und physischem Objekt im Fokus steht. Nach Stark et al. (2017) werden als Digitaler Schatten unter anderem Betriebs-, Zustands- und Prozessdaten vom physischem Objekt zum Digitalen Zwilling übertragen. Von Dahmen und Roßmann (2018) wird hervorgehoben, dass alle Daten zum Digitalen Schatten gehören, welche zur Generierung einer vollständigen Menge relevanter Daten für einen bestimmten Auftrag benötigt werden. An das instanziierte Digitale Modell werden Sensordaten oder Modifikationen während der Nutzung des physischen Objektes übertragen, wobei

dies automatisch, semi-automatisch oder manuell geschehen kann. Weiterhin dienen externe Daten, welche weder vom physischen Objekt gesendet werden, noch im Rahmen des Digitalen Modells bereits verwaltet werden, zur Anreicherung des Digitalen Modells. Die im Digitalen Zwilling unverarbeiteten Daten können zu Analysezwecken in externen Werkzeugen weiterverarbeitet werden, wodurch instanzbezogene Erkenntnisse, wie zum Beispiel die Produktlebensdauer, als generierte Informationen des Digitalen Zwillings dienen. Diese Erkenntnisse können an das physische Objekt in der Nutzungsphase zur Beeinflussung von Funktionen und Verhalten übertragen werden (Eigner et al. 2019, S. 347).

2.2 Instandhaltung allgemein und deren Strategien

In DIN 31051 (2019) wird die Instandhaltung definiert als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“. Das Hauptziel der Instandhaltung ist die Verfügbarkeit von Betrachtungseinheiten zu erhöhen, bei einer gleichzeitigen Verminderung der notwendigen Kosten und einer gleichbleibenden Ausbringung. Eine Instandhaltungsstrategie beschreibt eine Vorgehensweise, welche die Instandhaltungsmaßnahmen, den Instandhaltungszeitpunkt und -umfang festlegt (Landherr et al., 2013, S. 180). Derzeit setzen die meisten Unternehmen auf reaktive oder präventive Instandhaltungsstrategien, da Kosten und Komplexität der alternativen proaktiveren Instandhaltungsstrategien Unternehmen zunächst davon abhalten. Generell kann keine optimale Instandhaltungsstrategie festgelegt werden. Es muss selektiv für jeden Produktionsanlageanteil ermittelt werden, welche Instandhaltungsstrategie am geeignetsten ist. Technische und wirtschaftliche Erwägungen sowie gesetzliche Rahmenbedingungen liefern die Grundlage für die Entscheidungsfindung (Niu und Pecht, 2009). Während bei der reaktiven Instandhaltung erst nach Ausfall oder Defekt repariert wird, zielt die präventive Instandhaltung auf eine Kontrolle und einen Austausch von Bauteilen in vorher festgelegten Zeitintervallen, insbesondere basierend auf Herstellervorgaben und Erfahrungswerten ab. Bei der zustandsorientierten Instandhaltung erfolgt eine kontinuierliche Zustandsüberwachung und Auflösung von Wartungsmaßnahmen basierend auf definierten Zustandsabweichungen und Ereignissen. Der vorausschauenden Instandhaltung liegen umfassende Analysen und Korrelationen von Zustands- und Umfelddaten zugrunde, mit dem Ziel, Ausfallwahrscheinlichkeiten zu berechnen und somit den richtigen Wartungszeitpunkt zu bestimmen. (Mikat 2015, S. 16ff.)

2.3 Prognostics and Health Management

PHM beinhaltet Methoden, Techniken und Verfahren zur Vorhersage in Verbindung mit der Sicherstellung eines definierten Zustands (*Health*). Dazu gehören eine Zustandsbewertung in Quasi-Echtzeit unter aktuellen Betriebsbedingungen, die Prognose der zukünftigen Entwicklung eines Zustandes auf der Grundlage aktualisierter Daten sowie eine Vorhersage der RUL. Gegenüber den Verfahren des *Condition Monitorings* liegt der Fokus des PHM auf der Vorhersage des weiteren Verlaufs eines Degradationsmerkmals. PHM ist in der Lage, einen Ausfallzeitpunkt vorherzusagen und mittels geeigneter Maßnahmen (z. B. Wartung oder Belastungsreduktion) den Ausfall beziehungsweise Produktionsstillstand rechtzeitig zu verhindern. (Atamuradov et al. 2017, S. 1)

Grundsätzlich werden im PHM datengetriebene, physikbasierte und hybride Methoden unterschieden. Datengetriebene Ansätze können etablierte Methoden der Produktentwicklung, wie die rechnerische Lebensdaueranalyse oder quantitative und qualitative Zuverlässigkeitsmethoden nach Bertsche und Lechner (2004) sowie Verfahren zur gesamtheitlichen Anlagenmodellierung, z. B. auf Basis von Petri-Netzen (Trost 2008), um während der Produktnutzung beziehungsweise des Maschinenbetriebs analysierende Methoden erweitern. Hierzu zählen insbesondere Zuverlässigkeits-, Lebensdauer- und Prozessanalysen sowie das Trendmonitoring auf Basis von Zeitreihendatenanalysen zur Extrapolation eines historischen Teilverlaufs bis zu einem vordefinierten Schwellenwert (Mikat 2015, S. 20).

Eingesetzt werden Techniken, welche Methoden der angewandten Statistik mit Algorithmen beispielsweise des maschinellen Lernens verbinden (Döbel et al. 2018, S. 25). Ein beliebtes Verfahren zur Zuverlässigkeitsanalyse ist die Weibullanalyse (Zhai et al. 2013, S.699 ff.), wohingegen beim Trendmonitoring häufig Methoden aus dem Bereich der Autoregression angewendet werden (Pandian und Ali 2009). Carvalho et al. (2019) nennen als häufig verwendete Verfahren der Prozessanalyse unter anderem (faltende) Neuronale Netze, *Support Vector Machines*, *Random Forest* und *Long short-term memory* (LSTM). Nach Wu et al. (2020) wird der LSTM-Algorithmus vor allem aufgrund seiner Effizienz bei der Verarbeitung von Zeitreihendaten, wie sie bei extrahierten sensorischen Messungen von Produktionssystemen auftreten, häufig verwendet. Als wichtigen Vorverarbeitungsschritt für den Trainingsprozess von Vorhersagemodellen nennen Jiménez et al. (2020) die Merkmalsextraktion.

Physikbasierte Ansätze erfordern die Entwicklung detaillierter Modelle, um das reale System möglichst repräsentativ abzubilden (Mikat 2015, S. 20). Zur mathematischen Modellierung der physikalischen Vorgänge kommen häufig gewöhnliche (gesuchte Lösung von einer Variable – Raum oder Zeit – abhängig) oder partielle (gesuchte Lösung von mehreren Raumdimensionen und Zeit abhängig) Differentialgleichungen zum Einsatz (Munz und Westermann 2012). Zur Annäherung an die Lösung der Differentialgleichungen bedarf es meist numerischer Lösungsverfahren, wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode (FEM) zur strukturmechanischen Untersuchung von Bauteilen oder zur Beschreibung thermisch bedingter Materialveränderungen. Bei ereignisdiskreten Simulationen wiederum werden nur ereignisgesteuerte Systemzustandsveränderungen betrachtet (Landherr et al. 2013, S. 114). Es existieren auch Mischformen, wie objekt- oder signalflussorientierte Modellierungsansätze für mechatronische beziehungsweise multiphysikalische Systeme, welche sowohl kontinuierliche als auch diskrete Komponenten beziehungsweise Objekte beinhalten können (Schmitt und Andres 2019).

Hybride Ansätze vereinen Stärken datengetriebener und physikbasierter Verfahren, um konzeptspezifische Limitationen zu umgehen. Dazu zählen Maßnahmen zur Kompensation von Messungenauigkeiten und Parameterschätzungen oder die Bereitstellung aufbereiteter Datenmodule zur Ergänzung von Modellstrukturen (Anger et al. 2012). Insbesondere hinsichtlich der Vorhersage der RUL von Maschinen und deren Komponenten können rein datenbasierte beziehungsweise -getriebene Ansätze schnell an deren Grenzen stoßen (Werner et al. 2020, S. 335). Zwar lassen sich Trends auf Basis vergangener Ereignisse und darin enthaltener Korrelationen extrapolieren, Ausfallszenarien, welche historisch nicht gemessen werden, bleiben bei derartigen Analysen jedoch unberücksichtigt. Unter Verwendung physikbasierter Ansätze können potenzielle Ausfallmechanismen identifiziert und Fehler somit einfacher lokalisiert werden. Die mit der physikbasierten Modellierung verbundene Komplexität sowie die Vielfalt und Unsicherheit von Betriebsumgebungen stellen häufig ein Hindernis bei der Anwendung rein physikbasierter Ansätze dar, bestätigen Cubillo et al. (2016) bei der Analyse von Zahnrädern und Lagern.

3 Architekturkonzept für den Digitalen Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung in der Produktion

Wie in Bild 1 dargestellt, basiert das datengetriebene Modell auf erhobenen Betriebsdaten durch an den Maschinen installierten Sensoren. Je nach eingesetztem Industrial Internet of Things (IIoT)-Gateway sind diese dort bereits lokal verarbeitet, jedenfalls vereinheitlicht und aggregiert worden. Die Daten können zudem in einer Kontext-Broker-Architektur zu höherwertigen Informationen kontextualisiert werden (Dengel 2012, S. 409). Auf Basis eines entwickelten datengetriebenen Modells wird die RUL einzelner Maschinenkomponenten unter Verwendung von Algorithmen berechnet. Das physikbasierte Modell wiederum nutzt Daten und Informationen aus der Produktentwicklung, um unter Verwendung anwendungsfallabhängiger Simulationstechniken Daten für das datengetriebene Modell zu generieren. Dies führt zu einer erweiterten Datenmenge, mit der das datengetriebene Modell trainiert beziehungsweise optimiert wird. Für konkrete Lösungsvorschläge hinsichtlich Wartungsarbeiten oder Verbesserungen für die Produkt- beziehungsweise Maschinenentwicklung der

nächsten Generation wird die im datengetriebenen Modell berechnete RUL an ein regelbasiertes Entscheidungsunterstützungssystem (*Decision Support System – DSS*) übertragen. Im Folgenden wird auf Vorgehensweisen zur Entwicklung einzelner Module der vorgeschlagenen Architektur detaillierter eingegangen.

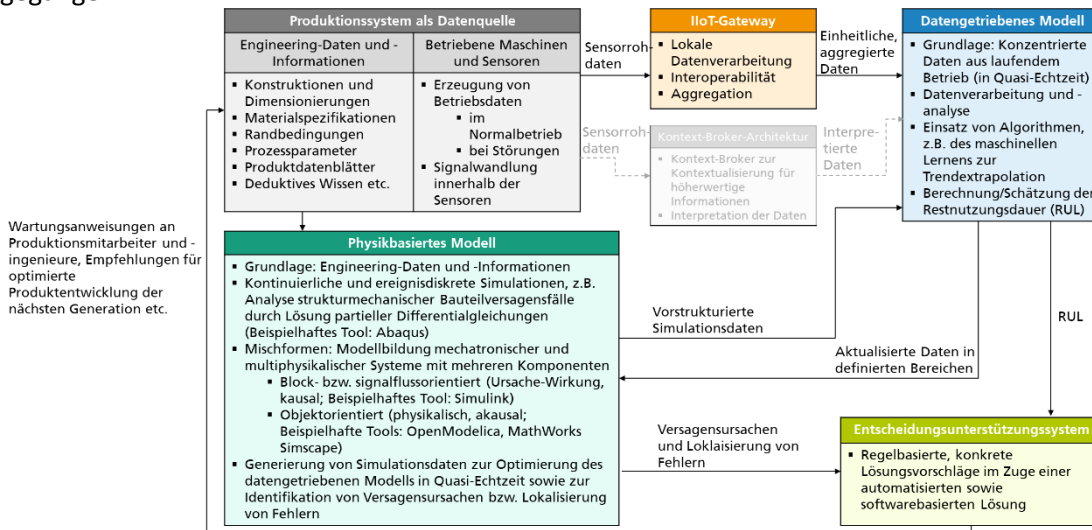


Bild 1: Generisches Architekturkonzept

3.1 Vorgehensweise zur physikbasierten Modellierung

In einem Idealszenario liegen anwendungsfallspezifische Simulationsmodelle und alle hierfür zugrundeliegenden Methoden, Daten und Informationen bereits aus der Phase der Produktentwicklung vor, in der Realität müssen diese jedoch häufig auf den Anwendungsfall der vorausschauenden Instandhaltung fokussiert beziehungsweise aufwändig nachentwickelt werden. Gründe hierfür sind vielfältig, beispielsweise verfügen Anlagenbetreiber meist nicht über die zur Modellierung beziehungsweise Simulation notwendigen Daten und Informationen ihres Maschinenbauers. Zur Entwicklung eines physikbasierten Modells als Grundlage für die Durchführung von Simulationen ist in Tabelle 1 eine Vorgehensweise dargestellt.

Tabelle 1: Vorgehen zur physikbasierten Modellierung

Ziel	Entwicklung eines physikbasierten Modells sowie Durchführung von Simulationen			
Vorgehen	Zieldefinition sowie Identifikation kritischer Komponenten und Analyse der Ausfallszenarien	Prüfen der Verfügbarkeit von Daten, Informationen und Wissen	Finale Modellbildung inklusive Verifikation und Validierung	Experimente und Dokumentation
Aufgaben	<ul style="list-style-type: none"> Zieldefinition der Simulationsanwendung: Identifikation potenzieller Ausfallmechanismen und Lokalisierung von Fehlern Identifikation kritischer Maschinenkomponenten Analyse der physikalischen Ausfallmechanismen 	<ul style="list-style-type: none"> Sammlung, Aggregation und Integration bereits verfügbarer Daten, Informationen und Wissen zu Maschinenkomponente und Ausfallszenarien (z.B. CAD-Modelle, Simulationsmodelle) Ggf. Adaption bestehender Modelle auf Anwendungsfall Integration von Methoden aus Produktentwicklung (z.B. Zuverlässigkeitsanalysen) 	<ul style="list-style-type: none"> Detaillierung der Problemdefinition bzw. zu simulierenden Ausfallmechanismen Analyse erforderlicher Systemparameter und Daten Formulierung eines mathematischen Modells Verifikation Erstellung (Programmierung) bzw. Erweiterung des Modells Validierung (Testläufe) 	<ul style="list-style-type: none"> Entwurf und Durchführung der Simulationsversuche Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse Dokumentation, Export und Präsentation der Ergebnisse Ableitung theoretischer Empfehlungen zur Verbesserung der Produktqualität
Ergebnis	Zielstellung und definierte kritische Komponenten inkl. beschriebener Ausfallmechanismen	Verfügbare Daten, Informationen und Wissen	Modell als Basis für Simulationen	Visualisierte Simulationsergebnisse und Interpretation

Zunächst werden das Ziel der jeweiligen Simulationsanwendung definiert. Für identifizierte und ausgewählte kritische Komponenten des zu untersuchenden Produktionssystems muss der physikalische Mechanismus des Ausfalls analysiert werden. Es folgt eine Prüfung der Verfügbarkeit bestehender Daten, Informationen und Wissen, insbesondere aus der Phase der Produktentwicklung.

Dies beinhaltet die Sammlung, Aggregation und Integration verfügbarer Daten und Informationen, z. B. Konstruktionen und Dimensionierungen inklusive entsprechender Computer Aided Design (CAD)-Modelle, Materialspezifikationen, Randbedingungen, Prozessparameter und Produktdatenblätter. Wie bereits einleitend in 3.1 erwähnt, müssen je nach Verfügbarkeit bereits bestehende Modelle des Produktionssystems auf den jeweiligen Anwendungsfall zur vorausschauenden Instandhaltung adaptiert beziehungsweise aufwändig nachentwickelt werden.

Bei der Modellbildung werden nach VDI 3633 (2014) zunächst das Problem definiert und erforderliche Systemparameter und Daten analysiert. Hierbei sollte der Fokus auf potenzielle Ausfallmechanismen des zu untersuchenden Objektes gelegt werden. Nach der Formulierung des Modells wird dieses nach Möglichkeit unter Verwendung von Verifikation- und Validierungsmethoden je nach Modellierungs- und Simulationstechnik verifiziert, anschließend erstellt und mittels erster Testläufe validiert. Je nach Problemdefinition muss die richtige Modellierungs- beziehungsweise Simulationstechnik und entsprechend die Simulationssoftware ausgewählt werden. Beispiele für kontinuierliche Simulationen sind, wie bereits in 2.3 angedeutet, die FEM-Simulation zur Versagensuntersuchung von Maschinenkomponenten aufgrund periodischer Lasten, sowie signalfluss- beziehungsweise objektorientierte Modellierungstechniken zur Analyse mechatronischer, hydraulischer oder thermischer Systeme. Je nach angewandter Simulationstechnik variiert auch die Vorgehensweise zur Modellierung signifikant. Elementare Kriterien bei der Auswahl von Simulationssoftware sind die zu simulierenden Domänen (z. B. Kinematik, Dynamik, Elektrik, Thermodynamik) sowie die zu simulierenden Zustandsverläufe (siehe 2.3).

Nach der Modellbildung werden Experimente durchgeführt. Die Simulationsversuche werden hierfür entworfen und durchgeführt. Die Simulationsergebnisse werden analysiert und in gewünschter Form dokumentiert, exportiert sowie präsentiert.

3.2 Vorgehensweise zur datengetriebenen Modellierung

Zur Entwicklung eines datengetriebenen Modells als Grundlage für die Analyse von Felddaten sind eine Datenerfassung, eine -verarbeitung sowie eine -analyse notwendig. Eine mögliche Vorgehensweise zur datengetriebenen Modellierung ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Vorgehen zur datengetriebenen Modellierung

Ziel	Entwicklung eines datengetriebenen Modells als Grundlage für die Analyse von Felddaten			
Vorgehen	Datenerfassung	Datenverarbeitung	Datenanalyse	Entscheidungsunterstützung & Empfehlungen
Aufgaben	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auswahl von Sensortypen bzw. Messprinzipien ▪ Mechanische Integration der Sensoren ▪ Auswahl Kommunikationstechnologie zur Übertragung der Sensordaten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festlegung des Ortes der Datenverarbeitung (an der Wirkstelle oder außerhalb der Anlage) ▪ Festlegung des Ortes zur Bereitstellung der generierten Informationen ▪ Auswahl IIoT-Gateway ▪ Verstehen und Vorverarbeiten der Daten ▪ Ggf. erste Visualisierung vorverarbeiteter Daten ▪ Auswahl Kommunikationstechnologie zur Übertragung der aggregierten und einheitlichen Daten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Strukturierung der Daten ▪ Identifikation von Zustandsindikatoren durch Merkmalsextraktion ▪ Auswahl von Algorithmen zur Erkennung von Anomalien innerhalb der gemessenen und verarbeiteten Daten ▪ Auswahl von Ansätzen und Algorithmen zur Fehlervorhersage bzw. zur Berechnung der RUL abhängig von der verfügbaren Datengrundlage ▪ Informationsgenerierung: Modellierung des Zusammenhangs, Trainieren des Modells sowie Trendextrapolation ▪ Datenvisualisierung ▪ Validierung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung eines regelbasierten Entscheidungsunterstützungssystems auf Basis getroffener Vorhersagen sowie Kritikalitäten von Ausfallmechanismen ▪ Ableitung von Handlungsempfehlung für Produktionsmitarbeiter sowie Maßnahmen zur Verbesserung der Produktentwicklung der nächsten Generation
Ergebnis	OT-Infrastruktur	IIoT-Infrastruktur und verarbeitete Daten	Generierte Informationen: Anomalien und Fehlervorhersagen, RUL	Entscheidungsunterstützungssystem

Die Datenerfassung steht für die Gewinnung analoger oder digitaler Daten durch Messen oder Zählen und gegebenenfalls Signalumformung meist unter Verwendung geeigneter Sensorik. Entsprechend müssen je nach notwendigen Parametern, Sensortypen und Messprinzipien ausgewählt werden, wofür beispielsweise bestehende Werkzeugkästen nach Fleischer et al. (2018) zur Unterstützung zur Verfügung stehen. Weiterhin müssen die Sensoren an geeigneter Stelle an den Maschinen angebracht beziehungsweise mechanisch integriert werden. Die Sensormesswerte werden – zum Aufbau einer

Operation Technology (OT)-Infrastruktur – über Bussysteme (z. B. Feldbus, M- oder Modbus), an produktionsnahe Gateways zur Vorverarbeitung der Signale übertragen und beispielsweise über klassische Funk- (Ethernet, W-LAN, LTE etc.) oder Industriestandards wie EtherCAT an zentralere IIoT-Gateways oder Plattformen in Form von Kontext-Broker-Systemen und letztlich datenanalysierenden Modulen gesendet. Das Gateway fungiert als soft- und hardwarebasierte Schnittstelle zwischen der Datenerfassung und -verarbeitung und übernimmt dabei Kernfunktionen wie Interoperabilität, Aggregation und je nach Bedarf lokale Datenverarbeitungen. Hierfür gilt es sowohl die Verarbeitung beziehungsweise Bereitstellung der verarbeiteten Sensordaten auszugestalten, als auch die Logik der Informationsgenerierung, das heißt das Vorverarbeiten von Daten, zu definieren. Neben der Festlegung des Ortes der Datenverarbeitung (direkt an der Wirkstelle oder außerhalb der Maschine) sowie des Ortes zur Bereitstellung der generierten Informationen, werden im Zuge der Datenverarbeitung die Daten für die datengetriebenen Modelle vorverarbeitet.

Die datengetriebenen Modelle zielen auf die Erkennung und Vorhersage von Fehlern innerhalb der erfassten Daten und schließlich auf die Berechnung der RUL kritischer Maschinenkomponenten ab. Unter Berücksichtigung eines Verschlechterungsprofils einer Maschine beziehungsweise ihren Komponenten ist die RUL die Zeitspanne eines aktuell erfassten Gesundheitszustands einer Maschine bis zu einem erkannten Fehler basierend auf extrahierten Zustandsindikatoren. Je nach verfügbarer Datengrundlage im Anwendungsfall (Ausfälle als Einzelereignis ohne historischen Verlauf; Wissen über vordefinierte Schwellenwerte für einzelne Zustandsindikatoren oder gesamte „Run-to-failure“-Historie) muss selektiv entschieden werden, welcher Ansatz beziehungsweise welche Algorithmen zur Berechnung der RUL herangezogen werden.

Konkrete Lösungsvorschläge können im Zuge einer automatisierten Lösung mithilfe eines DSS erfolgen. Das DSS wird mit den berechneten Daten des datengetriebenen Modells inkl. der generierten Erkenntnisse des Simulationsmodells versorgt, um regelbasierte, konkrete Lösungsvorschläge zu geben. Lösungsvorschläge können unter anderem Wartungsanweisungen an Produktionsmitarbeiter und -ingenieure und Empfehlungen für eine optimierte Produkt- beziehungsweise Maschinenentwicklung in der Zukunft sein. Der Einsatz von DSS im Kontext der Produktentwicklung schafft die Voraussetzung für Produktoptimierung durch Nutzung von Erfahrungswissen (Lentes und Zimmermann 2017, S. 3835). Dementsprechend können Erkenntnisse über Versagensursachen für die Entwicklung der nächsten Produkt- beziehungsweise Maschinengeneration verwendet werden.

3.3 Harmonisierung datengetriebener und physikbasierter Modelle

In Tabelle 3 ist das schrittweise Vorgehen zur Harmonisierung physikbasierter und datengetriebener Modelle, um ein wechselseitiges Zusammenspiel beider Modelle sicherzustellen, dargestellt. Hierfür bedarf es zunächst einer Entwicklung von Schnittstellen zwischen beiden Modellen. Diese müssen definiert, sowie Anforderungen an diese beschrieben werden. Zum bidirektionalen Datenaustausch beider Modelle kann das physikbasierte Modell in ausgewählten Bereichen aktualisiert werden. Hierzu können beispielsweise virtuelle Sensoren entwickelt werden, wobei mindestens zwei reale Messgrößen gemessen und zu einer virtuellen Zielgröße berechnet werden. Die Berechnung der Zielgröße basiert dabei entweder auf beispielsweise physikalischen und chemischen Effekten oder – sobald der naturwissenschaftliche Zusammenhang realer Messgrößen eine gewisse Komplexität übersteigt – statistischen Verfahren beziehungsweise Algorithmen des maschinellen Lernens. Um einen Kompromiss zwischen Komplexität und erforderlicher Genauigkeit sowohl des physikbasierten als auch des datengetriebenen Modells zu erzielen, empfiehlt sich der Einsatz von Techniken zur Reduzierung der Modellkomplexität entsprechend des notwendigen Detailgrades sowie der Funktionalitäten. Beispielsweise zeigen einige Sensormesswerte keinen signifikanten Änderungstrend zwischen gesunden Zuständen und Fehlern und tragen daher nicht zur Auswahl nützlicher Merkmale für das Training eines Modells bei. Folglich muss eine Datenreduktion durchgeführt werden, indem nur die Sensoren mit dem „stärksten“ Trend ausgewählt und zur Berechnung von Zustandsindikatoren mit Hilfe von Merkmalsextraktionsmechanismen kombiniert werden. Zur Approximation des physikbasierten Modells an die Realität gilt es in ausgewählten Bereichen das Modell mit Daten aus

dem Feld anzureichern. Durch die Nutzung von Betriebsdaten wird das physikbasierte Simulationsmodell in ausgewählten Bereichen sehr nah an die Realität approximiert.

Zur Optimierung des datengetriebenen Modells durch die Nutzung des physikbasierten Modells zur Generierung zusätzlicher Simulationsdaten und somit zur Erweiterung der Datenmenge beziehungsweise zum besseren Training des Modells lassen sich unbekannte Ausfallszenarien, welche sensorisch nicht gemessen werden konnten, simulieren. Die hierfür zu entwickelnde Schnittstelle zur Anreicherung des datengetriebenen Modells sollte bedarfsweise eine Quasi-Echtzeitfähigkeit der Datenübertragung ermöglichen. Zudem sollte für eine integrierte Lösung auf einen automatisierten Export sowie eine entsprechend der Anforderungen des datengetriebenen Modells benötigte Struktur der Simulationsdaten geachtet werden. Für eine gegenseitige Validierung der beiden Modelle gilt es auf einen Abgleich zwischen realer Messung inklusive der verarbeiteten und analysierten Daten sowie der Simulationsdaten zu achten.

Tabelle 3: Vorgehen zur Harmonisierung physikbasierter und datengetriebener Modelle

Ziel	Wechselseitiges Zusammenspiel von physikbasiertem und datengetriebenem Modell			
Vorgehen	Definition der Schnittstellen	Aktualisierung des physikbasierten Modells sowie Definition geforderter Modellgenauigkeit bzw. -komplexität	Optimierung des datengetriebenen Modells	Fortwährende gegenseitige Validierung der Modelle
Aufgaben	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Analyse möglicher Schnittstellen zwischen den entwickelten Modellen sowie Anforderungsbeschreibung an die Schnittstellen ▪ Nutzung der bestehenden Infrastruktur (Gateway, Kommunikation etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung der Schnittstelle zur Aktualisierung des physikbasierten Modells für sich ändernde Parameter (wenn möglich in Echtzeit) ▪ »Retrofit« des Modells mithilfe realer Messungen ▪ Ggf. Integrierte Hybridisierung mittels virtueller Sensoren sowie Entwicklung des hierfür zugrundeliegenden mathematischen Modells ▪ Definition geforderter Modellgenauigkeit bzw. -komplexität entsprechend Detailgrad und Funktionalität der Modelle 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung des physikbasierten Modells zur Generierung von Simulationsdaten ▪ Entwicklung der Schnittstelle zur Anreicherung des datengetriebenen Modells (wenn möglich in Echtzeit) ▪ Automatisierter Export der Simulationsdaten sowie benötigte Strukturierung ▪ Simulation von Ausfallszenarien zur Maximierung der Datenmenge 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Methodischer Abgleich zwischen Messung sowie verarbeiteten bzw. analysierten Daten und Simulationsdaten ▪ Ggf. Einsatz von V&V-Techniken je nach angewandter Modellierungs- bzw. Simulationstechnik
Ergebnis	Schnittstellen sowie Anforderungsbeschreibung	Aktuell gehaltenes physikbasiertes Simulationsmodell	Simulationsexport und -import in Echtzeit	Plausibilitätsprüfung

4 Spezifischer Anwendungsfall und Proof-of-Concept

Im Rahmen des Projektes Z-BRE4K existieren drei Anwendungsfälle, in denen entwickelte Konzepte zur vorausschauenden Instandhaltung gemeinsam mit Industrieanwendern erprobt und realisiert werden. In diesem Beitrag wird auf den Anwendungsfall, bei dem ein Wärmeregulator zur Kühlung einer Formpressmaschine für die Fertigung von Kunststoff-Flaschenverschlüssen im Fokus steht, detailliert eingegangen. Der Wärmeregulator inklusive Kühlkreislauf, welcher Kanäle innerhalb der Formpressmaschine mit Kühlmittel versorgt, gewährleistet die entsprechende Verformung beziehungsweise Aushärtung der Verschlüsse. Die Temperatur des Kühlmittels wird individuell an den jeweils verwendeten Kunststoff für den Deckel angepasst. Das Regelsystem des Wärmeregulators hält die eingestellte Temperatur für jedes verwendete Material konstant. Der Wärmeregulator verfügt über Komponenten wie beispielsweise Rohre unterschiedlicher Längen und Höhendifferenzen, eine Zentrifugalpumpe, Wärmetauscher und einen Filter sowie Sensoren zur Erfassung von Druck, Durchflussmenge, Temperatur und anderen Werten. Ziel dabei ist die Vorhersage des Verstopfens und somit die Berechnung der RUL des Filters. Aufgrund von wenig registrierten Ausfällen in historischen Daten und einer unzureichenden Datenmenge wurde als Lösungsansatz die Festlegung von Schwellenwerten für definierte Sensorwerte sowie die Simulation von Szenarien durch beispielsweise experimentelles Variieren der mathematischen Funktion der Filterverstopfung gewählt. Das anwendungsfallsspezifische Architekturkonzept ist in Bild 2 dargestellt.

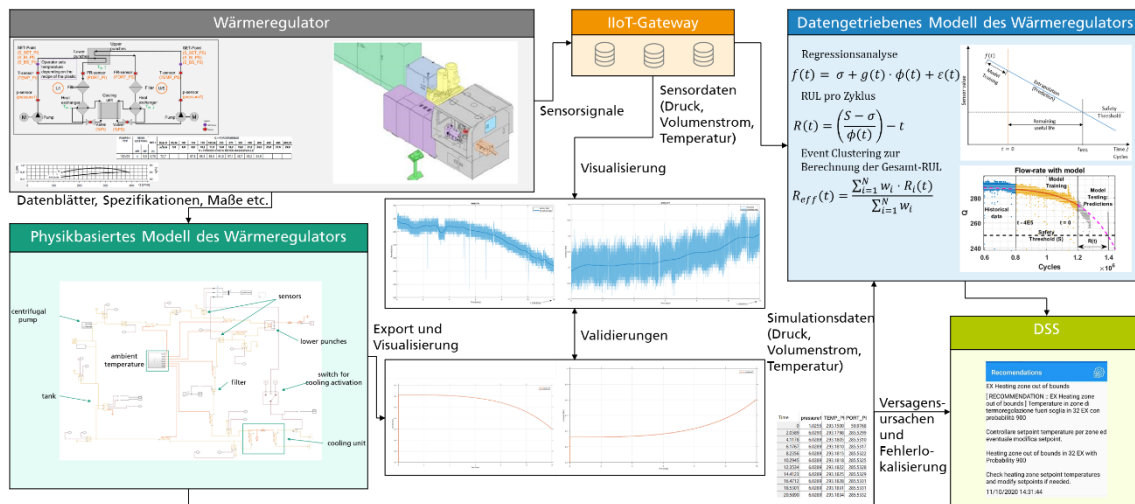


Bild 2: Anwendungsfallsspezifisches Architekturkonzept

Zur datengetriebenen Modellierung wurden die erfassten Sensordaten über ein eingesetztes IIoT-Gateway für die Datenanalyse vorverarbeitet. Ferner wurden eine eindeutige Zuordnung zwischen gemessenen Sensorwerten, den Komponenten des Wärmeregulators sowie deren möglicher Ausfälle festgelegt und Hypothesen aufgestellt. Es wurde angenommen, dass eine sinkende Durchflussrate und ein steigender Druck im Wärmeregulator auf eine beginnende Verstopfung des Filters hindeuten. Im Zuge der Datenanalyse wurde ein regressionsbasierter Ansatz verwendet, um das Verstopfen des Filters auf der Grundlage des Verlaufs der erfassten Sensordaten frühzeitig zu erkennen. Der Ansatz verwendet historische Daten, um den Trend des Signals vorherzusagen und erkennt Abweichungen basierend auf vordefinierten Schwellenwerten, die entweder linear oder exponentiell zum gemessenen Trend verlaufen. Dies kann für jeden extrapolierten Trend der einzelnen Sensorwerte (z.B. Druck, Volumenstrom, Temperatur) durchgeführt werden. Durch Anwendung eines *Event-Clustering*-Algorithmus, welcher auf der beschriebenen Regressionsanalyse aufbaut, wurden die extrapolierten Trends der einzelnen Sensorwerte bis zu den Schwellenwerten gewichtet, sodass eine effektive Gesamt-RUL des Filters berechnet wurde. Zu Validierungszwecken wurde die berechnete RUL mit einer Zuverlässigkeitsanalyse auf Basis einer Weibullverteilung verglichen. Eine detaillierte Beschreibung kann Angadi et al. (2020) entnommen werden.

Zur Entwicklung des physikbasierten Modells wurde in einem ersten Schritt gemeinsam mit dem Industrieanwender die theoretische Struktur des Wärmeregulators in Form eines Flussdiagramms skizziert. Es wurden Anforderungen an das Modell erhoben, mögliche Annahmen festgehalten und erste Parameter dokumentiert. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten und Informationen sowie der zu untersuchenden Versagensfälle wurden ein objektorientierter Modellierungsansatz zur physikbasierten Abbildung des Wärmeregulators ausgewählt. Zunächst wurden erste Systementwürfe und Komponententests durchgeführt, um letztlich den Gesamtentwurf inklusive aller relevanten Komponenten des Wärmeregulators zu erstellen. Unter Verwendung realer Messdaten, Produktdatenblätter, Abmessungen – unter anderem in einem zur Verfügung gestellten CAD-Modell – sowie spezifischer Abfragen beim Industrieanwender wurden alle Komponenten parametrisiert und weitere Annahmen im Modell dokumentiert. Das Modell wurde laufend verifiziert und durch Abgleiche mit real gemessenen und verarbeiteten Sensorwerten validiert. In Folgeaktivitäten soll die Güte des Modells durch eine methodische Verifikation und Validierung weiter verbessert werden. Das Modell erfüllt den Zweck eines experimentierfähigen Modells, um verschiedene Parameter im System zu variieren und somit Erkenntnisse für die Entwicklung der nächsten Generation des Wärmeregulators zu sammeln.

Parallel wurde ein Proof-of-Concept zur Optimierung des datengetriebenen Modells mittels generierten Simulationsdaten durchgeführt. Hierzu wurden Anforderungen an Struktur, Quantität und Qualität der zu simulierenden Daten erhoben, um diese in Quasi-Echtzeit als Zeitreihendaten in das

datengetriebene Modell einzuspeisen. Es können somit weitere Algorithmen mit der simulativ erzeugten Datenmenge erprobt und trainiert werden. Durch die gesammelten Erfahrungen soll die Robustheit des datengetriebenen Modells gesteigert werden, um intelligentere Algorithmen bezüglich der Datenanalyse und Trendextrapolation auch auf Felddaten anwenden zu können. Die Fähigkeit des Ansatzes bestätigte sich insbesondere in der schnellen Durchführung virtueller Experimente, was zu einem effizienten Fortschritt der datengetriebenen Modellierung führte.

Weiterhin wurde eine Schnittstelle zum „Retrofitting“ des physikbasierten Modells mit ausgewählten Daten aus dem Feld entwickelt. Das Simulationsmodell kann daher während des laufenden Betriebs mit ausgewählten Daten aktualisiert werden, um eine bessere Approximation an Realbedingungen zu erhalten. In Folgeaktivitäten gilt es zu prüfen, welche Parameter während des laufenden Betriebs im physikbasierten Modell dynamisch variiert werden und welche sich nahezu statisch verhalten sollen. Alle aggregierten Informationen, das heißt unter anderem Anomalien innerhalb der Daten, Ausfallwahrscheinlichkeiten, Fehlerprognosen sowie die RUL werden im Anwendungsfall in Quasi-Echtzeit an das DSS übermittelt, welches über ein *Dashboard* auf dem *Shopfloor* des Industrieanwenders regelbasiert Handlungsempfehlungen für Wartungsmaßnahmen ausgibt. Auswirkungen auf Instandhaltungsrelevante Kennzahlen, wie beispielsweise die *Mean Time Between Failures*, *Mean Time To Repair*, Ausfallraten oder die *Overall Equipment Effectiveness* werden den indirekten Bereichen des Industrieanwenders bereitgestellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erhebung und Nutzung der Potenziale der vorausschauenden Instandhaltung, wie beispielsweise einer Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit, werden Konzepte zur Harmonisierung datengetriebener und physikbasierter Modelle benötigt, da durch den Einsatz von Simulationen schnell und kostengünstig virtuelle Experimente zur Erweiterung der benötigten Datenmenge durchgeführt werden können. Zudem können unter Verwendung physikbasierter Modelle physikalische Ursachen und Wirkungen zur Ermittlung zusätzlicher Erkenntnisse untersucht, potenzielle Ausfallmechanismen identifiziert und Fehler somit einfacher lokalisiert werden. In diesem Beitrag wurden auf Basis eines Architekturkonzepts für den Digitalen Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung Ansätze für ein schrittweises Vorgehen zur Entwicklung physikbasierter, datengetriebener Modelle sowie deren Harmonisierung vorgestellt. Durch den hybriden Ansatz, bei dem physikbasierte Simulationen zu Analysezwecken durchgeführt, Felddaten während des Betriebs erfasst, verarbeitet und analysiert werden, sowie die kombinierten Erkenntnisse zur Beeinflussung des physischen Produktionssystems dienen, wird das Konzept der Definition eines Digitalen Zwillings gerecht. Das Konzept wurde in einem konkreten Anwendungsfall realisiert. Wesentliche Teile des Konzepts, insbesondere die physikbasierte Modellierung und Simulation zur Optimierung eines datengetriebenen Modells zur Vorhersage der Filterverstopfung beziehungsweise der RUL eines Wärmeregulators wurden in diesem Beitrag detailliert dargestellt. In Folgeaktivitäten gilt es das physikbasierte Modell fortlaufend und methodisch zu verifizieren und validieren. Die Schnittstellen, sowohl zur Anreicherung des datengetriebenen, als auch zur Aktualisierung des physikbasierten Modells wurden entwickelt, jedoch gilt es im Rahmen des Validierungsprozesses des hybriden Modellierungsansatzes genauer zu spezifizieren, welche Parameter im physikbasierten Modell einer Aktualisierung bedürfen und welche konstant bleiben können. Hierbei gilt es vor Integration der Parameter in das physikbasierte Modell deren Plausibilität zu überprüfen, um nicht etwaige Messfehler in das Modell aufzunehmen.

Danksagung

Der Inhalt dieses Beitrags ist ein Ergebnis von Arbeiten im Projekt Z-BRE4K. Dieses Projekt wurde im Rahmen des Horizon-2020-Rahmenprogramms der Europäischen Union unter der Vertragsnummer 768869 gefördert. Die Autoren möchten sich bei den Förderern und Partnern des Projekts bedanken, ohne die diese Publikation nicht realisiert werden könnte.

Literatur

- Angadi et al. 2020 ANGADI, Veerendra C.; MOUSAVI, Alireza; BARTOLOMÉ, Diego; TELLARINI, Matteo; FAZZIANI, Matteo: *Regressive Event-Tracker: A Causal Prediction Modelling of Degradation in High Speed Manufacturing*. In: *Procedia Manufacturing* 51 (2020), S. 1567 – 1572.
- Anger et al. 2012 ANGER, Cristoph; SCHRADER, Robert, KLINGAUF, Uwe: *Unscented Kalman Filter with Gaussian Process Degradation Model for Bearing Fault Prognosis*. In: Proceedings of First European Conference of the Prognostics and Health Management Society, Dresden, Deutschland, 3.-5. Juli 2012. S. 202-213.
- Atamuradov et al. 2017 ATAMURADOV, Vepa; MEDJAHER, Kamal; DERSIN, Pierre; LAMOUREUX, Benjamin; ZERHOUNI, Noureddine: *Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners - Review, Implementation and Tools Evaluation*. In: *International Journal of Prognostics and Health Management* 8 (2017).
- Bertsche u. Lechner 2004 BERTSCHE, Bernd; LECHNER, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau – Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Berlin Heidelberg: Springer, 2004.
- Carvalho et al. 2019 CARVALHO, Thyago Peres; SOARES, Fabrizzio Alphonsus Alves de Melo Nunes.; VITA, Roberto; FRANCISCO, Roberto da P.; BASTO, João; ALCALÁ, Symone G. S.: *A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance*. In: *Computers & Industrial Engineering* 137 (2019), S. 106024.
- Cubillo et al. 2016 Cubillo, Adrian; Perinpanayagam, Suresh; Esperon-Miguez, Manuel: *A review of physics-based models in prognostics: Application to gears and bearings of rotating machinery*. In: *Advances in Mechanical Engineering* 8(8) (2016), S. 1-21.
- Dahmen u. Roßmann 2018 DAHMEN, Ulrich; ROßMANN, Jürgen: *Simulation-based Verification with Experimentable Digital Twins in Virtual Testbeds*. In: Schüppstuhl, Thorsten; Tracht, Kirsten; Franke, Jörg (Hrsg.): *Tagungband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Berlin Heidelberg: Springer, 2018, S. 139 – 147.
- Dengel 2012 DENGEL, Andreas: *Semantische Technologien – Grundlagen, Konzepte, Anwendungen*. 1. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2012.
- DIN 31051 2019 Norm DIN 31051 Juni 2019. Grundlagen der Instandhaltung: Berlin: Beuth, 2019.
- Döbel et al. 2018 DÖBEL, Inga; LEIS, Miriam; VOGELANG, Manuel Molina; NEUSTROEV, Dmitry; PETZKA, Henning; RÜPING, Stefan; VOSS, Angelika; WEGELE, Martin; WELZ, Juliane: *Maschinelles Lernen – Kompetenzen, Anwendungen und Forschungsbedarf*. In: *Fraunhofer-Gesellschaft Ergebnisbericht*, München, 2018.
- Eigner 2020 EIGNER, Martin: *Digitaler Zwilling – Stand der Technik*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020), Nr. 4, S. 3-6.
- Eigner et al. 2019 EIGNER, Martin; DETZNER, Alexander; SCHMIDT, Philipp Heiner; THARMA, Rajeeth: *Definition des Digital Twin im Produktlebenszyklus*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019), Nr. 6, S. 345-450.
- Fleischer et al. 2018 FLEISCHER, Jürgen; KLEE, Benedikt; SPOHRER, Andreas; MERZ, Simon: *Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0 – Wege zur kostengünstigen Sensorsystemen*. Frankfurt: VDMA Forum Industrie 4.0, 2018.
- Jiménez et al. 2020 JIMÉNEZ, Alfredo Arcos; ZHANG, Long; MUÑOZ, Carlos Quiterio Gómez; MÁRQUEZ, Fausto Pedro García: *Maintenance management based on Machine Learning and nonlinear features in wind turbines*. In: *Renewable Energy* 146 (2020), S. 316-328.

- Landherr et al. 2013 LANDHERR, Martin; NEUMANN, Michael; VOLKMANN, Johannes; JÄGER, Jens; KLUTH, Andreas; LUCKE, Dominik; RAHMAN, Omar-Abdul; RIEXINGER, Günther; CONSTANTINESCU, Carmen: Fabriklebenszyklusmanagement. In: Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentjes, Joachim (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013, S. 163-195.
- Landherr et al. 2013 LANDHERR, Martin; NEUMANN, Michael; VOLKMANN, Johannes; CONSTANTINESCU, Carmen: Digitale Fabrik. In: Westkämper, Engelbert; Spath, Dieter; Constantinescu, Carmen; Lentjes, Joachim (Hrsg.): *Digitale Produktion*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013, S. 107-131.
- Lentes u. Zimmermann 2017 LENTES, Joachim; ZIMMERMANN, Nikolas: *amePLM: a platform providing information provision in engineering*. In: *International Journal of Production Research* 55 (2017), Nr. 13, S. 3832-3841.
- Mikat 2015 MIKAT, Heiko: *Hybride Fehlerprognose zur Unterstützung prädiktiver Instandhaltungskonzepte in der Luftfahrt*. Technische Universität Darmstadt, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Dissertation, 2015.
- Munz u. Westermann 2012 MUNZ, Claus-Dieter; WESTERMANN, Thomas: *Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differenzialgleichungen – Ein interaktives Lehrbuch für Ingenieure*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- Niu und Pecht 2009 NIU, Gang, PECHT, Michael: *A Framework for Cost-effective and Accurate Maintenance Combining CBM, RCM and Data Fusion*. In: International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2009.
- Pandian u. Ali 2009 PANDIAN, Annamalei; ALI, Ahad: *A Review of Recent Trends in Machine Diagnosis and Prognosis Algorithms*. In: World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (2009), S. 1731-1736.
- Scheifele et al. 2019 SCHEIFELE, Christian; VERL, Alexander; RIEDEL, Oliver: *Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems*. In: *Procedia CIRP* 79 (2019), S. 397-402.
- Schmitt u. Andres 2019 SCHMITT, Thomas Lienhard; ANDRES, Markus: *Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme*. Wiesbaden: Springer, 2019.
- Stark et al. 2017 STARK, Rainer; KIND, Simon; NEUMEYER, Sebastian: *Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design*. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 66 (2017) 1, S. 169 – 172.
- Trost 2008 TROST, Monika: *Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2008.
- VDI 3633 2014 VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 Dezember 2014: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen*. Berlin: Beuth, 2014.
- Werner et al. 2020 WERNER, Andreas; VEERANDRA C. Angadi; LENTES, Joachim; MOUSAVI, Alireza: *Vorausschauende Instandhaltung – Wenn der Digitale Schatten an seine Grenzen stößt*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020) 5, S. 335-339.
- Wu et al. 2020 WU, Haiyue; HUANG, Aihua; SUTHERLAND, John W.: *Avoiding Environmental Consequences of Equipment Failure via an LSTM-Based Model for Predictive Maintenance*. In: *Procedia Manufacturing* 43 (2020), S. 666-673.
- Zhai et al. 2013 ZHAI, Lian-Yin; LU, Wen-Feng; LIU, Ying; LI, Xang; VACHTSEVANOS, George: *Analysis of Time-to-Failure Data with Weibull Model in Product Life Cycle Management*. In: Nee, Andrew Y.C.; Song, Bin; Ong, Soh-Khim (Hrsg.): *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*. Singapore: Springer, 2013, S. 699-703.

Spezifikationen einer Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte

Specifications of a development environment for the synthesis of a patient-specific short shaft endoprosthesis of the hip

Patrik Müller, Paul Christoph Gembarski, Roland Lachmayer

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Hannover
{Mueller, Gembarski, Lachmayer}@ipeg.uni-hannover.de

Abstract (deutsch): In der Endoprothetik können konfektionierte Kurzschaftprothesen die anatomischen und osteologischen Anforderungen an die Standzeit, Funktionalität und Komplikationsfreiheit nicht optimal erfüllen. Dieser Beitrag bietet die Spezifikationen für eine rechnerunterstützte Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte, die den Erfüllungsgrad dieser Anforderungen an das Implantat maximieren kann. Dafür werden im Rahmen einer Design Research Methodology die osteologischen und anatomischen Einflussfaktoren auf den Produktlebenszyklus einer Kurzschaftendoprothese identifiziert und Lösungsmethoden zur Erfüllung der Anforderungen konzipiert. Im Anschluss an den Entwurfsprozess der Kurzschaftendoprothese wird das Effect-Engineering in der Prothetik, mithilfe der additiven Fertigung, vorgestellt, welches durch die Funktionsintegration verschiedener physikalischer Effekte und Optimierungsstrategien die Lebensqualität der operierten Patienten erhöht.

Keywords (deutsch):

Rechnerunterstützte Entwicklungsumgebung, Kurzschaftendoprothetik, Hüftgelenkersatz, Effect-Engineering, Funktionsintegration

Abstract (english): In endoprosthetics, standardized short shaft prostheses cannot optimally fulfil the anatomical and osteological requirements for durability, functionality and freedom from complications. This article provides the specifications for a Computer-aided Engineering Environment for the synthesis of a patient-specific short shaft endoprosthesis of the hip, which can maximise the degree to which these requirements are met by the implant. To this end, the osteological and anatomical factors influencing the product life cycle of a short-shaft endoprosthesis are identified in the course of a design research methodology and solution methods are designed to meet the requirements. Following the design process of the short shaft endoprosthesis, the Effect-Engineering in prosthetics, with the help of additive manufacturing, is presented, which increases the quality of life of the operated patients through the functional integration of various physical effects and optimisation strategies.

Keywords (english):

Computer-aided Engineering Environment, Short Shaft Endoprosthetics, Hip Joint Replacement, Effect-Engineering, Integration of Functions

1 Einleitung

Mit dem steigenden Anspruch an die Endoprothetik und der erhöhten Nachfrage an weichteilschonenden sowie knochensparenden Operationstechniken wächst auch die Bedeutung der patientenindividuellen Lösungen (Tusk 2020). Der prothetische Gelenkersatz der Hüfte gilt laut der renommierten Fachzeitschrift „The Lancet“ als „Operation des 20. Jahrhunderts“ (Learmonth et al. 2007). So wurden im Jahr 2018 alleine in Deutschland insgesamt 240.000 Hüftendoprothesen implantiert, was einer Steigerung von ca. 23 % im Vergleich zum Jahre 2005 entspricht (Destatis 2020). Aufgrund der steigenden Lebenserwartung der Patienten sowie einer begrenzten Standzeit der Endoprothesen werden schmerzhaft und aufwändige Revisionsoperationen am künstlichen Hüftgelenk stetig häufiger. Der Grund für den revidierenden Eingriff ist oftmals in den konstruktiven Eigenschaften und der verminderten Funktionalität heutiger konfektionierter Standardschaftprothesen zu finden (Moskal et al. 2016).

Bei der derzeitigen präoperativen Planung mit konfektionierten Schaftprothesen am Hüftgelenk werden vom Operateur verschiedene osteologische und anatomische Zielkonflikte durch das Eingehen diverser Kompromisse gelöst. Ein beispielhafter Zielkonflikt zwischen den osteologischen Grundanforderungen und der Erzeugung einer individuellen Hüftanatomie ist die gezielte Knochenverankerung des Standardschafts an der starren Knochenwand mit einer exakten Rekonstruktion der gesunden Hüftanatomie (Babisch 2017). Unter der Annahme, dass kein Mensch einem anderen gleicht, wird die Frage gestellt, ob eine patientenindividuelle Schaftprothese am Hüftgelenk diesen Zielkonflikt besser lösen kann. Die nicht vernachlässigbare Individualität von Hüftknochen und der gegebenen Anatomie eines Patienten wurde bereits von Noble et al. (1988) herausgestellt. Durch die Reduzierung von klassischen Fertigungsrestriktionen, beispielsweise durch die additive Fertigung sowie einem stärkeren Fokus auf den rechnerunterstützten Entwurf, ist die patientenindividuelle Designsynthese von Schaftprothesen am Hüftgelenk zur Steigerung der Standzeit und der Funktionalität des künstlichen Hüftgelenks geeignet. Im Rahmen dieses Beitrags soll nach Blessing und Chakrabati (2009) mit der Design Research Methodology (*kurz: DRM*) eine rechnergestützte Entwicklungsumgebung (*engl. Computer-aided Engineering Environment*) konzipiert werden, durch welche eine patientenindividuelle Kurzschaftendoprothese für die additive Fertigung entworfen und ausgelegt wird.

In den verschiedenen Stufen der Design Research Methodology werden die gegenwärtigen Fragestellungen und Probleme der Prothetik ermittelt, welche in der Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Hüftschaftendoprothese gelöst werden sollen. Dafür werden im ersten Abschnitt die Anforderungen identifiziert, Hypothesen aufgestellt und Einflussfaktoren detektiert. Im nächsten Schritt werden ein umfassendes Problemverständnis sowie der Forschungsfokus erarbeitet, welcher im letzten Schritt zur Entwicklungsumgebung ausformuliert wird. Um Implantate mit einer maximalen Funktionalität zu entwickeln, werden hocheffiziente Effekte mit dem Ansatz des Effect-Engineerings integriert. Das Potenzial der Funktionsintegration durch das Effect-Engineering in der additiven Fertigung soll am Beispiel einer Hüftschaftendoprothese mithilfe verschiedener exemplarischer Effekte, wie einer gradierten, osteointegrativen Porosität oder der Möglichkeit zur präoperativen Medikamenteninfiltration, demonstriert werden.

2 DRM: Spezifikation einer Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte

2.1 Klärung des Forschungsziels – Kann die Standzeit, Funktionalität und Komplikationsfreiheit von Implantaten maximiert werden?

Um die Revisionsoperationen zeitlich möglichst weit nach hinten zu verschieben oder im Idealfall zu verhindern, sind die obersten Ziele der Endoprothetik, die Standzeit, die Funktionalität und die Komplikationsfreiheit der Implantate zu maximieren (BVMed 2016). Bei der Umsetzung dieser Ziele in

konkrete Anforderungen an das Implantat entstehen Zielkonflikte, welche sich mit den vorwiegend verwendeten konfektionierten Standardimplantaten nicht bzw. nur bedingt lösen lassen. So lässt sich beispielsweise mit Hüftschäften in konfektionierten Größen die Rekonstruktion der gesunden Hüftanatomie mit einer bestmöglichen proximalen metaphysären Knochenverankerung nicht kompromissfrei realisieren (Tusk 2020).

Mit der steigenden Anzahl an Erstimplantationen steigt auch stetig die Zahl der Revisionsoperationen, aufgrund von Komplikationen, die das Implantat im Körper hervorruft. Endoprothesen haben eine durchschnittliche Standzeit von 15 bis 20 Jahren (Wintermantel 2009). So wurden im Jahr 2018 ca. 36.000 Revisionsoperationen durchgeführt, bei welchen das künstliche Hüftgelenk vollständig bzw. teilweise ausgetauscht, ersetzt oder entfernt wurden. Mit rund 30 % ist die Lockerung von knochenverankerten Komponenten der Hauptgrund für den revidierenden Eingriff (Grimberg et al. 2019). Eine aseptische Lockerung (ohne Beteiligung von Krankheitserregern) ist beispielsweise der häufigste Grund bei einem späten Ausfall (> 2 Jahre postoperativ) der Endoprothese. Der Effekt des Stress-Shieldings (zu Deutsch: *Spannungsabschirmung* oder *periprothetische Osteopenie*) spielt dabei eine übergeordnete Rolle. Aufgrund des deutlich höheren Elastizitätsmoduls des Implantatwerkstoffs im Vergleich zum Knochen führt die Abschirmung der mechanischen Belastungen alltäglicher Bewegungen der Patienten im Knochen zu einer erhöhten Knochenresorption (Reduktion der Knochendichte) und einem verminderten Knochenaufbauprozess. Die aufgrund des Stress-Shieldings auftretenden Veränderungen in der Knochendichte des Femurs im postoperativen Zustand um einen zementfreien Hüftschaff sind in Bild 1 dargestellt.

Im Vergleich der postoperativen Zustände kurz nach der Implantation (vgl. Bild 1a) sowie nach 2,5 Jahren (vgl. Bild 1b) ist eine deutliche Radioluzenz (Aufhellung) der Knochenstruktur im Bereich der proximalen Knochenwand erkennbar (rot durchgezogen). Diese Entwicklung ist kritisch, da im metaphysären Bereich die hauptsächliche Knochenverankerung vorliegen soll (Koch und Kälicke 2017). Der Effekt des Stress-Shieldings lässt sich gezielt durch das Implantatdesign und der angestrebten Knochenverankerung beeinflussen (Arabnejad et al. 2016).

In Hinblick auf die drei hauptsächlichen Ursachen für eine Revision wurde vor allem die Individualisierung der

Endoprothese an jeden Patientenfall als Maßnahme zur besseren Erreichung der Ziele identifiziert. Zur Herstellung von patientenindividuellen Implantaten bieten sich die additiven Fertigungsverfahren an, da damit die Fertigungsrestriktionen reduziert und die Integrationsfähigkeit verschiedener Funktionen im Implantat maximiert werden (Ehlers et al. 2020). Die Potenziale von additiv gefertigten Implantaten in Bezug auf das Auflösen der gegebenen Zielkonflikte sollen im Rahmen dieses Beitrags am Beispiel der schenkelhalsteilerhaltenden Kurzschaffendoprothese an der Hüfte dargestellt werden.

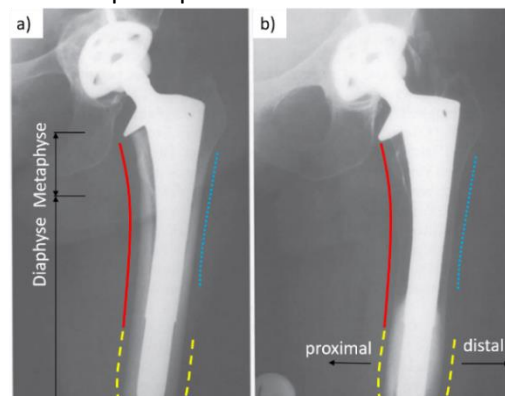


Bild 1: Veränderungen der Knochendichte kurz nach der Implantation (a) sowie 2,5 Jahre nach der Implantation (b). Bild nach Roth und Winzer 2002.

2.2 Erste deskriptive Studie

2.2.1 Anatomische und osteologische Anforderungen an die Kurzschaffendoprothese

Im Vergleich zur Standardprothese ist die Implantation von Kurzschäften, bei gleichbleibender oder sogar besserer Haltbarkeit, knochenschonender und bietet im Revisionsfall deutlich mehr Optionen (Jerosch 2017). Die Vorteile der Kurzschaffendoprothese sind nach Babisch (2017) die metaphysäre Knochenverankerung mit partieller Schonung der proximalen Knochenstruktur, die proximale Kraftübertragung und die Möglichkeit einer weichteilschonenden Implantationstechnik.

Diese Vorzüge resultieren in verschiedenen Frühergebnissen, die von einer längerfristigen und revisionsfreien Überlebensrate, im Vergleich zu Langschaffprothesen, berichten und die Kurzschaffendoprothese deshalb vor allem für junge Patienten mit einer guten Knochenqualität

interessant machen (Ettinger et al. 2011). Hinsichtlich einer knochen- und weichteilschonenden Implantation ist eine möglichst hohe Schenkelhalsresektion anzustreben, die eine proximale Verankerung gewährleistet. Für die Verankerung der Schaftprothese im Femur ist die Geometrie des Femurkanals relevant. Es zeigt sich, dass neben der Hüftanatomie auch der Femurkanal bei jedem Patienten individuelle Ausprägungen besitzt (Noble et al. 1988). Auch trotz der besseren klinischen Ergebnisse mit Kurzschaftendoprothesen ergeben sich durch die Verwendung standardisierter Größen verschiedene Hindernisse.

Mit Kurzschaftprothesen in konfektionierten Größen ist eine optimale Wiederherstellung der Gelenkgeometrie nicht bei jedem Patienten möglich, da oftmals keine hinreichenden Knochenverankerung im Femurkanal für die geforderte Hüftanatomie garantiert werden kann. Zu dessen Zielerreichung muss derzeit entweder mit einer großen Zahl von Schaftgrößen oder mit einer modularen Prothese gearbeitet werden. Konfektionierte Kurzschäfte haben in der Regel nur leichte bis sehr wenig Variationsmöglichkeiten bzgl. der Winkelverhältnisse sowie des horizontalen und vertikalen Längenausgleichs der Stellung des Femurs zum Pelvis (Becken) (Tusk 2020). Mit modularen Schaftsystemen, die durch einen Steckhals diese Variabilität gewinnen, gab es allerdings in der Vergangenheit immer wieder Korrosionsprobleme, sodass von dessen Verwendung größtenteils abgesehen wird (Tusk 2020). So werden aktuell während der präoperativen Planung die verschiedenen Kurzschafttypen mit analogen oder digitalen Röntgensablonen „ausprobiert“ und eine möglichst gute Lösung dieses Zielkonflikts iteriert. Es erscheint daher viel naheliegender, die Konfiguration des Implantats an die individuellen anatomischen Gegebenheiten eines jeden Patienten anzupassen (Tusk 2020). Knochenverankernde Implantate, wie die Kurzschaftendoprothese der Hüfte, müssen zudem diverse osteologische Kompetenzen erfüllen, um eine Biokompatibilität, Primärstabilität sowie ausreichende Langzeitstabilität zu gewährleisten. Nach Koch und Kälicke (2017) ergeben sich daraus osteologische Grundanforderungen an Schaftprothesen im Oberschenkelknochen:

- eine proximale Krafteinleitung soll die natürlichen biomechanischen Bedingungen des proximalen Femurs nachahmen,
- Schaftgeometrie und Material sollen eine günstige Implantatsteifigkeit aufweisen, die Dehnreize oberhalb des Schwellenwerts der Aktivierung des mechanosensorischen Systems zulassen,
- eine Oberflächenvergrößerung des kurzen Implantats mit osteotroper Beschichtung der Implantatoberfläche soll die Osteointegration verbessern,
- eine neben der kompakteren Verklebung bevorzugten spongiösen Einbettung des Implantats zur Schaffung eines rasch knochenadaptiven Um- und Anbaus soll die Langzeitstabilität sichern und die periprothetische Osteopenie verhindern.

Dabei muss in Bezug auf die Kurzschaftendoprothese aus osteologischer Sicht vor allem der Zielkonflikt zwischen der erforderlichen hohen Primärstabilität und der Gewährleistung einer bioharmonischen Langzeitstabilität durch die Reduzierung des Stress-Shielding-Effekts gelöst werden.

Während der Implantation wird der Femur durch Raspelungen, Fräsungen oder Impaktionen geschädigt. Dabei wird das lakunär-kanalikuläre Netzwerk zentral gestört, womit die Verbindung der Osteozyten untereinander unterbrochen wird. Zu dessen Wiederherstellung werden, auch in Anwesenheit des metallischen Implantats, ähnlich der Frakturheilung, Kaskaden der Reparatur vom Körper in Gang gesetzt und das osteonale Remodelling (Havers-Umbau) angepasst (Davies 2005).

Hohe Scherspannungen zu Beginn der Implantation unterbinden allerdings die Osteointegration, da sie das Anhaften der Knochenzellen am Implantat verhindern. Für eine hinreichende Primärstabilität und knöchernen Einheilung sind deshalb tolerierbare Mikrobewegungen von maximal 100 bis 150 Mikrometer zulässig (Albrektsson und Johansson 2001). In dieser Hinsicht sind auch die Oberflächenrauigkeiten sowie die Porosität relevant. So beeinflussen Oberflächenrauigkeiten kleiner 10 Mikrometer die zelluläre Reaktion, während Oberflächenrauigkeiten größer 10 Mikrometer die mechanische Stabilität beeinflussen (Thomsen 1991). Außerdem fördern Porengrößen von 50 bis 500 Mikrometern das Knocheneinwachsen, sodass damit eine knöchernen Schicht erzeugt werden kann, die die großen Unterschiede des E-Moduls zwischen Knochen und Implantat ausgleichen kann, dämpfend wirkt und die Kräfte im Interface vergleichmäßigt, wie in Bild 2 dargestellt (Rojek und Telega 2001).

Diese Gradierungsstrategien, beispielsweise in Form von Porosität, lassen sich vor allem mithilfe der additiven Fertigung und den hier verwendeten Methoden des Effect-Engineerings realisieren. Die Grundvoraussetzung für die Langzeitstabilität ist die ungestörte knöcherne Einheilung. Ist das gewährleistet, tritt der Knochen-Implantat-Verbund in die Langzeitphase des adaptiven Knochenumbaus ein. Bei nun intaktem Interface ergeben sich aufgrund der verschiedenen E-Module des Implantats und des Knochens neue Spannungszustände und Relativbewegungen an der Grenzzone. Die Minderbeanspruchung infolge der fehlenden Übertragungen von Verformungen des metallischen Schafts in den Knochen führen zum Versiegen der spannungsinduzierten Flüssigkeitsströme im Knochen (Koch und Kälicke 2017). In der Folge werden keine Belastungen durch das mechanosensorische System registriert und der adaptive Knochenumbau kommt zum Erliegen. Die osteologische Anforderung an das Implantat sieht demnach während der Einheilphase eine hohe Primärstabilität mit einer Abschirmung von ungünstigen Scherspannungen an der Knochen-Implantat-Grenzfläche und einem für den Knochenhalt wiederum erforderlichen mechanischen Reiz vor.

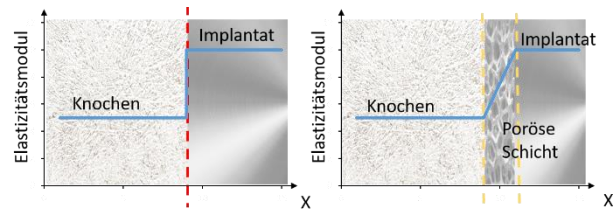


Bild 2: Schema der Veränderung des Elastizitätsmoduls an der Knochen-Implantat-Grenzfläche mit glatter bzw. poröser Implantatoberfläche nach Rojek und Telega (2001).

2.2.2 Effect-Engineering in der Kurzschaftendoprothetik mithilfe der additiven Fertigung

In der Terminologie der Konstruktionsmethodik werden physikalisch und mathematisch beschreibbare Funktionen, die ein Bauteil oder System übernehmen kann, durch Effekte realisiert (Roth 2000). Dabei liegen vor allem in der Kombination und Integration von verschiedenen Effekten die Potenziale der Funktionsfähigkeit der Bauteile, da mittels der additiven Fertigung das Auflösen konstruktiver Widersprüche völlig neu gelöst werden kann (Lachmayer et al. 2020). Aufgrund der geringen klassischen Fertigungsrestriktionen sind vor allem in der Endoprothetik erhebliche Effizienzsteigerungen aufgrund der steigenden Funktionalität des Implantats möglich. Im Folgenden werden verschiedene Effekte vorgestellt, die im Implantat angewendet und integriert werden können.

Optimierung der strukturellen Porosität zur Reduzierung des Stress-Shielding-Effekts

Das effektivste Vorgehen zur Reduzierung des Stress-Shielding-Effekts ist die Verwendung von einem porösen Implantatdesign auf Basis von Gitterstrukturen, welches sich den Materialeigenschaften des realen Knochens annähert. Damit wird der in Abschnitt 2.2.1. dargestellte Sprung des Elastizitätsmoduls verhindert und Kraftflussverhältnisse, ähnlich des präoperativen Zustands, für einen förderlichen Knochenumbau in der proximalen Metaphyse hergestellt. Die Ausgangslage ist das Volumenmodell der patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese (vgl. Bild 3a). Zur Diskretisierung des Modells wird die Geometrie voxelisiert und jedes Volumenelement in eine periodische Einheitszelle umgewandelt und im Modell tesseliert. Eine numerische Optimierungssoftware berechnet im nächsten Schritt die Spannungen sowie Mikrobewegungen und passt die relative Dichte in jeder Einheitszelle an. Die neue poröse Zellstruktur wird im Modell angepasst und erneut berechnet.

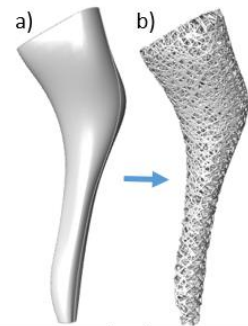


Bild 3: Erzeugung einer Gitterstruktur mit einer optimierten Dichteverteilung.

Sobald die Konvergenzkriterien (bspw. Sicherheitsfaktor der Zellstrukturen, erhöhte Ausprägung der Spannungsverteilung am proximalen Femur, tolerierbare Mikrobewegungen etc.) erreicht sind, wird die Optimierung beendet. Das Ergebnis ist eine optimierte Porosität des Hüftschafths (vgl. Bild 3b).

Kommunizierende Hohlräume zur Einbringung von Arzneimittel

Mithilfe der additiven Fertigung und der Möglichkeit zur Realisierung von komplizierten Geometrien sind kommunizierende Hohlräume im Inneren des Hüftschafths ausführbar, in welche postoperativ Arzneimittel eingebracht werden können. Das gibt den Medizinern die Möglichkeit, die Einheilphase medikamentös zu beeinflussen, indem gezielt Arzneimittel zur Wundheilung oder Schmerzlinderung

in die Grenzschicht zwischen Implantat und Knochen gebracht werden. Außerdem sind weitere Effekte mit den kommunizierenden Hohlräumen realisierbar, die die Osteointegration positiv beeinflussen.

Auslegung einer interkonnektierenden Oberflächenschicht

Mithilfe einer interkonnektierenden Oberflächenschicht kann der Sprung der Elastizitätsmodule zwischen Prothesengrundkörper und Knochen an kritischen Stellen ausgeglichen werden. Diese Schicht, beispielsweise mit stochastisch angeordneten Tripoden, kann vom Knochen dreidimensional umschlossen werden und erhöht die Oberfläche des Knochen-Implantat-Verbunds. Dadurch wird das Elastizitätsmodul beider Werkstoffe durch eine isoelastische Knochenschicht angepasst, die stetig Dehnungsreize für den dauerhaft knochenadaptiven An- und Umbau gibt.

Konfigurator zur Rückgewinnung der patientenindividuellen Hüftanatomie

Die Rekonstruktion der patientenindividuellen Hüftanatomie kann gezielt mithilfe der additiven Fertigung gewährleistet werden. Indem der knochenverankerte Schaft als fixiertes Design festgesetzt wird, kann die Anbindung durch einen Konfigurator variabel entworfen werden. Dafür wird das Rotationszentrum als variabler Designpunkt definiert, welcher durch verschiedene Variablen wie dem femoralen und vertikalen Offset oder dem CCD-Winkel beeinflusst werden kann, wie in Bild 4 dargestellt. Dadurch wird eine optimale Knochenverankerung gewährleistet.

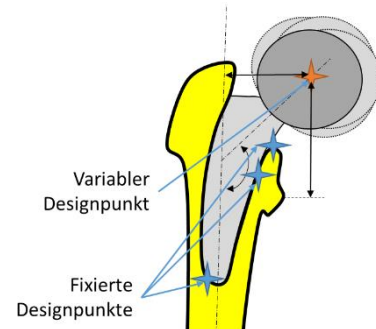


Bild 4: Erzeugung einer optimalen postoperativen Hüftanatomie durch einen Designkonfigurator mit fixiertem Hüftschafft.

Das Wissen für die Gestalt der Anbindung wird in Form von Sensitivitäten gespeichert, die angeben, wie sich die Kräfteverhältnisse an den Muskeln mit einer variierten Hüftanatomie verändern. Diese Sensitivitäten können aus einer muskuloskelettalen Mehrkörpersimulation und einem Wissen über die anschließenden numerischen Spannungszustände im Knochen gewonnen werden.

2.3 Präskriptive Studie – Rechnerunterstützte Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte

Die Entwicklung von technisch-medizinischen Produkten folgt bekannten Prozessmodellen. Die methodische Produktentwicklung ist beispielsweise nach VDI 2221 in die Phasen Planung, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten gegliedert. Die Berücksichtigung der Patientenindividualität erhöht die möglichen Freiheitsgrade im Produkt. Um dem entgegenzuwirken, werden rechnergestützte Entwicklungsumgebungen eingesetzt. Diese Entwicklungsumgebung hilft dabei dem Entwickler, sequentiell die richtigen Entscheidungen zu treffen und führt durch die Entwurfsphase des Produktentstehungsprozesses. Außerdem besitzt die Entwicklungsumgebung in der Regel alle notwendigen Synthese- und Analysewerkzeuge, um ein Produkt zu entwerfen und gibt die Möglichkeit, die Lösung in Bezug auf die Anforderungserfüllung und Funktionen zu überprüfen (Brockmöller et al. 2020).

Die in Bild 5 dargestellte Entwicklungsumgebung für patientenindividuelle Kurzschaftendoprothesen mit einer hohen Funktionsintegration repräsentiert eine Unterstützung in Form eines Konzepts.

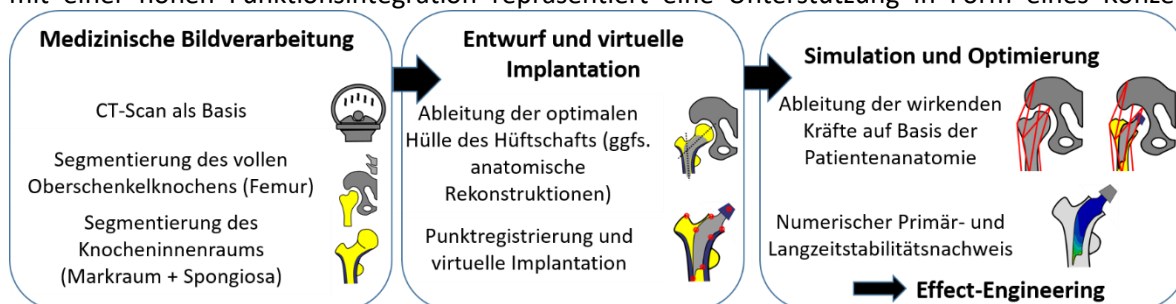


Bild 5: Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte.

Innerhalb der ersten beiden Stufen wurde die Erkenntnis erarbeitet, dass ein patientenindividuelles und osteologisch gefordertes Schaftdesign mithilfe des Funktionsintegrationspotenzials der additiven Fertigung die Anforderungen an die Standzeit, die Funktionalität und die Komplikationsfreiheit der Implantate maximieren kann. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nur ein Teil der Merkmale des Produkts direkt modelliert werden, wie die Gestaltparameter der Geometrie. Resultierende Eigenschaften, wie beispielsweise die Spannungsverteilungen, werden von den Gestaltparametern beeinflusst und lassen sich demnach nur indirekt modellieren. Dies führt zu Syntheseschleifen, die in der Entwicklungsumgebung berücksichtigt werden müssen. Die Entwicklungsumgebung, als Ergebnis dieser Studien, gliedert sich in drei Teilbereiche, die den Prozess der Designsynthese mithilfe verschiedener rechnergestützter Werkzeuge darlegt. Die Spezifikationen der rechnerunterstützten Entwicklungsumgebung werden in Form einer User Story Map dargestellt, die die Anforderungen der einzelnen Teilbereiche anwenderorientiert abbildet. In Bild 6 ist dafür ein Ausschnitt der User Stories für die ersten beiden Teilbereiche abgebildet.

Medizinische Bildverarbeitung		Entwurf und virtuelle Implantation	
1. Segmentierung von CT-Scans	2. Ableitung der optimalen Implantathülle	3. Punktregistrierung und virtuelle Implantation	
3	9	20	35
0	2	10	15
1.1. Flächenmodell (FM 1 + FM 2) Als User möchte ich den vollen Femur sowie den Markraum segmentieren, um ein virtuelles Flächenmodell zu erhalten.	2.1. Manipulation FM2 Als User möchte ich das Flächenmodell des Markraums math. manipulieren können, um die geom Anforderungen der Implantation einzuhalten.	3.1. Virtuelle Implantation Als User möchte ich das Flächenmodell des Implantats virtuell in den Femur implantieren.	
0	2	10	15
1.2. Materialeigenschaften Als User möchte ich die inhomogenen Materialeigenschaften des Femurs identifizieren, um eine exakte numerische Simulation zu gewährleisten.	2.2. Anatomiekonfigurator Als User möchte ich das Flächenmodell des Markraums mathematisch manipulieren können, um eine optimale Hüftanatomie erzeugen zu können.		
3	5	10	20

Bild 6: Ausschnitt der User-Story Map zur Spezifikation des Entwurfsprozesses der optimalen Implantatgeometrie.

Durch dieses Vorgehen kann eine Implantatgeometrie erzeugt werden, welche die anatomischen Randbedingungen der patientenindividuellen Hüfte abbildet. Die User Stories beschreiben die Anforderungen an die Entwicklungsumgebung und die Erwartungen an den Funktionsumfang aus Sicht der Nutzer. Dieses Vorgehen erleichtert die Validierung und Bewertung der Spezifikationen. Ein Ausschnitt der User Stories aus dem weitaus umfangreichsten Teilbereich der Entwicklungsumgebung, der Simulation und Optimierung, ist in Bild 7 dargestellt.

Simulation und Optimierung			
4. Ableitung der wirkenden Kräfte	5. Numerischer Stabilitätsnachweis	6. Effect-Engineering	
5	11	6	19
5	11	20	60
4.1. MKS präoperativ Als User möchte ich die patientenindividuellen Muskelkräfte am Femur bestimmen, um die exakten Randbedingungen zu identifizieren.	5.1. Primärstabilität Als User möchte ich den Knochen-Implantat-Verbund statistisch simulieren, um die Primärstabilität abschätzen zu können.	6.1. Multikriterielle Optimierungen Als User möchte ich multikriterielle Optimierungen durchführen, um hocheffiziente Effekte im Implantat zu integrieren.	
3	7	4	10
2	4	2	9
4.2. MKS postoperativ Als User möchte ich die Mehrkörpersimulation parametrisieren können, um die Muskelreaktionskräfte im postoperativen Zustand zu identifizieren.	5.2. Langzeitstabilität Als User möchte ich den prä- und postoperativen Zustand simulieren, um den Knochenumbau abschätzen zu können.		
2	4	2	9

Bild 7: Ausschnitt der User-Story Map zur Spezifikation des Simulations- und Optimierungsprozesses der optimalen Implantatgeometrie unter Verwendung der Methoden des Effect-Engineerings.

Durch das Effect-Engineering werden vor allem die osteologischen Anforderungen an die Kurzschaftendoprothese, beispielsweise durch die Integration der in Abschnitt 2.2.2. vorgestellten Funktionen realisiert. Im Folgenden werden die einzelnen Phasen mit den erforderlichen Eingangs- und gewünschten Ausgangsdaten dargestellt sowie verwendete Werkzeuge charakterisiert.

2.3.1 Medizinische Bildverarbeitung

Die Basis der patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese sind computertomografische Bilddaten des Patienten (kurz CT-Scans). Diese CT-Scans sind die Grundlage für das Reengineering unterschiedlicher Gewebetypen, welche mithilfe der Hounsfield-Skala differenziert werden können. Im ersten Schritt wird der volle Femur aus dem CT-Scan segmentiert, sodass ein dreidimensionales Modell des Knochens entsteht (vgl. Bild 8a). Aus diesem Modell des Femurs wird der Markraum sowie die Spongiosa anschließend separat segmentiert, welche den Bauraum für die patientenindividuelle Kurzschaftendoprothese darstellt (vgl. Bild 8b). Durch diese Segmentierung wird in der Designsynthese gewährleistet, dass die intakte metaphysäre Knochenwand vollständig erhalten bleibt und zur Herstellung der Stabilität sowie zur Osteointegration genutzt werden kann. Die Berücksichtigung dieser individuellen Femurgeometrie im Designprozess der Kurzschaftendoprothese ist essenziell für die Rekonstruktion der Hüftanatomie und die Primär- sowie Langzeitstabilität des Implantats.

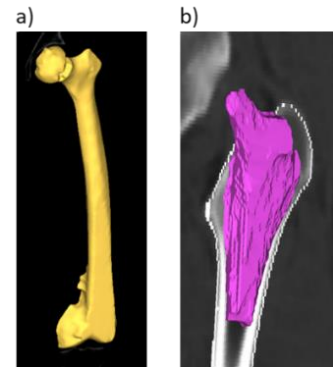


Bild 8: Segmentierung des vollen Femurs (a), sowie Segmentierung des Markraum und der Spongiosa (b).

2.3.2 Entwurf und virtuelle Implantation

Aus dieser zweiten Segmentierung wird anschließend, mithilfe generativer Algorithmen, eine optimale Hülle der patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese abgeleitet. Die Methode des Reverse Engineerings wird in dieser Entwicklungsumgebung auf die Designsynthese der patientenindividuelle Kurzschaftendoprothesen übertragen, um die optimale Passgenauigkeit zu gewährleisten. Die Ausgabe der Segmentierung ist ein unstrukturiertes trianguläres Oberflächennetz. Die Entwicklungsumgebung muss dafür in der Lage sein, dieses Netz mithilfe einer Flächenrückführung in ein NURBS-Flächenmodell (Non-uniform rational B-Splines) zu transformieren. Die Geometrie und das Design werden durch die Entwicklungsumgebung berechnet und nicht, wie im Reverse Engineering üblich, durch mehrere repetitiver Schritte aus geometrischen Primitiven manuell erzeugt.

Dieses so erzeugte mathematische Flächenmodell ist deshalb besonders für organische Bauteilformen geeignet und lässt eine parametrische Bearbeitung der Konturen zu (Biedermann und Meboldt 2020). Anders als mit der polygonbasierter Modellierung können mit NURBS beliebige Kurven und Flächen präzise dargestellt werden. Außerdem lässt sich das NURBS-Flächenmodell mithilfe der visuellen Programmiersprache *Grasshopper*[®] nach vordefinierten Regeln bearbeiten, sodass ein stetiges Bauteil mit einer glatten Oberfläche entsteht, welches auch ohne anschließendes Effect-Engineering in der additiven Fertigung herstellbar ist.

Bei der Kurzschaftendoprothese sollen die proximale Krafteinleitung, metaphysäre Knochenverankerung sowie eine spongiösen Einbettung berücksichtigt werden. Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden charakteristische Orientierungspunkte im Bauraum definiert, die als Designpunkte für die Oberflächengeometrie agieren. Beispielsweise werden so Punkte an der proximalen Knochenwand gesetzt, um die Knochenwandgeometrie an dieser Stelle identisch abzubilden. An anderen Stellen, wie beispielsweise dem Trochanter Major, werden die Orientierungspunkte im Lösungsraum dreidimensional verschoben, um eine spongiösen Einbettung zu realisieren. Mithilfe der parametrischen Modellierung in *Grasshopper*[®] lassen sich zudem aus der Wissensbasis heraus verschiedene weitere Anforderungen an die Kurzschaftendoprothese abbilden, die zum Beispiel auch die Implantierbarkeit gewährleisten. Die generischen Algorithmen überprüfen in diesem Fall die konisch verlaufenden Querschnitte vom Ort der Femurkopffosteotomie und passen diese gegebenenfalls automatisiert an. Das Bild 9 stellt beispielhaft das Vorgehen zum Entwurf der Implantatgeometrie dar.

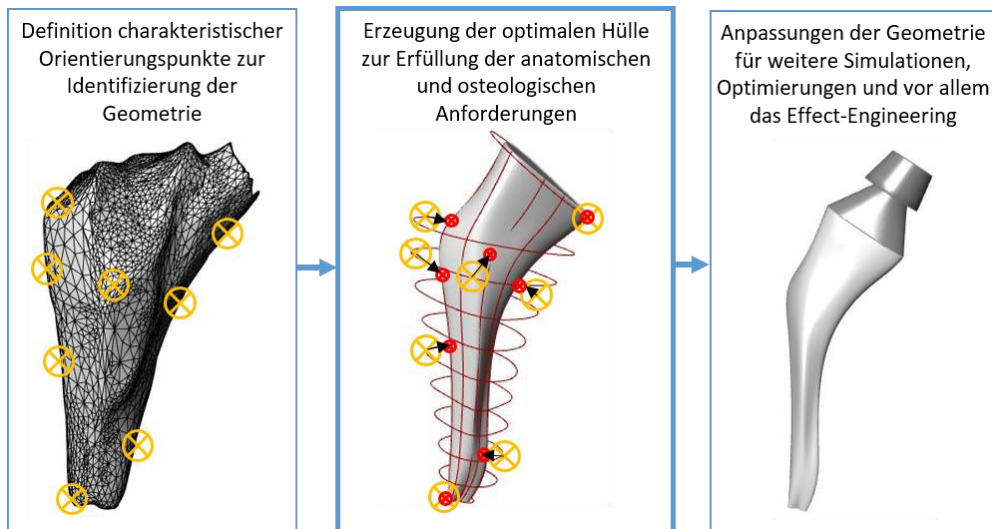


Bild 9: Vorgehen der Erzeugung einer optimalen Implantatgeometrie mit den Methoden des Reverse Engineering sowie einer anschließenden mathematischen Modifikation des Flächenmodells.

Abschließend wird eine Anbindung für den Kugelkopf des Hüftgelenks erzeugt, welche initial die alte Hüftanatomie des Patienten darstellt und in Hinblick auf die Ziel-Anatomie variiert werden kann. Dafür kann die Wissensbasis mit Sensitivitäten versehen werden, die verschiedene Konfigurationen ausschließt. Für weitere, vor allem numerische, Untersuchungen wird die Kurzschaftendoprothese virtuell in den Femur implantiert und eine Baugruppe des Modells erzeugt.

2.3.3 Simulation und Optimierung

Die Simulation der patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese im Knochenverbund ist grundlegend für den Nachweis der Anforderungen an die (Langzeit-)Stabilität des Implantats. Um diesen Nachweis durchzuführen, wird die patientenindividuelle Kinematik und Kinetik in der numerischen Simulation berücksichtigt.

Dafür wird die Hüftanatomie des Patienten in einem Mehrkörpersystem in *OpenSim*[®] implementiert und verschiedene Bewegungsabläufe (Gehen, Laufen, Springen) im prä- sowie postoperativen Zustand simuliert. Das Mehrkörpersystem besteht aus einem muskuloskeletalen System, welches durch eine Parametrisierung der Femurgeometrie und Muskelangriffspunkte an den Patienten angepasst werden kann. Diese Anpassung kann durch die Aufnahme von verschiedenen Landmarken der Patientenanatomie im CT-Scan und der späteren Registrierung im Mehrkörpersystem erfolgen. Das Ergebnis dieser Simulation sind valide Gelenk- und Muskelreaktionskräfte des Patienten, die für die weiteren numerischen Untersuchungen verwendet werden. Mit diesem Vorgehen lässt sich auch der postoperative Zustand mit ggfs. angewendeten Veränderungen an der Hüftgelenkanatomie simulieren, die durch die Veränderung der Längen, Hebelarme und Massen die Kräfteverhältnisse des Gelenks und der Muskeln verändern (vgl. Bild 10).

Anschließend wird die Stabilität des Knochen-Implantat-Verbunds numerisch in *Abaqus Unified FEA*[®] untersucht. *Abaqus Unified FEA*[®] bietet die Möglichkeit zur akkuraten Berechnung der Festigkeit und Verformungen von Festkörpern mithilfe von Differentialgleichungen. Für diese numerischen Untersuchungen sind vor allem die Materialeigenschaften des Knochens relevant. Da der Knochen gradierte Dichteigenschaften aufweist und inhomogene Stoffeigenschaften besitzt, verfügen unterschiedliche Knochenregionen über unterschiedliche Elastizitätsmodule. Diese Materialeigenschaften werden auf Basis der Hounsfield-Units aus dem CT-Scan auf das in der

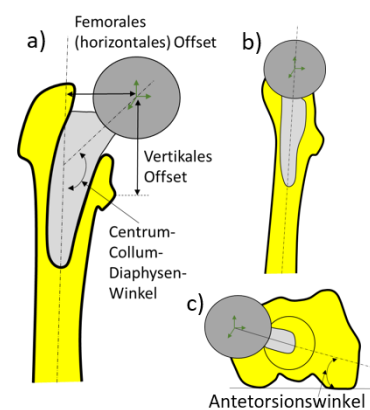


Bild 10: Parametrisierung der postoperativen Hüftanatomie zur Berechnung der Realen Muskelreaktionskräfte.

Simulationsumgebung erzeugte Volumenmodell des Knochens übertragen, sodass nicht nur die patientenindividuelle Geometrie, sondern auch das exakte Materialverhalten gewährleistet werden kann. Zur Primärstabilität werden die Spannungen und vor allem Mikrobewegungen analysiert, da nur geringe Relativbewegungen zwischen Knochen und Implantat für ein positives Einwachsen zulässig sind. Sobald der numerische Nachweis für die Primärstabilität erbracht ist, werden Untersuchungen zur Langzeitstabilität durchgeführt, da hier der Stress-Shielding-Effekt besondere Betrachtung findet. Der beanspruchungsadaptive Knochenumbau wird mit einem Modell nach Bouguecha (2007) berechnet. In dem numerischen Modell werden die Spannungen im Knochen des präoperativen Zustands mit den veränderten Spannungszuständen im postoperativen Zustand verglichen. Beide Spannungszustände werden verrechnet, ein Stimulus zum Knochenumbau und neue Materialkennwerte berechnet (Bouguecha 2007).

An die numerischen Simulationen schließen umgehend die multikriterielle Optimierungen durch das Effect-Engineering an. Durch die Integration von verschiedenen Effekten werden die optimierbaren Gestaltparameter verändert. Im Gegensatz zur konventionellen Topologieoptimierung, die für die Dichte der finite Elemente nur binäre Zustände (Material da, oder Material nicht da) zulässt, wird in dieser Entwicklungsumgebung eine relative Dichteverteilung berechnet, die sich in unterschiedlichen Porositäten des Volumens äußert. Grundsätzlich werden alle Optimierungsmaßnahmen durch die Bedingungen des Knocheneinwachsens, der Mikrobewegungen, der Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffs sowie der additiven Herstellbarkeit begrenzt. So müssen beispielsweise Porengrößen von 50 bis 500 Mikrometern eingehalten (Rojek und Telega 2001), minimale Wandstärken bis 180 Mikrometern beachtet werden und die lokale Scherspannungen in der Knochen-Implantat-Grenzfläche unterhalb der Versagensgrenze liegen (Hoffman 1967). An dieser Stelle sei darauf hinzuweisen, dass jede Veränderung der Geometrie des Implantats eine aktualisierte numerische Überprüfung der Stabilität benötigt, sodass sich in dieser Phase der Entwicklungsumgebung eine Schleife bildet.

3 Kritische Würdigung, Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der identifizierten Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit der knochenverankerten Endoprothesen ist es möglich, dass die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellte Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte die Standzeit, die Funktionalität und die Komplikationsfreiheit der Implantate maximieren kann. Allerdings fehlt in der DRM die letzte Phase, die Evaluation, vollständig. Erst mit Abschluss dieser Phase ist eine umfassende Aussage über den Nutzen dieser rechnerunterstützten Entwicklungsumgebung sowie der patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte möglich.

Des Weiteren zeigen sich weitere Hindernisse in der Fertigung und Anwendung des Implantats. Aufgrund der Patientenindividualität und der individuellen Designsynthese ist für jede Kurzschaftendoprothese mit erhöhten Herstellungspreisen im Vergleich zu konfektionierten Standardprothesen zu rechnen. Außerdem entsteht aufgrund der Patientenindividualität ein enormer Dokumentationsaufwand, um eine Zulassung des Implantats zu erhalten. Durch die additive Fertigung ist das Prozess- und Qualitätsmanagement ohnehin aufwändiger als bei konventionellen Herstellungsverfahren, wie beispielsweise dem Gießen. In diesem Zusammenhang würde jede integrierte Funktion bzw. Individualisierungsmaßnahme den Dokumentationsaufwand sowie die Zulassungshürde weiter erhöhen.

Dieser Beitrag stellt eine Entwicklungsumgebung dar, die die Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte ermöglicht. Dafür werden die grundlegenden geometrischen, anatomischen sowie osteologischen Anforderungen an ein Implantat detektiert und in einem Entwurfsprozess abgebildet. Die Entwicklungsumgebung umfasst dabei die virtuelle Produktentwicklung, ausgehend vom CT-Scan der Patienten, über das Effect-Engineering, bis hin zum numerischen Stabilitätsnachweis in-silico (anhand rechnerunterstützter und mathematische Modelle).

Für die Konzeptionierung des Vorgehens wurden die ersten drei Phasen der Methode der Design-Research-Methodology angewendet.

Grundsätzlich sind die zu erwartenden Vorteile der im Rahmen dieses Beitrags vorgestellten Entwicklungsumgebung zur Synthese einer patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese der Hüfte vielversprechend. Allerdings sind, wie in diesem Abschnitt dargestellt, weitere Untersuchungen notwendig, um die Entwicklungsumgebung sowie die Designsynthese zu evaluieren. Die vierte Phase der DRM-Methode ist notwendig, um beispielsweise Probleme in der additiven Fertigung der patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese detailliert zu erkennen und auch die Funktionsfähigkeit in-vitro (in künstlicher Umgebung) sowie abschließend die Stabilität in-vivo (am lebenden Objekt) zu überprüfen. Für die Evaluation der rechnergestützten Entwicklungsumgebung bietet sich mittelfristig eine Kooperation mit einem tiermedizinischen Institut an, welches die Implantation der entworfenen patientenindividuellen Kurzschaftendoprothese, beispielsweise bei einem Hund mit einer ausgeprägten Coxarthrose, durchführt und medizinisch betreut.

Literatur

- Albrektsson und Johansson 2001 ALBREKTSSON, T.; JOHANSSON, C.: *Osteoinduction, osteoconduction and osseointegration*. In: *European Spine Journal* 2001, 10, S. 96-101, doi: 10.1007/s005860100282.
- Arabnejad et al. 2016 ARABNEJAD, S.; JOHNSTON, B.; TANZER, M.; PASIN, D.: *Fully Porous 3D Printed Titanium Femoral Stem to Reduce Stress-Shielding Following Total Hip Arthroplasty*. In: *J Orthop Res*. 2017, 35, S. 1774-1783, doi: 10.1002/jor.23445.
- Babisch 2017 BABISCH, J.: *Kann man mit Kurzschaftprothesen besser planen und rekonstruieren?* In: Jerosch, Jörg (Hrsg.): *Kurzschaftendoprothese an der Hüfte*, 1. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017, S. 32-45.
- Biedermann und Meboldt 2020 BIEDERMANN, M.; MEBOLDT, M.: *Computational design synthesis of additive manufactured multi-flow nozzles*. In: *Additive Manufacturing* 2020, 35 doi: 10.1016/j.addma.2020.101231.
- Blessing und Chakrabati 2009 BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*, 1. Aufl., Springer-Verlag London, 2009, doi: 10.1007/978-1-84882-587-1.
- Bouguecha 2007 BOUGUECHA, A.: *Numerische und experimentelle Untersuchungen zum beanspruchungsadaptiven Knochenumbau im peripröthetischen caninen Femur*, 1. Aufl. TEWISS, 2007.
- Brockmüller et al. 2020 BROCKMÜLLER, T.; SIQUEIRA, R.; GEMBARSKI, P. C.; MOZGOVA, I.; LACHMAYER, R.: *Computer-aided Engineering Environment for Designing Tailored Forming Components*. In: *Metals* 2020, 10, 1589, doi: 10.3390/met10121589.
- BVMed 2016 Bundesverband Medizintechnologie (BVMed) (2016): *Der lange Weg eines Medizinprodukts von der Idee bis zur Anwendung am Patienten*.
- Davies 2005 DAVIES, J. E.: *Understanding Peri-Implant Endosseous Healing*. In: *J Dent Educ*, 67, S. 932-949.
- Destatis 2020 Statistisches Bundesamt (2020): *Anzahl der Implantationen künstlicher Hüftgelenke in deutschen Krankenhäusern in den Jahren 2005 bis 2019*.
- Ehlers et al. 2020 EHLERS, T.; LACHMAYER, R.; VAJNA, S.; HALLE, T.: *Producibility*, In: Vajna, S. (Hrsg.): *Integrated Design Engineering*, Springer Nature Switzerland AG 2020, Cham Switzerland, S. 287 - 323, doi: 10.1007/978-3-030-19357-7_9.

- Ettinger et al. 2011 ETTINGER, M.; ETTINGER, P.; LERCH, M.; RADTKE, K.; BUDDÉ, S.; EZECHIELI, M.; BECHER, C.; THOREY, F.: *The NANOS short stem in total hip arthroplasty: a mid term follow-up*. In: *Hip Int.* 2011, S. 583-586, doi: 10.5301/HIP.2011.8658 .
- Grimberg et. al 2019 GRIMBERG, A.; JANSSON, V.; Melsheimer, O.; Steinbrück, A.: *Endoprothesenregister Deutschland (EPRD): Jahresbericht 2019 – Mit Sicherheit mehr Qualität*, 2019.
- Hoffman 1967 HOFFMAN, O.: *The Brittle Strength of Orthotropic Material*. In: *J. Compos. Mater.* 1967 , 1, S. 200–206, doi: 10.1177/002199836700100210 .
- Jerosch 2017 JEROSCH, J.: *Klassifikation von Kurzschaftsystemen in der Hüftendoprothetik*. In: Jerosch, Jörg (Hrsg.): *Kurzschaftendoprothese an der Hüfte*, 1. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017, S. 3-6.
- Koch und Kälicke 2017 KOCH, F. W.; KÄLICHE, T.: *Osteologische Aspekte*. In: Jerosch, Jörg (Hrsg.): *Kurzschaftendoprothese an der Hüfte*, 1. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017, S. 14-32, doi: 10.1007/978-3-662-52744-3.
- Lachmayer et al. 2020 LACHMAYER, R.; BODE, B.; GRABE, T.; RETTSCHLAG, K.: *Integration spezifischer Effekte in Strukturbauteilen mittels Additiver Fertigungsverfahren*. In: Lachmayer, R.; Rettschlag, K.; Kaierle, S. (Hrsg.): *Konstruktion für die Additive Fertigung 2019*, Springer-Verlag, doi: 10.1007/978-3-662-61149-4_1.
- Learmonth et al. 2007 LEARMONTH, I. D.; YOUNG, C.; RORABECK, C.: *The operation of the century: total hip replacement*. In: *Lancet* 2007, 370, S. 1508–1519, doi: 10.1016/S0140-6736(07)60457-7.
- Moskal et al. 2016 MOSKAL, J. T.; CAPPS, S. G. ; SCANELLI, J. A.: *Still no single gold standard for using cementless femoral stems routinely in total hip arthroplasty*. In: *Arthroplasty Today* 2016, 4, S. 211-218, doi: 10.1016/j.artd.2016.02.001.
- Noble et al. 1988 NOBLE, P. C.; ALEXANDER, J. W.; LINDAHL, L. J.; YEW, D. T.; GRANBERRY, W. M.; TULLOS, H. S.: *The anatomic basis of femoral component design*. In: *Clin Orthop Relat Res.* 1988, 235, S. 148-65.
- Rojek und Telega 2001 ROJEK, J.; TELEGA, J. J.: *Contact problems with friction, adhesion and wear in orthopaedic biomechanics. Part I – General developments*. In: *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 2001, 39, S. 655-677.
- Roth 2000 ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre*, Springer-Verlag, 3. Auflage, 2000.
- Roth und Winzer 2002 ROTH, A.; Winzer, T.: *Periprothetische Osteopenie*. In: Peters, K.. M: *Knochenkrankheiten*, 1. Aufl., Steinkopff-Verlag Heidelberg, 2002, S. 105-108.
- Rubin et al. 1992 RUBIN, P. J.; LEYVRAZ, P. F.; AUBANIAC, J.M.: *The morphology of the proximal femur. A three-dimensional radiographic analysis*. In: *J Bone Joint Surg Br* 1992, 74, doi: 10.1302/0301-620X.74B1.1732260.
- Thomsen und Ericson 1991 THOMSEN, P.; ERICSON, L. E.: *Inflammatory Cell Response to Bone Implant Surfaces*. In: *Bone-Bio Material Interface* 1991, S. 153–164.
- Tusk 2020 TUSK, I.: *Warum individuelle Schäfte am Hüftgelenk?*, In: *Orthopäde* 2020, 49, S. 403-407, doi: 10.1007/s00132-020-03904-w.
- Wintermantel 2009 WINTERMANTEL, E.: *Biokompatibilität*. In: Wintermantel, Erich; Ha, Suk-Woo (Hrsg.): *Medizintechnik*, 5. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, S. 67-104, doi: 10.1007/978-3-540-93936-8.

Durchgängige Systemmodellierung - Integration von Zielen in technische Systemmodelle im Kontext des Anforderungsmanagements

Continuous System Modelling - Integration of Goals into technical System Models in Context of Requirements Management

Dennis Horber, Fabian Wilking, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk), Erlangen

horber@mfk.fau.de

wilking@mfk.fau.de

schleich@mfk.fau.de

wartzack@mfk.fau.de

Abstract (deutsch): Durch die steigende Komplexität technischer Konsumentenprodukte beschäftigen sich immer mehr Unternehmen mit Ansätzen, um diese Komplexität greifbarer zu machen. Ein Ansatz dafür ist das Model-Based Systems Engineering (MBSE). Ein zentrales Element dieses Ansatzes ist die Verwendung von Systemmodellen, die zur Beschreibung von Struktur und Verhalten des Systems dienen. Anforderungen lassen sich somit unmittelbar mit Systemelementen verbinden und verifizieren. Die im entwicklungsmethodischen Vorgehen oft vernachlässigten Ziele, die den Anforderungen hierarchisch übergeordnet sind, finden aber auch in diesen Modellen noch keine Anwendung. Dieser Beitrag beschäftigt sich damit, inwiefern sich Ziele konsistent in technische Systemmodelle integrieren lassen, sodass eine durchgängige Modellierung von den Zielen bis hin zu den einzelnen Elementen ermöglicht wird. Dabei werden bereits bestehende Möglichkeiten, hier beispielhaft in der System Modelling Language (SysML), um Systemelemente und Verbindungen ergänzt, um eine konsistente Integration von Zielen gewährleisten zu können und die Syntax der Notationen nicht erheblich zu beeinflussen.

Keywords (deutsch):

Model-Based Systems Engineering, MBSE, Systemmodell, Zielmodellierung, Anforderungsmanagement

Abstract (english): Caused by the increasing complexity of technical consumer products, many enterprises are considering new approaches to grasp this complexity. One of these approaches is Model-Based Systems Engineering (MBSE). A central element of this approach is the use of system models, which describe structure and behaviour of the system. This enables the connection between requirements and system elements. Goals, as superordinated requirements, are often unheeded within engineering approaches and are not represented within technical system models. Therefore, this paper discusses the utilization of a goal integration into system models to enable a continuous modelling from goals towards single elements. Therefore, existing possibilities, e.g. within the System Modelling Language (SysML), are enhanced by further system elements as well as relations to achieve a consistent integration of goals and prevent a substantial influence on the syntax of the language.

Keywords (english):

Model-Based Systems Engineering, MBSE, System Model, Goal Modeling, Requirements Engineering

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Erreichung eines höheren Produktnutzens geht meist nur noch mit einem Anstieg der Komplexität technischer Systeme einher. Unternehmen stehen daher vor der Herausforderung, diese Komplexität für sich greifbar zu machen. Das Modellbasierte Systems Engineering (MBSE) ist ein Ansatz, welcher mit Hilfe der Systemmodellierung versucht, diese Komplexität des technischen Systems in das entwicklungsmethodische Vorgehen zu integrieren und greifbar zu machen (Weilkiens 2014). Mit steigender Komplexität der Produkte geht im gleichen Umfang eine Zunahme von miteinander wechselwirkenden Anforderungen sowie Relationen in weitere Partialmodelle einher. Spezifische Produkthanforderungen können aus übergeordneten Zielen, darunter zum Beispiel Unternehmenszielsetzungen, abgeleitet und somit zur Überführung jener Ziele in die Produktentwicklung verwendet werden (Rupp 2014). Nach Rupp (2014) ist die Verknüpfung jeder abgeleiteten Anforderung mit dem zugehörigen Ziel ein integraler Bestandteil für die erfolgreiche Verfolgung jeder Zielsetzung sowie deren Erreichung. Die modellbasierte Systementwicklung besitzt dabei das Potential, ebendiese Verknüpfung der Ziele und Anforderungen, sowie mit weiteren Elementen der technischen Systemmodelle, abzubilden. Dadurch werden die Dokumentation sowie die durchgängige Nutzung der Ziele in Systemmodellen ermöglicht. Sie legen zudem die Grundlage für die Verifikation von Anforderungen an das System und die Validierung der übergeordneten Entwicklungsziele. Hierdurch begründet, beschäftigt sich der vorliegende Beitrag mit der konzeptionellen Umsetzung und der technischen Nutzbarmachung der Zielmodellierung.

1.2 Forschungsfrage und Vorgehen

Im Tätigkeitsfeld des Anforderungsmanagements stellt die Klärung der Zielsetzungen aller Stakeholder sowie der daraus abgeleiteten Anforderungen den grundlegenden Schritt für den Start eines Entwicklungsprojektes dar (Rupp 2014). Über die reine Dokumentation der Ziel-Anforderungs-Relationen hinaus, bietet das zielorientierte Anforderungsmanagement in der Softwareentwicklung eine Möglichkeit zur modellbasierten Abbildung von Zielen und deren Relationen mit Hilfe von Zielgraphen (van Lamsweerde 2001). Das MBSE erfordert allerdings einen interdisziplinären Ansatz, der eine durchgängige Verwendung aller Elemente in den Systemstrukturen erlaubt. Hierzu liegen kein einheitliches Vorgehen sowie keine dedizierte Möglichkeit vor, um Ziele zu integrieren. Die Herstellung der Durchgängigkeit von den Systemelementen zu den Anforderungen bis letztlich zu den übergeordneten Zielen ist ein wesentliches Element der Produktentstehung. Die oft gegenüber Anforderungen im entwicklungsmethodischen Vorgehen vernachlässigten Ziele erfahren somit eine direkte Integration in die Modellierung (van Lamsweerde 2001). Aus diesem Grund befasst sich dieser Beitrag mit der Frage, wie Ziele konsistent in technische Systemmodelle integriert werden können, sodass eine durchgängige Verknüpfung von den Zielen bis zu den Strukturelementen ermöglicht wird. Hierdurch soll die Verwendung der Zielmodellierung über die reine Visualisierung und Dokumentation hinaus auch deren technische Nutzbarmachung, etwa durch eine zielgerichtete Systementwicklung auf Basis eines stetigen Vergleichs von Systemverhalten und Zielmodell, erreicht werden. Dafür werden zunächst die Grundlagen von Systemmodellen im Kontext des MBSE sowie die Einordnung und Abgrenzung des Ziel- sowie Anforderungsbegriffes betrachtet. Nachfolgend werden bestehende Ansätze und Möglichkeiten zur Zielmodellierung aufgezeigt und bewertend verglichen. Auf den damit gewonnenen Erkenntnissen aufbauend wird ein verbesserter Ansatz zur Zielmodellierung vorgestellt und anhand eines Fallbeispiels beschrieben. Abschließend wird der Ansatz diskutiert und ein Ausblick auf weitere Potenziale gegeben, die mit einer Integration dieses Ansatzes einhergehen.

2 Stand der Technik

2.1 Model-Based Systems Engineering

Das Model-Based Systems Engineering beschreibt den Einsatz von Modellen anstelle von Dokumenten in der Systementwicklung (Walden et al. 2017). Es dient dazu, die dem Systems Engineering zugrundeliegende systematische Denkweise anwendbar zu machen. Vordergründig ist dabei das Ziel der durchgängigen Modellierung des Systems, einen Zustand zu erreichen, in welchem es lediglich eine einzige Quelle gibt, von welcher Eigenschaften sowie Veränderungen des Systems angenommen werden – die sog. "Single Source of Truth" (Dori und Crawley 2016). Die Durchgängigkeit der Modellierung impliziert dabei sowohl strukturelle Eigenschaften wie auch Verhaltensweisen des Systems bis hin zu den Anforderungen. Dadurch lassen sich folgende Vorteile beim Einsatz von MBSE erzielen (Wagner und Meyer 2014; Eigner et al. 2015):

1. **Erhöhtes Systemverständnis:** Die Durchgängigkeit der Modelle sowie die Darstellung ihrer Zusammengehörigkeit ermöglichen die Betrachtung des Systems aus einer übergeordneten Ebene. Dadurch lassen sich vereinfacht Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Elementen oder Subsystemen identifizieren.
2. **Verbesserte Kommunikation:** Notationsgrundlagen, wie z.B. durch die SysML, und multiple Perspektiven erlauben die Betrachtung des Systems aus unterschiedlichen Disziplinen und Domänen. Dadurch kann ein homogenes Systemverständnis geschaffen werden, das die disziplin- bzw. domänenübergreifende Kommunikation vereinfacht.
3. **Rückverfolgbarkeit & Transparenz:** Die Verknüpfung der Modelle und eine Versionierung ihrer Veränderungen erlauben eine transparente Rückverfolgung von Iterationen oder Entscheidungen während des Entwicklungsprozesses.

Wesentliches Element zu Erreichung dieser Vorteile ist die Verwendung von Systemmodellen im MBSE, wie z.B. SysML-Diagramme. Diese Systemmodelle bilden das System in Struktur und Verhalten ab und unterstützen die Entwicklung in drei Bereichen. Zum einen ermöglichen sie die Visualisierung des Systems. Diese modellhafte Visualisierung verbessert das Erschließen von Zusammenhängen im System und macht dadurch die Komplexität greifbarer. Darüber hinaus bieten die Systemmodelle eine Möglichkeit zur Dokumentation von Design-Entscheidungen sowie dem strukturellen Aufbau. Erst durch die maschinelle Auslesbarkeit dieser Systemmodelle hat sich mit der technischen Nutzbarmachung ein dritter Anwendungsbereich gebildet. Zusammenhänge können dabei genutzt werden, um schnell Produktalternativen zu generieren oder die Grundlage für Digitale Zwillinge zu schaffen (Dworschak et al. 2019). Zur näheren Betrachtung der Integrationen von Zielen in das Konzept des MBSE und den Systemmodellen müssen die verfolgten Ziele sowie die Anwendungsbereiche einbezogen werden. Erst ein sich in diese Rahmenbedingungen eingliederndes Konzept kann eine sinnvolle Integration in bestehende entwicklungsmethodische Vorgehensweisen ermöglichen.

2.2 Zielmodellierung

Bei der Entwicklung technischer Systeme und Produkte ist die Klärung der Aufgabenstellung ein integraler Bestandteil der frühen Phasen eines Entwicklungsvorhabens. Dabei sind die verschiedenen Stakeholder zu identifizieren sowie deren allgemeinen und projektspezifischen Bedürfnisse, Forderungen und Wünsche aufzunehmen (VDI 2221 Blatt 1 2019). In den frühen Phasen der Entwicklung können diese zunächst lediglich auf einer sehr generischen Ebene formuliert und oftmals nur qualitativ beschrieben werden, weswegen diese als übergeordnete Entwicklungsziele aufgenommen werden. Die Zieldokumentation stellt lediglich die notwendige Grundlage für die Systementwicklung dar und eine durchgängige Verwendung der Ziele in der Entwicklung ist hiermit noch nicht gewährleistet. Nach van Lamsweerde (2001) wurden Ziele und deren Modellierung lange ignoriert, weswegen im Bereich der Softwareentwicklung das zielorientierte

Anforderungsmanagement (goal-oriented requirements engineering) entwickelt wurde. Mit Hilfe dessen kann die Zielidentifikation, Zieldokumentation und die Anforderungsableitung durch eine modellbasierte Abbildung unterstützt werden. Dabei werden Ziele anhand ihres Typs sowie ihrer Attribute modelliert und deren Abhängigkeiten untereinander abgebildet. Ebenjene Abhängigkeiten können in Zielkonflikten resultieren, welche durch eine Zielkonfliktanalyse identifiziert und gelöst werden müssen. Abhängigkeiten zwischen Zielen können dabei auf andere Systemelemente, wie zum Beispiel auf abgeleitete Anforderungen, übertragen werden (van Lamsweerde 2001).

Im zielorientierten Anforderungsmanagement bestehen mehrere Ansätze, welche unterschiedliche Zielsetzungen der Modellierung verfolgen und daher nicht allgemeingültig angewendet werden können (eine umfassende Übersicht der Ansätze kann Kavakli und Loucopoulos (2005) entnommen werden). Darunter befinden sich zum Beispiel das KAOS- oder i*-Framework. Das mit Hilfe von KAOS (Keep All Objects Satisfied) modellierte Zielmodell umfasst, aufgrund der Aufteilung in vier Einzelmodelle (Ziel-, Verantwortungs-, Objekt-, Operationelles Modell), lediglich Ziele und im Gegensatz zu i* keine Aufgaben oder beteiligte Stakeholder (Werneck et al. 2009). Nach Kavakli und Loucopoulos (2005) dient i* vorrangig zur Situationsanalyse und dem Schärfen des Verständnisses der organisationalen Struktur, wohingegen in KAOS vorrangig Unternehmensziele zu Systemkomponenten zugeordnet werden. Zudem bestehen bei beiden Ansätzen individuelle Vorgaben an die semantische Modellierung der Ziele (Matulevičius und Heymans 2007). Beide Frameworks zeigen, dass die Zielmodellierung bislang anwendungsfallspezifisch geschieht und daher ein geeigneter Ansatz aus dem vielfältigen Portfolio bestehender Ansätze gewählt werden muss. Erste Bestrebungen zur Integration des KAOS-Ansatzes in die SysML bestehen (Laleau et al. 2010), allerdings weisen diese keine notwendige Unterscheidung zwischen Zielen und Anforderungen sowie keine darauf basierende Ableitung von Elementbeziehungen auf. Einen weiteren Ansatz stellten Breckenridge et al. (2013) vor. Dieser fokussiert die anwendungsfallspezifische Modellierung von Zielen und deren Verknüpfung mit Zustandsvektoren, welche als Maß für die Zielerreichung dienen. Im Ansatz werden die hierarchischen Strukturen der Ziele sowie deren kontextspezifische Zielklassen berücksichtigt. Beiden Ansätzen gemein ist die nicht durchgängige Differenzierung des Ziel- und Anforderungsbegriffs durch die Erweiterung bzw. Generalisierung der Anforderungen um die Ziele. Ein Ansatz, der die allgemeingültige Integration von Zielen in technische Systemmodelle, wie zum Beispiel SysML, erlaubt, ist bislang jedoch nicht vorhanden.

3 Voraussetzungen und Potentiale der Zielmodellierung

3.1 Anforderungs- und Zielbegriff

Die zur Integration von Zielen in technische Systemmodelle notwendige, begriffliche Abgrenzung des Anforderungs- und Zielbegriffes ist ein wesentlicher Bestandteil für die Unterscheidung der Modellierungsintention. Diese Begriffsabgrenzung erfolgt in den verschiedenen Domänen oder Fachbereichen allerdings abweichend, weswegen die Begrifflichkeiten aus unterschiedlichen Sichtweisen beleuchtet wurden. Stellvertretend für die unterschiedlichen Sichtweisen wurden die klassische Produktentwicklung (VDI 2221 Blatt 1 2019), die Entscheidungsfindung (Breiing und Knosala 1997), das Anforderungsmanagement (Rupp 2014) sowie die modellbasierte Systementwicklung (Walden et al. 2017) näher betrachtet. Die Analyse des Anforderungs- und Zielbegriffs aus Sicht der verschiedenen Domänen und Fachbereiche zeigt eine ähnliche Begriffseinteilung, lediglich im Bereich der modellbasierten Systementwicklung werden Ziele mit „Bedarfe“ assoziiert (Walden et al. 2017). Ziele werden demnach als den Anforderungen übergeordnet angesehen und beschreiben abstrakte Forderungen an das zu entwickelnde System. Zusammenfassend erfolgt die Abgrenzung daher auf Basis von informationeller Abstraktions- beziehungsweise Formalisierungsebene sowie einer fachsprachlichen Generalisierung (vgl. Bild 1). Obgleich Anforderungen und Ziele koexistieren können, so ist nach Ryan (2013) eine einheitliche Trennung hinsichtlich der Begrifflichkeiten notwendig.

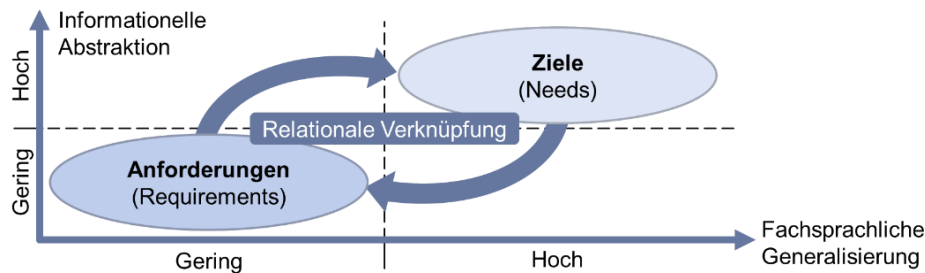


Bild 1: Unterscheidung des Anforderungs- und Zielbegriffs

3.2 Potentiale der Zielmodellierung

Die Potentiale der Zielmodellierung leiten sich aus den Vorteilen der durchgängigen Modellierung im MBSE ab. Wesentlich ist dabei die Greifbarmachung der Komplexität durch die Darstellung von Abhängigkeiten, z.B. bei der Untersuchung von Auswirkungen. Veränderungen von Systemelementen oder Anforderungen können bei einer durchgängigen Modellierung unmittelbar mit ihren Auswirkungen auf die in der Entwicklung generierten Ziele bewertet werden. Die in den entwicklungsmethodischen Vorgehensmodellen früh vorgesehene Aufstellung von Zielen verdeutlicht daher drei Motivationen für die Modellierung von Zielen:

- **Ableitung von Zielen:** Durch das bewusste Modellieren von Zielen sowie die Verknüpfung untereinander können weitere, bislang noch nicht identifizierte Ziele abgeleitet werden.
- **Ableitung von Anforderungen:** Aus den modellierten Zielen können unmittelbar Anforderungen abgeleitet werden. Weitere Anforderungen können im Modell durchgängig mit den übergeordneten Zielen in Verbindung gebracht und ihre Wechselwirkungen dadurch bewertet werden.
- **Strukturierung & Verknüpfung:** Die Modellierung von Zielen sowie die Verknüpfung mit daraus abgeleiteten oder in Beziehung stehenden Anforderungen, bis letztlich zu den Systemelementen, ermöglicht eine durchgängige Betrachtung. Diese Betrachtungsmöglichkeit erstreckt sich dabei von der konzeptionellen Motivation zur Systementwicklung bis hin zur Realisierung und Zielerfüllung durch einzelne technische Komponenten.

Mit den ersten beiden Motivationen, der Ableitung von Zielen sowie von Anforderungen, wird es ermöglicht, auch zu späteren Zeitpunkten in der Entwicklung die Ausrichtung auf die Ziele zu gewährleisten. So entstehen Anwendungsfälle (Use Cases) im Rahmen der Systemmodellierung meist nur zu Beginn der Entwicklung. Aus ihnen lassen sich Anforderungen oder auch Ziele ableiten. Iterationen oder Veränderungen können jedoch dazu führen, dass im Projektverlauf weitere Anforderungen hinzukommen. Ohne die vorherige Ableitung und Verknüpfung von Zielen kann es dazu führen, dass Anforderungen ohne übergeordnete Ziele entstehen. Eine Validierung wird somit erschwert, da eine transparente Rückführung zu den Zielen nicht mehr vorliegt.

Darin übergehend erschließt sich der Vorteil der dritten Motivation zur Modellierung von Zielen. Erst die transparente und nachvollziehbare Integration von Zielen in die Modellierung erlaubt es, eine durchgängige Validierung durchzuführen. Die unmittelbare Verknüpfung ermöglicht es, den Ingenieuren bei jeder Veränderung des Systems auf den Ebenen der Anforderungen, der Struktur oder des Verhaltens eine Rückführung auf die Ziele herzustellen. Dadurch können bereits frühzeitige Abweichungen von den eigentlichen Zielen festgestellt werden und die Überführung in Anforderungen in den Modellierungsprozess übernommen zu werden. Vorrangiges Ziel ist dabei die Verbesserung der Validierung auf den Ebenen der Visualisierung und Dokumentation als Teilaspekte der Anwendung von Systemmodellen. Die technische Nutzbarmachung, z.B. in Form der maschinellen Auslesbarkeit, ist dabei ebenfalls denkbar, so wie es schon heute im Kontext der Anforderungsmodellierung genutzt wird. Bild 2 zeigt, dass sich das Konzept der Zielmodellierung in die bereits bestehenden Aspekte der Systemmodellierung nahtlos integriert und die bisher noch vorhandene Lücke zwischen den Zielen und Anforderungen auf Modellierungsebene schließt.

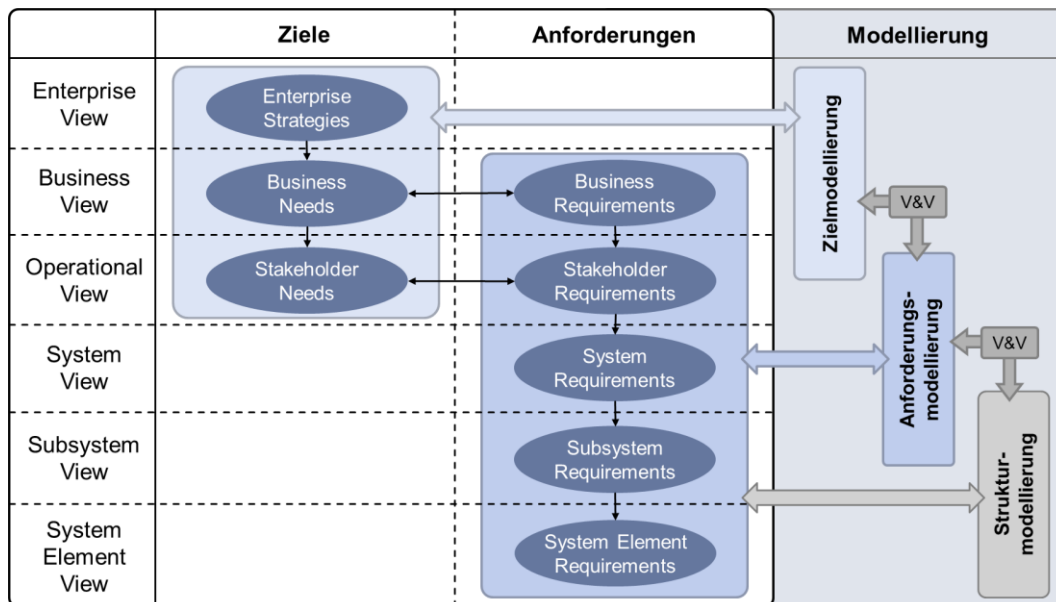


Bild 2: Potentiale der Zielmodellierung (unter Verwendung von Ryan (2013))

3.3 Anforderungen an eine Notation zur Zielmodellierung

An eine Notation zur Modellierung können mehrere Anforderungen gestellt werden, um eine konsistente Integration zu ermöglichen. Dem Anspruch des MBSE gerecht werdend, muss eine solche Notation dazu beitragen, die Durchgängigkeit innerhalb des Modells zu gewährleisten. Dies kann beispielhaft dadurch erzielt werden, indem Systemelemente unmittelbar mit Anforderungen und diese wiederum mit den hierarchisch übergeordneten Zielen verknüpft werden können. Zudem ist die Einführung neuer Ebenen in der Systemmodellierung davon geprägt, Wechselwirkungen innerhalb bestimmter Notationen zu verhindern. Lassen sich Anforderungen im Idealfall als erfüllt oder nicht-erfüllt identifizieren, fällt diese Aussage hinsichtlich der Ziele schwieriger. Ziele sind in einem erhöhten Maße von Subjektivität geprägt und lassen sich nicht in jedem Fall derart quantifizieren, dass sich eine finale Aussage über die Erfüllung abgeben lässt. Notationen, wie z.B. die SysML, müssen diesen subjektiven Charakter einbeziehen. Dafür wird es notwendig sein, neue Beziehungsformen zu entwickeln, die diesem subjektiven und teilerfüllenden Charakter von Zielen gerecht werden. Denkbar können hier schon grob gehaltene Beziehungen wie das aus der Anforderungsmodellierung bekannte "satisfy" sein. Darüber hinaus würden aber auch Negativbeziehungen benötigt werden, z.B. ein "dissatisfy". Grundlage für die Definition weiterer sowie komplexer Beziehungen können bestehende Methoden der Zielkonfliktanalyse sein (siehe dazu (van Lamsweerde 2001)). Ziele müssen noch mehr als Anforderungen gegeneinander abgewogen werden. Negativbeziehungen sind daher ein wichtiges Element zur Charakterisierung der Zielerfüllung in der Systemmodellierung. Eine Erweiterung der Notation muss jedoch zwingend unter der Betrachtung von Wechselwirkungen innerhalb der Notation erfolgen. So dürfen andere Diagramme nicht hinsichtlich ihrer Aussagekraft verwässert werden. Überschneidungen von Anwendungsbereichen verschiedener Diagramme, wie es beispielsweise in der UML der Fall ist, müssen dabei jedoch kein Ausschlussgrund sein. Sie können dazu dienen, weitere Perspektiven und Sichtweisen auf das System zu ermöglichen, wie es mit der Integration von Zielen der Fall wäre. Eine weitere Anforderung ist der mit der erweiterten Notation einhergehende Modellierungsaufwand. Die Zielmodellierung darf nicht zu einem erheblichen Mehraufwand führen, da damit das Verhältnis aus Aufwand und Nutzen deutlich abgeschwächt und eine Aufwandskompensation erschwert wird. Zusammenfassend müssen Ansätze zur Zielmodellierung die beschriebenen Anforderungen erfüllen, damit eine anwendbare Integration in die bestehenden Modellierungsformen sichergestellt wird. Mit diesen Anforderungen werden die bisher möglichen Ansätze zur Zielmodellierung im nachfolgenden Abschnitt hinsichtlich ihrer Eignung verglichen.

4 Zielintegration in technische Systemmodelle

Mit dem Goal Modelling ist bereits ein Ansatz betrachtet worden, der die Modellierung von Zielen ermöglicht. Da dem Ansatz jedoch eine technische Ausrichtung fehlt und dieser für die Informationstechnik verwendet wird, ist es sinnvoll, eine Modellierungssprache zu verwenden, die dem interdisziplinären Charakter des Systems Engineering gerecht wird. Mit der SysML besteht eine solche Sprache, die in Wissenschaft sowie Industrie bereits breite Verwendung findet, sie wird hier daher beispielhaft betrachtet. Der Ansatz und vor allem das Potenzial der Zielmodellierung muss aber generischer gesehen und darf nicht einer einzelnen Sprache zur Systemmodellierung zugeordnet werden. Durch die Integration der Zielmodellierung in die SysML lässt sich der in diesem Kapitel dargestellte Ansatz von bestehenden Ansätzen der Anforderungs- und Zielmodellierung durch die unmittelbare Verknüpfung mit dem System abgrenzen. Zwar gibt es erste Ansätze zur Modellierung von Zielen in SysML (siehe Abschnitt 2.2), diese erfüllen jedoch nicht die in Abschnitt 3.2 als notwendig erachteten Wechselwirkungen zwischen Zielen, Anforderungen und Struktur. So weist Ansatz nach Laleau et al. (2010) keine unmittelbare Verbindung zwischen Zielen und Systemelementen auf, sondern ergänzen die Anforderungen lediglich mit den Zielinformationen. Der Ansatz nach Breckenridge et al. (2013) fokussiert die hierarchische Strukturierung von Zielen sowie deren Verknüpfung mit Zustandsvektoren und bietet darüber hinaus keine Verknüpfungsmöglichkeit mit davon abweichenden Systemelementen. Zur Überprüfung der generellen Umsetzbarkeit der Zielmodellierung in der SysML hinsichtlich der genannten Potentiale werden nachfolgend Modellierungsmöglichkeiten verglichen sowie ein neuer Ansatz vorgestellt.

4.1 Analyse bestehender Möglichkeiten in der SysML

Bei der Betrachtung der Modellierungsmöglichkeiten lassen sich zwei Diagramme identifizieren, die aus ihrem Anwendungskontext zur Modellierung von Zielen geeignet sind (vgl. Bild 3). Die Erfüllung hinsichtlich der in Abschnitt 3.2 aufgeführten Potentiale bietet dabei eine Bewertungsgrundlage für deren Eignung. Die Diagramme werden dafür nachfolgend analysiert und verglichen.

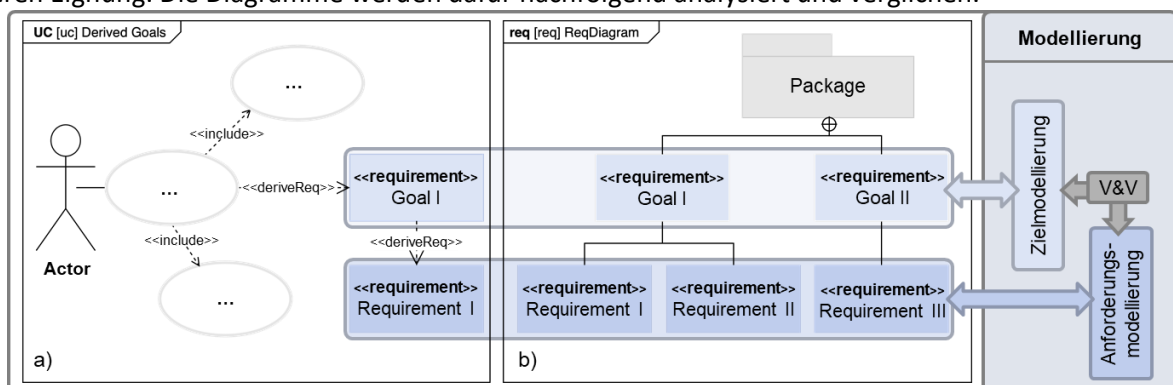


Bild 3: Möglichkeiten zur Zielmodellierung in a) Anwendungsfall- und b) Anforderungsdiagrammen

4.1.1 Anforderungsdiagramme

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal der SysML gegenüber ihrem Grundgerüst, der UML, ist die Modellierung von Anforderungen. Dadurch lassen sich Anforderungen unmittelbar mit Elementen verbinden, die in Beziehung zu dieser Anforderung stehen, z.B. Komponenten, durch welche die Anforderung erfüllt wird. Anforderungen lassen sich dabei hierarchisch darstellen und nähern sich somit dem Konzept der hierarchischen Überordnung von Zielen gegenüber Anforderungen an. Es ist somit naheliegend, Ziele schlichtweg als übergeordnete Anforderungen anzunehmen. Essentieller Vorteil dieser Nutzung von Anforderung ist die Eingliederung in ein bereits bestehendes und validiertes Notationselement der SysML. Dadurch kann eine interne Verzerrung der Syntax ausgeschlossen werden. Ziele sind somit unmittelbar und vor allem durchgängig in das Systemmodell integriert und

schließen die Lücke der Modellierung von Bedürfnissen (vgl. Bild 2). Ziele sind jedoch nicht als solche in der SysML definiert. Die Ausnutzung von Anforderungselementen zur Darstellung dieser würde zwangsläufig zu einer Verwässerung der Begriffe sowie der Diagrammform führen. Qualitätsmerkmale für Anforderungen ließen sich somit nicht auf die für Ziele verwendeten Anforderungselemente anwenden, da sie einer anderen Ausrichtung unterliegen. Hierarchische Darstellungen würden über zwei Stufen hinaus zudem nicht mehr mit den Definitionen des Anforderungsmanagements einhergehen, da keine Zwischenstufen zwischen Anforderungen und Zielen definiert werden. Der subjektive und abwägende Charakter von Zielen in der Systemgestaltung erfordert zudem eine entsprechende Darstellung. Gelten Anforderungen als zu erfüllend, muss bei Zielen ein stärkerer Entscheidungsprozess hinsichtlich des Erfüllungsgrades durchgeführt werden, da Ziele noch konträrer zueinanderstehen können, als dies bei Anforderungen der Fall ist. Eine beispielhafte Darstellung der Zielmodellierung in Anforderungsdiagrammen ist Bild 3b) zu entnehmen.

4.1.2 Anwendungsfalldiagramme

Die zweite Motivation zur Modellierung von Zielen besteht aus der unmittelbaren Ableitung von Anforderungen. So steht am Anfang der Entwicklung die Betrachtung von Anwendungsfällen. Diese Betrachtung ermöglicht es, aus einem Anwendungsfallszenario unmittelbar Anforderungen abzuleiten. Das übliche Vorgehen besteht hier jedoch eher aus dem Ableiten von Zielen und nachfolgend die Überführung in konkrete Anforderungen. Dadurch lassen sich sukzessiv während des Entwicklungsprozesse Ziele ableiten. Eine Gliederung, gleichsam wie bei der bisherigen Ableitung von Anforderung, ist jedoch nicht möglich. Besonders bei einer Vielzahl abgeleiteter Anforderungen bzw. Zielen leidet die Übersicht. Die Diagramme dienen daher ausschließlich des Bewusstseins für die Ableitung. Bild 3a) zeigt dabei die Möglichkeit zur Ableitung von Anforderungen in Anwendungsfalldiagrammen. Auch hier könnte zunächst die Ableitung von hierarchisch übergeordneten Anforderungen, also Zielen durchgeführt werden.

4.1.3 Vergleich von bestehenden Möglichkeiten

Neben den beiden hier gezeigten Darstellungsformen lassen sich auch noch andere Möglichkeiten erwähnen, wie eine externe Modellierung von Zielen. Das Goal Modeling ermöglicht diese externalisierte Modellierung bereits. In der auf Geschäftsprozesse ausgelegten BPMN ist eine solche Darstellung ebenfalls denkbar. Zwar besteht in diesem Fall eine notationsbedingte Unabhängigkeit, die Vermischung unterschiedlicher Sprachen verhindert jedoch eine logische oder auch maschinelle Auswertung der Modelle sowie eine durchgängige Syntax. Tabelle 1 stellt die beschriebenen Möglichkeiten hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen dar und bezieht die Anforderungen an eine Notation zur Zielmodellierung (vgl. Abschnitt 3.3) ein.

Tabelle 1: Vergleich bestehender Möglichkeiten zur Zielmodellierung in technischen Systemmodellen

	Darstellungsform	Durchgängigkeit	Notationsabhängigkeit	Modellierungsaufwand
Anforderungsdiagramme	Integration von Zielen in Anforderungsdiagramme	Möglich	Stark abhängig	Hoch
Anwendungsfalldiagramme	Nutzung von Use Cases zur Ableitung von Zielen	Nicht gegeben	Schwach abhängig	Gering
Externe Modellierung	Externe Modellierung und Ableitung von Zielen (z.B. über Funktionshierarchien)	Keine logische Verknüpfung	Unabhängig	Gering - Hoch

Die direkte Bewertung der Ansätze ist dabei nur bedingt möglich, da sie unterschiedliche Anwendungszwecke aufweisen. Keines der Konzepte bietet eine vorteilhafte Darstellung von Zielen,

da die Syntax der Sprache jeweils gestört wird. Sinnvoll ist daher ein Ansatz, der die jeweilige Sprache zur Systemmodellierung sinnvoll ergänzt, ohne andere Bereiche oder Verwendungen der Modelle zu beeinflussen. Zudem muss der generell von Anforderungen zu unterscheidende Charakter der Ziele einbezogen und berücksichtigt werden.

4.2 Ansatz zur Zielmodellierung in technischen Systemmodellen

Die in Abschnitt 4.1.1 bis 4.1.3 getätigten Analysen bestehender Möglichkeiten zur Modellierung von Zielen in technischen Systemmodellen zeigt, dass diese bislang lediglich unter Einschränkungen und unter Hinnahme von gravierenden Nachteilen, beispielsweise der Verletzung bestehender Notationen, möglich ist. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt der entwickelte Ansatz zur konsistenten Modellierung von Zielen in technischen Systemmodellen vorgestellt. Die begriffliche Trennung des Anforderungs- und Zielbegriffes wird dabei auf den Modellierungsansatz übertragen, wodurch ein einheitliches Verständnis dieser Elemente in der multidisziplinären Entwicklung gewährleistet wird. Der entwickelte Ansatz wird durchgängig an der exemplarischen Weiterentwicklung eines Fensterhebers gezeigt. Hierbei wird das bestehende System zunächst konzeptionell analysiert und anschließend in die modellbasierte Systementwicklung überführt (vgl. Bild 4).

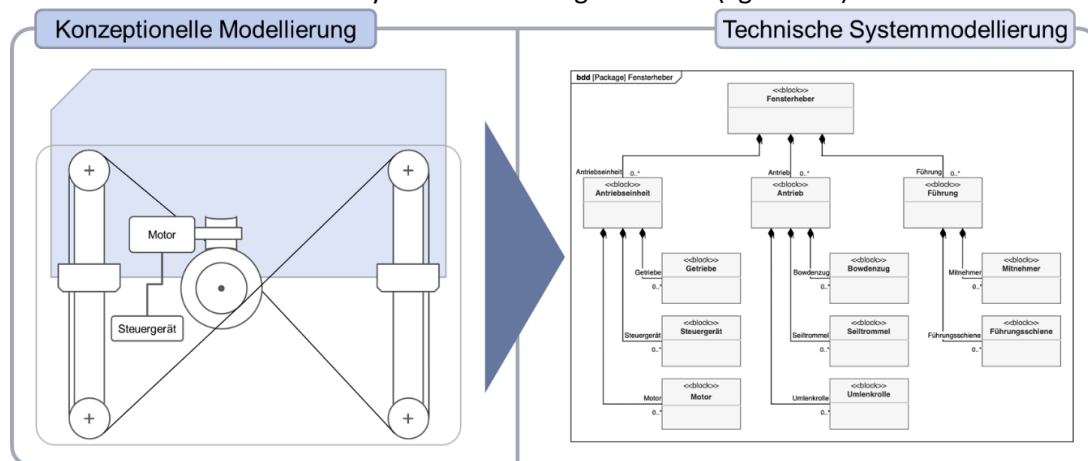


Bild 4: Konzeptionelle Modellierung des Fensterhebers und Überführung in ein technisches Systemmodell

Das Entwicklungsszenario des Fensterheber-Moduls umfasst zwei Haupt-Stakeholder, nämlich den Auftraggeber, welcher den Auftrag zur Weiterentwicklung unter der Voraussetzung der MBSE-Anwendung stellt, sowie den Zulieferer, welcher die Aufwände der Umsetzung des MBSE-Ansatzes oktroyiert bekommt. Für die Weiterentwicklung des Fensterhebers sind dafür zunächst die bestehenden Anforderungen und Ziele in ein geeignetes Systemdiagramm zu übernehmen und hinsichtlich der neuen Vorgaben anzupassen sowie zu ergänzen. Dieser Änderungsprozess setzt allerdings eine Möglichkeit zur durchgängigen Überprüfung der Zielkompatibilität sowie -inkompatibilität voraus. Bei der Betrachtung der Potentiale der Zielmodellierung haben sich zwei Motivationen ergeben, die eine sinnvolle Integration von Zielmodellen in die Entwicklung beschreiben. Da das Beispiel bereits einen fortgeschrittenen Zeitpunkt während der Entwicklung beschreibt und eine Weiterentwicklung betrifft, ist die Ableitung neuer Ziele hier nur hintergründig einzubeziehen. Denkbar sind dabei Ziele, die sich unmittelbar aus den Stakeholdern ableiten und in einer konträren Beziehung zu abgeleiteten Zielen aus dem Anwendungsfall stehen. Fokussiert wird die Strukturierung und Visualisierung von Zielen in Abhängigkeit zu Systemelementen und Anforderungen (vgl. Bild 5). Aus der Vorgängergeneration wurde das Ziel übernommen, eine möglichst geringe Geräuschemission durch den Fensterheber anzustreben. Zudem wurde das neue Ziel abgeleitet, eine möglichst kurze Schließ- und Öffnungszeit des Fensters zu ermöglichen. Aus diesem neuen Ziel wurde die Anforderung abgeleitet, eine höhere Geschwindigkeit des Fensterhebers herbeizuführen. Eine Erhöhung des maximalen Drehmomentes des Motors, welcher für das Anheben des Fensters verantwortlich ist, soll dabei den geforderten Geschwindigkeitsanstieg gewährleisten. Hierauf basierend wurde ein

entsprechendes Modell für den Elektromotor gewählt, welches das benötigte Drehmoment zur Verfügung stellen kann. Für die Notation wurde dabei auf die bereits für Anforderungen verwendete "satisfy" Beziehung zurückgegriffen. Eine mögliche, andere Gestaltung wird in Kapitel 5 diskutiert. Dadurch lässt sich von der Komponente bis hin zum Ziel die Erfüllungsbeziehung, sowie der strukturelle Aufbau nachvollziehen. Der Ausbau des Modells um Ziele ermöglicht zudem die Darstellung von Negativbeziehungen. Geht mit dem neuen Modell des Elektromotors auch eine erhöhte Geräuschemission einher, so kann diese Negativbeziehung gleichsam modelliert werden. Auswirkungen lassen sich somit unmittelbar modellhaft nachvollziehen. Eine solche Beziehung wird hier als "dissatisfy" eingetragen.

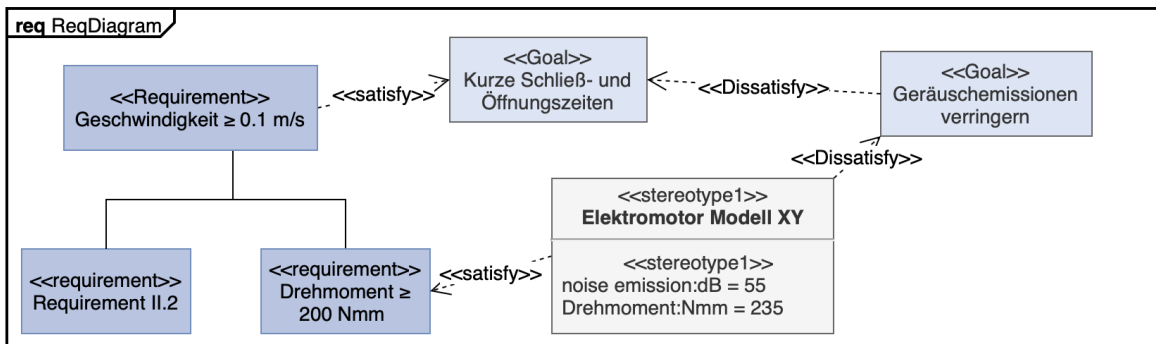


Bild 5: Beispielhafte Darstellung der Zielintegration in ein Anforderungsdiagramm der SysML

Den Entwicklern ist es somit möglich, Negativbeziehungen in das Modell aufzunehmen und dadurch die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Sie kann als Beitrag zur Anforderungspriorisierung sowie für eine spätere technische Nutzarmachung verwendet werden. Die hier gezeigte durchgängige Modellierung ermöglicht den Ausbau des dem Systems Engineering zugrundeliegenden Systemdenkens innerhalb der Modellierung und unterstützt auf der visuellen und strukturellen Ebenen den Entwickler bei der Anwendung dieser Denkweise.

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Analyse bestehender Möglichkeiten zeigt, dass aktuell keine durchgängige Modellierung von Zielen möglich ist, ohne übergeordnete Zielsetzungen des MBSE mit der Modellierungssprache SysML zu verletzen. Darunter fällt unter anderem die Verwässerung der Notationselemente, wie zum Beispiel von Anforderungsdiagrammen und -elementen. Aus diesem Grund wurde ein Ansatz besprochen, die bestehende Systemmodellierung um Elemente und Verbindungen zu erweitern, die eine durchgängige Zielmodellierung ermöglichen. Dadurch wird eine wichtige Lücke geschlossen, da Ziele zuvor in der Systemmodellierung ausgeschlossen oder nicht hinreichend mit Anforderungen und Systemelementen verknüpft werden. Das dargestellte Konzept nimmt dabei bereits wichtige Aspekte zur Modellierung auf und ermöglicht somit vorerst mit der Visualisierung und Dokumentation zwei der drei Teilbereiche zur Nutzung von Systemmodellen. Ist die Integration der Ziele zweifellos neben den anderen Elementen möglich und abgegrenzt, muss für die Beziehung der besondere Charakter der Beziehungen weiter betrachtet werden. Die hier vorgeschlagene "satisfy" und "dissatisfy"-Beziehung ist für eine maschinelle Auswertung und quantifizierbare Einordnung noch nicht verwendbar. Denkbar wären hier Möglichkeiten, die kardinal ein Annähern ("converge") oder ein Entfernen ("distance") zum Ziel darstellen. Dadurch lässt sich eine Nutzarmachung der Zielmodellierung realisieren, indem es z.B. für die Priorisierung und in der Entscheidungsfindung genutzt wird. Zudem machen sie den subjektiven Charakter der Ziele hinsichtlich der Ausprägungen greifbarer. Zwar werden die Ziele nicht objektiver, da die textuelle Gestaltung durch den hier aufgeführten Vorschlag nicht beeinflusst werden soll, aber die Erfüllungsbeziehungen lassen sich quantifizieren und somit objektiver gestalten. Daran schließt sich die Frage an, ob eine Abhängigkeit bzw. Wechselwirkung zwischen zwei Anforderungen gleichsam zu einer Abhängigkeit auf unteren oder höheren Hierarchieebenen, z.B. bei den Zielen, führen kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit diesem Beitrag wurde ein Ansatz gezeigt, Ziele in Systemmodelle zu integrieren und unmittelbar mit abgeleiteten bzw. in Wechselwirkung stehenden Anforderungen und Systemelementen zu verbinden. Dieser Ansatz wurde beispielhaft in der Modellierungssprache SysML umgesetzt und an der Entwicklung eines Fensterhebers exemplarisch angewendet. Die bisherige Möglichkeit zur Verifikation von Anforderungen wurde damit um die Validierung von übergeordneten Entwicklungszielen erweitert. Eine Analyse des Anforderungs- sowie Zielbegriffes aus verschiedenen Fachgebieten gibt dabei Aufschluss über das grundsätzliche Verständnis beider Begrifflichkeiten in der interdisziplinären Produktentwicklung. Die Unterscheidung erfolgt dabei auf Basis der informationellen Abstraktion sowie einer fachsprachlichen Generalisierung dieser Elemente. Diese Unterscheidung wurde daher in den vorgestellten Ansatz integriert, womit notationsbedingte Wechselwirkungen zielführend vermieden werden können. Zusammenfassend bietet der vorliegende Beitrag daher einen Mehrwert hinsichtlich einer verbesserten Visualisierung und Dokumentation des technischen Systems in Bezug auf die Erfüllung von Zielen, wohingegen die technische Nutzbarmachung dieser Modellierung Gegenstand weiterführender Forschungsarbeiten in diesem Gebiet sein kann. Besonders hinsichtlich der Ausweitung des MBSE-Ansatzes auf neue Sektoren im Konsumgüterbereich und der damit verbundenen Integration von Zulieferern können sich Potenziale des Ansatzes ergeben (Wilking et al. 2020). Dadurch lassen sich Zulieferer unmittelbar in die Erreichung der Ziele involvieren und eine entsprechende Kooperation realisieren, wodurch auch die Nachvollziehbarkeit von Anforderungen aus Zulieferersicht verbessert werden kann. Die technische Nutzbarmachung der Systemmodelle kann dabei durch weitere Integration des Ansatzes in die Schritte des Produktentwicklungsprozesses ermöglicht werden. Ein potientielles Anwendungsszenario findet sich im Bereich der Entscheidungsfindung, da die Validierungsbeziehung zwischen Anforderungen und Zielen somit auch zum Vergleich zwischen Konzeptalternativen oder Produktalternativen verwendet werden kann. Zudem können Aspekte wie Unsicherheit und Subjektivität einer Entscheidung in der zielorientierten Entscheidungsfindung auf Basis der untergliederten Anforderungen quantifiziert werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes WA 2913/33-1 „MuBePro“.

Literatur

- | | |
|---------------------------|---|
| Breckenridge et al. 2013 | BRECKENRIDGE, Jonathan T.; JOHNSON, Stephen B.; PATTERSON, Jonathan: <i>Implementation of a Goal-Based Systems Engineering Process Using the Systems Modeling Language (SysML)</i> . In: <i>AIAA Conference</i> . Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. |
| Breiting und Knosala 1997 | BREITING, Alois; KNOSALA, Ryszard: <i>Bewerten technischer Systeme: Theoretische und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen</i> . Berlin: Springer, 1997. |
| Dori und Crawley 2016 | DORI, Dov; CRAWLEY, Edward: <i>Model-based systems engineering with OPM and SysML</i> . New York: Springer, 2016. |
| Dworschak et al. 2019 | DWORSCHAK, Fabian; ZIRNGIBL, Christoph; SCHLEICH, Benjamin; WARTZACK, Sandro: <i>Konzept für den MBSE-Einsatz zur automatisierten Individualisierung von komplexen Produkten</i> . In: KRAUSE, Dieter; PAETZOLD, Kristin; WARTZACK, Sandro (Hrsg.): <i>Proceedings of the 30th Symposium Design for X (DFX2019)</i> . UniPress, 2019, S. 279–290. |

- Eigner et al. 2015 EIGNER, Martin; HUWIG, Christian; DICKOPF, Thomas: *Cost-benefit analysis in model-based systems engineering: state of the art and future potentials*. In: WEBER, Christian; HUSUNG, Stephan; CASCINI, Gaetano; CANTAMESSA, Marco; MARJANOVIC, Dorian; ROTINI, Federico (Hrsg.): *Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (Vol.7)*. Glasgow: Design Society, 2015, S. 227–236.
- Kavakli und Loucopoulos 2005 KAVAKLI, Evangelia; LOUCOPOULOS, Pericles: *Goal Modeling in Requirements Engineering: Analysis and Critique of Current Methods*. In: *Information Modeling Methods and Methodologies (2005)*, S. 102–124.
- Laleau et al. 2010 LALEAU, Régine; SEMMAK, Farida; MATOUSSI, Abderrahman; PETIT, Dorian; HAMMAD, Ahmed; TATIBOUET, Bruno: *A first attempt to combine SysML requirements diagrams and B*. In: *Innovations in Systems and Software Engineering 6 (2010)*, 1-2, S. 47–54.
- Matulevičius und Heymans 2007 MATULEVIČIUS, Raimundas; HEYMANS, Patrick: *Comparing Goal Modelling Languages: An Experiment*. In: Sawyer, Pete; PAECH, Barbara; HEYMANS, Patrick (Hrsg.): *Requirements Engineering: Foundation for Software Quality*. Berlin: Springer, 2007, S. 18–32.
- Rupp 2014 RUPP, Chris: *Requirements-Engineering und -Management: Aus der Praxis von klassisch bis agil*. 6. Aufl. München: Carl Hanser, 2014.
- Ryan 2013 RYAN, Michael J.: *An Improved Taxonomy for Major Needs and Requirements Artifacts*. In: *INCOSE International Symposium 23 (2013)*, S. 244–258.
- van Lamsweerde 2001 VAN LAMSWEEERDE, A.: *Goal-Oriented Requirements Engineering: A Guided Tour*. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of 5th IEEE International Symposium on Requirements Engineering*. IEEE Computer Society, 2001, S. 249–262.
- VDI 2221 Blatt 1 2019 Norm VDI 2221 Blatt 1 November 2019: *Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Modell der Produktentwicklung*.
- Wagner und Meyer 2014 WAGNER, Christian; MEYER, Jan: *Erfahrung mit modellbasiertem Systementwurf am Beispiel des automobilen Steuergerätes Battery Management System (BMS)*. In: MAURER, Maik; SCHULZE, Sven-Olaf; ABULAWI, Jutta (Hrsg.): *Tag des Systems Engineering 2014*. München: Hanser, 2014, S. 213–224.
- Walden et al. 2017 WALDEN, David D.; ROEDLER, Garry J.; FORSBERG, Kevin; HAMELIN, R. Douglas; SHORTELL, Thomas M.; KAFFENBERGER, Rüdiger; ENDLER, David; GEISREITER, Martin; RAMBO, Jürgen: *INCOSE Systems Engineering Handbuch: Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-prozesse und -Aktivitäten*. 4. Aufl. GfSE Verlag, 2017.
- Weilkiens 2014 WEILKIENS, Tim: *Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur*. 3. Aufl. Sebastopol: dpunkt-Verlag, 2014.
- Werneck et al. 2009 Werneck, Vera; PÁDUA, Antonio de; DO PRADO, Julio: *Comparing GORE Frameworks: i-star and KAOS*. In: AYALA, Claudia; SILVA, Carla; ASTUDILLO, Hernán (Hrsg.): *Workshop of Engineering of Requirements*, 2009.
- Wilking et al. 2020 WILKING, Fabian; SCHLEICH, Benjamin; WARTZACK, Sandro: *MBSE along the Value Chain: An Approach for the Compensation of additional Effort*. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of 15th International Conference of Systems of Systems Engineering (SoSE2020)*. IEEE, 2020, S. 61–66.

Die Rolle von MBSE für die nachhaltige Forschung und Entwicklung

The role of MBSE in the exploration and exploitation of sustainable development

Michaela Kesselring¹, Jonathan Masior², Oliver Riedel²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT, Stuttgart
michaela.kesselring@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, 70569 Stuttgart
jonathan.masior@iao.fraunhofer.de

Abstrakt: Die vorliegende Studie analysiert, wie MBSE externe und interne Wissensquellen in der nachhaltigen Produkt-, Dienstleistungs- und Systementwicklung miteinander verbinden kann. Dazu bedient sich die Studie eines qualitativen Forschungsansatzes. Die Datenstichprobe besteht aus achtzehn Experten aus Forschung und Industrie auf dem Gebiet von MBSE und Nachhaltigkeit. Zusammengefasst deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der MBSE sowohl die Exploration als auch die Exploitation von nachhaltigkeitszentrierten Wissensquellen ermöglicht. MBSE wurde am häufigsten für die Unterstützung ökologischer und ökonomischer Nachhaltigkeit anerkannt. Die soziale Nachhaltigkeit wurde am seltensten anerkannt. Ein Vergleich der Antworten von Experten ergab Diskrepanzen im wahrgenommenen Umfang der nachhaltigen Gestaltungsmöglichkeiten durch MBSE.

Keywords:

MBSE, Nachhaltigkeitsmanagement, Technologiemanagement

Abstract: The present study analyses how to manage and integrate internal and external knowledge sources in sustainable product-, service- and system development with MBSE. To do so, the study employs a qualitative research approach. The data sample consists of eighteen experts from research and industry in the field of MBSE and sustainability.

Together, the results indicate that MBSE enables both exploration and exploitation of sustainability-centered knowledge sources. MBSE was most often recognized to support ecologic and economic sustainability. Social sustainability was least often recognized. A comparison of expert answers revealed, discrepancies in the perceived scope of the sustainability performance of MBSE.

Keywords:

MBSE, sustainable development, technology management

1 Model-based Systems Engineering in Sustainable Development

Sustainability influences design, modelling, and analysis in the product and service development process. Sustainable products and services are characterized by multiple social, economic, and ecologic functions or components (Ceschin and Gaziulusoy 2016). Dominant views in science and technology argue that compartmentalizing sustainability approaches leads to an aggravation of development complexity (Hallstedt 2017). Complexity drivers are associated with heightened stakeholder and system requirements as well as the integration of entirely new disciplines (e.g. social sciences) and knowledge sources. Following the work of Mieke et al. (2019a), sustainability introduces entirely new external and internal knowledge sources. The exploitation of internal sustainable innovation assets often lies in integrating perspectives from other business units or product lines. For example, employees with different backgrounds approach a similar function from different angles. In doing so, different ideals or utopia emerge, eventually leading to a more sustainable result (Scott et al. 2016). As the pool of external knowledge, sources may lie in concepts as diverse as nature exploration of external knowledge sources is even more complex. Authors such as Mieke et al. (2019a) plea for the use of biological materials or the recognition of biological processes as a source for sustainable innovation. In their study on bidirectional real-time interaction, the authors show that sustainable development complexity is driven by a multitude of internal and external factors and their interdependencies (Mieke et al. 2019b). According to Konrad et al. (2019), increased complexity can jeopardize the efficiency of development initiatives. Masior et al. (2020) argue that design, modelling, and analysis tools can support the management of complexity. For managing complexity through formalizing requirements, designs, analysis, verifications, and validations of system models, Model-based Systems Engineering (MBSE) is a “promising approach” (Konrad et al. 2019; Halstenberg and Stark, 2020). Reviewing the literature on MBSE attributes and sustainable development requirements, matching traits exists. Meaning that social, economic, and ecologic sustainability considerations increase complexity (Hallstedt 2017) which MBSE is designed to manage (Masior et al. 2020). Despite the theoretical match, little knowledge exists on how MBSE can bind the three dimensions of sustainability into the model sphere. Existing literature mostly focusses on theoretical concepts such as frameworks for modelling sustainability of complex systems (Azevedo et al. 2009), or ecologic impact analysis through MBSE (Bras 2009). Moreover, little attention as to how MBSE supports the exploration of company external and the exploitation of internal knowledge exists. For the first time, the present paper attempts to combine the three concepts of sustainable development, MBSE, as well as exploratory and exploitative innovation strategies to analyze **how MBSE can support the exploitation and exploration of sustainability**. To address this research target, a qualitative research design is employed. As strategic and IT-driven initiatives are often disconnected and hinder the realization of sustainability exploration and exploitation potential (Henriksson and Weidman Grunewald 2020) the data sample consisted of research experts as well as management and domain experts. Including managerial industry level, research experts, as well as domain specialists, enables an in-depth analysis of perceived benefits of MBSE in sustainable development at different levels. As a result, discontinuities in expected and realized sustainability benefits can be identified.

2 Theoretical Background

2.1 Sustainable Development

In research and development, sustainability is a widely recognized, yet little practiced strategy (Kaebernick et al. 2003). Sustainable research and development refer to the integration of social, ecologic, and economic requirements throughout the entire lifetime of a product, service or system. Whereby social, ecologic, and economic sustainability is often referred to as the sustainability triangle (Eigner et al. 2011). Authors such as Eigner et al. (2011) suggest that to achieve sustainability all three dimensions must be met. Meaning that sustainable product development considers the produce itself

as well as the social and physical environment contributing to its value creation, over the entire product life cycle. However, much of the research on sustainability focuses on concepts to optimize the dimensions individually. Challenges arise particularly in the incorporation of sustainable ideas in the early stages of development processes (Petala et al. 2010). Exploitative and explorative development are two innovation management approaches to incorporate sustainability practices into research and development. As defined by Jansen et al. (2009), exploitative development refers to the improvement of tasks and technologies already employed; exploratory development deals with technologies and tasks that are novel to the company and often radically innovative. Authors such as Michelino et al. (2019) argue that explorative and exploitative innovation strategies support the integration of sustainability challenges into product development. To do so, Maletič et al. (2018) developed a theoretical framework to reduce ecologic cost throughout the product lifecycle by emphasizing exploitation and exploration in new design, product, technology, and knowledge management. Other approaches found that sustainability exploitation effectively reduces the input consumption of resources (Herrmann et al. 2014).

2.2 MBSE State of Research

MBSE “is the formalized application of modelling to support system requirements, design, analysis, verification, and validation activities beginning in the conceptual design phase and continuing throughout development and later life cycle phases” (INCOSE 2007). According to Brusa et al. (2017) and Masiar et al. (2020), MBSE includes organizing development artefacts and managing their interdependencies over the whole system lifecycle. Together the authors argue that MBSE builds on four pillars illustrated in Table 1.

Table 1 Pillars of MBSE

Graphical modeling language	Model functions are visualized allowing for cross-disciplinary exchange, logical decomposition and use case analysis of the developed system (Konrad et al. 2019)
Development processes	Design happens according to common development principles such as the zigzag pattern (Weilkiens et al. 2016)
Model management	Models are manageable which enables version control; relation databases, and supports the reuse and traceability of physical parts (Bitzer et al. 2018)
IT solutions	MBSE supports the interoperability of IT-solutions allowing for the automation of functions missions and performance thread analysis (Woody 2012)

Much of the literature on sustainability and MBSE focuses on ecologic sustainability. A seminal study in this area is by Wimmer et al. (2002) who developed a software tool to integrate, support, and weigh ecologic factors in MBSE. Drawing upon this concept Bougain and Gerhard (2019) developed a learning system for design engineers to conclude on sustainable consequences before the product verification. With their approach, Bougain and Gerhard (2019) investigate economic sustainability by merging business and engineering systems. In engineering, socially centered MBSE approaches are insufficient mostly because of the qualitative nature of requirements. However, Wall et al. (2020) assume that the quantification of social consequences can reduce the risk of discussing sustainability requirements, in design only. Only a few studies examine the interconnection between the dimensions of the sustainability triangle. Examples stem from Scott et al. (2016) who combine ecologic and economic life cycle assessment and Brownsword and Silmon (2011) integrating the sustainable triangle into a scenario-based service system. Building on the previous literature, the section that follows outlines the limits of existing research and introduces the research questions that result.

2.3 Research Question (RQ)

2.3.1 Exploitation of sustainability through MBSE

Authors such as Gmelin and Seuring (2014) support the argument that exploitative innovation strategies can increase sustainability. A key starting point in the academic debate is the adaptability of requirements to include changing norms and sustainability measures per stakeholder demands (Seuring and Gold 2013). Associated prerequisites are the traceability of existing functions (Mavris et al. 2018), products as well as services and the opportunity to analyze sensitivities when changing single components. From the perspective of sustainability exploitation practices, companies can achieve continuous incremental sustainability improvements (Herrmann et al. 2014). In theory, MBSE is but one application that may increase the traceability in product or service systems, the analytical capacity within the system as well as the ability to combine different systems. To present knowledge, literature has not yet investigated the exploitative capacity of sustainability through MBSE. Therefore, the present study asks: **RQ1: How can MBSE support the exploitation of novel sustainability trends and requirements?**

2.3.2 Exploration of sustainability through MBSE

Exploring opportunities for novel product or function design, as well as the connection of different systems, holds immense sustainability potential. Authors such as Miede et al. (2019a) identified external sources of sustainable optimization potential in areas as diverse and complex as nature. Industrial examples are already implemented in industries such as Aerospace where the flapped wing, is assumed to resemble the feather structures of eagles or the replacement of synthetic material through natural material. Besides the integration of external knowledge sources from nature, previous studies on exploration argue that sustainability exploration deals with process innovation (e.g., cradle-to-cradle or product-service systems) (Bras 2009), market innovation (e.g., development of niche markets) (Prasanna Kumar and Patil 2019), and sustainability-oriented learning (e.g., open creativity management approaches) (Zanetti et al. 2016). The infrastructure for integrating novel ideas, connect systems with external perspectives and adhere to a new market and stakeholder requirements may again be provided through MBSE. However, little knowledge exists on how to bring this theoretical construct into action. Therefore, the present study asks: **RQ2: How can MBSE support the exploration of existing sustainability-related components and functions in your products and services?**

2.3.3 Bottom-up versus Top-down sustainability

Depending on the operational field, attention towards an application is shaped by “both top-down (i.e., schema-driven) and bottom-up (i.e., stimulus-driven) processes” (Ocasio 2011 p. 1286). MBSE implementation and operation is often stimuli-driven and initiated by technical teams in a company. Traditionally, technical teams follow a short-term fulfilment perspective (Engert, Baumgartner 2016). Strategic initiatives such as increasing sustainability are often subject to higher management levels. Here, long-term strategic thinking dominates (Engert and Baumgartner 2016). Consequently, technical teams may less recognize strategic sustainability initiatives. Differences in perspective often hinder a balanced view on exploitation and exploration of sustainability efforts. Similarly, connecting strategic perspectives and operational aspects are known as a driver of holistic sustainability management (Michelino et al. 2019). To identify obstacles to sustainable development through MBSE, the paper aims to analyze differences in the perception of the benefits of MBSE for sustainability across the hierarchical level. **RQ3: What discrepancies occur between strategic and application level in sustainability management through MBSE?**

3 Methodology

Qualitative multiple-case studies are a well-established approach where a comprehensive and systematic analysis of the research object is still lacking (Yin 2016). According to the author, multiple case studies support the accuracy, robustness, reliability, and generalizability of the results. In line with Yin (2016), the present study builds on a qualitative study design, executed through semi-structured interviews. Semi-structured interviews allow for structured questioning while maintaining the required openness to include novel und-planned information (Mayring 2014). The interviews took place between July - August 2020. The data sample consisted of 18 experts in the field of MBSE and sustainability. An expert is an individual with leading knowledge or competence in the area of MBSE as well as sustainability. The sample consisted of industry managers and operators as well as researchers. By integrating different industry levels, the study aims to generate insights into differences in the recognition of MBSE's performance scope. The experts stem from mechanical engineering, and transport (including civil aviation, railways, road transport). Reportedly, these sectors are highly involved in MBSE, allowing for increased competence accumulation. Table 2 illustrates the sample the sector classification builds on the international labor association. The size and the heterogeneity in the sample allow the generalization of the results and decreases the potential of sample distortion. The interviews endured 22 - 47 min and were conducted in German and English. To maintain interviewee confidentiality and enable fluent conversation, the interviews were anonymized.

Table 2 Interview Sample

Category	Sector	Experts	Employees
Industry	Transport equipment manufacturing	IET1, IET2, IET3, IET4	10,001+
	Mechanical and electrical engineering	IEE5, IEE6	10,001+
Research	Transport equipment manufacturing	RET1, RET2	n.a.
	Mechanical and electrical engineering	REE3, REE4, REE5, REE6	n.a.
Domain	Transport equipment manufacturing	SET1	51-200
		SET2, SET3	5001-10,000
		SEE4, SEE5	5001-10,000
Experts	Mechanical and electrical engineering	SEE6	10,001+

The interview guide builds on the scientific literature introduced in section two.

To check the comprehensibility and plausibility of the interview guide, two pre-tests were conducted with independent experts. In consequence, minor adjustments were made. The final interview guide consisted of three parts. The first part verified the expert status of the interviewee, by asking about the company and educational background. The second part asked which role MBSE plays in sustainability exploration and exploitation. Thereby, the interviewees were first asked an open question. Depending on the initial response, second-order questions were posed. Second-order questions intend to obtain specific answers on literature-derived sustainability. Table 3 lists the question order and content. Within each section, the participants were asked to name examples based on their own experience. To obtain a clear picture of the practical and theoretical status quo the interviewees were asked to indicate whether their answer refers to own or third-party knowledge (e.g. literature). To verify the statements made, and where possible, supplementary data from industry reports and scientific literature was collected (Mayring 2014). Not verifiable third-party insights were excluded from the analysis.

Table 3 Interview Guideline

1 st Order Question	2 nd Order response-dependent questions
How can MBSE support the exploitation of novel sustainability trends and requirements?	How does MBSE support the improvement of sustainability and lower the impact?
	... exploit the sustainability of existing products and services?
	... be utilized to constantly survey existing sustainability (market) requirements?
	... increase the levels of automation in sustainability management?
	... penetrate existing sustainability centered systems of systems more deeply?

How can MBSE support the exploration of sustainability trends and requirements?	... support the exploration of sustainable components/ideas?
	... support the introduction of new and sustainable products and services?
	... aggressively ventures into new sustainability domains?
	... support creative ways to satisfy sustainability requirements?
	... actively target new sustainability centered systems of systems?

The interviews were audio-record and afterwards transcribed using MAXQDA. Doing so enabled the interviewer to concentrate on the conversation as well as to reduce falsification and bias in the following data analysis. The data analysis followed the principles of qualitative content analysis set by Mayring (2014). Following the guidelines of Mayring (2014) and after initial analysis of the transcript, inductive coding was applied. In doing so, the interviewees developed first and second-order categories. After initial categorization, the first and second-order categories were synthesized into subordinate categories. Finally, categories were assigned to the sustainability pillars: social, ecologic, and economic. Two of the named authors performed the coding process. Separately, each of the authors suggested the initial coding categories. The categories are listed in Tables 4 and 5.

4 Results

4.1 Requirements for MBSE induced Sustainability

Although sustainability gains were largely recognized by the participants, most interviewees first noted that four key factors influence the usability of MBSE in the context of exploration and exploitation of sustainability. These are: (1) Integration of existing engineering IT infrastructures; (2) Interoperability of the modelling languages to link external and internal knowledge; (3) common level of system model understanding; (4) sustainability aspects (e.g. values for CO₂ balance) must be integrated into a model at the earliest possible point. The interviewed experts further argued that the development of a systems model first happens in the exploitation phase. "The integration of external knowledge may happen at any point, the integration of any ideas or systems happens internally" [SET].

4.2 Exploitation of Sustainability through MBSE

Table 4 gives an overview of the drivers and dimensions identified in the study, including exemplary statements by the interviewed experts that are related to the exploitation of sustainability through MBSE. Thirteen drivers of sustainability exploitation were identified. These drivers vary in the frequency they were named. The following lists the drivers and indicates the frequency of their mentioning in brackets. The frequency accounts for the number of references to the factor throughout the exploitation related part of the interviews. Penetrating systems of systems more deeply was recognized to be enabled by the highest number of drivers. One interviewee argued: "systems of systems is a complex topic, from our point of view, the very purpose of MBSE and the range of application involved in it, is to realize connectedness across our services and products" [IEE]. Looking at the frequency of elements mentioned, the interviewees recognized the sustainability of existing products and services, most often.

4.3 Exploration of Sustainability through MBSE

Table 5 gives an overview of the drivers and dimensions identified in the study, including exemplary statements by the interviewed experts related to the exploration of sustainability through MBSE. Penetrating systems of systems more deeply was recognized to be enabled by the highest number of drivers. Looking at the frequency of exploration elements mentioned, the interviewed experts recognized the exploration of new and sustainable product and services, most often.

Table 4 Drivers of Sustainability Exploitation through MBSE

IQ	Driver	FQ	Exemplar Statement
Lower the impact of existing technologies	Elaborated Context	8	"MBSE enables you to address more complex, more advanced requirements such as atmospheric conditionality's and how to model uncertain end-setting while reducing for example to noise or light disturbance" [RET]
	Measuring Change Impact	13	"In the solution, space we see above all the aspects that modularization strategies based on an appropriate architecture can better estimate sensitivities" [SEE]
Lower the impact of existing products and services.	Optimize & Evaluate Alternatives	13	"If you model your system in terms of sustainability, you can identify more influences on the topic than without an appropriate model. Sustainability has many interfaces and influencing factors, therefore an MBSE model is important to analyze in which dimensions the system under consideration affects sustainability" [IEE]
Sustainability of existing products and services.	Graphical representation Mathematical programming techniques	6	"Graphical modelling languages, enable different people in your organization to grasp the problem, thus products and services can be viewed from different angles, integrating different perspectives and if this is the goal making your product or service more sustainable" [IET]
	Measuring Change Impact	3	"When done right, visualizing natural dynamics in non-static model centered system, allows real-time validation and verification, of strategic entities" [IEE]
	Reusable Asset Repository	14	"We can actually handle changes in requirements in a more efficient way because you can make direct impact analysis" [IET]
	Mathematical programming techniques	12	"Economic sustainability of products and services, is enhanced by the ability to reuse models, you don't have to start from scratch, you adapt you optimize" [SET]
Automation in sustainability management.	Optimize & Evaluate Alternatives	8	"Automation of sustainability factor analysis, through data-centric specifications ensures a more exhaustive yet continuous systems engineering" [REE]
	Optimize & Evaluate Alternatives	8	"Automating the dependencies between climate concerns and product entities, enlarges the company internal sustainability perspective optimization and evaluation is no longer a black box approach but automated alternative modelling will become a major driver of sustainable design" [SEE]
	Executable design	8	"We currently work on MBSE solutions that automate and re-arrange models within a system that have intuitive interfaces so that different disciplines can play with measures and interactive relations can be visualized leading to a better understanding by stakeholders" [IET]
Satisfaction analysis of tapped sustainability	Constructed simulations	7	"Requirements can be viewed more flexibly, providing a higher degree of sustainability as we can adjust and calculate margins for existing requirements" [IET]
	Manage and Track Complexity	5	"AI based neural networks offer analysis capacity to include ecologic aspects in the synthesis exploitation and optimization of innovation processes" [REE]
	Optimize & Evaluate Alternatives	7	"MBSE helps us manage complexity, which in turn helps us to have more sustainable systems of systems" [IEE]
	Performance thread analysis	7	"With MBSE we can test the systems dependencies and increase the traceability of whatever emission or whatever sustainability aspect would occur"[IET]
Systems of System more deeply	Elaborated Context	10	"Model-centric technical system boundaries help us understand the scope of requirements better and how they interact with other models in the system" [SET]
	Hierarchy and abstraction mechanism	4	"By combining existing systems of systems, you can reformulate the mission of existing systems and create something more sustainable" [IET]
	Integrated Domains/Disciplines	4	"With MBSE we have the chance to describe systems at different levels of maturity with different structural depths, and thus also have the opportunity to continue to ask sustainability questions at the highest abstract level at a very early stage" [REE]
	Data Environment	5	"With MBSE, process chains of systems can be viewed and questioned via SysML modeling: How does this system, for example, run through the different life cycle phases, through production? Through the use? Even Recycling" [SET]
	Network Connectivity	5	"In due time we like to expand our systems further down, so that decentralized decision making can be realized" [IET]
	Optimize & Evaluate Alternatives	2	MBSE enables the optimization of processes so that the whole range of systems can be connected leading to transparency and deficiency identification" [REE]
	Performance thread analysis	5	"MBSE allows sustainability to be digitally represented as a decomposable thread which analyses potentially unforeseen interactions between subsystems" [IET]

Table 5 Driver of Sustainability Exploration through MBSE

IE	Driver	Fq	Exemplar Statement
New and sustainable product & services domains	System use cases/scenarios	3	"Use-Case considerations, i.e. early lateral thinking is enabled by the methodical construct" [RET]
	Executable design	2	"MBSE leaves an open view for topics under consideration, i.e. not limited by the given solutions - thus interfaces to social and ecological topics can be taken up" [IEE]
	Integrated Domains/ Disciplines Data Environment	7	"You can take the model-based system from a drawer, put them in a whole new context and generate something new with bio-inspired materials and inventive ideas" [IET] "Inviting other team members into the visualized conversation, is but one possibility to increase the solution space within model-based systems engineering" [REE]
	Logical decomposition	6	"MBSE allows us to talk on a requirement or function-based language rather than about the end product, suitable components from other industries are integrateable" [IET]
	Trace Reqt. and Allocations	8	"If you map services with sequential diagrams, process models and so on, you can think your way into different stakeholders and design more sustainable services" [REE] "Combination of external sustainability stimuli is easier to incorporate, as we have a better picture where to integrate or use such stimuli within the system" [IET]
	Hierarchy and abstraction mechanism	13	"MBSE allows to easily explore the impacts of new component/ideas throughout the various tiers, down to the bottom level of the physical implementation" [IEE]
	Graphical representation	12	"The meta-level view makes it possible to consider functionalities or parameters that the target system should have at an early stage under sustainability aspects" [SET] "As the understanding of the system function is clear, it is possible to introduce components with similar function but more sustainable such as bionic designs" [IET] " Graphical interfaces increase the understanding of complexity of other sources of inspirational systems" [IET]
	Model Management	14	"The development time naturally increases with the complexity, thus often hindering sustainable advancements model management can be optimized through MBSE" [IET] "MBSE allows for the inclusion of sustainable components without increasing development time" [IET]
	Mission use cases/scenarios	8	"By going beyond sustainability requirements and functions to the logic before thinking about the technical details, technical implementation becomes sustainable" [IET]
	Reusable Asset Repository	9	"By taking a mission centered approach, you will get a different perspective on what sustainability actually is." [IEE]
	Adaptability	12	"its [MBSE] capability to focus on the impacts a novel solution can have on legacy approaches" [IEE]
	Constructed simulations	3	"MBSE expands the way the company adapt to changing requirements, by incorporating different usage scenarios and customer groups, at different life cycle stages" [IET]
	Hierarchy and abstraction mechanism	6	"Venturing into new markets, by simulating different approaches like material resilience in the air vs in water is enabled through the digital twin and MBSE support" [IET]
	Constructed simulations	3	"By making MBSE applicable across different hierarchical levels and departments, new more sustainable markets can be addressed" [REE]
Graphical representation	8	"Define a coherent set of stakeholder needs and combining it with existing know-how sustainability constraints can be introduced and simulated in relation to design" [REE]	
Model Management	12	"The combination of sustainable functions that have not been recognized yet is enabled through the model-based visualization, which when done right enables the creation of interdisciplinary inspired processes to achieve a never thought of sustainable impact" [REE]	
Hierarchy and abstraction mechanism	6	"Adequately managing complexity allows us to cut development costs by half, thus increasing the penetration of new more efficient products into the market" [IET] "Analyzing functions across interfaces and hierarchies, leads to new systems of systems that would otherwise have stayed in their own product-service boundary conditions" [REE]	
Control flow, Measuring Change Impact	12	"With MBSE you can shift the impact of external as well as internal system towards different life cycle phases and calculate sensitivities at each stage" [IET]	
Integrated Domains/ Disciplines Data Environment	7	"MBSE allows us to expand the boundaries of our internal systems, connect them and improve systems beyond the ideation phase" [IEE] "In MBSE existing technologies can be designed to piggyback other systems, making the underlying system more sustainable and decreasing the overall impact" [IET]	
Control flow, Measuring Change Impact	12	"The exploration of different systems in a digital form, has shown us that not only a product itself is a system but entire transportation modes available in our company can be combined into an environment of systems, that when modelled correctly can be optimized with regard to not jeopardize future generations needs for example public spaces" [IET]	
Reusable Asset Repository	3	"Existing infrastructure can be enhanced or used by other systems making the joint usage of resources possible" [IET]	
Performance thread analysis	11	"In a model-based space we can digitally connect production, process as well as product-service or, service-service system models. Allowing such an integration enables CO2 calculation or other sustainability related assessments" [IET]	
Integrated Domains/Disciplines Data Environment	7	"MBSE can support the creation of a whole new democratized marketplace where different supplier can connect their systems to mine and based on my preset requirements, in this case increase sustainability re-invent the whole market" [IEE]	

Systems of Systems

4.4 Conditions for Sustainability Management through MBSE

The distinct characteristics differentiating research, industry, and domain experts identified gaps in the perception and communication of MBSE benefits. As illustrated in Table 6, the results show that economic sustainability is the biggest concern among all participants as the implementation of MBSE is the result of managerial decisions. Domain experts put less emphasis on environmental sustainability. Yet researchers recognized ecologic sustainability to hold great potential. Managers, state that MBSE provides leverage for increasing ecologic sustainability. Finally, linkages between MBSE and social sustainability were only recognized by the industry.

Table 6 Recognition of Sustainability Dimensions by interview group

	Industry	Domain Experts	Research	Sum of Relative Relevance
Social	3	0	1	0,22
Ecologic	5	4	5	0,78
Economic	5	5	5	0,83

4.5 Contextual Analysis of Sustainability in relation to Exploration and Exploitation

The study analyzed how MBSE can shape the sustainability dimensions. To analyze this dependency, the transcripts were reviewed and the context the expert referred to was coded using sustainability triangle dimensions. The expert statements revealed a dependency between exploration and exploitation. Figure 1 illustrates the derived insights by modelling exemplary expert statements, which identified the exploration driver and exploitation enabler of the sustainability triangle. The figure depicts the identified prerequisites for MBSE driven sustainability (see 4.1).

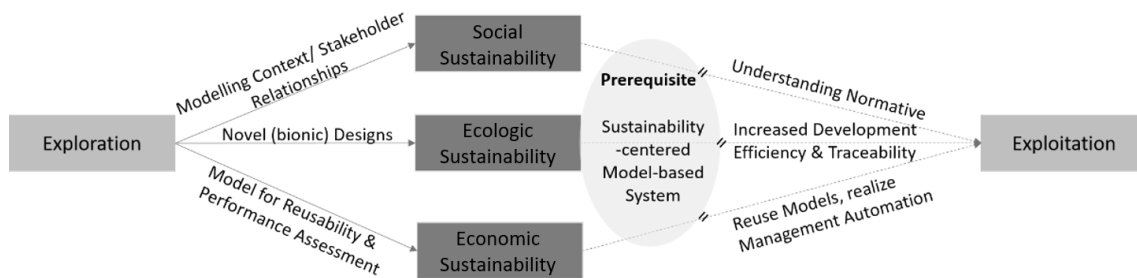


Figure 1 Innovation Strategies for Sustainable Development through MBSE

5 Discussion

The present paper analyzed the facilitating role of MBSE in the exploration and exploitation of sustainability. The results indicate that exploitation and exploration of sustainability can be achieved through MBSE. Both strategies showed similar driver characteristics required for a system of systems and the sustainability of products and services. Concerning systems of systems, a possible explanation is these require the full range of features associated with MBSE. Model management of multiple systems involves products and services, processes as well as systems and their connectivity. Literature by Halstenberg and Stark (2019) backs this statement. New to research is the proof found for the managerial efforts of sustainability-driven systems of systems. The frequency of product service sustainability is unsurprising. Product and service models are at the core of MBSE. Knowledge about their interdependencies is consequently high. Halstenberg and Stark (2019) support this notion. In this light, evolving topics are explored and exploited at a single entity level first. Interrelations only become visible at later stages. The higher the complexities and the unknowns within a model the less recognized their features. The initial consideration of the study was that MBSE supports innovation

processes by following structured development processes. The findings suggest that the definition of an initial sustainability requirement sets the tone for sustainability considerations. Hence, development processes for sustainable systems require structured ongoing refinement, the identification of new requirements and the development of novel ways (internal and external) to realize multi-level sustainable requirements. Agility supporting development processes such as the zigzag pattern (Weilkiens et al. 2016) remain crucial to overcome discrepancies between strategic and application level. A significant realization of the testimonials of MBSE-application was the influence MBSE has on the peripheral and supporting processes in a company. For complexity management and the integration of artefacts, article-centric data management is well established. However, a model-centric approach has an even deeper impact on the enterprise's value-adding structure. Optimization reaches development, logistics, quality management, verification, and validation. Results of the study indicate that MBSE is a support system for all four dimensions and their underlying dynamics. Foci between domain, managerial as well as research level differ. The fragmented recognition of sustainability elements is in line with the observations of Henriksson and Weidman Grunewald (2020). Factors relevant to sustainability are interconnected and involve a variety of ecologic, social, and economic factors. Sustainability efforts must therefore be subject to effective communication.

6 Conclusion

This study set out to analyze how MBSE can support the exploitation and exploration of sustainability. The study shows that sustainability considerations and strategic exploration and exploitation are hardly systemized. However, MBSE emerged as an enabler for structured inter- and intra-organizational sustainability management. It shows that there are differences in the recognition of sustainability dimensions at managerial levels. To decrease recognition asymmetries across hierarchical structures practitioner must increase efforts on disclosing and communicating the operational spectrum of MBSE. Being limited to qualitative research, this study lacks a quantification of the associated sustainability effects and their respective importance across industries. Further studies could quantify the value of MBSE in sustainability management to encourage the implementation of this application. Considerably more work is needed to determine the role of MBSE in innovation management.

References

- Azevedo et al. 2009 AZEVEDO, Kyle; BRAS, Bert; DOSHI, Siddharth; GULDBERG, Tina: *Modeling Sustainability of Complex Systems: A Multi-Scale Framework Using SysML* (2009), p. 1437–1448
- Bitzer 2018 BITZER, Michael; EIGNER, Martin; FAIBT, Karl-Gerhard; MUGGEO, Christian; EICKHOFF, Thomas: FRAMEWORK OF THE EVOLUTION IN VIRTUAL PRODUCT MODELLING AND MODEL MANAGEMENT TOWARDS DIGITIZED ENGINEERING. In: *Design information and knowledge*. 2018, p. 345–354
- Bougain and Gerhard 2019 BOUGAIN, Sébastien; GERHARD, Detlef: *Integrating Environmental Impacts with SysML in MBSE Methods*. 2019
- Bras 2009 BRAS, Bert: *Sustainability and product life cycle management – issues and challenges*. In: *International Journal of Product Lifecycle Management* 4 (2009), p. 23
- Brownsword and Silmon 2011 BROWNSWORD, Mike; SILMON, Joe: *Managing Risk and Cost with an EA Approach*. (Integrated Enterprise Architecture conference). 2011
- Brusa et al. 2017 BRUSA, Eugenio; CALÀ, Ambra; FERRETTO, Davide: *Systems Engineering and Its Application to Industrial Product Development*. Cham: Springer, 2017

- Ceschin and Gaziulusoy 2016 CESCHIN, Fabrizio; GAZIULUSOY, Idil: *Evolution of design for sustainability: From product design to design for system innovations and transitions*. In: *Design Studies* 47 (2016), p. 118–163
- Eigner et al. 2011 EIGNER, Martin; HAUFF, Michael von; SCHÄFER, Patrick D.: *Sustainable Product Lifecycle Management: A Lifecycle based Conception of Monitoring a Sustainable Product Development*. In: *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, May 2nd - 4th, 2011*. Heidelberg: Springer, 2011, p. 501–506
- Engert and Baumgartner 2016 ENGERT, Sabrina; BAUMGARTNER, Rupert J.: *Corporate sustainability strategy – bridging the gap between formulation and implementation*. In: *Journal of Cleaner Production* 113 (2016), p. 822–834
- Gmelin and Seuring 2014 GMELIN, Harald; SEURING, Stefan: *Achieving sustainable new product development by integrating product life-cycle management capabilities*. In: *International Journal of Production Economics* 154 (2014), p. 166–177
- Hallstedt 2017 HALLSTEDT, Sophie I.: *Sustainability criteria and sustainability compliance index for decision support in product development*. In: *Journal of Cleaner Production* 140 (2017), p. 251–266
- Halstenberg and Stark 2019 HALSTENBERG, Friedrich A.; STARK, Rainer: *Study on the feasibility of modelling notations for integrated Product-Service Systems Engineering*. In: *Procedia CIRP* 83 (2019), p. 157–162
- Henriksson and Weidman Grundewald 2020 HENRIKSSON, Henrik; WEIDMAN GRUNEWALD, Elaine: *The Path to Exponentiality* (2020), p. 155–172
- Herrmann et al. 2014 HERRMANN, Christoph; SCHMIDT, Christopher; KURLE, Denis; BLUME, Stefan; THIEDE, Sebastian: *Sustainability in manufacturing and factories of the future*. In: *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 1 (2014), no. 4, p. 283–292
- INCOSE 2007 INCOSE (Hrsg.): *INCOSE systems engineering vision 2020.*, 2007
- Jansen et al. 2009 JANSEN, Justin; VERA, Dusya; CROSSAN, Mary: *Strategic leadership for exploration and exploitation: The moderating role of environmental dynamism*. In: *The Leadership Quarterly* 20 (2009), no. 1, p. 5–18
- Kaebnick et al. 2003 KAEERNICK, H.; KARA, S.; SUN, M.: *Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 19 (2003), no. 6, p. 461–468
- Konrad et al. 2019 KONRAD, Christian; JACOBS, Georg; RASOR, Rik; RIEDEL, Ricarda; KATZWINKEL, Tim; SIEBRECHT, Justus: *Enabling complexity management through merging BPM with MBSE*. In: *Procedia CIRP* 84 (2019), p. 451–456
- Maletic et al. 2018 MALETIČ, Matjaž; MALETIČ, Damjan; GOMIŠČEK, Boštjan: *The role of contingency factors on the relationship between sustainability practices and organizational performance*. In: *Journal of Cleaner Production* 171 (2018), p. 423–433
- Masiar et al. 2020 MASIOR, Jonathan; SCHNEIDER, Benjamin; KÜRÜMLÜOĞLU, Mehmet; RIEDEL, Oliver: *Beyond Model-Based Systems Engineering towards Managing Complexity*. In: *Procedia CIRP* 91 (2020), p. 325–329
- Mavris et al. 2018 MAVRIS, Dimitri N.; BALCHANOS, Michael G.; PINON-FISCHER, Olivia J.; SUNG, Woong Je: *Towards a Digital Thread-enabled Framework for the Analysis and Design of Intelligent Systems* (2018)

- Mayring 2014 MAYRING, Philipp: *Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution*. Klagenfurt., 2014
- Michelino et al. 2019 MICHELINO, Francesca; CAMMARANO, Antonello; CELONE, Andrea; CAPUTO, Mauro: *The Linkage between Sustainability and Innovation Performance in IT Hardware Sector*. In: *Sustainability* 11 (2019), no. 16, p. 4275
- Miehe et al. 2019a MIEHE, R. ; FULL, J.; SCHOLZ, P.; DEMMER, A.; BAUERNHANSL, T.; SAUER, A.; SCHUH, G.: *The Biological Transformation of Industrial Manufacturing-Future Fields of Action in Bioinspired and Bio-based Production Technologies and Organization*. In: *Procedia Manufacturing* 39 (2019a), p. 737–744
- Miehe et al. 2019b MIEHE, Robert; FISCHER, Evelyn; BERNDT, Dirk; HERZOG, Andreas; HORBELT, Jessica; FULL, Johannes; BAUERNHANSL, Thomas; SCHENK, Michael: *Enabling bidirectional real time interaction between biological and technical systems: Structural basics of a control oriented modeling of biology-technology-interfaces*. In: *Procedia CIRP* 81 (2019b), p. 63–68
- Ocasio 2011 OCASIO, William: *Attention to Attention*. In: *Organization Science* 22 (2011), no. 5, p. 1286–1296
- Petala et al. 2010 PETALA, Effrosyni; WEVER, Renee; DUTILH, Chris; BREZET, Han: *The role of new product development briefs in implementing sustainability: A case study*. In: *Journal of Engineering and Technology Management* 27 (2010), p. 172–182
- Prasanna et al. 2019 PRASANNA KUMAR, R. N.; PATIL, Shailesh: *A System and Method for improving the Model Based Systems Engineering Environment capability*. In: *INCOSE International Symposium* 29 (2019), S1, p. 277–290
- Scott 2016 SCOTT, William; FULLALOVE, Richard; ARABIAN, Gary; CAMPBELL, Peter: *Case Study: A Model Based Systems Engineering (MBSE) Framework for Characterising Transportation Systems Over the Full Life Cycle*. In: *INCOSE International Symposium* 26 (2016), no. 1, p. 916–932
- Seuring and Golf 2013 SEURING, Stefan; GOLD, Stefan: *Sustainability management beyond corporate boundaries: from stakeholders to performance*. In: *Journal of Cleaner Production* 56 (2013), no. 1–6
- Wall et al. 2020 WALL, Johan; BERTONI, Marco; LARSSON, Tobias: *The Model-Driven Decision Arena: Augmented Decision-Making for Product-Service Systems Design*. In: *Systems* 8 (2020), no. 2, p. 22
- Weilkiens et al. 2016 WEILKIENS, Tim; LAMM, Jesko; WALKER, Markus; ROTH, Stephan: *Model-based system architecture*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2016
- Wimmer et al. 2002 WIMMER, W.; ZÜST, R.; STRASSER, Ch.: *Application of Ecodesign Pilot and Methodical Support for Implementation of Ecodesign in Products*. Dubrovnik, 2002
- Woody 2012 WOODY, Carol: *Mission thread security analysis: a tool for systems engineers to characterize operational security behavior*. In: *INSIGHT* 16 (2012), no. 2, p. 37-40
- Yin 2016 YIN, Robert K.: *Qualitative research from start to finish*. Second edition. New York, London: The Guilford Press, 2016
- Zanetti et al. 2016 ZANETTI, Anthony; SABATINI, Roberto; GARDI, Alessandro: *Introducing green life cycle management in the civil aviation industry: the state-of-the-art and the future*. In: *International Journal of Sustainable Aviation* 2 (2016), no. 4, p. 348

Referenzarchitektur für Smart Services

Reference Architecture for Smart Services

Arthur Wegel¹, Philipp Sahrhage¹, Fabio Worthmann¹, Martin Rabe¹, Roman Dumitrescu¹

¹Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik, Paderborn
arthur.wegel@iem.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Die Digitalisierung ermöglicht neue, intelligente Marktleistungen und bietet zudem das Potenzial, ganze Wertschöpfungssysteme zu revolutionieren. Gleichzeitig neigen produzierende Unternehmen dazu, ihre Marktleistungen zunehmend dienstleistungsorientiert zu gestalten. Folglich werden bestehende physische Produkte um digitale Dienstleistungen ergänzt, um zusätzliche Mehrwerte für die Kunden zu schaffen. Dadurch entstehen so genannte Smart Services, die auf der Auswertung großer Datenmengen intelligenter, kommunikationsfähiger Maschinen und Systemen basieren. Smart Services sind - mehr noch als traditionelle mechatronische Systeme – domänenübergreifende technische Systeme, die entwickelt, betrieben und abgerechnet werden müssen. Zur Beherrschung der daraus resultierenden Komplexität wird ein Strukturierungsrahmen benötigt, der interdisziplinäre Teams bei der Entwicklung von Smart Services unterstützt. Im vorliegenden Beitrag wird eine Referenzarchitektur für Smart Services vorgestellt, die generische Smart-Service-Elemente und deren Wirkbeziehungen strukturiert. Damit soll die Komplexität der stark interdisziplinären Systeme durch produzierende Unternehmen beherrschbar werden.

Keywords (deutsch):

Smart Service, Produkt-Service-Systeme, Referenzarchitektur

Abstract (english): Digitization enables new, intelligent market services and also offers the potential to revolutionize entire value creation systems. At the same time, manufacturing companies are tending to make their market services increasingly service-oriented. Consequently, existing physical products are being supplemented with digital services in order to create additional added value for customers. This results in so-called smart services, which are based on the evaluation of large volumes of data from intelligent, communication-enabled machines and systems. Even more so than traditional mechatronic systems, smart services are cross-domain technical systems that must be developed, operated and billed. In order to master the resulting complexity, a structuring framework is required that supports interdisciplinary teams in the development of smart services. This paper presents a reference architecture for Smart Services that structures generic Smart Service elements and their relationships. Thus, the complexity of the strongly interdisciplinary systems should become manageable by manufacturing companies.

Keywords (english):

smart service, product service systems, reference architecture

1 Motivation und Einleitung

Die Digitalisierung und die damit verbundene Konvergenz physischer und digitaler Welten stellen bereits seit Jahren einen wesentlichen Treiber von Innovationen dar (acatech 2015, S. 23). Laut KPMG wird die digitale Transformation von Unternehmen durch die aktuelle COVID19-Pandemie sogar beschleunigt (KPMG 2020). Gleichzeitig ist eine zunehmende Serviceorientierung produzierender Unternehmen zu beobachten (Koldewey et al. 2019b, S. 158). Dabei werden physische Produkte durch Dienstleistungen ergänzt, um zusätzliche Mehrwerte zu schaffen. Dies erlaubt es Unternehmen den zunehmend gesättigten Märkten und stagnierenden Erlösen entgegenzuwirken (Sayar und Er 2018, S. 71). In diesem Spannungsfeld rücken insbesondere digitale Services, die auf Daten physischer Produkte aufbauen, in den Fokus der Unternehmen (Rymaszewska et al. 2017, S. 16). Diese sog. Smart Services beruhen auf der Auswertung großer Datenmengen, die von intelligenten, kommunikationsfähigen Systemen bereitgestellt werden (acatech 2015, S. 14; Koldewey et al. 2019a, S. 4).

Ein Smart Service im Kontext eines produzierenden Unternehmens basiert auf den Daten eines Cyber-physischen Systems (CPS), das mittels Sensorik den eigenen Zustand und Umfelddaten erfassen und über ein Kommunikationssystem bzw. eine Mensch-Maschine-Schnittstelle mit seinem Umfeld und weiteren vernetzten Systemen teilen kann (Allmendinger und Lombreglia 2005, S. 2; Broy 2010, S. 21). Durch die Erfassung, Vorverarbeitung und Analyse dieser Daten können Smart Services, wie bspw. vorausschauende Wartung oder automatische Nachbestellung von Verbrauchsmaterialien, angeboten werden (Koldewey et al. 2019a). Hierzu können weitere Datenquellen oder digitale Services herangezogen werden (Westermann 2017, S. 13). Ferner sind die durch Smart Services erzeugten Informationen in die Geschäftsprozesse eines Unternehmens zu integrieren, um bspw. eine Rechnungserstellung auszulösen (Sun et al. 2007, S. 559).

Die Entwicklung eines derart mehrmaschig vernetzten Systems stellt eine disziplinübergreifende Aufgabe dar, die ein gemeinsames Verständnis von Domänenexperten für das zu entwickelnde System voraussetzt. Die Orchestrierung der Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Domänen stellt für viele Unternehmen des produzierenden Gewerbes eine Herausforderung dar. Daraus resultiert ein Forschungsbedarf nach einer für produzierende Unternehmen geeigneten Leitlinie, die einen disziplinübergreifenden Entwicklungsprozess von Smart Services unterstützt. Die Erarbeitung dieser Leitlinie in Form einer Referenzarchitektur wird im vorliegenden Beitrag dargestellt. In Kapitel 2 wird die übergeordnete Forschungsfrage strukturiert und in Teilprobleme gegliedert. Hierbei werden konkrete Anforderungen von Unternehmenspartnern des Forschungsprojektes IMPRESS (Instrumentarium zur musterbasierten Planung hybrider Wertschöpfung und Arbeit zur Erbringung von Smart Services), die im Querschnittsprojekt *Smart Service Engineering* erarbeitet wurden, berücksichtigt. Anschließend findet eine kritische Auseinandersetzung mit dem Stand der Technik anhand der identifizierten Anforderungen (vgl. Kapitel 3). Aufbauend auf den Erkenntnissen aus einer Literaturrecherche und Workshops zur Konzipierung industrieller Smart Services mit Unternehmenspartnern des Forschungsprojektes IMPRESS wird eine Referenzarchitektur für Smart Services vorgestellt, die den Anforderungen von produzierenden Unternehmen gerecht werden soll (vgl. Kapitel 4).

2 Vielschichtige Herausforderungen der Smart-Service-Entwicklung

Die Transformation eines physischen Produktes zu einem Smart Service bedeutet für ein produzierendes Unternehmen einen Paradigmenwechsel von einem produkt- zu einem nutzerzentrierten Geschäftsmodell (acatech 2015, S. 16). Dieser kann u.a. eine Erweiterung eigener Kompetenzen verlangen und eine Anpassung bestehender Marktleistungen erfordern (Bullinger et al. 2017). Die mit dem Wandel einer Marktleistung einhergehenden Herausforderungen lassen sich bspw. entlang des Schichtenmodells nach Acatech strukturieren (acatech 2015, S. 17). Darin werden vier Handlungsfelder definiert, die ein Smart Service sowohl aus der technischen als auch aus der betriebswirtschaftlichen Perspektive beschreiben.

Das Fundament für Smart Services wird durch die Schicht der **technischen Infrastruktur** geschaffen. Diese beschreibt die technisch-infrastrukturellen Voraussetzungen zur Realisierung von sog. Smart Spaces. Im engeren Sinne werden Smart Spaces als eine technische Infrastruktur, die zur Vernetzung von physischen Produkten bzw. CPS mit digitalen Services notwendig ist, verstanden (acatech 2015, S. 16). Aufgrund der hohen Anzahl an verfügbaren Vernetzungstechnologien und deren weit gestreuten Eigenschaften entlang der Dimensionen Reichweite, Übertragungsgeschwindigkeit und Energieverbrauch stellt die Auswahl einer geeigneten Technologie eine Herausforderung dar (Rabe 2019, S. 117). Ferner werden die Erfassung von Nutzerdaten und deren Vernetzung mit einer externen IT-Infrastruktur von Bedenken hinsichtlich der Datensicherheit und -hoheit begleitet (Neuhüttler et al. 2019, S. 10). Die Berücksichtigung dieser Aspekte in den frühen Phasen der Entwicklung stellte auch eine Anforderung der Unternehmenspartner von IMPRESS, die in der Konzipierung von Smart Services identifiziert wurden.

Auf der Ebene der **vernetzten physischen Plattformen** werden sog. Smart Products bzw. CPS als Datenquellen betrachtet (acatech 2015, S. 17). Ausgestattet mit notwendiger Sensorik und Kommunikationssystemen können sie Umfeld- und Nutzerdaten erfassen und versenden. Dabei kann ein Teil der erfassten Daten durch eingebettete Systeme bereits auf dieser Ebene verarbeitet und durch multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen mit den Nutzern kommuniziert werden (Westermann 2017, S. 93). Die Entwicklung von CPS stellt eine interdisziplinäre Herausforderung dar (VDI 2206 2004, S. 4), die durch die Ergänzung um digitale Services erschwert wird. Zum einen gilt es den zunehmenden Softwareanteil und die notwendige IT-Infrastruktur zu berücksichtigen. Zum anderen stellen sich vor dem Hintergrund nutzungsabhängiger Erlösmodelle (Rabe 2019, S. 115), wie z.B. Pay-per-Use oder Pay-per-Performance, Fragestellungen hinsichtlich der Manipulationssicherheit solcher Systeme. Ferner wurden bei der Konzipierung von Smart Services mit beteiligten Unternehmen des IMPRESS-Konsortiums weitere Sicherheitsaspekte, wie Authentifizierung und Autorisierung hervorgehoben, die eine zuverlässige Abrechnung gewährleisten sollen.

Die Produkt- und Nutzungsdaten werden mittels Kommunikationssystemen von CPS auf die **software-definierte Plattformen** übertragen. Diese Ebene stellt eine technische Integrationsschicht dar und kann aufgrund der Virtualisierung, unabhängig von den darunterliegenden Schichten, verändert werden. Hier werden die Daten mittels Algorithmen zur sog. Smart Data veredelt und in Form von Diensten bereitgestellt. Smart Data kann als eine semantische Beschreibung von Rohdaten eines Produktes verstanden werden, die durch die Anwendung von Datenanalyseverfahren und maschinellem Lernen erreicht wird (acatech 2015, S. 71). Die Herausforderungen bei der Transformation von Daten über Informationen hin zu Wissen sind umfangreich und reichen von der Definition von Key-Performance-Indicators (KPIs) über die Beherrschung von hohen Datenmengen, -geschwindigkeit und -vielfalt hin zur Auswahl von Modellierungstechniken und der Bereitstellung eines Analytics-Dienstes (Wirth und Hipp 2000, S. 5; Dorschel 2015, S. 2). Ferner sind Aspekte der Datensicherheit und des Datenschutzes zu berücksichtigen, da Software-definierte Plattformen hochsensible Daten konkurrierender Akteure enthalten können (Bullinger et al. 2017, S. 101). Diese Anforderungen werden durch entsprechende Entwicklungsumgebungen und Software-Monitoring- und Verwaltungs-Tools komplettiert, die bisher seitens produzierender Unternehmen kaum vorhanden und somit in die Entwicklungsprozesse zu integrieren sind.

Auf einer **Serviceplattform** werden die auf der darunterliegenden Schicht erstellten Dienste zu Smart Services kombiniert und einem Kunden angeboten. Diese Ebene wird als eine betriebswirtschaftliche Integrationsschicht bezeichnet und stellt eine unternehmens- und branchenübergreifende Kollaborationsplattform dar, auf der Wertschöpfungsketten modular konfiguriert und zu neuen, internetbasierten Geschäftsmodellen zusammengeführt werden können. (acatech 2015, S. 6). Mit Aspekten der Kollaboration und Integration gehen Herausforderungen einher, die zum einen die Definition möglicher Partner und deren Einbindung in den Serviceprozess betreffen. Zum anderen gilt es ein Smart Service in bestehende Systemlandschaft der Kunden und Partner zu integrieren (Sun et al. 2007, S. 559; Neuhüttler et al. 2019, S. 12). Hierbei gilt es nicht nur Datenschutz- und Datensicherheitsaspekte, sondern auch die Konsistenz der Datenstände unterschiedlicher IT-Systeme und der Prozesslogik zu beachten (Neuhüttler et al. 2019, S. 12).

Bei der Konzipierung von Smart Services mit Unternehmenspartnern von IMPRESS wurde festgestellt, dass das Schichtenmodell nach Acatech (2015) eine geeignete Grundlage für die Strukturierung der zu betrachtenden Handlungsfelder bietet. Insbesondere die Berücksichtigung sowohl der technischen als auch der betriebswirtschaftlichen Perspektiven hebt das Schichtenmodell von den untersuchten Ansätzen des Stands der Technik ab (vgl. Kapitel 3). Dieses bedarf jedoch einer Detaillierung, um produzierende Unternehmen bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses von Smart Services durch konkrete Lösungsbausteine zu unterstützen. Dabei gilt es die Smart-Service-Bausteine entlang des Schichtenmodells zu strukturieren und in Relation zueinander zu setzen. Das Ergebnis soll eine Referenzarchitektur für Smart Services darstellen.

3 Aktueller Stand der Technik

Auf Basis der in Kapitel 2 genannten Anforderungen aus einer Literaturrecherche und der Zusammenarbeit mit Unternehmenspartnern im Forschungsprojekt IMPRESS wurde der aktuelle Stand der Technik analysiert. Dabei wurden bestehende Ansätze zur Strukturierung wiederverwendbarer Lösungsmuster und deren Wirkbeziehungen für Smart Services und verwandte Anwendungsgebiete, wie Internet-of-Things (IoT), Big-Data und Data-Analytics betrachtet.

Das *integrative Rahmenwerk für Qualitätsperzeption von industriellen Smart Services* nach Neuhüttler et al. (2019) legt den Fokus auf die Wahrnehmung der Smart-Service-Qualität durch die Nutzer bzw. Kunden. Die Autoren strukturieren die Qualitätswahrnehmung in zwölf Handlungsfelder, die eine Schnittmenge zwischen Entwicklungsgegenständen und Smart-Services-Elementen bilden. Die umfassende Matrix von Qualitätsmerkmalen unterstützt die Entwickler von Smart Services die Kundenerwartungen und -anforderungen zu strukturieren und zu verstehen (Neuhüttler et al. 2019, S. 8). Dieser Ansatz zeichnet sich durch eine intensive und strukturierte Auseinandersetzung mit Qualitätskriterien diverser Kategorien, die in der Ableitung von Anforderungen und der Definition konkreter Maßnahmen mündet, aus. Die hohe Anzahl der Qualitätsmerkmale und deren Subkategorien sowie deren starke handlungsfeldübergreifende Verflechtung erschwert jedoch die Anwendung des Rahmenwerks (Neuhüttler et al. 2019, S. 13).

In der *Referenzarchitektur zur Konzipierung von Smart Services* nach Rabe et al. (2018) werden Aspekte und Darstellungstechniken zur Beschreibung und Analyse von Smart Services berücksichtigt. Die Aspekte Anwendungsszenario, Erlös-konzept, Serviceprozess, Wirkstruktur und Datenanalyse werden mittels Beziehungen wie „erfordert“ und „ermöglicht“ in Relation zueinander gesetzt (Rabe 2019, S. 108). Es werden sowohl technische als auch betriebswirtschaftliche Aspekte eines Smart Services und deren Wechselwirkungen berücksichtigt. Gesichtspunkte der Datenschutz und -sicherheit sowie der Integration in bestehende IT-Systeme werden nicht explizit betrachtet. Aus gemeinsamen Workshops mit Unternehmenspartnern des IMPRESS-Konsortiums ging jedoch hervor, dass diese Fragestellungen eine wichtige Rolle in der Entwicklung von Smart Services spielen.

Ein weiterer Ansatz zur Strukturierung eines Smart Services stellen die *Smart Service Layer-Modelle* nach Koldewey et al. (2019b) dar. Dabei wird eine Smart Service Idee entlang von zwölf Layern, die den Kategorien Kunde, kundensichtbare Marktleistung und Technik beschrieben. Die explizite Berücksichtigung der Kundensicht bei der Spezifikation einer Smart Service Idee fördert eine nutzentrierte Entwicklung. Diese Wirkung wird durch die Layer der kundensichtbaren Marktleistung verstärkt. Da das Layer-Modell in der Strategieentwicklung eingesetzt wird, werden technische Aspekte, wie bspw. die technischen Infrastruktur eines Smart Services nicht umfassend erfasst.

Manufacturing Reference Architecture (MRA) ist ein weiterer Ansatz zur Strukturierung von Smart Services in der Produktion. Diese legt den Fokus auf die Softwarebausteine und deren Wechselwirkungen, die eine Integration von Produktionsdaten diverser Branchen, wie bspw. Automotive, deren Analyse, Interoperabilität zwischen Akteuren eines Produktionsnetzwerks und Nutzerinteraktion mit Smart Services erfordern (Papazoglou et al. 2015, S. 63). Aspekte der technischen Infrastruktur und physischer Produkte (vgl. Kapitel 2) werden nicht berücksichtigt, jedoch

werden erweiterbare Schnittstellen zum domänenspezifischen Wissen über bspw. Partner, Prozesse und Produkteigenschaften vorgesehen (Papazoglou et al. 2015, S. 66). Steindl et al. (2015) schlagen eine *Ontologie-basierte Smart Service Architektur* vor, die der Modellbildung von datengetriebenen Modellen dient. Dabei orientieren sich die Autoren am RAMI 4.0-Modell (Adolphs et al. 2015, S. 7). Der Fokus der Referenzarchitektur liegt auf der Integration des domänenspezifischen Wissens, welches u.a. auf Engineering-, Prozess- und Servicedaten basiert und in Form einer Ontologie abgebildet wird. Eine Spezifikation der Datenquellen und -senken findet jedoch nicht statt. Ferner wird die Integration der entstehenden Smart Services in Kundenprozesse nicht beleuchtet.

Da Smart Services nicht nur für produzierende Unternehmen von Relevanz sind, sondern auch in Bereichen wie bspw. Smart City und Smart Building Eingang finden, wurden entsprechende Ansätze ebenfalls untersucht. McKee et al. (2017) schlagen eine Service-orientierte Architektur (SOA) für Smart City, die sich entlang der Dimensionen Stadtinfrastruktur, Geschäftsrollen und Architekturschichten erstreckt, vor. Die SOA-Schichten adressieren die abstrakte Spezifikation eines Services, deren Planung, konkrete technologische Umsetzung und Bereitstellung auf einer Plattform (McKee et al. 2017, S. 7). Jedoch gehen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Handlungsfeldern nicht hervor. Clement et al. (2017) konkretisieren SOA für Smart City exemplarisch am Beispiel eines Smart Grid und bieten einen Ansatz, der sich auf weitere Domänen transferieren lässt. Die domänenspezifischen Prozesse sollen durch Anwendungen unterstützt werden. Diese werden auf einer zentralen Cloud-Infrastruktur bereitgestellt, nachdem die Daten der eingebundenen physischen Objekte in einer Edge-Cloud vorverarbeitet wurden (Clement et al. 2017, S. 83). Dabei werden die zugrundeliegenden Objekte jedoch nicht weiter spezifiziert. Mazzara et al. (2019) schlagen eine Referenzarchitektur für smarte und software-definierte Gebäude vor. Darin werden Hardware, Netzwerk und ein Management-System einem software-definierten Gebäude zugeordnet. Darauf aufbauend bilden Anwendungen und Services gemeinsam mit Querschnittskonzepten ein smartes Gebäude. Die Autoren nutzen die Referenzarchitektur zur Strukturierung verfügbarer IoT-Lösungen, wie Sensorsysteme und Kommunikationstechnologien sowie der Datenmanagementaspekte (z.B. Datenablage und Datenanalyse) und Beispielanwendungen (z.B. Energiemanagement) (Mazzara et al. 2019, S. 168). Der Ansatz zeichnet sich durch eine klare Struktur der Referenzarchitektur, Einordnung potentieller Lösungsbausteine sowie Berücksichtigung der Datensicherheit aus. Jedoch findet keine detaillierte Betrachtung physischer Objekte und der Nutzerprozesse statt.

Aus den Ansätzen im Bereich Smart City und Smart Building wird ersichtlich, dass Konzepte des Internet-of-Things eine gute Ausgangsbasis für die Strukturierung von Smart Services darstellen können. Daher wurden diverse IoT-Referenzarchitekturen der Industrie und Forschung untersucht. Die industriellen Lösungsansätze, wie *AWS Manufacturing Architecture* (AWS 2020), *Azure IoT-Referenzarchitektur* (Microsoft 2019) und *IBM IoT Reference Architecture* (IBM 2020) zeichnen sich durch eine umfangreiche Konzepte mit einer Vielzahl an konkreten Lösungselementen, die eine Umsetzung von IoT-Anwendungen unterstützen aus. Diese Konzepte sind jedoch sehr stark durch konkrete unternehmensspezifische Lösungen geprägt. Ferner findet keine dedizierte Betrachtung physischer Produkte und Kundenprozesse statt. Andere industrielle Ansätze, wie *WSO2 Reference Architecture for IoT* (WSO2 2020), *technische Referenzarchitektur für das Daten- und Device-Management bei IoT-basierten digitalen Geschäftsmodellen* (Bial und Scheuch 2015), *Novatec IoT Reference Architecture* (Rakic 2019) und *Referenzarchitektur für IoT-Lösungen* der CAB Lab (Schmidtman 2019) sind deutlich generischer gestaltet. Eine dedizierte Betrachtung physischer Produkte findet darin jedoch auch nicht statt. Die Lösungsansätze aus der Forschung (Trunzer und Pethig 2018; Soldatos et al. 2017; AUTOWARE 2017; Nada 2015) fokussieren ebenfalls stark die Gestaltung der technischen Infrastruktur und software-definierter Bausteine sowie die Anbindung physischer Produkte an diese Infrastruktur.

Aus der Analyse des aktuellen Stands der Technik geht hervor, dass weder die untersuchten Ansätze, noch deren Kombination, die Anforderungen der Unternehmen des produzierenden Gewerbes an eine Referenzarchitektur für Smart Services (vgl. Kapitel 2) erfüllen. Im folgenden Kapitel wird ein Lösungsvorschlag, der auf Basis von Literaturrecherche und Erkenntnissen aus der Konzipierung von Smart Services mit Unternehmenspartnern des IMPRESS-Konsortiums erarbeitet wurde, vorgestellt.

4 Referenzarchitektur für Smart Services

Eine *Referenzarchitektur für Smart Services* verfolgt das Ziel den Entwicklungsaufwand dieser komplexen Systeme zu reduzieren. Hierzu werden bewährte Lösungen zu wiederverwendbaren Mustern aggregiert und auf Basis des Schichtenmodells nach Acatech (2015) strukturiert (vgl. Bild 1). Neben einer Detaillierung der vier Schichten wurde das Modell um die Handlungsfelder *Sicherheit*, *Mensch-Maschine-Schnittstelle* (MMS) und *Geschäftsmodell* erweitert. Während ein Geschäftsmodell Rahmenbedingungen für die darunter liegenden Schichten definiert, stellen Sicherheit und MMS Querschnittshandlungsfelder dar, die außer beim Geschäftsmodell innerhalb eines jeden Handlungsfeldes zu berücksichtigen sind. Die Referenzarchitektur enthält wesentliche Elemente eines Smart Services primär aus der Perspektive der Datenflüsse dar. Diese bestimmen die Wirkbeziehungen zwischen den Elementen der Handlungsfelder. Eine Ausnahme stellen die Wirkzusammenhänge eines Geschäftsmodells, eines Anwendungsszenarios und der Aktorik dar. Die jeweiligen Handlungsfelder und deren Schnittmengen mit den Querschnittshandlungsfeldern sowie deren Wirkbeziehungen werden im Folgenden dediziert vorgestellt.

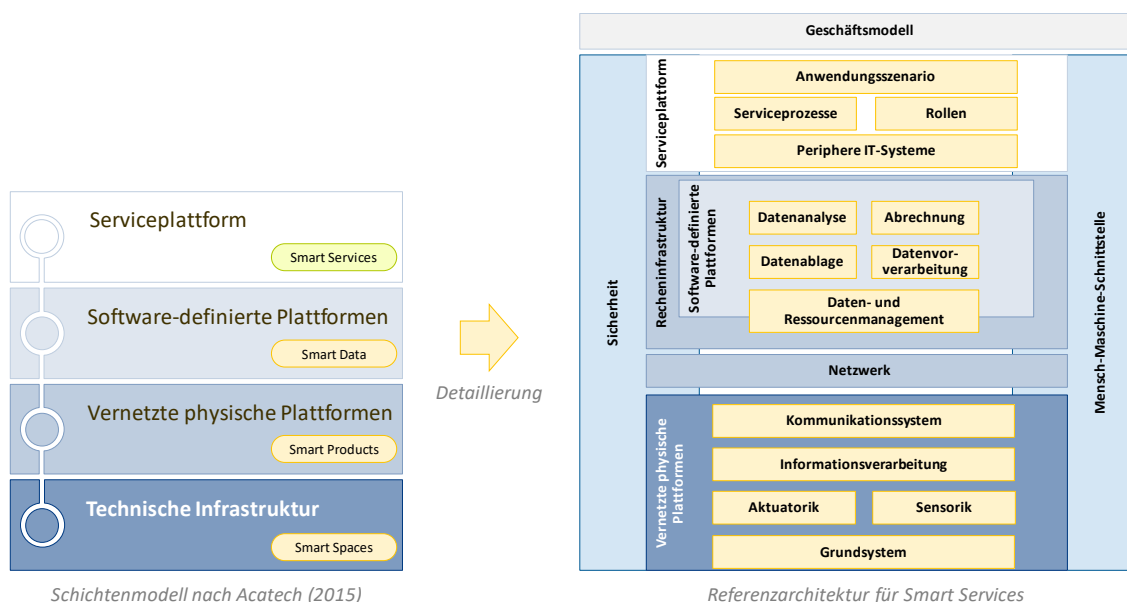


Bild 1: Referenzarchitektur für Smart Services auf Basis des Schichtenmodells nach Acatech (2015)

4.1 Vernetzte physische Plattformen

Die vernetzten physischen Plattformen als Datenquellen für die darauf aufbauenden Smart Services bilden das Fundament der Referenzarchitektur, während das Schichtenmodell nach Acatech (2015) auf technischer Infrastruktur fußt. Diese Veränderung wurde durch die Perspektive der Datenflüsse hervorgerufen. Der Datenfluss beginnt am *Grundsystem* eines physischen Produktes und mündet zunächst in einer *Sensorik* (VDI 2206 2004, S. 14). Je nach Grundsystem und den zu erfassenden Messgrößen kommen diverse Varianten von Sensoren in Frage, die mit im Zuge des Entwicklungsprozesses zu beantworten sind (Rot 194, S. 27). Dabei können mehrere Sensoren zum Einsatz kommen. Die Messdaten werden anschließend an die *Informationsverarbeitung* weitergeleitet und dort verarbeitet. Im Kontext fortgeschrittener mechatronischer Systeme kann die Verarbeitung der Sensordaten auf drei Ebenen stattfinden (Dumitrescu 2010, S. 114). Während ein Regler auf der untersten Ebene die notwendigen Stellgrößen ermittelt und diese an die Aktorik weiterleitet, aggregiert eine Datenverarbeitung auf der zweiten Ebene die Messdaten und sendet diese an ein *Kommunikationssystem*, eine *Mensch-Maschine-Schnittstelle* und ggf. einen internen Datenspeicher. Diese Datenbasis kann auf der dritten Ebene zur Ausführung kognitiver Funktionen, wie

Situationsanalyse, Zielbestimmung oder Verhaltensanpassung eingesetzt werden. Eine kognitive Informationsverarbeitung wird für die Umsetzung eines Smart Services jedoch nicht vorausgesetzt.

Die Gestaltung einer MMS auf der Ebene vernetzter physischer Plattformen kann je nach Anwendungsfall unterschiedlich ausfallen (Rabe 2019, S. 119). Insbesondere beim Aufbau eines Smart Services auf bestehenden physischen Systemen gilt es in der Konzipierungsphase zu prüfen, ob die vorhandenen MMS neue Anforderungen erfüllen. So kann bspw. durch die Integration einer Nutzer-Authentifizierung, die auf ein nutzungsabhängiges Erlösmodell zurückzuführen ist, eine Erweiterung bestehender MMS notwendig werden.

Neben einer Nutzer-Authentifizierung kommen weitere sicherheitstechnische Aspekte zum Tragen. Grundsätzlich ist jedes vernetzte System gegen Bedrohungen, wie Täuschung, Manipulation, Leugnung, Informationsweitergabe an Unbefugte, Ressourcenabsorption und Rechteverletzung zu schützen (Khan et al. 2017, S. 2). Zugriffskontrollen, Protokollierung und Verschlüsselung können u.a. mögliche Schutzmaßnahmen sein, um die entsprechenden Risiken zu minimieren. So sind bspw. die Produktdaten von dem Kommunikationssystem vor der Weitergabe an ein Netzwerk zu verschlüsseln.

4.2 Technische Infrastruktur

Im Rahmen der Referenzarchitektur für Smart Services stellt die technische Infrastruktur eine Basis für die Vernetzung von physischen Produkten sowie die Verarbeitung von Daten mehrere vernetzter Systeme dar. Die Vernetzung wird durch das Handlungsfeld *Netzwerk* charakterisiert. Dieses kann in Abhängigkeit von dem Anwendungsfall unterschiedliche Ausdehnung annehmen. Bedingt durch die Anzahl der teilnehmenden Systeme und der Reichweite der Datenübertragung kommen Personal- (PAN), Local- (LAN) und Wide-Area-Networks (WAN) in Frage (Rabe 2019 S. 118). Diese Parameter entscheiden über die einzusetzenden Technologien, die u.a. ein Kommunikationssystem des Produkts beherrschen muss. Über das Netzwerk gelangen Produktdaten in eine *Recheninfrastruktur*, wie bspw. Private, Edge oder Hybrid Cloud. Diese stellt die notwendigen Ressourcen bereit, um die geplanten Anwendungsfälle bedienen zu können. Die Leistungsfähigkeit der Recheninfrastruktur ist eines der entscheidenden Faktoren, die auf die Wahrnehmung der Smart-Service-Qualität durch den Kunden Einfluss nehmen (Neuhüttler et al. 2019). Daher gilt es die Auslastung der Infrastrukturressourcen zu überwachen. Hierzu ist eine MMS mit entsprechenden Werkzeugen zu installieren. Die Sicherheit der Kundendaten stellt einen weiteren Faktor, der als ein Ausschlusskriterium verstanden werden kann, dar. Deshalb gilt es bereits in der Systemkonzipierung mögliche Bedrohungsszenarien zu modellieren und somit vorzubeugen. Potenzielle Schutzmaßnahmen reichen von Authentifizierung und Autorisierung auf der Software-Ebene bis zur Installation von Sicherheitstüren vor den Serverräumen.

4.3 Software-definierte Plattformen

Innerhalb der Recheninfrastruktur befinden Software-definierte Plattformen. Die Schnittstelle dazwischen stellt das *Daten- und Ressourcenmanagement* dar. Dies ist ein zentrales Element der Software-Ebene, da es sowohl die Auslastung von ggf. verteilten Ressourcen der Recheninfrastruktur verwaltet, die ein- und ausgehenden Datenflüsse steuert sowie den Datenaustausch zwischen den restlichen Elementen der Software-definierten Plattformen reguliert. Ferner werden hier Schnittstellen zu peripheren Systemen zur Verfügung gestellt und verwaltet. Die beim Daten- und Ressourcenmanagement ankommenden Produktdaten werden anschließend entsprechend ihrer Struktur in der *Datenablage* hinterlegt. Je nach Datenformat können diverse Technologien zum Einsatz kommen. In einem Anwendungsfall wie bspw. Maschinenüberwachung werden Zeitreihendatenbanken zur Ablage der Rohdaten verwendet. Parallel dazu wird der Datenstrom an eine *Datenvorverarbeitung* geleitet. Diese ist für die Ermittlung notwendiger Merkmale aus den Rohdaten zuständig. Im Zeitbereich können bspw. Mittelwerte oder Varianz relevant sein. Handelt es sich bei Rohdaten um Schwingungen können Transformationen in den Bildbereich (z.B. Fourier-Transformation) hilfreich sein. Die ermittelten Datenmerkmale werden anschließend durch eine *Datenanalyse* verarbeitet. Hierbei steht eine Vielzahl an Verfahren der Statistik oder des maschinellen

Lernens zur Verfügung. Die mittels der Datenanalyse gewonnenen Informationen werden anschließend an einen Zielnutzer geleitet. Diese Resultate werden durch eine dem Erlösmodell-entsprechende Abrechnung, wie bspw. Pay-per-Use oder Pay-per-Performance dem Kunden in Rechnung gestellt. Die gewählte Abrechnungssystematik kann eine Protokollierung der Nutzung oder weitere Datenanalysen erfordern.

Die Entwicklung und Pflege der o.g. Anwendungslogik und entsprechender Algorithmen bedarf eine MMS für die beteiligten Entwickler und Systemadministratoren. Ferner kann eine MMS für die Überwachung der Nutzung von Smart-Service-Funktionen eingesetzt werden, sodass diese Erkenntnisse bei der Weiterentwicklung von Smart Services zum Tragen kommen und die Nutzererfahrung stetig verbessert werden kann. Hierzu sind entsprechenden Datenbanken in der Datenablage vorzusehen.

Aus der Perspektive der Sicherheit sind auf der Ebene der Software-definierten Plattformen die o.g. Bedrohungsszenarien (vgl. Kapitel 4.1) zu berücksichtigen. Ferner sind Vertrauensgrenzen zwischen unterschiedlichen Komponenten einer Anwendung zu definieren. Diese sind insbesondere vor dem Hintergrund gemeinsam genutzter Komponenten durch mehrere Anwendungen zu berücksichtigen.

4.4 Serviceplattformen

Auf der Ebene der Serviceplattformen erfolgt die Planung der zu entwickelnden *Anwendungsszenarien*. Diese sind maßgeblich durch Serviceprozesse und die daran beteiligten Rollen beschrieben. Die *Serviceprozesse* bestimmen die Ablauflogik eines Smart Services. Dabei kann die Verantwortung für die Prozessschritte bei unterschiedlichen *Rollen* liegen. Diese werden durch Akteure besetzt, die auf der Ebene des Geschäftsmodells bestimmt werden. Während der Ausführung eines Serviceprozesses setzen die verantwortlichen Rollen unterschiedliche IT-Werkzeuge ein, die kein Bestandteil der Software-definierten Plattformen darstellen. Diese werden als *periphere IT-Systeme* bezeichnet. So kann bspw. ein Kunde einen Serviceprozess mit einem unternehmensinternen ERP-System auslösen. Diese Eingangsinformationen werden über eine entsprechende Schnittstelle an die darunterliegende Schicht geleitet. Auf die gleiche Weise können Resultate der Datenanalyse in ein peripheres IT-Systeme gespeist werden. Die Einbindung peripherer IT-Systeme ermöglicht eine flexible Gestaltung der Serviceplattform und Einbindung einer hohen Anzahl an Akteuren.

Neben der direkten Einbindung von peripheren IT-Systemen und entsprechender Mensch-Maschine-Schnittstellen, sind weitere MMS für Smart Service Konsumenten und Produzenten vorzusehen. Zum einen werden dadurch aufwändige Anmeldeverfahren vermieden, zum anderen tragen Omni-Kanäle zur Benutzerfreundlichkeit eines Systems bei. Dadurch können jedoch weitere Bedrohungen entstehen, die es im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen gilt. Ferner gilt es die Anbindung externer Systeme, die sensible Unternehmensdaten enthalten, zu schützen.

4.5 Einfluss der Geschäftslogik auf Elemente der Smart Service Referenzarchitektur

Geschäftsmodelle folgen einer Geschäftslogik. Je nach Geschäftsmodelltyp ändert sich auch die zugrundeliegende Geschäftslogik. Die Plattformökonomie bringt die Logik der Plattform-Geschäftsmodelle, oder auch zweiseitige Märkte genannt, vermehrt in die Industrie. Diese Geschäftslogik unterscheidet sich grundlegend von klassischen sogenannten Pipeline Geschäftsmodellen. Bild 2 zeigt drei zu differenzierende Geschäftsmodelltypen (Pipeline, Plattform zweiseitig, Plattform mehrseitig).

Pipelines sind klassische Geschäftsmodelle, bei denen ein Anbieter für einen Kunden eine Leistung erbringt. Zweiseitige Plattformen unterscheiden sich dahingehend, dass eine Vielzahl von Produzenten und Konsumenten auf einem „Marktplatz“ zusammenkommen und ein Matching stattfindet, bevor Anbieter und Kunde sich finden. Mehrseitige Plattformen gehen noch einen Schritt weiter. Hier erwarten Konsumenten in der Regel verschiedene Leistungen von mehreren Gruppen an Produzenten (z.B. Smartphone-Ökosysteme: Produzent A sind Smartphone Anbieter, Produzent B sind App Entwickler, Konsumenten sind die Nutzer). Häufig ist dieser Übergang fließend. Mit einer

zunehmenden Anzahl an Akteursgruppen nimmt folglich auch die Komplexität des Ökosystems zu. Beispiele wie 3yourmind (Fertigungsnetzwerk für Additive Manufacturing) oder tapio (Smart Service Marktplatz für die Holzverarbeitende Industrie) zeigen, dass Smart Services im Kontext zwei- bzw. mehrseitiger Geschäftsmodelle in der Industrie eine große Rolle spielen. In Bezug auf Smart Services haben die verschiedenen Geschäftslogiken unterschiedliche Einflüsse auf die Elemente der Smart Service Referenzarchitektur.

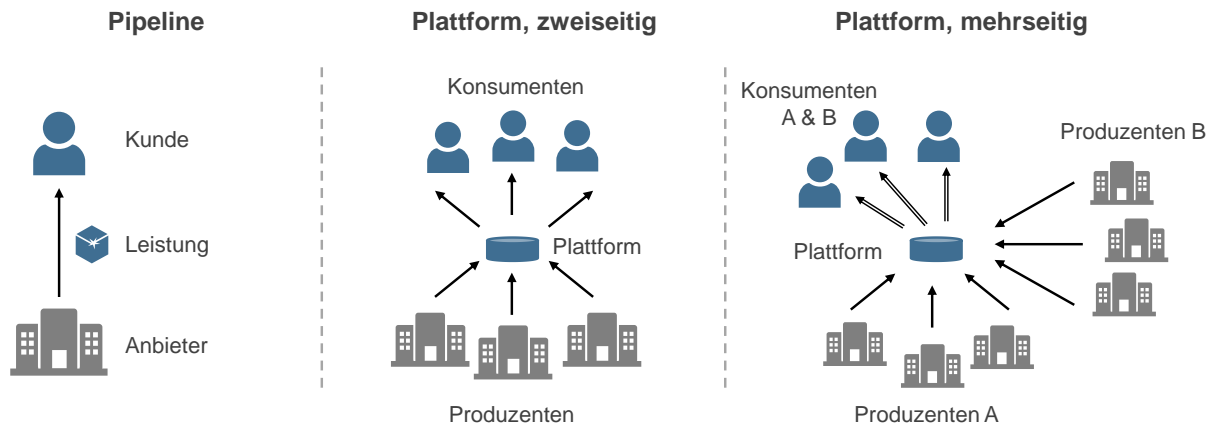


Bild 2: Verschiedene Geschäftslogiken im Überblick

Sobald ein Unternehmen sich entscheidet, eine offene Plattform im Sinne eines zwei- bzw. mehrseitigen Marktes anzubieten, gilt es ein sensibles und komplexes Ökosystem zu führen. Das Thema Governance und Datenhoheit spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Auch die Erlöslogik ändert sich. Folgende Aspekte gilt es zu berücksichtigen.

Governance: Auf mehrseitigen Märkten herrscht häufig ein Dilemma zwischen Offenheit und Qualität der Plattform. Eine sehr offene Plattform kann schnell wachsen und Nutzerzahlen gewinnen. Das kann jedoch zu Lasten der Datenqualität für Smart Services geschehen. Ein stark kontrollierter Zugang stellt die Datenqualität sicher, kann jedoch das Wachstum hemmen. Externe Beziehungen zu anderen Plattformen gilt es ebenfalls zu berücksichtigen, um an benötigte Daten oder Dienste zu gelangen.

Datenhoheit: In einem bilateralen Geschäftsverhältnis ist es häufig möglich klare Vereinbarungen bzgl. der Datenhoheit zu treffen. In einem offenen Ökosystem stellt sich allerdings die Frage, wer darf auf welche Daten welches Akteurs zugreifen, um sie für einen Smart Service zu nutzen?

Erlöslogik: Im Kontext von Smart Services wird häufig von direkten Erlösen durch z.B. Pay-per-Use oder -Performance basierte Zahlungen ausgegangen. Im Falle von mehrseitigen Geschäftsmodellen muss die Rolle des Smart Service jedoch hinterfragt werden. Der Smart Service kann z.B. nur die Grundlage für ein Matching sein (z.B. Smart Service „Kapazitätsanalyse“ auf einer Kapazitätsbörse) und somit nicht direkt monetarisiert werden. Hier können andere Erlöslogiken (z.B. Transaktionsgebühren) greifen.

Diese Wechselwirkungen zwischen Geschäftsmodell und Smart Service sind bereits in der frühen Phase der Entwicklung zu berücksichtigen, um eine erfolgreiche Markteinführung zu gewährleisten.

5 Resümee und Ausblick

Die vorgestellte Referenzarchitektur für Smart Services stellt eine umfassende Basisstruktur von den vernetzten physischen Plattformen hin zu den Geschäftsmodellen dar, die einen Leitfaden für eine effiziente Konzipierung und Entwicklung dieser komplexen Systeme ermöglichen soll. Die aufgezeigten Wechselwirkungen zwischen den Handlungsfeldern und deren Elementen sollen die Komplexität von Smart Services beherrschbar machen. Hierbei ist anzumerken, dass die vorgeschlagene Referenzarchitektur nur einen Strukturierungsrahmen darstellt und ihre volle Wirkung in Kombination mit Lösungsmustern entfaltet. Diese Lösungsmuster stellen unterschiedliche Ausprägungen der

handlungsfeldspezifischen Elemente dar und werden derzeit von dem IMPRESS-Konsortium erarbeitet. Gemeinsam mit den Lösungsmustern kann die Referenzarchitektur als ein morphologischer Kasten eingesetzt werden, der einen unternehmensübergreifenden Entwicklungsprozess unterstützen und die Synchronisation zwischen den verteilten Entwicklerteams fördern kann. So kann die Time-to-Market entscheidend verkürzt und Aufwände reduziert werden. Für Unternehmen mit geringer Erfahrung in der Entwicklung datenbasierter Services bspw. im Maschinen- und Anlagenbau ermöglicht die Referenzarchitektur einen leichteren Einstieg in die Entwicklung von Smart Services und somit eine nachhaltige Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag stellt ein Teil des Forschungsprojektes IMPRESS (Fördernummer: 02L17B070) dar und ist gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie durch den Europäischen Sozialfonds als Teil des Programms „Zukunft der Arbeit“. Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern Heinz-Nixdorf-Institut, Technische Universität Chemnitz, Weidmüller Interface, Diebold Nixdorf, FIWARE Foundation, DMG Mori, FREUND Maschinenfabrik und MSF Vathauer für die Kooperation.

Literatur

- Acatech 2015 Arbeitskreis Smart Service Welt / ACATECH (Hrsg): Smart Service Welt – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internetbasierte Dienste für die Wirtschaft. Abschlussbericht, Berlin, März 2015.
- Adolphs et al. 2015 ADOLPHS, Peter; BEDENBENDER, Heinz; DIRZUS, Dagmar; EHRlich, Martin; EPPLE, Ulrich; HANKEL, Martin; HEIDEL, Roland; HOFFMEISTER, Michael; HUHLÉ, Heimo; KÄRCHER, Bernd; KOZIOLEK, Heiko; PICHLER, Reinhold; POLLMEIER, Stefan; SCHEWE, Frank; WALTER, Armin; WASER, Bernd; WOLLSCHLAEGER, Martin: Reference Architecture Model Industrie 4.0. VDI/VDE-Gesellschaft, Mess- und Automatisierungstechnik, 2015
- Allmendinger und Lombreglia 2005 ALLMENDINGER, Glen; LOMBREGLIA, Ralph: Four Strategies for the Age of Smart Services. In: Harvard Business Review, Vol. 83, No. 10, S. 131-154, Oktober 2015
- AUTOWARE 2017 AUTOWARE Projektkonsortium: Cognitive Digital Automation Framework. Online unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/723909/de>, aufgerufen am: 13.08.2020
- AWS 2020 AWS; Frost & Sullivan: Manufacturing Transformation: Journey to the Cloud. White Paper. Online unter: https://pages.awscloud.com/rs/112-TZM-766/images/FS_WP_AWS%20Manufacturing%20Transformation_FINAL_02.27.2019%20%281%29.pdf, aufgerufen am: 06.11.2020
- Bial und Scheuch 2015 Bial, Dominik; Scheuch, Rolf: Architecting for the Internet of Things (IoT) – Eine Referenzarchitektur für IoT-basierende digitale Geschäftsmodelle. In: Online Themenspecial Internet der Dinge, Advertorial, 2015
- Broy 2010 BROY, Manfred (Hrsg.): Cyber-physical Systems – Innovation durch Software-intensive eingebettete Systeme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- Bullinger et al. 2017 BULLINGER, Hans-Jörg; GANZ, Walter, NEUHÜTTLER, Jens: Smart Services – Chancen und Herausforderungen digitalisierter Dienstleistungssysteme für Unternehmen. In: BRUHN, Manfred; HADWICH, Karsten (Hrsg.):

- Dienstleistungen 4.0, Band 1. Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 97-120, 2017.
- Clement et al. 2017 CLEMENT, S.J.; MCKEE, D. W.; XU, Jie: Service-Oriented Reference Architecture for Smart Cities. In: IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering, 2017.
- Dorschel 2015 DORSCHHEL, Joachim (Hrsg.): Praxishandbuch Big Data. Springer Fachmedien, 2015
- Dumitrescu 2010 DUMITRESCU, Roman: Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme. Universität Paderborn, Dissertation, 2010.
- IBM 2020 IBM: Internet of Things reference architecture. Online unter: <https://www.ibm.com/cloud/architecture/architectures/iotArchitecture/reference-architecture/>, aufgerufen am: 30.10.2020
- Kagermann 2015 KAGERMANN, Henning: Change Trough Digitization – Value Creation in the Age of Industry 4.0. In: ALBACH, Horst; MEFFERT, Heribert; PINKWART, Andreas; REICHWALD, Ralf: Management of Permanent Change. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015.
- Khan 2017 KHAN, Rafiullah; MCLAUGHLIN, Kieran; LAVERTY, David; SEZER, Sakir: STRIDE-based Threat Modeling for Cyber-Physical Systems. In: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), September 2017
- Koldewey et al. 2019a KOLDEWEY, Christian; EVERS, Hans Heinrich; DUMITRESCU, Roman; GAUSEMEIER, Jürgen; REINHOLD, Jannik: Development Process for Smart Service Strategies – Grasping the Potentials of Digitalization for Servitization. In: ISPIM Innovation Conference – Celebrating Innovation, Italien, 16.-19. Juni, 2019.
- Koldewey et al. 2019b KOLDEWEY, Christian; GAUSEMEIER, Jürgen; FISCHER, Stefan; KAGE, Martin: Entwicklung von Smart Service Strategien. In: Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Berlin, 2019.
- KPMG 2020 KPMG: Digital acceleration. Online unter: <https://home.kpmg/us/en/home/insights/2020/09/digital-acceleration.html>, aufgerufen am 30.11.2020.
- Mazzara et al. 2019 MAZZARA, Manuel; AFANASYEV, Ilya; SARANGI, Smruti, R.; DISTEFANO, Salvatore; KUMAR, Vivek; AHMAD, Muhammad: A Reference Architecture for Smart and Software-defined Buildings. In: IEE International Conference on Smart Computing, 2019.
- McKee et al. 2017 MCKEE, D. W.; CLEMENT, S. J.; ALMUTAIRI, J.; XU, Jie: Massive-Scale Automation in Cyber-Physical Systems: Vision & Challenges. In: IEEE 13th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, S. 5-11, 2017.
- Microsoft 2020 MICROSOFT: Azure IoT-referenzarchitektur. Online unter: <https://docs.microsoft.com/de-de/azure/architecture/reference-architectures/iot>, aufgerufen am 30.10.2020
- Nada 2015 Nada, Philip: AEGLE 3rd Prototype. Online unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/644906/>, aufgerufen am: 13.08.2020.
- Neuhüttler et al. 2019 NEUHÜTTLER, Jens; GANZ, Walter, SPATH, Dieter: An Integrative Quality Framework for Developing Industrial Smart Services. In: Service Science, September 2019.

- Papazoglou et al. 2015 PAPAZOGLOU, Michael P.; VAN DEN HEUVEL, Willem-Jan; MASCOLO, Julien Etienne: A Reference Architecture and Knowledge-Based Structures for Smart Manufacturing Networks. In: IEEE Software, S. 61-69, Mai/Juni 2015.
- Rabe 2019 RABE, Martin: Systematik zur Konzipierung von Smart Services für mechatronische Systeme. Universität Paderborn, Dissertation, 2019.
- Rabe et al. 2018 RABE, Martin; ASMAR, Laban; KÜHN, Arno; DUMITRESCU, Roman: Planning of Smart Services based on a Reference Architecture. In: Proceedings of the 15th International Design Conference, 21.-24. May 2018, Dubrovnik, 2018.
- Rakic 2019 RAKIC, Dean: IoT reference Architecture. Online unter: <https://www.novatec-gmbh.de/en/blog/iot-reference-architecture/>, aufgerufen am 15.09.2020
- Rot 1994 ROT, Karlheinz: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 2: Kataloge, 2. Auflage, Springer-Verlag, 1994
- Rymaszewska et al. 2017 RYMASZEWSKA, Anna; HELO, Petri; GUNASEKARAN, Angappa: IoT Powered Servitization of Manufacturing – An Exploratory Case Study. In: Internations Journal of Production Economics, Vol. 110, S. 92-105, 2017.
- Sayar und Er 2018 SAYAR, Deniz; ER, Özlem: The Antecedents of Successful IoT Service and System Design: Cases from the Manufacturing Industry. In: International Journal of Design, Vol. 12, No. 1, S. 67-78, 2018.
- Schmidtmann 2019 SCHMIDTMANN, Verena: Checkliste für eine IoT-Referenzarchitektur. Online unter: <https://www.cio.de/a/checkliste-fuer-eine-iot-referenzarchitektur,3596009>, aufgerufen am 15.09.2020
- Soldatos et al. 2017 SOLDATOS, John; KEFALAKIS, Nikos; ROUKOUNAKI, Aikaterini; EFREMIDIS, Sofoklis: Distributed Data Analytics Infrastructure. Online unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/723094/>, aufgerufen am: 13.08.2020
- Steindl et al. 2019 STEINDL, Gernot; HEINZL, Bernhard; KASTNER, Wolfgang: A Novel Ontology-Based Smart Service Architecture for Data-Driven Model Development. In: eKNOW 2019 - The Eleventh International Conference on Information, Process, and Knowledge Management, 2019
- Sun et al. 2007 SUN, Wei; ZHANG, Kuo; CHEN, Shuh-Kwei; ZHANG, Xin; LIANG, Haiqi: Software as a Service: An Integration Perspective. In: KRÄMER, Bernd J.; LIN, Kwei-Jay; NARASIMHA, Priya: Service-Oriented Computing – ICSOC, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- Tunzer und Pethig 2018 TUNZER, Emanuel, PETHIG, Florian: Systemarchitekturen für Smart Data Ansätze – Aggregiertes Konzept aus mehreren Projekten. In: Produktions- und Verfügbarkeitsoptimierung mit Smart Data Ansätzen, S. 13-27, 2018.
- VDI 2206 2004 VDI-Richtlinie Juni 2004, Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.
- Westermann 2017 WESTERMANN, Thorsten: Systematik zur Reifegradmodell-basierten Planung von Cyber-Physical systems des Maschinen- und Anlagenbaus. Universität Paderborn, Dissertation, 2017.
- Wirth und Hipp 2000 WIRTH, Rüdiger; HIPPE, Jochen: CRISP-DM: Towards a Standard Process Modell for Data Mining. In: Proceedings of the Fourth International Conference on the Practical Application of Knowledge Discovery and Data Mining, April 2000
- WSO2 WSO2: A Reference Architecture for Internet of Things. Online unter: <https://wso2.com/whitepapers/a-reference-architecture-for-the-internet-of-things/>, aufgerufen am: 06.10.2020

Vorgehen zur systematischen Verknüpfung von Produktanforderungen und Systemarchitektur unter Berücksichtigung der PGE

Procedure for the systematic linking of product requirements and system architecture under consideration of the PGE

Moritz Wäschle¹, Marcel Timucin¹, Aline Radimersky², Constantin Mandel¹, Joshua Fahl¹, Tobias Hirschter¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung, 76131 Karlsruhe
moritz.waeschle@kit.edu

²Firma Robert Bosch GmbH, 77815 Bühl
aline.radimersky@de.bosch.com

Abstract (deutsch): Die Nachfrage von Stakeholdern nach einem immer breiteren Spektrum von Funktionen bei gleichzeitig steigenden Qualitätsanforderungen, kürzeren Produktlebenszyklen und attraktiven Preisen führt zu steigender Produktkomplexität. Gleichzeitig dienen bereits bestehende Systeme mit verifizierten Anforderungen als Grundlage für die Produktentwicklung. Durch ein gezieltes Anforderungsmanagement inklusive der Verknüpfung zur Systemarchitektur wird versucht, diesen Herausforderungen zu begegnen. Zur Verknüpfung von Anforderungen zur Systemarchitektur kann die modellbasierte Systementwicklung genutzt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden hierzu die in Doors definierten Anforderungen eines Stellmotors im industriellen Umfeld mit einer Systemarchitektur in der Sprache Systems Modeling Language geeignet verknüpft. Dies ermöglicht die Nachvollziehbarkeit von Systemelementen und realisiert eine Berücksichtigung und Wiederverwendung von Referenzprodukten. Basierend auf dem Systemtripel aus Anforderung, Testfall und physischem Element können unterschiedliche produktgenerationsübergreifende Variationen im Sinne des Modells der Produktgenerationsentwicklung identifiziert werden.

Keywords (deutsch):

Model-Based Systems Engineering, Anforderungsmanagement, Produktgenerationsentwicklung, Systemarchitektur

Abstract (english): Stakeholder demand for an ever-wider range of functions combined with increasing quality requirements, higher reliability, shorter product lifecycles and attractive pricing leads to increasing product complexity. At the same time, the products build on existing systems with verified requirements. By means of a targeted requirements management including the link to the system architecture, an attempt is made to meet these challenges. Model-Based system development can be used to link requirements to system architecture. In the present work the requirements of an actuator in an industrial environment, as defined in Doors, were suitably linked with a system architecture in the language Systems Modeling Language. This enables the traceability of system elements and realizes a consideration and reuse of reference products. Based on the system triad of requirement, test case and physical element, different product generation-spanning variations can be identified in the sense of the Product Generation Engineering.

Keywords (english):

Model-Based Systems Engineering, Requirements Engineering, Product Generation Engineering, Systemarchitecture

1 Einleitung und Stand der Forschung

1.1 Einführung

Validierung beschreibt im Kontext der Entwicklung technischer Systeme den Abgleich zwischen erzeugten Objekten und vom Einsatzzweck bestimmten Zielen des Systems. Bei komplexen mechatronischen Systemen benötigt man daher die Darstellung von Abhängigkeiten zwischen Elementen wie Anforderung und Testfall, um eine ganzheitliche Validierung zu realisieren. Beispielsweise fordert die Norm IEEE 1012 eine Traceability von Elementen der Systemarchitektur und von verschiedenartigen Anforderungen (IEEE 1012-2016/Cor 1-2017). Vorangegangene Arbeiten untersuchten die Erstellung einer Systemarchitektur für mechatronische Systeme (Wäschle et al. 2020). Der vorliegende Beitrag befasst sich mit einem Ansatz, welcher Anforderungen und Systemarchitektur zusammenführt. Mithilfe von Model-Based Systems Engineering (MBSE) werden neben einer durchgängigen Entwicklung technischer Systeme, auch die Wiederverwendung von Systemelementen berücksichtigt. Hierbei ist ein Systemelement „[...] ein diskreter Teil eines Systems, der zur Erfüllung bestimmter Anforderungen implementiert werden kann. Bei einem Systemelement kann es sich um Hardware, Software, Daten, Menschen, Prozesse [...] oder eine beliebige Kombination davon handeln“ (ISO/IEC/IEEE 15288:2015). Im Verständnis dieses Beitrags sind nachfolgend auch Anforderungen und Testfälle als Systemelemente zu verstehen.

1.2 Model-Based Systems Engineering (MBSE)

MBSE bezeichnet „[...] die formalisierte Anwendung von Modellierung zur Unterstützung von System Anforderungs-, Design-, Analyse-, Verifikations- und Validierungsaktivitäten, beginnend in der konzeptuellen Entwicklungsphase und fortfahrend über die Entwicklung und spätere Lebenszyklusphasen“ (INCOSE 2007). Die drei Säulen des MBSE – Sprache, Methode und Tool – müssen bei jedem Einsatz von MBSE berücksichtigt werden (Delligatti 2014). Die etablierte aus der Unified Modeling Language (UML) hervorgegangene Sprache Systems Modeling Language (SysML) sowie das Tool IBM Rhapsody wurden nachfolgend eingesetzt. Den Einsatz der Sprachen UML in Bezug zur Traceability setzen beispielsweise Carniel und Pegoraro in einem Metamodell für die Traceability zwischen Anforderungen ein (Carniel und Pegoraro 2018). Nejadi et al. beschäftigen sich in der Sprache SysML mit der Ableitung von Designcharakteristiken aus Sicherheitsanforderungen (Nejadi et al. 2012). Vidal und Villota untersuchen eine Anforderungsverknüpfung zwischen SysML Diagrammen und einer Modellsimulation in Matlab (Vidal und Villota 2018). Die Veröffentlichungen verdeutlichen eine Eignung von SysML zur Traceability von Anforderungen, jedoch wird die Beschreibung von unterschiedlichen Anforderungsarten zu Elementen in verschiedenen Systemebenen der Systemarchitektur nur teilweise betrachtet. Zudem wird eine Wiederverwendung im Sinne der Generationsentwicklung nur eingeschränkt berücksichtigt.

Bei den Methoden wurden insbesondere die zentralen Themenbereiche des Beitrages berücksichtigt: die Sichtenbildung, die Berücksichtigung des Kontextes sowie der Aufbau der Systemarchitektur. In diesem Rahmen handeln nachfolgende Methoden.

Die Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM) setzt das von zahlreichen Methoden verwendete objektorientiertes Vorgehen ein. Basierend auf Bedarfen und abgeleiteten Anforderungen wird eine logische Architektur erstellt. Nachfolgend werden die Entwicklungsaktivitäten berücksichtigt: analysiere Bedarfe, definiere Systemanforderungen, definiere logische Architektur,

synthetisiere Kandidaten zugewiesene Architekturen, verbessern und evaluieren von Alternativen, validieren und verifizieren des Systems. (Lykins et al. 2000)

Eine Ableitung der Systemarchitektur aus Anforderungen wird in SYSMOD beschrieben. Die Methode adressiert die Architekturtypen Basisarchitektur, logische Architektur, physische Produktarchitektur und funktionale Architektur. (Weilkiens und Soley 2014)

Die Modellierungstheorie Software Plattform Embedded Systems (SPES) beschreibt in vier zentralen Sichten ein durchgehendes MBSE. Hierbei wird eine Trennung von Problem und Lösung sowie eine Trennung von logischer und technischer Lösung angestrebt. Die beschriebene Matrixstruktur beschreibt eine hierarchische Aufteilung der Granularität sowie horizontale Beziehungen auf Systemebene. (Pohl et al. 2012)

Im Folgenden wird einerseits die Methode SPES aufgrund der beschriebenen Matrixstruktur, Sichtenbildung und dem Fokus auf mechatronische Systeme angewendet. Andererseits werden die zuvor beschriebenen Methoden basierend auf einem Referenzproduktmodell konsolidiert, um einen anwendungsneutralen Einsatz im Automobilbereich zu ermöglichen. Hierzu werden nachfolgend das Modell der PGE- Produktgenerationsentwicklung sowie das assoziierte Referenzproduktmodell eingeführt.

1.3 PGE – Produktgenerationsentwicklung

Das Modell der PGE beschreibt die Entwicklung neuer Produkte durch zwei grundlegende Hypothesen (Albers et al. 2015; Albers et al. 2019; Albers et al. 2020):

- Jedes Produkt wird auf der Grundlage eines Referenzsystems entwickelt. Elemente des Referenzsystems stammen aus bestehenden oder bereits geplanten sozio-technischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation und dienen als Grundlage und Ausgangspunkt für die Entwicklung eines neuen Produktes.
- Die Systemelemente eines neuen Produktes werden auf der Basis von Referenzsystemelementen durch die Aktivitäten Übernahme- (ÜV), Ausprägungs- (AV) und Prinzipvariation (PV) entwickelt.

Das Referenzsystem besteht aus Elementen von beispielsweise Wettbewerbs- oder Vorgängerprodukten. Diese können unter anderem Systemelemente wie Testfälle und Anforderungen enthalten. Eine Abbildung des Referenzsystems im sogenannten Referenzproduktmodell wird nachfolgend erläutert.

1.4 Referenzproduktmodell

Das generische Referenzproduktmodell (Albers u. a. 2020a) stützt sich auf verschiedene bereits in Praxis und Wissenschaft etablierte Konzepte (siehe Albers, Hirschler, Fahl 2020). Diese Konzepte lassen sich durch fünf Erfolgsfaktoren charakterisieren: Systemdenken, Stakeholder-Zentrierung, Berücksichtigung von lösungsoffenen und lösungsspezifischen Informationen, Referenzsystemelementen und Grundaktivitäten der Produktentwicklung. Albers et al. integrieren die Merkmale in ein einziges Referenzproduktmodell und demonstrieren wie diese etablierten Prinzipien konsistent und komplementär zusammenwirken (Albers u. a. 2020a). Das Basisproduktmodell mit seinen Systemsichten (Eigenschafts-/Funktions-/Physisch) und Ebenen (Supersystem(e), System, Subsystem(e)) wird in den von Albers, Ebel & Lohmeyer (Albers, Ebel, Lohmeyer 2012) eingeführten erweiterten Ansatz von den drei zentralen Systemen Ziel-, Handlungs- und Objektsystem integriert. Darüber hinaus beinhaltet das generische Referenzproduktmodell das Referenzsystem der Generation

n R_n als Grundlage für die Entwicklung die in Betracht gezogene Produktgeneration G_n . Die zentralen Entwicklungsaktivitäten verbinden schließlich die verschiedenen Segmente des neuen Modells. (Albers u. a. 2020a)

Bild 1 zeigt die Wechselbeziehung zwischen R_n und G_n sowie die drei Systeme Ziel-, Handlungs- und Objektsystem in G_n und R_n . Das Referenz Objektsystem kann beispielsweise ein Systemmodell des bestehenden Produkts enthalten, im Zielsystem haben Entwickler Ziele und Anforderungen an das neue Produkt im Kopf. Das Handlungssystem zeigt beispielsweise ein ISO/IEC 15504 konformes Vorgehen nach A-SPICE (**A**utomotive **S**oftware **P**rocess **I**mprovement and **C**apability **D**etermination). In Bild 1 sind zentrale Aktivitäten im Kontext der Validierung dargestellt, welche die Systemsichten und Ebenen verbinden.

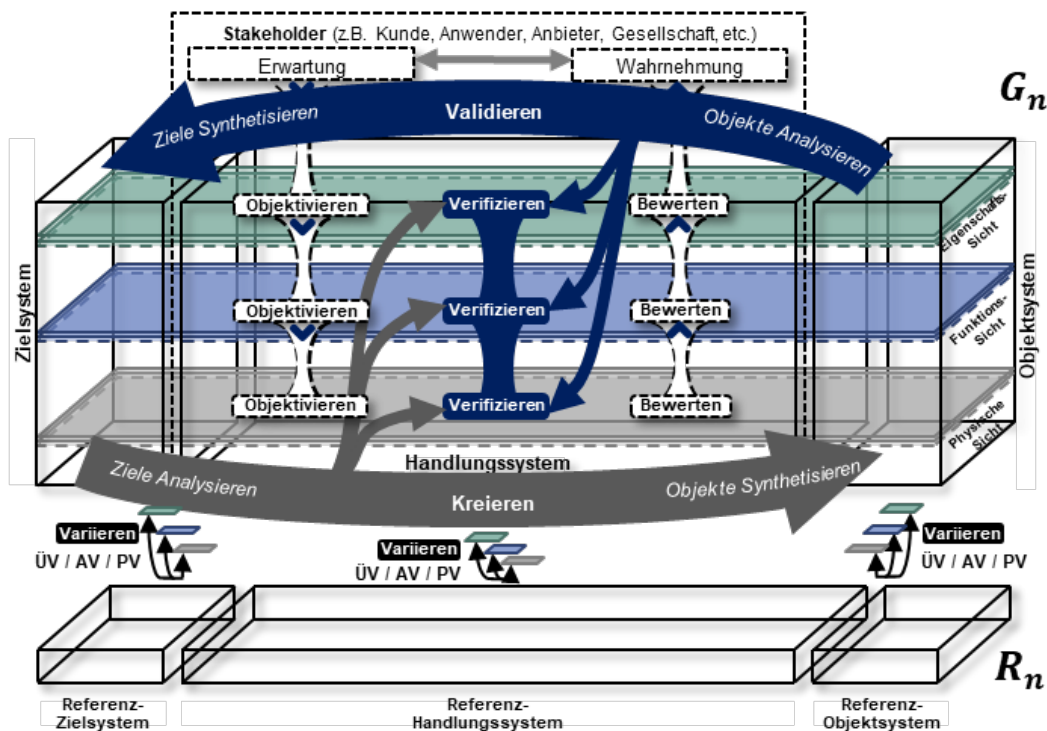


Bild 1: Referenz Produktmodell

Übertragen auf den praktischen Kontext leitet das entwickelte Modell die Produktentwickler an, eine Produktspezifikation von Anfang an und während des gesamten Entwicklungsprozesses zu systematisieren. Entsprechend den integrierten Erfolgsfaktoren unterstützt das Modell das Management von Komplexität im Sinne der Strukturierung homogener Elemente einer Produktspezifikation und deren Verknüpfung mit zentralen Entwicklungsaktivitäten. Darüber hinaus stärkt das Modell das Bewusstsein und die Nutzung von Referenzen, um den Entwicklungsaufwand systematisch zu verteilen und damit den Zeit- und Kostenaufwand zu reduzieren. Schließlich fördert das Modell die frühzeitige und kontinuierliche Ausrichtung der Entwicklung an den Anforderungen der Stakeholder und dient damit einem Grundprinzip zur Sicherung des Markterfolgs. (Albers u. a. 2020a)

Die Produktspezifikation orientiert sich im folgenden Beitrag auf einen Aktuator, welcher mit (Model-Based) Systems Engineering Ansätzen nachfolgend vorgestellt wird.

1.5 (Model-Based) Systems Engineering in der Praxis am Beispiel eines Stellmotors

Die Integration des Systems Engineering in der automobilen Produktentwicklung wird derzeit von den OEMs und deren Zulieferern stark vorangetrieben. Spätestens seit der Einführung von A-SPICE sind Automobilunternehmen gezwungen, die Entwicklungsprozesse dementsprechend anzupassen. So

wird auch bei der Entwicklung der Stellmotoren der Robert Bosch GmbH der interdisziplinäre Ansatz des Systems Engineering aufgegriffen und Prozesse und Toollandschaft dahingehend weiterentwickelt. Im Anforderungsmanagementtool Doors Next Generation (DNG) werden die Kundenanforderung aus der Customer Requirements Specification (CRS) nachverfolgbar in Systemanforderungen der System Requirement Specification (SysRS) weiterverarbeitet und entsprechende Testfälle definiert. Der Aufbau des Architekturmodells orientiert sich dabei am SPES-Ansatz. Dieser definiert verschiedene hierarchische Abstraktionsgrade (Systemlevel), welche das zu entwickelnde System zunehmend konkretisieren (Pohl et al. 2012). Durch die Verknüpfungsmöglichkeit der Tools können die Anforderungen den Testfällen und physischen (Teil-) Systemen zugeordnet werden.

Auch bei der Entwicklung der nächsten Generation des Stellmotors wird diese Systematik angewandt. Die Motoren der Produktfamilie sind für Anwendungen im konventionellen oder elektrifizierten Fahrzeug-Antriebsstrang konzipiert – beispielsweise in Verteilergetrieben oder mehrgängigen Getrieben von E-Achsen. Der betrachtete Aktuator ist ein BLDC-Motor mit integrierter Elektronik, der neben der Positionsregelung auch zusätzliche Steuergerätefunktionen übernehmen kann. (Robert Bosch GmbH o.J.) Dem Aktuator gehen mehrere Produktgenerationen und –varianten voraus, sodass in der Entwicklung bestehendes Erfahrungswissen und Designs genutzt werden können. Entscheidend ist dabei jedoch, dass veränderter Kontext – z.B. aufgrund neuer Anwendungen – berücksichtigt und resultierende Entwicklungsrisiken und –aufwände bewertet werden können. Dies soll durch einen methodischen Ansatz zur Verknüpfung von Anforderungen, Systemarchitektur und Testfall unterstützt werden.

2 Forschungsziel und -fragen

Forschungsziel dieses Beitrags ist die Verknüpfung der Anforderungen an eine Produktgeneration mit der spezifischen Systemarchitektur durch gezieltes Zusammenführen des Modells der PGE - Produktgenerationsentwicklung mit Model-Based Systems Engineering (MBSE). Im vorliegenden Beitrag wird das übergeordnete Forschungsziel anhand der folgenden zwei Forschungsfragen strukturiert:

- I. Wie lassen sich anhand der Systemarchitektur Anforderungen, Testfälle und physische Systemelemente am Beispiel eines Stellmotors verknüpfen, um eine Nachvollziehbarkeit der Elemente zu realisieren?
- II. Wie kann die Entwicklung zukünftiger Produktgenerationen in der Entwicklungspraxis durch die Einführung der Verknüpfungen von Anforderungen, Testfällen und physischen Systemelementen unterstützt werden?

3 Ansatz

3.1 Systematische Verknüpfung von Systemelementen mit MBSE zur Herstellung von Traceability

Insbesondere im Automobilbau, in welchem mechatronische Systeme in zahlreichen Varianten in Plattform-, Modul- und Baukastenstrategien entwickelt werden, ist eine umfängliche Betrachtung von Systemelementen von entscheidender Bedeutung. Systemelemente wie Elektromotor, Anforderungen (max. Leistung), Testfälle (Fahrzyklus) und Systemkontext (Antriebseinheit) stehen in enger Wechselwirkung zueinander. So muss berücksichtigt werden, dass Anforderungen auf ein System Auswirkungen auf dessen Subsysteme haben. Aufgrund der Aufführung einer lösungsoffenen Anforderung wird ein spezifisches System entwickelt. Durch die Auswahl von technischen Lösungsprinzipien, zur Erfüllung von Funktionen, ergeben sich wiederum Anforderungen an unterliegende Teilsysteme (Subsysteme) (Renner 2007). Dieser Vorgang wiederholt sich, bis die technische Lösung ausreichend konkretisiert ist (Renner 2007). Zur Identifikation und Analyse der

Bild 3 zeigt, wie für die Dokumentation und Identifizierung von Anforderungen in Expertentools angewendet werden. So kann das Anforderungsmanagementtool DNG zur Dokumentation der Spezifikationen dienen und deren Systemelemente (in DNG auch als Artefakt bezeichnet), die in DNG dargestellt werden, mit Modellen in Rhapsody verknüpfen. Für die Identifizierung von Business und Stakeholder Requirements wird zusätzlich ein Context Model, welches die relevanten Systeme in der Umgebung beschreibt, aufgebaut. Die Systemelemente können dann entsprechend verknüpft werden. Im Zusammenspiel von Systemarchitektur und System Requirement Specification wird das System über die verschiedenen Systemebenen hinweg bis zur finalen technischen Lösung zunehmend konkretisiert.

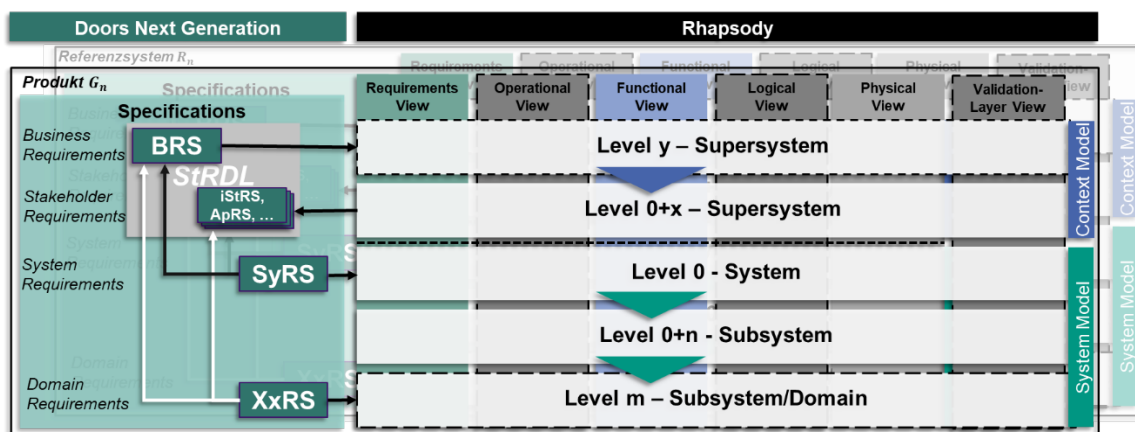


Bild 3: Gegenseitiger Einfluss von granularen Anforderungs- und Systemartefakten im Context- und Systemmodell mit Bezug zum Referenzsystem

Um die Auswirkungen im Systemmodell betrachten zu können, muss die Traceability nicht nur zwischen Anforderungsmanagement und Systemmodell, sondern auch innerhalb der einzelnen Modelle gewährleistet sein. Die hieraus folgende Verknüpfung wird mithilfe einer Klassifizierung von Anforderungen realisiert. Je nach Anforderungsart müssen Anforderungen und Architektur unterschiedlich verknüpft werden. Im vorliegenden Beispiel wird die Anforderungsklassifizierung für mechatronische Systeme nach Krusche angewendet (Krusche 2000):

- *Funktionale Anforderungen (Requirements View)* richten sich an eine zu erfüllende Funktion. Demzufolge werden diese mit der Funktion in der Systemebene, in der diese auftritt, verknüpft (Functional View). Die Funktion kann wiederum mit dem entsprechenden logischen Teilsystem und dem SysML-Activity Diagram verknüpft werden, in dem der Funktionsablauf beschrieben wird. Die funktionale Anforderung wird anschließend mit den realisierenden Wirkprinzipien und dem verifizierenden Testfall verknüpft.
- *Gestaltungsanforderungen und (Lean) Constraints* haben i.d.R. keinen direkten Einfluss auf eine Funktion des Systems. Sie richten sich an die technische Ausführung. Daher werden diese nicht mit der Funktion, sondern mit dem logischen Systemelement verknüpft, welches von der Anforderung betroffen ist. Wohingegen Gestaltungsanforderungen ebenfalls mit einem Testfall verknüpft werden, sind Constraints im eigentlichen Sinne Randbedingungen. Daher besitzen Constraints i.a. keinen eigenen Testfall.

Abgeleitete Anforderungen machen einen großen Teil der Systemanforderungen aus. Zum einen kann eine Anforderung aus einer anderen Systemanforderung direkt abgeleitet werden und zum anderen kann eine Anforderung aus der Konkretisierung der Systemarchitektur entstehen. Diese können im eigentlichen Sinne Funktions- wie auch Gestaltungsanforderungen sein und werden dementsprechend verknüpft. Hinzukommt, dass die ausgehenden Anforderungen mitverknüpft wird zum Zwecke der

Traceability.

Zur Verknüpfung der verschiedenen Systemebenen werden im Kontext der funktionsorientierten Entwicklung die Funktionen mit ihren Subfunktionen verknüpft, wie in Bild 4 illustriert.

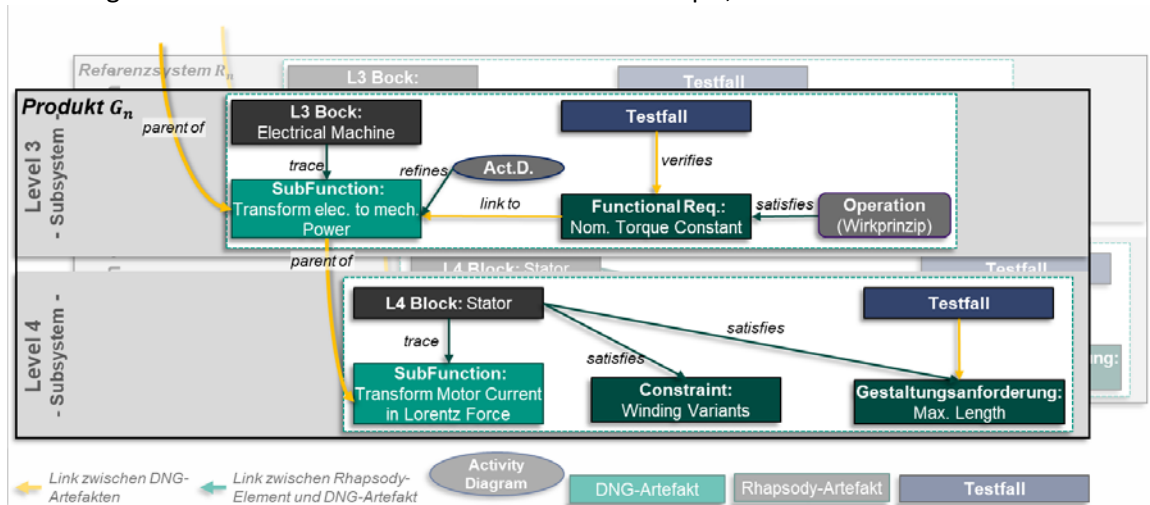


Bild 4: Ausschnitt der Traceability am Beispiel des Magnetkreises eines Stellmotors

Bild 4 zeigt anhand des Beispiels des Magnetkreises eines Stellmotors wie die Funktionsstruktur aufgebaut wird. Anhand des Wirkprinzips werden nach dem Vier-Säulen-Modell (vgl. Kapitel 3.1) die benötigten Subfunktionen bestimmt. Beispielsweise ist die Subfunktionen <<Transform electrical to mech. Power>> direkt mit der übergeordneten Funktion verknüpft, sodass eine Nachvollziehbarkeitskette entsteht. Somit wird auch das Systemmodell in vertikaler Richtung miteinander verknüpft. Zudem existiert eine horizontale Verknüpfung. Beispielsweise ist die Funktion <<Provide Torque>> mit der Anforderung in DNG <<Max. Torque>> verknüpft. Diese ist wiederum mit dem passenden Wirkprinzip und dem entsprechenden Testfall verknüpft, welche die Anforderung verifiziert. Die Systemelemente befinden sich in einer Produktgeneration und können durch Variationen aus dem Referenzsystem entwickelt werden. Dies wird im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

3.2 Unterstützung der Entwicklung zukünftiger Produktgenerationen durch Detektion von Systemtripeln

Der Ansatz verknüpft die unterschiedlich konkretisierenden Teilsysteme kausal miteinander. Dabei fällt auf, dass ein Teilsystem im Wesentlichen aus Systemelementen drei verschiedener Sichten bestehen muss: Requirements View, Physical View und Validation View. Denn Anforderungen, Testfälle und physische Teilsysteme (was i.A. das physische Produkt repräsentiert) sind elementar zur Entwicklung eines Produktes.

Ein **Systemtripel** beschreibt nun die Verknüpfung der Systemelemententypen Anforderung, physisches Systemelement und Testfall für ein (Teil-)System.

Die Erkenntnis des Systemtripels kann dabei helfen, die Auswirkungen von Änderungen eines Systemelements des Systemtripels auf weitere Systemelemente des Systemtripels zu analysieren und somit das Ausmaß der Änderung zu bestimmen. Jedes System, ungeachtet des Abstraktionsgrades, kann demnach mit dem Systemtripel beschrieben werden. Die Elemente des Systemtripels haben im Sinne der PGE wiederum korrespondierende Elemente in einem Referenzsystem. Das Referenzsystem beinhaltet das, was Grundlage der Entwicklung ist und kann unterschiedliche Referenzprodukte enthalten. Wenn beispielsweise ein Sensor von der Vorgängergeneration übernommen wird aber der zugehörige Testfall aus einer anderen Aktuatorbaureihe stammt, bilden diese beiden

unterschiedlichen Referenzprodukte das gemeinsame Referenzsystem. Somit kann auch die Analyse der Variationsanteile auf die Elemente des Systemtripels erweitert werden. Für diesen Schritt ist es notwendig, Anforderungen und Testfälle genauso wie physische Teilsysteme über die Variationsarten kategorisch einzuordnen. Tabelle 1 zeigt Beispiele, wie die PGE-Betrachtung auf Anforderungen und Testfälle übertragen werden kann.

Tabelle 1: Anwendung der PGE an den Elementen des Systemtripels: physische (Teil-) Systeme, Anforderungen und Testfälle

	Übernahmevariation	Ausprägungsvariation	Prinzipvariation
(Teil-) Systeme	Beispiel: Übernahme el. Magnetkreis	R_n : aktive Länge 15 mm G_n : aktive Länge 30mm	R_n : permanenterregter Motor G_n : fremderregter Motor
Anforderungen	Beispiel: Übernahme Spezifikation	R_n : Drehmoment min. 1 Nm G_n : Drehmoment min. 2 Nm	R_n : keine Laufzeitanforderung G_n : Laufzeitanforderung
Testfälle	Beispiel: Übernahme Testfall	R_n : Lastfall bei 1 Nm G_n : Lastfall bei 2 Nm	R_n : kein/bisheriger Prüfstand G_n : neuer Prüfstand

Unverändert übernommene Testspezifikationen aus einer vorherigen Produktgeneration können ebenfalls als Übernahmevariation bezeichnet werden, wohingegen z.B. die quantitative Veränderung des geforderten Drehmoments oder des Lastfalls als Ausprägungsvariation klassifiziert werden kann. Prinzipvariationen können dabei äquivalent zu Systemelementen auch durch das Hinzukommen oder Wegfallen von Anforderungen oder Testumgebungen identifiziert werden. Somit kann jedes Element des Systemtripels durch eine Variationsart der PGE entwickelt werden und das Ausmaß einer Änderung umfänglich betrachtet werden. Unter der Annahme, dass eine UV tendenziell ein geringeres Entwicklungsrisiko und einen geringeren -Aufwand als eine AV und diese wiederum tendenziell ein geringeres Risiko als eine PV hat, können nun Indikatoren für Entwicklungsrisiken und -aufwände abgeschätzt werden.

Im Falle einer AV, wie der quantitativen Änderung einer Anforderung, hat dies Auswirkung auf den Rest des Tripels. In diesem Fall muss geprüft werden, ob die restlichen Systemelemente der verknüpften Typen Testfall und physisches (Teil-) System der AV angepasst werden müssen. Beispielsweise muss bei einer erhöhten Leistungsanforderung geprüft werden, ob das physische Teilsystem die Leistungsklasse erfüllt und ob die Testumgebung die Anforderung verifizieren kann. Gegebenenfalls müssen diese angepasst werden, in Form einer veränderten Magnetkreisvariation oder eines fähigen Prüfstandes. Demzufolge ist von einem Verdachtsfall auf mögliche Änderungen die Rede, sollte mindestens eine AV im Systemtripel vorliegen.

Im Falle einer PV ist der assoziierte Aufwand und das Risiko i.d.R. deutlich höher. Grund dafür ist, dass das Hinzukommen oder Wegfallen eines Systemelementes häufig große Auswirkungen auf den Rest des Systemtripels hat. Beispielsweise ist bei einer neu zu berücksichtigenden Anforderung oftmals kein entsprechender Testcase vorhanden und das physische Teilsystem nicht entsprechend ausgelegt. Daher sind Folgearbeiten erforderlich. Gegebenenfalls können auch benachbarte Systemtripel betroffen sein. Dementsprechend kann man bei der Detektion mindestens einer PV im Systemtripel von einem Risikofall sprechen.

Bild 5 stellt dar, wie nun ein komplettes System über dessen Funktionsstruktur in Systemtripel aufgeteilt werden kann. Durch die Klassifizierung deren Elemente können Verdachts- und Risikofälle detektiert werden. Durch die Verknüpfungen der Systemtripel können durch einen Risikofall betroffene Systemtripel effizient detektiert werden. Das Beispiel zeigt, wie um den rot gekennzeichneten Risikofall alle verknüpften Systemtripel auf einen Verdachtsfall eingestuft werden.

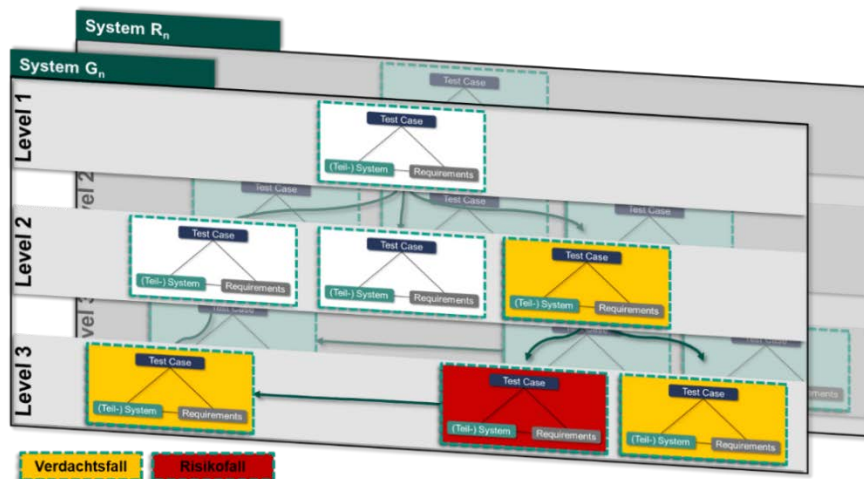


Bild 5: Beispiel einer bewerteten Systemstruktur mittels Detektion der Systemtripel

Neben den zentralen direkten Beziehungen innerhalb des Systemtripels ist es notwendig weitere Beziehungen zum Referenzsystem sowie weiteren Elementen zu erstellen. Beispielsweise wurde im Bereich der Validierung als zentrales Element der Testcase aufgenommen. Weitere Elemente wie Methoden, Prüfumgebung, Aktivitäten, Testablauf, Validierungsziel werden indirekt über Verknüpfungen mitberücksichtigt. Dies gilt ebenfalls für die weiteren Elemente im Systemtripel physische Elemente und Anforderungen. Die im MBSE Kontext vom zentralen Modell verlinkten Expertentools wie DOORS oder der Bereich Validierung eingesetzte Standard Open Test sequence eXchange müssen hierbei ebenso berücksichtigt werden. Ziel ist es, so wenig Verbindungen und Elemente wie möglich zu beschreiben und Redundanzen zu vermeiden, jedoch alle notwendigen Einflüsse realitätsnah abzubilden. Hierbei ergibt sich die Notwendigkeit aus den Zielen.

Die Einführung des Systemtripels und die damit verbundene Analyse im Sinne der PGE verdeutlicht, dass sich qualitative Analysen hinsichtlich Aufwands und Risiko einer Systementwicklung unterstützen lassen. Die Übersicht der Verdachts- und Risikofälle bietet hier mehrwertstiftende Informationen.

3.3 Diskussion und Verknüpfung mit Referenzproduktmodell

Basierend auf dem Referenzproduktmodell in Kapitel 1 werden die in Kapitel 3 erzielten Erkenntnisse in das Modell eingeordnet. Dies führt zu einer Abstraktion von unternehmensspezifischen Erkenntnissen und fördert eine allgemeingültigere Diskussion im Zusammenhang zu verknüpfenden Arbeiten.

Die in Kapitel 1 eingeführten Sichten Anforderung, Funktion und physisches Systemelement können je nach Anwendungsfall erweitert werden. So wurde in Kapitel 3 die SPES konforme Vorgehensweise mit fünf Sichten angewendet. Nach Ansicht der Autoren sind die drei essenziellen Elemente des Systemtripels, je nach Anwendungsfall erweiterbar. Die Anwendung im Systemtripel hat insbesondere den Analyseschritt im Referenzproduktmodell gestärkt, in dem nicht Systemelemente allein, sondern die Wechselwirkungen aus Anforderungen, physischen Systemelementen und Testfällen analysiert werden. Durch die Berücksichtigung der im Referenzproduktmodell generischen Systemebenen lässt sich der Kundennutzen auf verschiedenen Abstraktionsgraden bis zur Komponente modellieren und somit die Kundenzentrierung sicherstellen. Die geeignete Einbeziehung des Referenzsystems und die Zuordnung von Zielen, Handlungen und Objekten ermöglicht eine Nachvollziehbarkeit in horizontaler und vertikaler Richtung. Wie zu Beginn in Kapitel 1 im Referenzproduktmodell verdeutlicht, können Aktivitäten wie Evaluierung und Objektivierung auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen und zu Aktivitäten in weiteren Ebenen führen.

Eine initiale Verifizierung erfolgte durch das Spezifizieren von Anwendungsfällen für den Stellmotor. Mittels einer Zuordnung von bereits in Doors beschriebenen Anforderung zu den Anwendungsfällen der Kunden bzw. Stakeholder erfolgte eine Überprüfung der Realisierbarkeit des aufgezeigten Ansatzes. Neben dem Aufbau einer Systemarchitektur und der Beschreibung von Anforderungslisten ist eine Verknüpfung teilweise direkt in Doors möglich. Zudem ist bei der noch händisch anzulegenden Verknüpfung eine Modellierung des Gesamtsystems möglich.

4 Fazit und Ausblick

Der Ansatz unterstützt die Traceability zwischen Anforderungen und technischer Realisierung, die Erfassung kritischer Elemente und deren Auswirkung anhand eines konkreten toolübergreifenden Anwendungsfalls. Dies wird unter Einsatz der SPES Methode, einer generalisierten Betrachtung im Referenzproduktmodell sowie in der werkzeugübergreifenden Verknüpfung und Konkretisierung von verschiedenen Systemelementen durchgeführt, was die erste Forschungsfrage beantwortet. Die zweite Forschungsfrage zur Unterstützung der zuvor erforschten Verknüpfungen für zukünftige Produktgenerationen wurde mithilfe des Modells der PGE erläutert. Hierzu wurden Variationen im Sinne des Modells der PGE für weitere Systemelemente angewandt, welche sinnvoll untereinander und mit verschiedenen Anforderungsarten verbunden sind.

Mit dem Modell der PGE werden unter anderem Entwicklungsrisiken und -chancen identifiziert, während MBSE zur Modellierung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten verschiedener Systemelemente dient. Somit und aufgrund der Erkenntnisse des Beitrags werden nach Ansicht der Autoren für das Zusammenwirken von PGE mit MBSE folgende Potenziale konkretisiert: „MBSE ermöglicht eine Modellierung der Variation im Sinne der PGE“ und „Methoden des MBSE auf Basis des PGE-Modells ermöglichen eine effiziente Entwicklung in mehreren Generationen“.

Weiterführende Untersuchungen beschäftigen sich mit Metriken zur Quantifizierung von Indikatoren von Entwicklungsrisiken und -aufwände sowie der Bestätigung der Potenziale.

Literatur

- Albers et al. 2012 ALBERS, Albert; EBEL, Björn; LOHMEYER, Quentin: *Systems of objectives in complex product development*. In: *9th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering TMCE 2012*, Karlsruhe, Germany, 2012.
- Albers et al. 2015 ALBERS, Albert; BURSAC, Nikola; WINTERGERST, Eike: *Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive*. In: BINZ, Bertsche (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*, 2015.
- Albers et al. 2020a ALBERS, Albert; HIRSCHTER, Tobias; FAHL, Joshua; WOEHRLE, Gabriel; RAPP, Simon: *Reference Product Model for Structuring the Specification of Complex Products by the Example of the Automotive Industry*. In: *13th International Symposium on Tools and Methods*. Dublin, 2020a.
- Albers et al. 2020b ALBERS, Albert; RAPP, Simon; FAHL, Joshua; HIRSCHTER, Tobias; REVFI, Sven; SCHULZ, Michael; STÜRMLINGER, Tobias; SPADINGER, Markus: *Proposing a Generalized Description of Variations in Different Types of Systems by the Model of PGE – Product Generation Engineering*. In: *DESIGN 2020 – 16th International Design Conference*, 2020b.

- Albers, Hirschter, Fahl 2020 ALBERS, Albert; HIRSCHTER, Tobias; FAHL, Joshua: *Generic Reference Product Model for Specifying Complex Products by the Example of the Automotive Industry*. In: *Proceedings of TMCE*. Dublin, Ireland, 2020.
- Carniel und Pegoraro 2018 CARNIEL, Carlos Andrei; PEGORARO, Raquel Aparecida (2018): *Metamodel for Requirements Traceability and Impact Analysis on Agile Methods*. In: *Agile Methods*: Springer International Publishing, S. 105–117.
- Delligatti 2014 DELLIGATTI, Lenny: *SysML distilled: A brief guide to the systems modeling language*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2014.
- Holt, Perry, Brownsword 2012 HOLT, J.; PERRY, S.; BROWNSWORD, M.: *Model-Based Requirements Engineering: Institution of Engineering and Technology (Computing and Networks)*, 2012.
- IEEE 1012-2016/Cor 1-2017 Norm IEEE 1012-2016/Cor 1-2017. *IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation*, 2017. S. 78.
- ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Norm ISO/IEC/IEEE 15288:2015. 2015-06-30. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering. System life cycle processes.
- INCOSE 2007 INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE) (Hrsg.): *INCOSE Systems Engineering Vision 2020*, 2007.
- Krusche 2000 KRUSCHE, Thomas: *Strukturierung von Anforderungen für eine effiziente und effektive Produktentwicklung*. In: *Bericht / Institut für Konstruktionslehre, Maschinen-und Feinwerkelemente TU Braunschweig*. Aachen, Mainz, 2000.
- Lykins et al. 2000 LYKINS H., FRIEDENTHAL S., MEILICH C.C.P. A., "4.4.4 Adapting UML for an Object Oriented Systems Engineering Method (OOSEM)", In: Volume10, Issue1 Minneapolis, MN, July 16–20, July 2000, S. 490-497.
- Nejati et al. 2012 NEJATI, Shiva; SABETZADEH, Mehrdad; FALESSI, Davide; BRIAND, Lionel; COQ, Thierry (2012): *A SysML-based approach to traceability management and design slicing in support of safety certification: Framework, tool support, and case studies*. In: *Information and Software Technology* 54 (6), DOI: 10.1016/j.infsof.2012.01.005, 2012, S. 569–590.
- Pohl et al. 2012 POHL, Klaus; HÖNNINGER, Harald; ACHATZ, Reinhold; BROY, Manfred: *Model-Based Engineering of Embedded Systems: The SPES 2020 Methodology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- Renner 2007 RENNER, Ingo: *Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil*. 1. Aufl. München: Hut, 2007.
- Robert Bosch GmbH o.J. Robert Bosch GmbH (Hg.) (o.J.): *Aktuator für Anwendungen im Antriebsstrang*. Online verfügbar unter <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/antriebssysteme/getriebetechnik/aktuator-f%C3%BCr-anwendungen-im-antriebsstrang/> zuletzt geprüft am 26.03.2021.
- Vidal und Villota 2018 VIDAL, Enrique J.; VILLOTA, Elizabeth R.: *SysML as a Tool for Requirements Traceability in Mechatronic Design*. In: *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering - ICMRE 2018*: ACM Press, 2018.
- Wäschle et al. 2020 WÄSCHLE, Moritz; MARTIN, Alex; RADIMERSKY, Aline; BEHRENDT, Matthias; ALBERS, Albert: *SUPPORTING THE MODELLING IN MBSE BY APPLYING PRODUCT GENERATION ENGINEERING USING ELECTRONIC COMPACT ACTUATORS AS AN EXAMPLE*. In: *Design Conference 2020*, 2020.
- Weilkiens et al. 2014 WEILKIENS, Tim; SOLEY, Richard Mark: *Systems Engineering mit SysML/UML: Anforderungen, Analyse, Architektur*. 3., überarb. und aktualisierte Aufl. Heidelberg: dpunkt.verl., 2014.

Integration von Produktportfolios in die funktionsorientierte modellbasierte Systementwicklung

Integration of product portfolios into the function-oriented model-based system development

Christian Wyrwich¹, Georg Jacobs¹, Kathrin Spütz¹, Thilo Zerwas¹, Christian Konrad¹

¹RWTH Aachen University, Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung, Aachen
christian.wyrwich@imse.rwth-aachen.de

Abstract (deutsch): Steigender globaler Wettbewerbsdruck erfordert von Unternehmen des Maschinenbaus die dynamische Anpassung an sich verändernde Marktsituationen. Kunden erwarten, dass Hersteller individuelle Produkte mit der Qualität, in der Lieferzeit sowie zu dem Preis eines Großserienerzeugnisses anbieten. Als Teil dieses Mass-Customization-Trends ist die Verwendung von Produktkonfiguratoren weit verbreitet. Angesichts der zunehmend funktionsorientierten Produktentwicklung und vernetzter komplexer Systeme, gerät der traditionelle regelbasierte Konfigurationsablauf jedoch an seine Grenzen. Das Model-Based Systems Engineering ermöglicht es, über einen funktionsbasierten, interdisziplinären Entwicklungsansatz auch komplexe technische Systeme an individuelle Anforderungen anzupassen. Dieser Beitrag beschreibt, wie vorhandene Portfolioelemente eines etablierten Produktbaukastens über die Verknüpfung mit Prinziplösungen für die flexible funktionsbasierte Produktkonfiguration nutzbar gemacht werden können. Durch die Kopplung des Konfigurators mit dem MBSE-Systemmodell wird die wirtschaftliche Produktkonfiguration der für den Kunden optimal geeigneten Produktvariante möglich.

Keywords (deutsch):

Produktkonfiguration, Model-Based Systems Engineering, Prinziplösung, Wissensmanagement

Abstract (english): Increasing global competitive pressure requires mechanical engineering companies to adapt dynamically to changing market situations. Customers expect manufacturers to offer individual products with the quality, delivery time and the price of a mass-produced product. As part of this Mass-Customization-Trend, the use of product configurators is widespread. However, with increasingly function-oriented product development and complex interlinked technical systems, the traditional rule-based configuration process reaches its limits. Model-Based Systems Engineering makes it possible to adapt even complex technical systems to individual requirements using a function-based interdisciplinary development approach. This contribution describes how existing portfolio elements of an established modular product system can be made usable for flexible function-based product configuration by linking them with principle solutions. By connecting the configurator with the MBSE system model, the economic product configuration of the product variant optimally suited for the customer becomes possible.

Keywords (english):

product configuration, model-based systems engineering, principle solution, knowledge management

1 Einleitung und Motivation

Unternehmen des Maschinenbaus sehen sich zunehmend einem steigenden Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Als Folge des Wandels vom Verkäufer- zum Käufermarkt erwarten die Kunden, dass Hersteller kundenspezifische Produkte mit der Qualität, der Lieferzeit und dem Preis eines Massenproduktes anbieten (Schuh et al. 2010). In der Folge dieses Mass-Customization-Trends, erhöht sich die Variantenanzahl und Produktionslaufzeiten verkürzen sich (Kortmann et al., 2009).

Eine zentrale Rolle innerhalb des Mass-Customization-Konzepts spielen Konfigurationssysteme, deren Anwendung als Produktkonfigurator weit verbreitet ist (Felfering et al., 2014). Meist unterstützt eine grafische Benutzeroberfläche (kurz: GUI) die Konvertierung der kundenseitigen Anforderungen in eine konkrete technische Lösung (Brinkop 2020; Kortmann et al. 2009). Bild 1 zeigt die GUI eines derartigen konventionellen Produktkonfigurators (siehe Kapitel 4).



Bild 1: Konventioneller Produktkonfigurator

Die Grundlage traditioneller Konfiguratoren bilden Produktbaukästen (Liebisch 2014). In den Grenzen eines zuvor definierten Regelwerkes, ermöglicht der Konfigurator die Kombination der Bausteinelemente zu einer Produktvariante (Herrmann et al. 2013; Liebisch 2014). Die Konzeptionierung und der Aufbau eines Produktbaukastens erfordern dabei umfangreiche Vorleistungen (Franke et al. 2002). Diese rentieren sich, wenn der Baukasten Anwendung findet, da die Bedürfnisse des Marktes korrekt vorgedacht wurden.

Sowohl das klassische Vord Denken eines Produktbaukastens, als auch die Anwendung durch einen traditionellen Konfigurator, stellen für moderne mechatronische Produkte jedoch keine geeignete Unterstützung mehr dar. Die Schwierigkeit zur Verwendung traditioneller Produktkonfiguratoren resultiert dabei aus den folgenden zwei Aspekten:

- Moderne technische Systeme mit umfangreichen Elektrik- sowie Softwareanteilen entstehen auf Basis von Funktionen und Produktmerkmalen (engl.: Features). Innerhalb des traditionellen Maschinenbaus erfolgt die Produktentwicklung jedoch vorrangig auf Basis des physischen Produktaufbaus, welcher wiederum nicht explizit mit den Funktionen verknüpft ist (Drave et al. 2020). Diese Lücke gilt es ebenfalls für die Produktkonfiguration zu schließen, um aufgabenorientiert angepasste und gleichzeitig hochkomplexe technische Systeme mit gleichbleibender Produktivität konfigurieren und fertigen zu können (Drossel et al. 2018).
- Unabhängig von zunehmend heterogenen Kundenanforderungen besitzen Produkte nicht mehr notwendigerweise eine feste Systemgrenze. Die Funktionalität passt sich etwa über die Software an das Anwendungsszenario an oder verändert sich mit dem Produktlebenszyklus (Drossel et al. 2018). Ein Vord Denken dieses Verlaufes und der Funktionalitäten im Sinne eines traditionellen Produktbaukastens ist nicht mehr möglich (Drossel et al. 2018; Kaufmann und Pfenning 2014).

Dies gilt umso mehr für Cyber-Physische System (kurz: CPS) als zentralen Trend der Produktentwicklung. CPS erweitern den mechatronischen Verbund von Mechanik, Elektrik und Software um die Kommunikation von Produkten untereinander über das Internet. (Drossel et al. 2018)

2 Anwendungsbeispiel: Forschungsprojekt eLVG

Zur Veranschaulichung wird in diesem Beitrag ein mechatronisches Anwendungsbeispiel betrachtet: Mobile Arbeitsmaschinen wie Traktoren bieten mit der Zapfwelle eine Schnittstelle zur Übertragung mechanischer Leistung auf ein Anbaugerät. Die durchgängige Anwendung des Anbaugeräts im optimalen Betriebsbereich würde eine stufenlose dynamische Drehzahlregelung erfordern (Bergmann und Petri 2017). Aufgrund der mechanischen Getriebeübersetzung zwischen Zapfwelle und Verbrennungsmotor des Traktors, ist die Anpassung der Drehzahl jedoch ausschließlich über eine Änderung der Motordrehzahl umsetzbar. In dem Forschungsprojekt eLVG (Akronym für *elektrisch-leistungsverzweigtes Getriebe*) wurde daher ein Nachrüstmodul entwickelt, das die Variation der Zapfwelldrehzahl etablierter Traktoren erlaubt (siehe Bild 2).

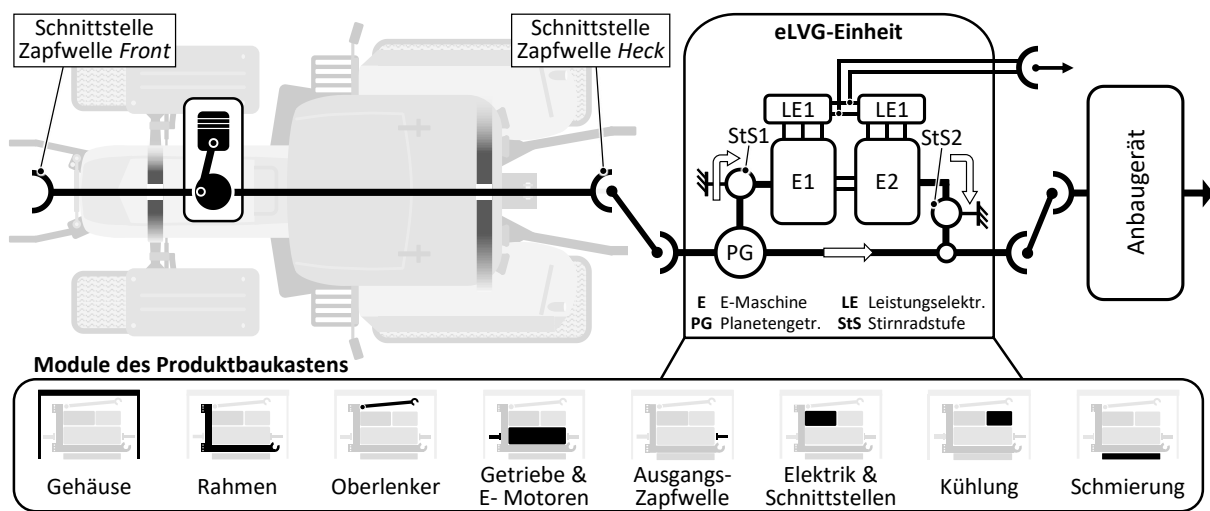


Bild 2: Forschungsprojekt eLVG

Die eLVG-Einheit ist als Produktbaukasten konzipiert, um das System über acht Module an die Kundenbedürfnisse anpassen zu können (siehe Bild 2). Innerhalb des vorliegenden Beitrages wird insbesondere das Modul *Kühlung* des eLVG betrachtet. Das Modul beinhaltet den Kühlkreislauf der E-Maschinen, der Vorschaltgetriebe sowie der Inverter. Die Kühlung ist dabei abhängig von der abzuführenden Wärmemenge als Luft- oder Wasserkühlung ausgeführt. (Gentz et al. 2020)

Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines mechanisch-elektrisch leistungsverzweigten Getriebes, wie es in dem eLVG verwendet wird. Abhängig vom Betriebspunkt wird die zu übertragende Leistung durch ein Planetengetriebe zwischen einem mechanischen und einem variablen Antriebszweig verteilt. Der Variator besteht aus zwei E-Maschinen, die über eine Leistungsbilanz elektrisch miteinander gekoppelt sind: Die E-Maschine im Generatorbetrieb (hier: E1) erzeugt die elektrische Leistung für die motorisch arbeitende E-Maschine (hier: E2). (Gentz et al. 2020)

3 Stand der Technik: Produktkonfiguratoren

Produktkonfiguratoren stellen Softwareanwendungen dar, welche die individualisierte Massenfertigung (engl.: Mass Customization) unterstützen und beherrschbar machen (Brinkop 2020). Unter Mass Customization wird die Anpassung von Produkten an kundenindividuelle Bedürfnisse verstanden, ohne auf wirtschaftliche Vorteile der Massenfertigung zu verzichten (Rogoll und Piller 2003). Produktkonfiguratoren bilden damit das Bindeglied zwischen individuellen Kundenanforderungen und dem Produktprogramm des Herstellers (Göbel 2009). Der Konfigurator basiert meist auf einem modularen Produktbaukasten und ermöglicht, innerhalb der Grenzen eines vordefinierten Regelwerkes, die Zusammensetzung der enthaltenen Bausteine zu einer Produktvariante. Diese Verknüpfungsregeln garantieren, dass die konfigurierten Produkte die

notwendige Funktion erfüllen, der Unternehmensausrichtung am Markt folgen sowie wirtschaftlich produziert werden können (Liebisch 2014; Ehrlenspiel 2014).

3.1 Anforderungen

Als Vermittler zwischen den Bedürfnissen des Kunden und den Unternehmensinteressen, vermittelt ein Produktkonfigurator zwischen zwei Sichtweisen (Göbel 2009). Im Folgenden werden wesentliche Anforderungen an Produktkonfiguratoren aufgeführt, die sich aus diesen Perspektiven ergeben.

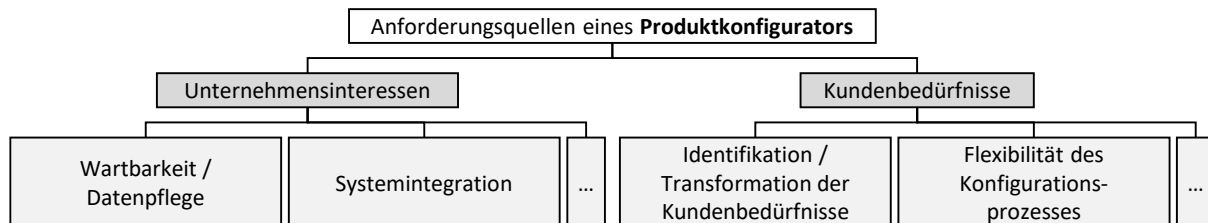


Bild 3: Quellen der Anforderungsermittlung eines Produktkonfigurators

- *Wartbarkeit / Datenpflege:* Lieferengpässe, Modellwechsel oder das Marktverhalten können eine Neuausrichtung des Produktbaukastens erfordern. Neben Aktualisierungen der Software, muss daher die Möglichkeit zur Wartung der Baukastenelemente sowie der Verknüpfungsregeln vorgesehen werden (Liebisch 2014).
- *Systemintegration:* Nach Liebisch kann ein Produktkonfigurator erst sinnvoll eingesetzt werden, wenn dieser in existierende Prozesse und Systeme eingebettet werden kann (Liebisch 2014). Durch die Anbindung an das Produktdatenmanagement (PDM), das Enterprise Resource Planning (ERP) oder das Customer-Relationship-Management (CRM) können dynamische Informationen wie die Lieferzeit in den Konfigurationsprozess integriert werden.
- *Identifikation / Transformation der Kundenbedürfnisse:* Kunden sind sich ihrer konkreten Bedürfnisse häufig nicht bewusst (Göbel 2009). Tiihonen gibt an, dass bis zu 80% der Kundenanforderungen unvollständig oder inkonsistent sind (Tiihonen et al. 1996). Nach Möglichkeit unterstützt der Konfigurator die Erstellung der Produktvariante durch Lösungsvorschläge und übersetzt die Anforderungen in technische Lösungen (Liebisch 2014).
- *Flexibilität des Konfigurationsprozesses:* Bei der Verwendung eines interaktiven Produktkonfigurators kann die Reihenfolge der Merkmalsauswahl an die Prioritäten des Anwenders angepasst werden (Schneeweiss und Hofstedt 2013). Diese Flexibilität erfordert die stetige Überprüfung der Funktionsfähigkeit sowie der Herstellbarkeit der Produktvariante durch die hinterlegten Verknüpfungsregeln (Göbel 2009). Für die Identifikation einer vorgedachten Produktvariante, müssen dabei ausreichend Merkmale definiert werden.

3.2 Integrationsgrad

Bei der Einbettung eines Produktkonfigurators in die bestehende Systemlandschaft werden die drei folgenden Integrationsgrade unterschieden (Krug 2010; Liebisch 2014; Göbel 2009):

- *Nicht-integrative* Konfiguratoren können nicht in andere Systeme integriert werden und besitzen keine Schnittstellen zu anderen Anwendungen. Diese Stand-Alone-Lösungen erfordern daher einen erhöhten Wartungsaufwand, da keine Daten aus anderen Systemen übernommen werden.
- *Datenintegrative* Konfiguratoren nutzen gemeinsam verwendete Informationen wie Baukastendaten des ERP-Systems oder Kundeninformationen aus dem CRM-System.
- Ist neben der Daten- auch die direkte Funktionsintegration in bestehende Anwendungen möglich, liegt ein *anwendungsorientiertes* System vor. Diese Konfiguratoren können externe Funktionen aus etwa dem CAD aufrufen und neue Komponenten für die Angebotserstellung zeichnen.

Inkompatible Datenformate der Subsysteme verhindern jedoch eine durchgängige Ontologie und fehlende Schnittstellen erschweren die umfangreiche Einbindung in der Praxisanwendung, sodass nützliches Wissen nicht genutzt werden kann (Kaufmann und Pfenning 2014; Rogoll und Piller 2003).

3.3 Wissensbasis

Die Wissensbasis umfasst neben den Baukastenelementen das Regelwerk, welches dem Konfigurator durch formalisierte Abhängigkeiten die Erstellung individueller Produktvarianten ermöglicht (Blecker et al. 2004). Es werden drei grundsätzliche Ansätze unterschieden:

- *Fallbasierte Systeme:* Fallbasierte Systeme durchsuchen eine Bibliothek bereits erfolgter Konfigurationen und adaptieren eine Lösung, die bereits zur Lösung einer Aufgabe mit möglichst vergleichbaren Anforderungen entwickelt wurde (Blecker et al. 2004). Aufgrund des Vorgehens bieten fallbasierte Systeme nur ein geringes Innovationspotential (Göbel 2009).
- *Regelbasierte Systeme:* Regelbasierte Systeme nutzen formalisierte Konditionalsätze, bestehend aus einem Bedingungs- und einem Aktionsteil (Göbel 2009). Aufgrund der erschwerten Wartung bei Änderung des Konfigurationswissens, wird die alleinige Verwendung dieser Wenn-Dann-Beziehungen für die industrielle Anwendung von Felfering nicht empfohlen (Felfering et al. 2014).
- *Modellbasierte Systeme:* Den wesentlichen Vertreter der modellbasierten Systeme stellen Constraints dar. Diese beschreiben mathematische Ausdrücke, die physikalische Abhängigkeiten zwischen Elementen definieren (Drave et al. 2020). Um die Nachvollziehbarkeit sowie Wartbarkeit constraint-basierter Systeme zu erhöhen, wurden mit der Feature-Modellierung (siehe Bild 4) und UML-Diagrammen grafische Darstellungsweisen entwickelt, die heutzutage in Produktkonfiguratoren zu industriellem Einsatz kommen (Felfering et al. 2014). Bild 4 zeigt den Auszug eines Feature-Diagramms für das eLVG innerhalb eines klassischen Konfigurators.

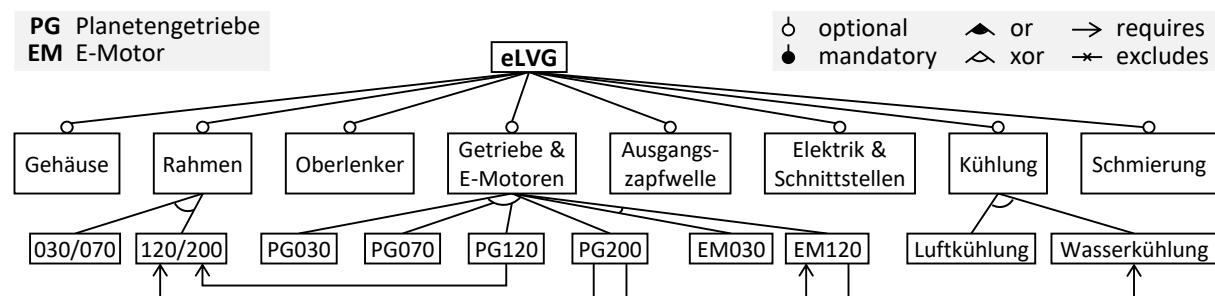


Bild 4: Feature-Diagramm des eLVG in traditioneller Konfiguratoranwendung

4 Modellbasierte funktionsorientierte Systementwicklung

Die Betrachtung der technischen Funktion bildet die Basis zur Systematisierung des Produktentwicklungsprozesses (Koller und Kastrup 1998; Pahl et al. 2007). Die Erstellung moderner mechatronischer Systeme erfordert die Berücksichtigung von Mechanik, Elektrotechnik, Software sowie deren Zusammenwirken. Um die Erfüllung der geforderten Funktionen testen zu können, muss das Produkt als Gesamtsystem betrachtet werden. Diesen domänenübergreifenden Entwicklungsansatz beschreibt das *Systems Engineering* (kurz: SE). (Kaufmann und Pfenning 2014)

Die moderne Produktentwicklung entfernt sich zunehmend von traditionellen dokumentenbasierten Ansätzen und verwendet eine Vielzahl disziplinspezifischer Modelle, die jeweils eine Sichtweise auf das Produkt darstellen (Kaufmann und Pfenning 2014). Durch die Schaffung eines interdisziplinären Systemmodells werden im *Model-Based Systems Engineering* (kurz: MBSE) sämtliche Modelle und Informationen des Entwicklungsprozesses zentral verwaltet und funktional miteinander verknüpft (Albers et al. 2015). Das Systemmodell als Kernelement des MBSE bildet damit eine formalisierte

Materialien sowie die Gestaltung der Geometrie beeinflusst werden. Dieser Zusammenschluss aus physikalischem Effekt, Geometrie und Werkstoff wird als *Prinziplösung* bezeichnet (Pahl et al. 2007). Prinziplösungen beschreiben somit, wie ein physikalischer Effekt, durch eine definierte Geometrie und festgelegte Materialeigenschaften eine Funktion erfüllt (Drave et al. 2020).

Drave et al. entwickeln einen Ansatz zur Formalisierung der Prinziplösungen mit der SysML (siehe Bild 6) und schaffen die Basis zur Nutzung des Potentials von Konstruktionskatalogen in der funktionsbasierten Produktentwicklung (Drave et al. 2020). Die Formalisierung des physikalischen Effektes sowie der Geometrie ermöglicht zudem die Anknüpfung von externen Modellen an die Prinziplösung. Innerhalb des Beispiels aus Bild 6 sind dies eine MATLAB-Funktion zur Berechnung des hydrodynamischen Verhaltens eines Pumpenrades, sowie das dazugehörige CAD-Modell.

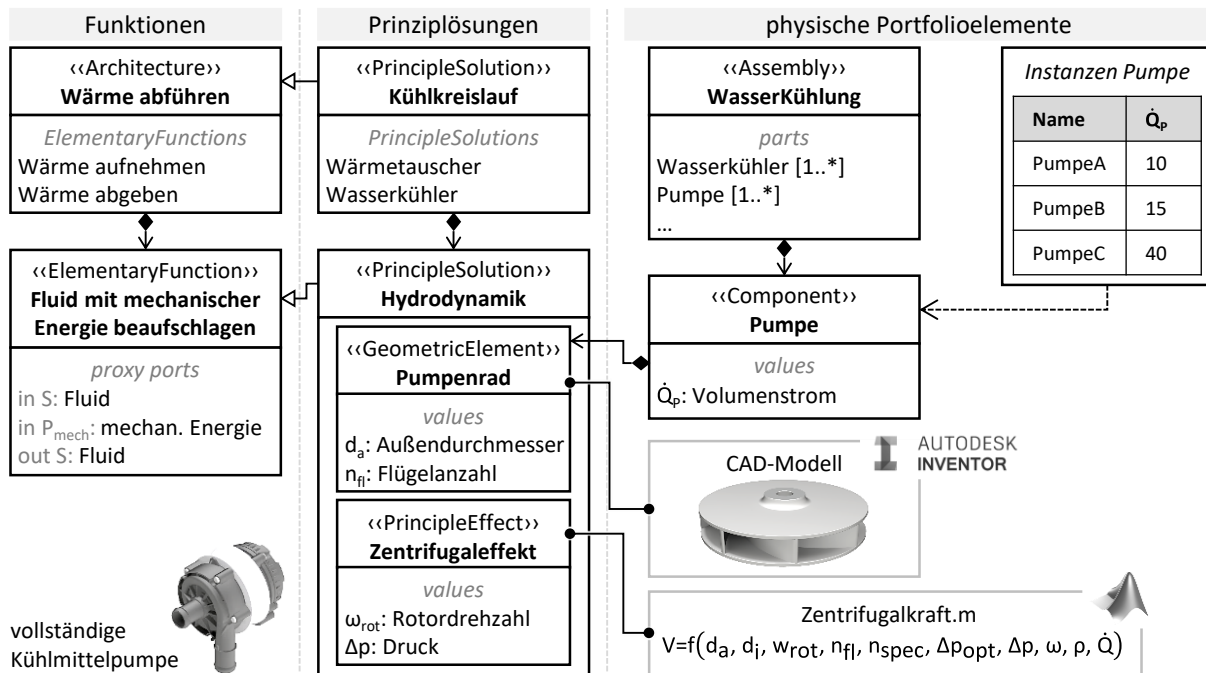


Bild 6: Funktionsorientierte Festlegung der Produktparameter in MBSE (nach Drave et al. 2020) und Verknüpfung zu MATLAB-Modell sowie CAD-Modell

5 Forschungsbedarf

Für Drossel ist eine umfassende fachdisziplinübergreifende Systembetrachtung für die Entwicklung moderner technischer Systeme unumgänglich (Drossel et al. 2018). Aktuelle Ansätze des *Model-Based Systems Engineering* (kurz: MBSE) wie *SYSMOD* (Weilkiens 2016), *FAS4M* (Moesser et al. 2016) und *SysML4FMArch* (Drave et al. 2020) fokussieren dabei den Einsatz von MBSE im Produktentwicklungsprozess. Diese Ansätze ermöglichen durch die funktionsbasierte Wissensmodellierung die Verbindung der Fachabteilungen sowie die durchgängige Verknüpfung von Kundenanforderungen und externer Varianz (Drave et al. 2020). Albers et al. zeigen zudem das Potential von MBSE innerhalb der Entwicklung von Produktbaukästen am Beispiel der Automobilindustrie (Albers et al. 2015).

Obwohl Produktkonfiguratoren im Kontext von mechatronischen Produkten bis hin zu CPS eine zunehmend funktionsorientierte Beschreibung der Produktmerkmale erfordern, existieren bisher keine Beiträge zur Abbildung von Produktkonfiguratoren im Kontext MBSE (Seiler et al. 2019). Als Ansatzpunkt für die effiziente Nutzung von MBSE für etablierte Produktbaukästen wird in dem vorliegenden Beitrag daher die Frage beantwortet: „Wie können Konfigurationsanforderungen durch die Verwendung bestehender Portfolioelemente funktionsorientiert bewertet werden?“. Es werden die folgenden Forschungshypothesen formuliert:

1. Durch die durchgängige Verknüpfung von bestehenden Portfolioelementen mit Prinziplösungsmodellen kann die Grundlage für die funktions- und modellbasierte Konfiguration geschaffen werden. Portfolioelemente beschreiben hier Komponenten, Baugruppen und Module.
2. Die durchgängige Verknüpfung von Prinziplösungen mit den Portfolioelementen ermöglicht durch eine funktionsbasierte Konfiguration die flexible Berücksichtigung kundenindividueller Anforderungen und öffnet damit den Lösungsraum. Die Konfiguration basiert auf funktionalen Zusammenhängen, anstatt statischen vorgedachten Konfigurationsregeln.

6 Lösungsansatz und Anwendung

Um die Anforderungen an funktionsbasierte Produktkonfiguratoren erfüllen zu können, erfolgt ein Wechsel der Entwicklungsumgebung für den Konfigurator zu einem MBSE-Systemmodell. Wie in Bild 7 dargestellt, werden kundenseitige Anforderungen in Funktionen überführt und diese jeweils durch Prinziplösungen umgesetzt. Die Portfolioelemente des etablierten Produktbaukastens werden mit den Prinziplösungen verknüpft, sodass der Übergang zu einem konkreten physischen Funktionsträger erfolgt. Dabei wird das SysML-Sprachprofil *SysML4FMArch* angewendet. Im Folgenden wird der Lösungsansatz anhand einer auszugsweisen Konfiguration des Fallbeispiels eLVG erläutert.

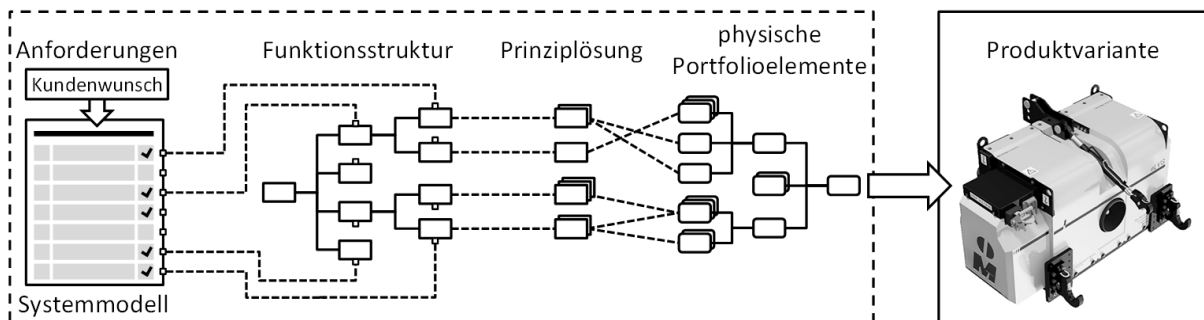


Bild 7: Konzept der funktionsbasierten Produktkonfiguration

Die funktionsbasierte Produktkonfiguration beginnt mit der Aufnahme funktionaler Kundenanforderungen. Der Einsatz des eLVG erfolgt in einem landwirtschaftlichen Arbeitsgespann zwischen Traktor und Anbaugerät (siehe Bild 2). Daher sind für die optimale Konfiguration die zur Verfügung stehende Leistung des Traktors und die erforderliche Leistung für den Anbaugeräte-Betrieb relevant. Der modellbasierte Konfigurator beinhaltet eine umfassende Datenbank zur Auswahl des verwendeten Traktors, sodass der Anwender nicht notwendigerweise die Leistungswerte seines Fahrzeuges kennen muss. Weitere Konfigurationsanforderungen resultieren aus der Auswahl der Anbaugeräte, die mit dem eLVG betrieben werden. Für das Einsatzgebiet erfolgt zudem die Abfrage der maximalen Außentemperatur (hier: 40 °C), da diese die Kühlung des eLVG beeinflusst (siehe Bild 8).

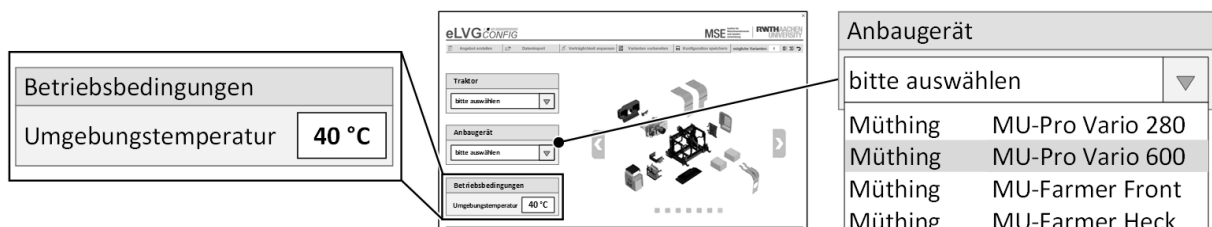


Bild 8: Konfigurationsschritt 1: Aufnahme funktionaler Kundenanforderungen

Durch die funktionale Betrachtungsweise wird der Lösungsraum für kundenindividuelle Produktvarianten geöffnet. Dieser muss durch den Produktkonfigurator wieder geschlossen werden, um eine konkrete technische Lösung definieren zu können. Um die Validität des Systemmodells zu jeder Zeit gewährleisten zu können, ist die Abfolge des Konfigurationsprozesses vorgegeben. Die

vollständig freie Konfiguration stellt hier einen Ausblick dar. Grundsätzlich können Varianten unterschiedlicher Leistungsgrößen einer *Luft-* oder *Wasserkühlung* ausgewählt werden. Im Folgenden wird der Konfigurationsprozess von den funktionalen Anforderungen des Landwirtes bis zur konkreten Kühlungsvariante schrittweise durchlaufen. Sämtliche Konfigurationsentscheidungen werden basierend auf Prinziplösungsmodellen getroffen:

1. Die Angaben des Landwirtes zu Traktor und Anbaugerät (siehe Bild 8) erfordern die Nutzung eines leistungsverzweigten Getriebes mit zwei E-Maschinen mit einer Leistung von jeweils 83 kW.
2. Für die sichere Funktionsfähigkeit der E-Maschinen, Stirnradstufen sowie der Leistungselektronik dürfen sich diese bis maximal 75°C erwärmen. Um eine ausreichende Kühlung zu bieten, darf die Temperatur des Kühlmittels höchstens $T_{fi} = 65^\circ\text{C}$ betragen. Beide Grenzwerte sind als Anforderungen innerhalb des Systemmodells hinterlegt.

Für die gesamte abzuführende Wärmeleistung ergibt sich für das Beispiel $P_{\text{therm.ges.}} = 10\text{ kW}$. Vereinfachend wird $P_{\text{therm.ges.}}$ als Summe der einzelnen Komponenten berechnet (siehe auch Bild 10). Die Auslegung soll künftig durch den Anschluss detaillierter Wärmemodelle präzisiert werden. Da durch die Luftkühlung maximal $P_{\text{max}} = 5\text{ kW}$ Wärmeleistung abgeführt werden können (siehe Bild 9), wird der Lösungsraum auf eine aktive Wasserkühlung mit $P_{\text{max}} = 20\text{ kW}$ eingeschränkt.

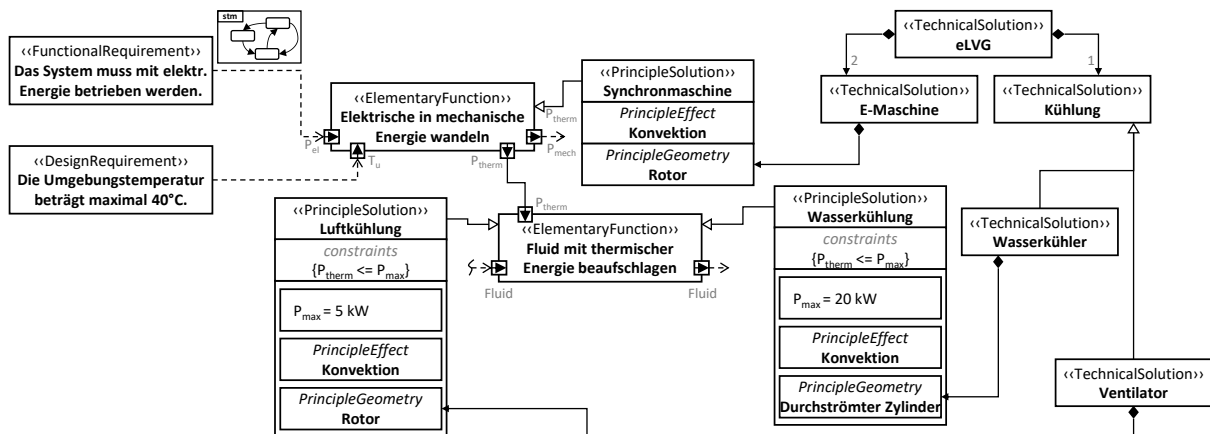


Bild 9: Konfigurationsschritt 2: Auszug des eLVG-Systemmodells mit Auswahl der Wasserkühlung

Bild 5 zeigt in der funktionalen Dekomposition einer eLVG-Wasserkühlung, welche Funktionen grundsätzlich realisiert werden müssen. Als Ergänzung dazu stellt Bild 10 den Fluss des Kühlmediums dar. Das Kühlmittel (hier: Wasser-Glykol-Gemisch) durchströmt zuerst die wärmesensiblen Inverter der Leistungselektronik; dies stellt eine Empfehlung des Herstellers dar. Im Anschluss folgen die E-Maschinen sowie die Stirnradstufen des elektrischen Variators der Leistungsverzweigung.

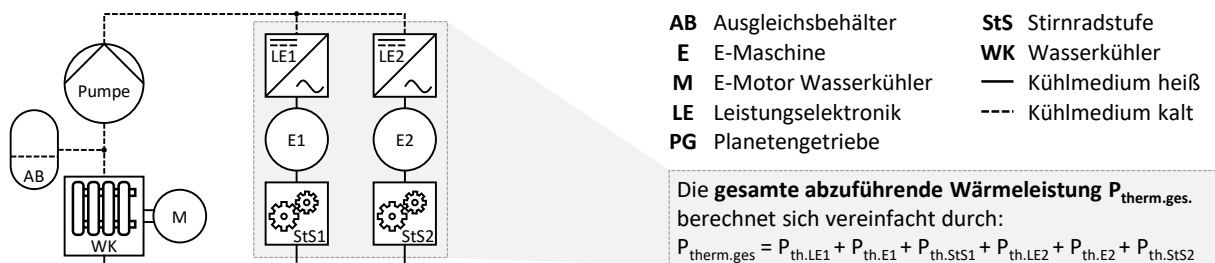


Bild 10: Kühlkreislauf der eLVG-Wasserkühlung

Für die Zusammenstellung der Wasserkühlung stehen in dem eLVG-Baukasten die in Bild 11 dargestellten Portfolioelemente zur Verfügung. Auf Basis der in dem Systemmodell hinterlegten technischen Anforderungen des Kühlkreislaufes und in Kombination mit den funktionalen Kundenwünschen schränkt der Konfigurator die geeigneten Produktvarianten weiter ein:

- Als Randbedingung wurde auch die maximale Umgebungstemperatur im Einsatzgebiet von $T_u = 40\text{ °C}$ aufgenommen (siehe Bild 8). Mit der gesamten abzuführenden Wärmeleistung von $P_{\text{therm.ges}} = 10\text{ kW}$ sowie der maximal zulässigen Kühlmitteltemperatur von $T_{\text{fi}} = 65\text{ °C}$ ergibt sich eine spezifische Kühlerleistung von $P_K = 0,4\text{ kW/°C}$ (siehe Bild 11). Diese Anforderung kann lediglich von *KühlerC* erfüllt werden.
- Für die notwendige spezifische Kühlleistung ist nach Kennfeld des Kühlers ein Volumenstrom von $\dot{Q}_p = 35\text{ L/min}$ erforderlich. Dieser kann ausschließlich durch *PumpeC* erfüllt werden (siehe Bild 11), sodass diese ausgewählt wird. Alle Pumpen basieren auf der identischen Prinziplösung. Erst durch die Instanziierung mit verschiedenen Parametersets ergeben sich drei konkrete Pumpen mit spezifischen Eigenschaften.

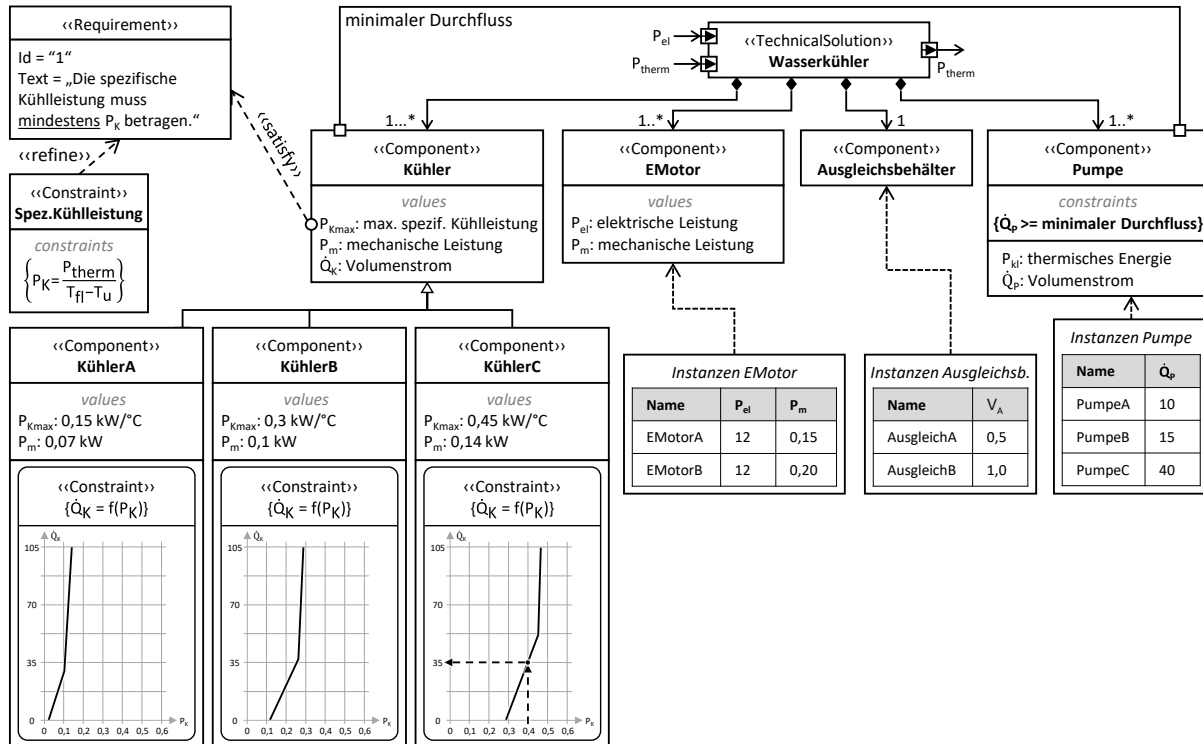


Bild 11: Konfigurationsschritte 3, 4 und 5: Portfolioelemente zur Realisierung der Wasserkühlung

- Beide Motoren erfüllen die notwendigen Leistungswerte zum Antrieb des gewählten Lüfters. Auch stellen beide Ausgleichsbehälter das notwendige Volumen für den funktionssicheren Betrieb des eLVG bereit. Um die am besten geeignete Produktkonfiguration identifizieren zu können, sind daher zusätzliche Bewertungskriterien erforderlich. In einem künftigen Entwicklungsschritt soll daher eine technisch-wirtschaftliche Bewertung mit einem Kostenmodell integriert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Angesichts der zunehmend funktionsorientierten Produktentwicklung und komplexer vernetzter Systeme kommen konventionelle Konfiguratoren an ihre Grenzen. Durch die Verknüpfung der für den Konfigurator nutzbaren Portfolioelemente mit den Prinziplösungen eines MBSE-Systemmodells ist es möglich, Konfiguratoren funktions- sowie modellbasiert weiterzuentwickeln.

Dieser Beitrag beschreibt die Verknüpfung von Portfolioelementen eines etablierten Produktbaukastens mit Prinziplösungen, um diese für die funktionsbasierte Produktkonfiguration nutzbar zu machen. Auf Basis modellbasiert abgebildeter funktionaler Zusammenhänge und Prinziplösungen identifiziert der Konfigurator eigenständig die am besten geeignete Produktvariante für die vorgegebenen Kundenwünsche. Die detaillierte Berücksichtigung von Anforderungen und der

resultierenden Funktionen öffnet dabei den Lösungsraum für flexible kundenspezifische Produktvarianten und unterstützt die Absicherung der Funktionsfähigkeit auf Basis physikalischer Modelle. Dabei kann die technische Funktionsfähigkeit jederzeit validiert werden. Diese Absicherung kann zukünftig durch die Integration von Kostenmodellen, Risikoanalysen und die umfangreiche Nutzung von Simulations- sowie CAD-Modellen erweitert werden.

Der Konfigurationsprozess wird zunächst in einer verprobten Reihenfolge durchlaufen. Die Erstellung einer Produktvariante soll zukünftig jedoch individuell erfolgen. Dieses offene Vorgehen erfordert die Definition eines Workflows zur Sicherstellung eines validen Systemmodells. In der gezeigten Ausführung des Configurators wird eine spezialisierte Produktvariante erzeugt. Durch die zeitgleiche Betrachtung sowie Gewichtung auch mehrerer Use-Cases, sollen in einer kommenden Ausbaustufe Produktvarianten konfiguriert werden können, die für vielfältige Betriebsphasen geeignet sind.

Literatur

- Albers et al. 2015 ALBERS, Albert; SCHERER, Helmut; BURSAC, Nikola; RACHENKOVA, Galina: *Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies*. In: *Procedia CIRP* 36 (2015), S. 129-134.
- Bergmann und Petri 2017 BERGMANN, Dirk; PETRI, Sebastian: *Ganzheitliche Regelungskonzepte für Traktoren*. In: *ATZ Offhighway* 10 (2017), Nr. 4, S. 32-37.
- Blecker et al. 2004 BLECKER, Thorsten; ABDELKAFI, Nizar; KREUTER, Gerold; FRIEDRICH, Gerhard: *Product Configuration Systems: State of the Art, Conceptualization and Extensions*. In: *Génie logiciel & artificielle. Eight Maghrebien Conference on Software Engineering and Artificial Intelligence*. Sousse, Tunisia: Centre de Publication Universitaire, 2004, S. 25-36
- Brinkop 2020 BRINKOP, Axel: *Marktführer Produktkonfiguration (2020)*, Nr. 44, abrufbar unter: <https://brinkop-consulting.com/guide/marktfuehrer.pdf>
- Drave et al. 2020 DRAVE, Imke; RUMPE, Bernhard; WORTMANN, Andreas; BERROTH, Joerg; HOEPFNER, Gregor; JACOBS, Georg; SPUETZ, Kathrin; ZERWAS, Thilo; GUIST, Christian; KOHL, Jens: *Modeling Mechanical Functional Architectures in SysML*. In: *Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (2020)*, S. 79–89.
- Drossel et al. 2018 DROSSEL, Welf-Guntram; IHLENFELDT, Steffen; LANGER, Tino; DUMITRESCU, Roman: *Cyber-Physische Systeme. Forschen für die digitale Fabrik*. In: Neugebauer, Reimund (Hrsg.): *Digitalisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018.
- Ehrlenspiel et al. 2014 EHRENSPIEL, Klaus; KIEWERT, Alfons; LINDEMANN, Udo; MÖRTEL, Markus: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- Felfering et al. 2014 FELFERING, Alexander; HOTZ, Lothar; BAGLEY, Claire; TIHONEN, Juha: *Knowledge-Based Configuration. From Research to Business Cases*. Burlington, Massachusetts: Morgan Kaufmann, 2014.
- Franke et al. 2002 FRANKE, Hans-Joachim; HESSELBACH, Jürgen; HUCH, Burkhard; FIRCHAU, Norman: *Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung*. München, Wien: Hanser, 2002.
- Gentz et al. 2020 GENTZ, Christian; JACOBS, Georg; WYRWICH, Christian: *Elektrisch-Mechanisch leistungsverzweigte Getriebe (eLVG) als modularer Baukasten für mobile Arbeitsmaschinen und -geräte: gemeinschaftlicher Schlussbericht zum Vorhaben (2020)*

- Göbel 2009 GÖBEL, Andreas: *Internationalisierung in Produktkonfiguratoren – Anforderungen und Konzepte für die Datenhaltung*. Universität Jena, Lehrstuhl für Datenbanken und Informationssysteme, Diplomarbeit, 2009.
- Kaufmann und Pfenning 2014 KAUFMANN, Uwe; PFENNING, Michael: Was die Produkt- von der Softwareentwicklung lernen kann – durchgängige Integration disziplinspezifischer Modelle durch den Einsatz von Modellierungssprachen. In: *Tag des Systems Engineering*. München: Hanser, 2014, S. 329-337.
- Koller und Kastrup 1998 KOLLER, Rudolf; KASTRUP, Norbert: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- Konrad et al. 2019 KONRAD, Christian; JACOBS, Georg; RASOR, Rik; RIEDEL, Ricarda; KATZWINKEL, Tim; SIEBRECHT, Justus: Enabling complexity management through merging business process modelling with MBSE. In: *Procidea CIRP 84*. Amsterdam: Elsevir, 2019, S. 451-456.
- Kortmann et al. 2009 KORTMANN, Daniel; KLINK, Hilmar; WÜPPING, Josef: Strategien zur profitablen Variantenkonfiguration. In: *International Journal of Interoperability in Business Information Systems, Issue 3(2)*. Oldenburg: University of Oldenburg, 2009, S. 57-60.
- Liebisch 2014 LIEBISCH, Matthias: *Aspektororientierte Datenhaltung in Produktkonfiguratoren – Anforderungen, Konzepte und Realisierung*. Universität Jena, Dissertation, 2014.
- Moeser et al. 2016 MOESER, Georg; GRUNDEL, Martin; WEILKIENS, Tim; KÜMPEL, Stephan; KRAMER, Christoph; ALBERS, Albert: Modellbasierter mechanischer Konzeptentwurf: Ergebnisse des FAS4M-Projektes. In: *Tag des Systems Engineering*. München: Hanser, 2016, S. 419-428.
- Pahl et al. 2007 PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Engineering Design – A Systematic Approach*. 3. Aufl. London: Springer, 2007.
- Rogoll und Piller 2003 ROGOLL, Tim; PILLER, Frank: *Konfigurationssysteme für Mass Customization und Variantenproduktion: Marktstudie 2003 – Strategie, Erfolgsfaktoren und Technologie von Systemen zur Kundenintegration*. 2. Aufl. München: ThinkConsult, 2003.
- Schneeweiss und Hofstedt 2013 SCHNEEWEISS, Denny; HOFSTEDT, Petra: FdConfig: A Constraint-Based Interactive Product Configurator. In: *Applications of Declarative Programming and Knowledge Management*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 239-255.
- Schuh et al. 2010 SCHUH, Günther; ARNOSCHT, Jens; LENDERS, Michael; RUDOLF, Stefan: *Effizienter innovieren mit Produktbaukästen: Studienergebnisse und Leitfaden – ein Beitrag zu Lean Innovation*, 2010.
- Seiler et al. 2019 SEILER, Florian; SCHWEDE, Lea-Nadine; KRAUSE, Dieter: MBSE-basierte Produktkonfiguratoren zur Analyse der Modularisierung bei der Entwicklung modularer Baukastensysteme, Bd. 2. In: *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design*, Dresden: TUDpress, S. 55-70.
- Tiihonen et al. 1996 TIIHONEN, Juha; SOININEN, Timo; SULONEN, Reijo: State-of-the-Practice in Product Configuration: A survey of 10 cases in the Finnish Industry. In: *Knowledge Intensive CAD*. London: Chapman & Hall, 1996, S. 95-114.
- Weilkiens 2016 WEILKIENS, Tim: *SYSMOD – The Systems Modeling Toolbox: Pragmatic MBSE with SysML*. 2. Aufl. Fredesdorf: MBSE4U, 2016.

Integration von Mission Profiles in die modellbasierte Systementwicklung zur Förderung der Kollaboration in automobilen Wertschöpfungsnetzen

Supporting Collaboration in Automotive Value-Networks by Integrating Mission Profiles into Model-Based Systems Engineering Development

Damun Mollahassani^{1*}, Sven Forte¹, Jens C. Göbel¹

¹Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Virtuelle Produktentwicklung, Kaiserslautern

*mollahassani@mv.uni-kl.de

Abstract (deutsch): Durch die informationstechnische Vernetzung, die Integration smarter Services und die zunehmende Elektrifizierung werden moderne Fahrzeuge immer mehr zu smarten Produkten. Mit der steigenden Komplexität und Interdisziplinarität der Produkte gehen auch grundlegend neue Herausforderungen für das Engineering einher. Hierbei kommt der durchgängigen Integration von Mikroelektronikentwicklungen in übergreifende Prozesse des Modell-basierten Systems Engineerings eine Schlüsselrolle zu. Ziel des in diesem Beitrag vorgestellten Ansatzes zur Integration von Mission Profiles in den Systementwicklungsprozess ist es, durch ganzheitliche, um Nutzungskontext und -umgebungsinformationen erweiterte Anforderungsmodelle kollaborativ zu entwickeln und auszutauschen. Dieser Ansatz fokussiert auf unternehmensübergreifende Kollaborationen in automobilen Wertschöpfungsnetzen, beginnend in der Innovations-Roadmapping Phase bis in die frühen Entwurfsphasen der Produktentwicklung. Die informationstechnische Grundlage für die Integration, basiert auf der Systems Modelling Language.

Keywords (deutsch):

Mission Profiles; SysML; Systems Engineering; MBSE; Mikroelektronik

Abstract (english): Through information technology networking, the integration of smart services and increasing electrification, modern vehicles are increasingly becoming smart products. The increasing complexity and interdisciplinarity of the products also bring with it fundamentally new challenges for engineering. The continuous integration of microelectronics developments into comprehensive processes of model-based systems engineering plays a key role here. The goal of the approach for the integration of mission profiles into the system development process presented in this paper is to collaboratively develop and exchange holistic requirements models extended by usage context and environment information. This approach focuses on cross-company collaborations in automotive value networks starting in the innovation roadmapping phase and extending into the early design phases of product development. The information technology integration is based on the Systems Modelling Language.

Keywords (english):

Mission Profiles; SysML; Systems Engineering; MBSE; Microelectronics

1 Einleitung

Die informationstechnische Vernetzung, die Integration smarter Services und die zunehmende Elektrifizierung ermöglichen Innovationen, die grundlegend über die klassischen, produktbezogenen Funktionsumfänge und das bisherige Angebot von Automobilanbietern hinaus gehen (Davenport 2019). Moderne Fahrzeuge wandeln sich immer stärker zu smarten Produkten (Göbel und Eickhoff 2020; Abramovici et al. 2017), deren Komplexität, Interdisziplinarität und kollaborative Entstehung eine immer größere Herausforderung für die Engineering-Prozesse darstellt (Paquin 2014). Eine Schlüsselrolle für heutige und künftige Fahrzeugangebote kommt der Entwicklung von Mikroelektronikkomponenten als integraler Bestandteil des interdisziplinären Systems Engineering zu. Bei der Entwicklung von Mikroelektronikkomponenten ist meist die Entwicklungsdauer bzw. die Time-to-Market ein großes Problem, da die hierfür notwendigen wertschöpfungsketten-übergreifenden Kollaborationsprozesse sowie die Komponentenerprobung aktuell sehr viel Zeit beanspruchen. Die Entwicklungsdauer neuer Mikroelektronikkomponenten (z.B. neuer Sensoren) übersteigt die Entwicklungsdauer des Gesamtfahrzeugs häufig um mehrere Jahre. Durch den Wandel hin zu smarten Fahrzeugen und branchen-übergreifenden Dienstleistungsangeboten, verändern sich auch die Komplexität und der Umfang der Anforderungen an diese Produkte. Es werden neue Kollaborations- und Austauschmöglichkeiten hinsichtlich nutzungskontext-bezogener Anforderungen in spezifischen Produktnutzungsumgebungen benötigt, die über bestehende Requirements Engineering Methoden hinaus gehen (GENIAL! 2018). Robustheits Validierungs Methoden verfolgen das Ziel, diese Lücke zu schließen. Dabei werden Aussagen bezüglich Risiko- und Zuverlässigkeitsaspekten in Hinblick auf reale Anwendungen und Belastungsbedingungen berücksichtigt (ZVEI 2013; ZVEI 2015). Der Mission Profiles (MP)-Ansatz ermöglicht eine Erweiterung des Requirements Engineering, über klassische Bauteilspezifizierende Anforderungen hinaus. Kontextbezogene, dynamische Lastfälle bzw. Lastprofile von Mikroelektronikkomponenten werden mathematisch-physikalisch beschrieben und können weitgehend standardisiert in automobilen Wertschöpfungsnetzen ausgetauscht werden (Burger et al. 2014).

2 Robustheit Validierung auf der Grundlage von Mission Profiles

Durch den zunehmenden Einsatz von Assistenzfunktionen und -systemen für autonome Fahrfunktionen werden immer mehr Mikroelektronikkomponenten benötigt, insbesondere um Sicherheitsfunktionen zu realisieren (Tille 2016). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Erprobung und die Robustheit dieser mikroelektronischen Komponenten. Nach ISO 24765:2010 (ISO/IEC/IEEE 24765 2010) beschreibt Robustheit die sichere und zuverlässige Funktion der Komponenten in speziellen Kontext- und Umweltbedingungen. Dies bedeutet auch die Berücksichtigung von speziellen Nutzungsszenarien, wie zum Beispiel geospezifischen Lastfällen. Unter geospezifischen Lastfällen versteht man den Einsatz der Komponente an verschiedenen Orten der Welt mit unterschiedlichen Umwelteigenschaften, beispielweise in der Sahara Wüste oder in der Tundra in Sibirien. Ziel ist es, für verschiedene dynamische Nutzungsszenarien bestimmte Verfügbarkeiten des Produktangebotes zu gewährleisten. Lastfälle und Lastkollektive werden in Mission Profiles durch Properties beschrieben. Darüber hinaus beinhalten MP zusätzlich zu singulären Lastkollektiven auch Korrelationen mehrerer Lastkollektive, welche spezifischen Anwendungsszenarien und Nutzerprofilen zugeordnet sind (Burger et al. 2014). Die Gesamtheit der in MP zusammen geführten Lastinformationen kann auch als Mission Profile (MP) Lasten bezeichnet werden. Die Sicherstellung der Robustheit von Mikroelektronikkomponenten erfordert die Berücksichtigung der folgenden Anforderungen bei der Beschreibung von MP-Lasten:

- Beschreibung und Austausch von komplexen Nutzungsszenarien sind unter anderem das Leitbild der Mission Profiles. Es muss ermöglicht werden, spezifische Nutzungsszenarien der einzelnen

Komponenten beschreiben zu können und diese unter den Partnern im Wertschöpfungsnetz austauschen zu können.

- Austausch von statischen und dynamischen Lasten sind grundlegende Anforderungen, für eine durchgängige Erstellung der Mission Profiles. Es muss möglich sein, diese Lasten zu erfassen und zwischen den einzelnen Entwicklungspartnern auszutauschen.
- Es bedarf einer eindeutigen Beschreibung von spezifischen mathematisch-physikalischen Ausdrücken. Hierzu gehört das Abbilden von Lastfällen und deren Verläufe durch mathematische und physikalische Formeln.
- Lastfälle müssen formalisiert und standardisiert beschrieben werden. Alle Lastfälle müssen nach einem vorher definierten Schema beschrieben werden. Nur so kann eine adäquate Beschreibung der Lastfälle garantiert werden.
- Es muss gewährleistet sein, dass ein Austausch von Lastfällen entlang der Wertschöpfungskette zwischen den einzelnen Entwicklungspartnern möglich ist. Der Austausch der Mission Profiles fördert nicht nur die Kollaboration, sondern fördert auch den Reifegrad der Mission Profiles.

2.1 Robustheit Validierung

Bestehende Requirements Engineering Methoden bieten keine ausreichenden Möglichkeiten zur Beschreibung mathematisch-physikalischer Ausdrücke oder komplexer Nutzungsszenarien (OMG 2016; Valentini et al. 2013). Um all dies zu gewährleisten, wird in der heutigen Entwicklung von Mikroelektronikkomponenten der Ansatz der Robustheit Validierung eingesetzt (ZVEI 2013; ZVEI 2015). Robustheit Validierung wird im Automobilssektor eingesetzt, um kritische Bauteile aus dem mikroelektronischen Bereich auf Robustheit zu prüfen. Allerdings ist der Ablauf der Robustheit Validierung primär durch manuelle Tätigkeiten geprägt. Die Prüfmethode basiert auf drei Stützpfählern und ist ein stark wissensgetriebener Vorgang (ZVEI 2013; ZVEI 2015; JEDEC JEP 148 2004):

- Wissen über den Einsatz bzw. die Nutzung
- Wissen über Ausfall und Versagensarten und deren Wechselwirkung mit anderen Systemkomponenten
- Wissen über Beschleunigungsmodelle, für die Definition von Versagensarten

Abbildung 1 zeigt den derzeitigen Ablauf des Robustheits Validierungs Ansatzes mit dem Robustheits Validierungs Flow (RVF). Dieser beschreibt einen voll integrierten Prozess im derzeitigen Entwicklungsprozess von Mikroelektronikkomponenten, ist jedoch nicht Teil des Systems Engineering Prozesses. Der initiale Startpunkt eines Robustheits Validierungs Flows bildet ein sogenanntes Mission Profile, das MP-Lasten bzw. Lastfälle beinhaltet, welches wiederum mit einem Anwendungsmodul angereichert wird. Innerhalb des RVF werden zuerst die erhaltenen Informationen separiert und in Produktspezifikationen und Technologiespezifikationen untergliedert. Nachdem durchlaufen aller Schritte wird die Halbleiterkomponente für den Produktionsprozess vorbereitet. Dies bedeutet, sie erfüllt zu diesem Zeitpunkt bereits alle relevanten Anforderungen, welche durch die Robustheit Validierung definiert wurden. Somit ist die Komponente für den vorgeschriebenen Einsatz valide. Der Einsatz der Robustheit Validierung erlaubt zudem die Wiederverwendung der Daten von vorherigen Produktgenerationen bei Neu- und Weiterentwicklungen, die Reduktion von Entwicklungszeit und die Kostensenkung im Prüfprozess. Dennoch ergeben sich Herausforderungen wie der überwiegend manuell geprägte Prozessablauf und die vielen Robustheits Validierungs Teilschritte, welche für jedes Projekt, jeden Projektpartner sowie jede Komponente bzw. Subkomponente neu angepasst werden müssen.

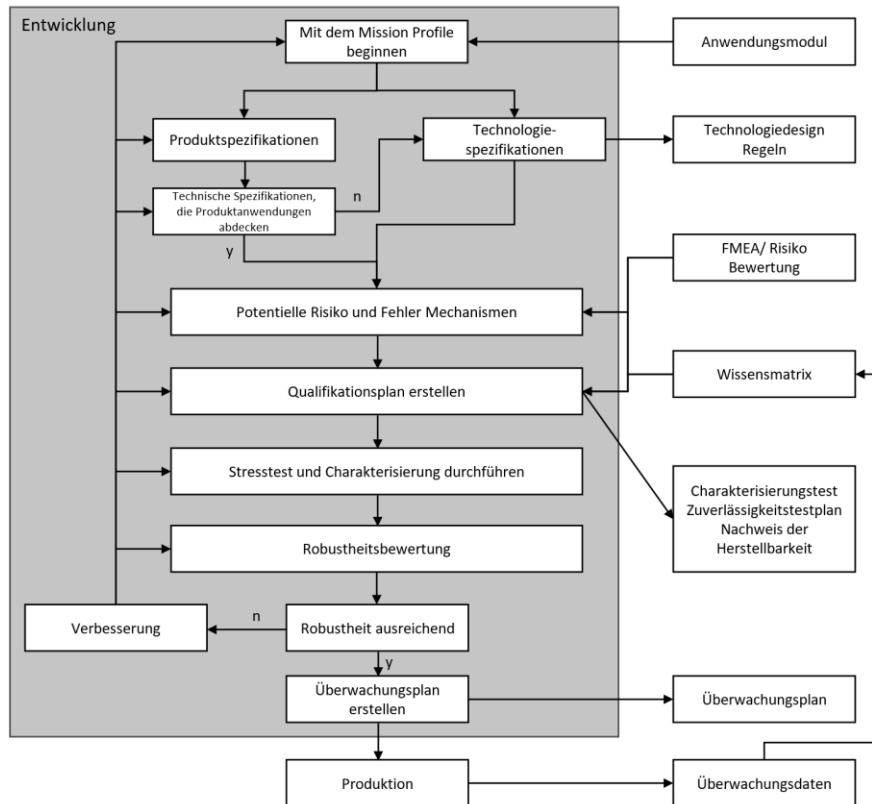


Abbildung 1 Ablauf einer Robustheit Validierung (ZVEI 2015)

2.2 Mission Profiles-Konzept

Die Grundlagen des MP-Konzepts gehen zurück auf die Anforderungsprofilentwicklung im Forschungsprojekt ResCar (ResCar 2014) und die darauf aufbauende Strukturentwicklung im Verbundförderprojekt autoswift (autoSWIFT 2018). Derzeit wird im Forschungsprojekt ELDA-MP („Entwicklung eines Standards für ein elektronisches Datenformat zur Beschreibung von Mission Profiles“) ein standardisiertes Datenformat zur Beschreibung von MP entwickelt (ELDA-MP 2020). Ein MP ist ein Modell, welches die Anforderungsdaten für elektronische Systemkomponenten erfasst, welche hierbei die Beschreibung von Lastfällen, Nutzungsszenarien und Anwenderverhalten umfasst. MP bilden beim Robustheits Validierungs Prozess alle relevanten Umwelteinflüsse und Belastungen ab, die auf die elektronischen Bauteile wirken. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus, von der Entwicklung bis hin zu Entsorgung der Komponente, berücksichtigt, wodurch ein MP alle Beanspruchungen der Komponenten während der Herstellung, Prüfung, Lagerung, des Transportes und der anschließenden beabsichtigten Nutzung beinhaltet (vgl. Abb. 2).

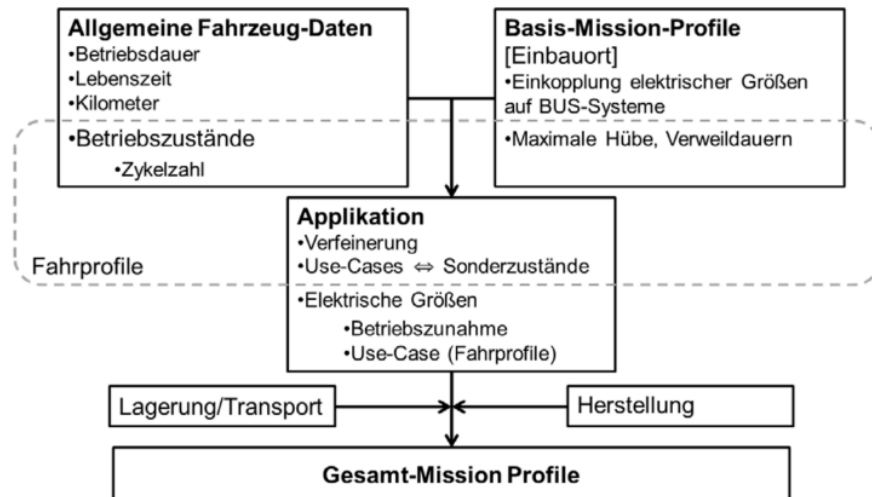


Abbildung 2 Inhalte eines Mission Profiles (Burger et al. 2014)

Die allgemeinen Fahrzeug-Daten beinhalten Informationen über Betriebsdauer, Lebenszeit sowie die Laufleistung eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Nach LV 124 (Volkswagen VW80000 2013) beträgt die typische Lebenszeit eines Steuergeräts 15 Jahre, wobei eine Betriebsdauer von 8.000 Stunden und eine Laufleistung von 300.000 Kilometern angenommen wird. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass neben der angenommenen Betriebsdauer auch weitere Einflüsse wirken, die während der Stillstandszeiten auftreten können. So können beispielsweise Temperatureinflüsse auf Elektronikkomponenten durch Sonneneinstrahlung oder Nachheizphasen einwirken, ohne dass sich das Fahrzeug im Betrieb befindet. Die Temperaturbelastung kann somit auf bis zu 60.000 Stunden steigen. Eine weitere Einflussgröße ist der Einbauort der betroffenen Komponenten. Das Basis-Mission-Profil gilt für alle an diesem Einbauort befindlichen Elektronikkomponenten. Es enthält unter anderem Informationen darüber, bei welcher maximal auftretenden Temperatur die Funktion sichergestellt werden muss. Zum anderen werden weitere Umweltbedingungen in einem Basis-Mission-Profil festgehalten, wie beispielsweise Daten über die Feuchte in Kombination mit der Temperatur sowie Vibration oder mechanische Schocks am Einbauort, welche aus dem Nutzungsort resultieren. Im dritten Bereich der Applikation werden die aus den Basis-Mission-Profilen generierten Anforderungen verfeinert und erweitert. Dies geschieht durch die Verwendung von Use-Cases, Sonderbetriebszuständen und der Definition von Worst-Case Szenarien. Die dazu benötigten applikationsspezifischen Parameter leiten sich aus den Fahrprofilen des OEM ab. Um ein vollständiges MP zu generieren, ist eine enge Zusammenarbeit entlang der gesamten Zuliefererkette notwendig. Somit müssen alle Partner innerhalb des Wertschöpfungsnetzes einen Partnerspezifischen-Input liefern und typische Erfahrungswerte hinsichtlich der Belastung dem MP hinzufügen. Durch einen kontinuierlichen Austausch wird die Vollständigkeit des MP sukzessive angestrebt. Hierbei werden initiale Anforderungen an die Komponente auf der OEM und TIER 1 Ebene formuliert und im fortlaufenden Austausch mit den weiteren Ebenen der Lieferkette verfeinert. Derzeit basieren die Elemente eines MP auf dem Extensible Markup Language kurz XML-Format. Ein Austausch der MP zwischen den beteiligten Unternehmen ist auf dieser Grundlage zwar möglich, jedoch in erschwerter Form, allerdings existieren bisher keine einheitliche Beschreibung des Datenformats und kein standardisiertes Datenaustauschformat.

2.3 Entwicklung von Mission Profiles

Bei der Definition aller MP-Lasten unterscheidet man zwischen den beiden Lasttypen „Umweltlasten“ und „funktionale Lasten“. Umweltlasten beschreiben externe Spannungsfaktoren wie z.B. die Umgebungstemperatur oder Feuchtigkeit. Durch funktionale Lasten werden interne Spannungsfaktoren beschrieben, diese beinhalten beispielsweise die Boardspannung. Die

Informationen bezüglich dieser Lastentypen werden von allen beteiligten Entwicklungspartnern benötigt. Diese Informationen können einen unterschiedlichen Ursprung haben, da es sich entweder um öffentliche Umweltlasten handelt oder Informationen aus eigenen Messungen. Zudem können Informationen aus Vorgängerprojekten oder komponentenspezifische Erfahrungen eingebracht werden. Der Vorgang für die Generierung eines MP wurde durch den Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie in einem Prozess dokumentiert und ist in Abb. 3 dargestellt. Der Prozess teilt sich in drei Schritte auf. Im ersten Schritt werden allgemeine Anforderungen an das Fahrzeug erhoben. Diese umfassen beispielsweise die Lebensdauer, Laufleistung sowie die Motorbetriebszeit. Des Weiteren werden die vorher gesammelten Anforderungen auf die Bereiche Elektrik/Elektronik Module (EEM) bzw. Mechatronik angewendet. Im zweiten Schritt liegt der Fokus auf den EEM. Hierbei werden die Anforderungen an die EEM von den vorher definierten Anforderungen an das Fahrzeug abgeleitet. Es werden spezifische Anforderungen formuliert, welche sich mit dem Komponentenversagen, der Betriebszeit und mit Einflüssen auf die EEM beschäftigen. Als Resultat ergibt sich daraus ein Basis MP für die EEM-Komponente.

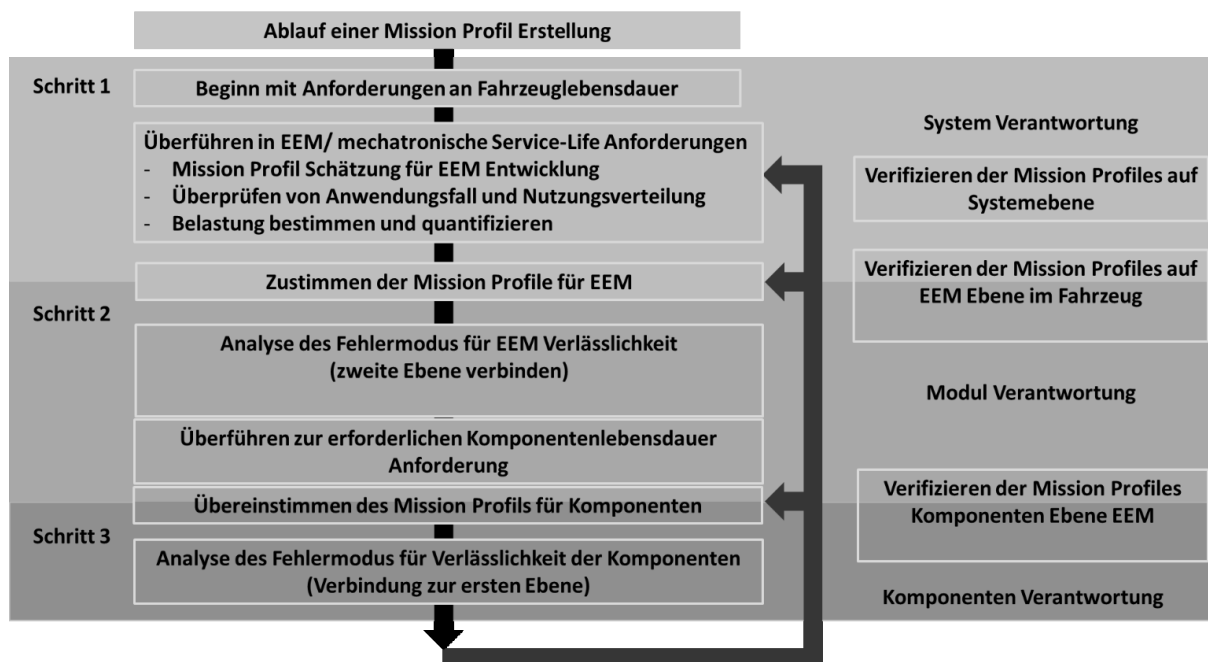


Abbildung 3 Ablauf einer Mission Profile Erstellung (ZVEI 2013)

Im dritten Schritt findet eine weitere Verfeinerung der Anforderungen statt. Die zuvor definierten Anforderungen an die Elektrik/Elektronik Module müssen nun auf die Komponentenebene heruntergebrochen werden, da der Inhalt eines MP sowohl Anforderungen an das Gesamtfahrzeug als auch Anforderungen an die einzelnen mikroelektronischen Komponenten umfasst. Die Übersetzung von der EEM-Ebene auf die Komponentenebene muss zusätzlich die anwendbaren elektrischen und mechanischen Umweltlasten des EEM-Designs enthalten. Insbesondere die Einflüsse auf kritische Komponenten müssen analysiert werden. Als finales Resultat der drei Arbeitsschritte ergibt sich ein MP für die jeweilige Komponente. Abschließend sieht der Prozessablauf vor, dass die erstellten MP auf den jeweiligen Ebenen, beginnend bei der Komponentenebene bis hin zur Fahrzeugebene, überprüft werden müssen. Annahmen, die bei der Auswahl der Mission Profiles verwendet wurden, sollen durch Messungen in der tatsächlichen Anwendung überprüft werden. Hierbei werden die Anforderungen auf Abweichungen geprüft. Gegebenenfalls muss eine frühzeitige Änderung der Konstruktion oder ein Austausch der Komponente vorgenommen werden (ZVEI 2013).

3 Integration der Mission Profiles im Systementwicklungsprozess

Die Integration des MP-Ansatzes in den modellbasierten Systementwicklungsprozess erfordert unmittelbar eine Erweiterung des bisherigen Model-based Systems Engineering Ansatzes (Estefan 2008) und eine informationstechnische Integration des MP-Ansatzes. Um diese Integration zu ermöglichen, wurde das MVPE-Modell (Eigner et al. 2014), Kaiserslauterer Innovation Roadmapping V-Modell (KIRV), in Richtung der frühen Innovationsphase prozessual weiterentwickelt und ein informationstechnisch in einen SysML-basierten Integrationsansatz umgesetzt (vgl. Abb. 4). Die Innovations-Roadmapping Phase, welche in die Requirements Engineering Phase mündet, beinhaltet die frühe IT-gestützte Generierung und die durchgängige Verwendung von MP entlang des gesamten MVPE-Modells.

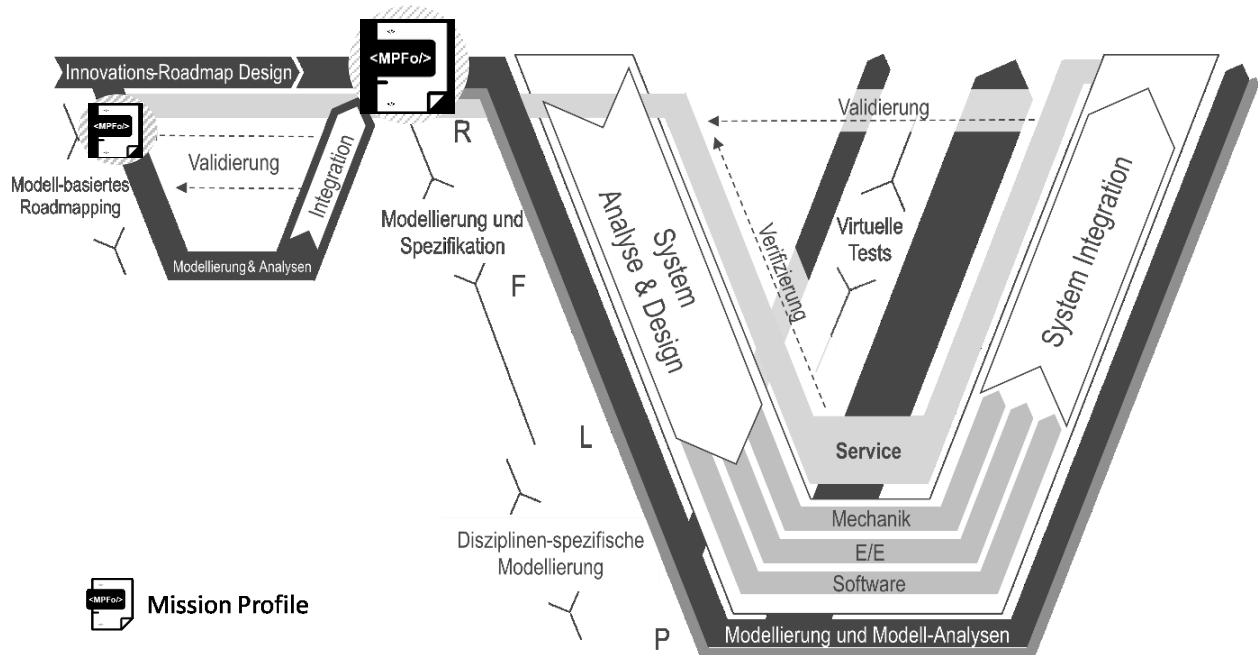


Abbildung 4 Kaiserslauterer Innovation Roadmap V-Modell (KIRV) zur prozessualen Integration von Mission Profiles (basierend auf (Eigner et al. 2014; Dickopf et al. 2019))

3.1 Modellierung und Implementierung von Mission Profiles in der SysML

Die Realisierung des KIRV-Ansatzes in der SysML (OMG 2019) ermöglicht es, die MP mit der gesamten Architektur des Produkts zu verknüpfen und eine durchgängige, sehr früh beginnende Anforderungsmodellierung abzubilden. Durch die Realisierung in der SysML, kann eine kollaborative Entwicklung der MP entlang der gesamten Wertschöpfungskette realisiert werden. Der Austausch von SysML-Modellen wird über den Standard XML-Metadata Interchange, kurz XMI, realisiert (OMG 2015) (Apostolov und Mollahassani 2018). Dieser XMI-Standard basiert auf XML, ebenso wie die derzeitige Beschreibung von MP. Somit kann auch ein Austausch von MP-Modellen zwischen unterschiedlichen Tools, die MP lesefähig sind, realisiert werden. Dieser Ansatz für die Implementierung der MP in der SysML setzt voraus, dass die Systemarchitektur oder das Systemverhalten bereits im Modell vorhanden sind. Als Referenzmodell für die Implementierung wurde ein MP Beispiel genutzt, welches durch den Zentralverband für Elektrotechnik- und Elektronikindustrie veröffentlicht wurde. Im dort gezeigten Beispiel wird ein Steuergerät betrachtet, welches sich in der Fahrzeugtür befindet. Es bestehen Verbindungen zur Fahrzeugstromversorgung, zu verschiedenen Sensoren, Aktoren und mit dem CAN-Bus.

Ausgeführt im Fahrzeug (EEM Betriebszeit)	Temperaturprofil (Umgebungstemperatur der Teile in Montageumgebung)	Temperatur	Verteilung
		-40°C 23°C 60°C 80°C 85°C	6% 65% 20% 8% 1%
	Feuchtigkeit	Relative Feuchtigkeit bis zu 100% Kondensieren und Gefrieren	
Installiert im Fahrzeug ohne Ausführung (EEM Nichtbetriebszeit)	Temperatur	Minimale Temperatur: -40°C Maximale Temperatur: +85°C Durchschnittstemperatur: +25°C	
	Feuchtigkeit	Relative Feuchtigkeit bis zu 100%; Kondensieren und Gefrieren Mittelwert 60% relative Feuchtigkeit Durchschnittstemperatur: +23°C	
Transport	Temperatur	Minimale Temperatur: -50°C Maximale Temperatur: +95°C	
	Transportzeit	Max. 24 Stunden Ununterbrochen bei maximaler Temperatur Max. 48 Stunden Ununterbrochen bei maximaler Temperatur	
Lagerung	Temperatur	Minimale Temperatur: -10°C Maximale Temperatur: +55°C	
	Lagerungszeit	5 Jahre	
	Feuchtigkeit	Maximal 85% relative Feuchtigkeit	

Abbildung 5 Beispiel eines Mission Profiles für ein Türsteuergerät (Auszug) (ZVEI 2013)

Das in Abb. 5 betrachtete MP ist in vier signifikante Bereiche gegliedert, welche von der allgemeinen Lebensdauer, dem Einbauort des EEM und den Umwelt- und funktionalen Lasten gebildet werden. Der Auszug in Abb. 5 aus einem MP beschreibt die Umweltlasten, die während des gesamten Lebenszyklus auf das Türsteuergerät einwirken. Diese betreffen die Lagerung, den Transport und den Einbau im Fahrzeug, wobei bei letzterem unterschieden werden muss zwischen Nutzung und Nicht-Nutzung. Die Angaben des Türsteuergerätes dienen als Grundlage für die Implementierung des dazugehörigen MP in der SysML. Zu Beginn der Modellierung bzw. Generierung eines MP werden High-Level Anforderungen an das Fahrzeug gestellt. In diesem Beispiel werden hierfür die bereits erwähnten Anforderungen aus der LV 124 (Volkswagen VW80000 2013) genutzt. Dies sind die nichtfunktionalen Anforderungen des MP. Bei einem realen Beispiel wären dies Anforderungen, die der OEM oder TIER 1 in die Gesamtmodellierung einbringen würde. Für die Modellierung des MP werden spezifische Stereotypen angelegt. Diese werden mithilfe eines SysML Profiles genauer beschrieben. Zu erkennen sind die neuen Stereotypen in den folgenden Abbildungen des Modells, sie haben ein vorangesetztes „MPFO_“ bei der Stereotypen-Deklaration. Nachdem die Grundanforderungen an das System gestellt wurden, müssen nun weitere funktionale und nichtfunktionale Umweltlastanforderungen an das System bzw. Türsteuergerät gestellt werden. Hierzu werden dem Türsteuergerät der Block Funktionale Lasten und der Block Umweltlasten mithilfe einer Generalisierung zugeordnet.

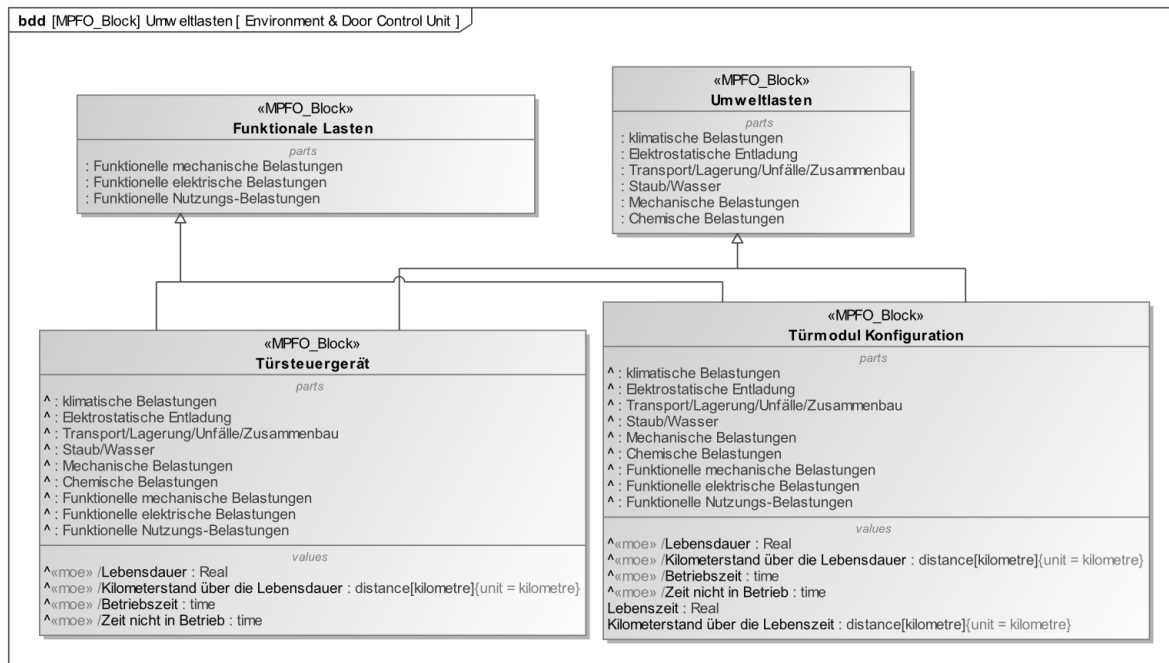


Abbildung 6 Einfluss der Mission Profile Lasten auf das Türsteuergerät

In Abb. 6 ist zu erkennen, dass beide Lastfälle bzw. MP-Lasten weitere Parts beinhalten. Diese Parts stehen für eine weitere Verfeinerung der Umweltlasten, die auf das Bauteil wirken. Diese Verfeinerung ist notwendig, da die Lastfälle sehr konkret sein müssen und konkrete Angaben hierfür definiert werden müssen. Für eine bessere Verständlichkeit wird exemplarisch eines dieser Parts der Umweltlast näher betrachtet. Hierfür wird der Aufbau der klimatischen Belastungen betrachtet. Im Modell werden alle Werte den einzelnen Klima-Lastfällen zugeordnet. Dies bedeutet, z.B. dass für die Lagerung des Bauteils die maximale und minimale Temperatur im Modell festgelegt werden müssen, welche während der Lagerung auftreten dürfen. Gleichzeitig werden auch Kriterien wie die Feuchtigkeit oder Dauer betrachtet. Hierzu können noch weitere Temperaturverläufe hinzugefügt werden oder Klimadiagramme angeheftet werden, wie in dem gezeigten Beispiel in Abb. 7. Eine derartig detailreiche Modellierung der Lastfälle ist notwendig, um die Qualität des MP selbst und damit die Konformität für die Ermittlung der Robustheit des Bauteils zu gewährleisten. Diese Schritte für die Umweltlasten müssen parallel auch für die funktionalen Lasten durchgeführt werden.

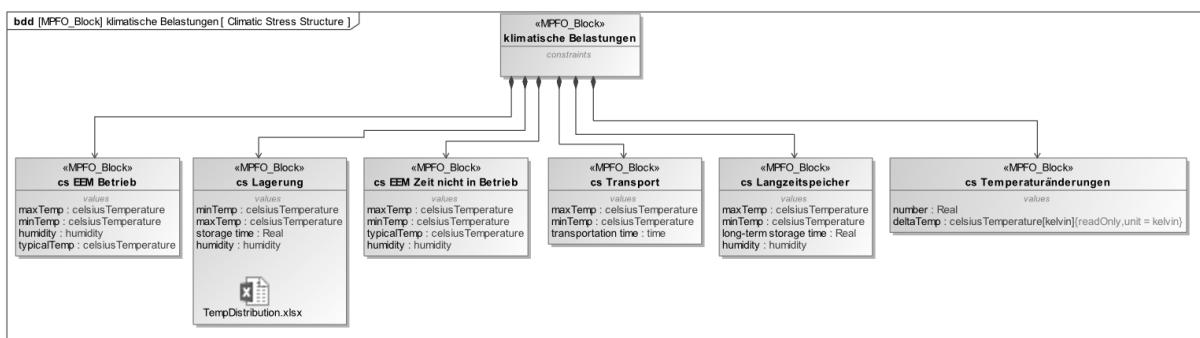


Abbildung 7 Klimatische Belastungen

Wie auch bei der klassischen Lastenheftentwicklung (DIN 69901 2009), bedarf es bei einem MP auch einer konkreten Definition von Anforderungen an das Bauteil. Hierzu wird das Konzept des Requirements Diagramms und des Parameter Diagramms in der SysML verwendet. Die vorher definierten Blöcke der Umweltlasten wie z.B. die klimatischen Belastungen benötigen die spezifische Definition von Anforderungen bzw. quantitative Anforderungen. Die Definition von quantitativen

Anforderungen mit konkreten Zahlenwerten wird durch das SysML-Parameter Diagramm abgebildet. Es muss gewährleistet sein, dass der zuvor definierte Block der klimatischen Belastungen mit Anforderungen und Constraints abgesichert/ verifiziert werden. Constraints definieren Einschränkungen und können in der SysML jedem mathematischen oder logischen Ausdruck entsprechen, einschließlich zeitvariabler Ausdrücke und Differentialgleichungen (Friedenthal 2015). Im Ergebnis lassen sich somit die quantitativen Anforderungen im Modell durch Constraint Blocks überprüfen und abbilden. Lässt sich aus den quantitativen Werten der Umweltlasten ein mathematischer Zusammenhang herleiten, kann dieser mithilfe der Constraints ein Einschränkungsausdruck erfasst werden. Dadurch soll bei der Analyse des MP überprüft werden können, ob die jeweiligen Anforderungen für das zu entwickelnde Modul eingehalten wurden. Zudem können die Inhalte des MP auf diesem Wege weiterhin spezifiziert werden. Da es sich bei den generierten MP Inhalten größtenteils um quantitative Eigenschaften handelt und die einwirkenden Lasten gleichermaßen den nichtfunktionalen Anforderungen entsprechen, bietet sich der gewählte Ansatz für die Umsetzung an. Hierbei muss zunächst jede Anforderung Constraints zugeordnet bekommen. Zuvor wurden die Anforderungen den jeweiligen Values bzw. konkreten Werten des Türsteuergerätes zugeordnet. Mithilfe der Values und der Constraints innerhalb eines Parameter Diagrammes ist es möglich, mathematisch die Anforderungen bzw. Lastfälle zu überprüfen, welche das MP definiert hat. In Abb. 8 ist ersichtlich, wie eine durchgängige Verbindung zwischen Türsteuergerät, Anforderungen und den Constraints abgebildet werden kann. Mit der Abbildung der Constraints und der Verbindung zu den Anforderungen ist es möglich, ein MP innerhalb der SysML zu generieren und eine durchgängige Modellierung von der Definition von Lastfällen bis hin zu Kontrollmechanismen, welche diese Lastfälle überprüfen können, zu erreichen.

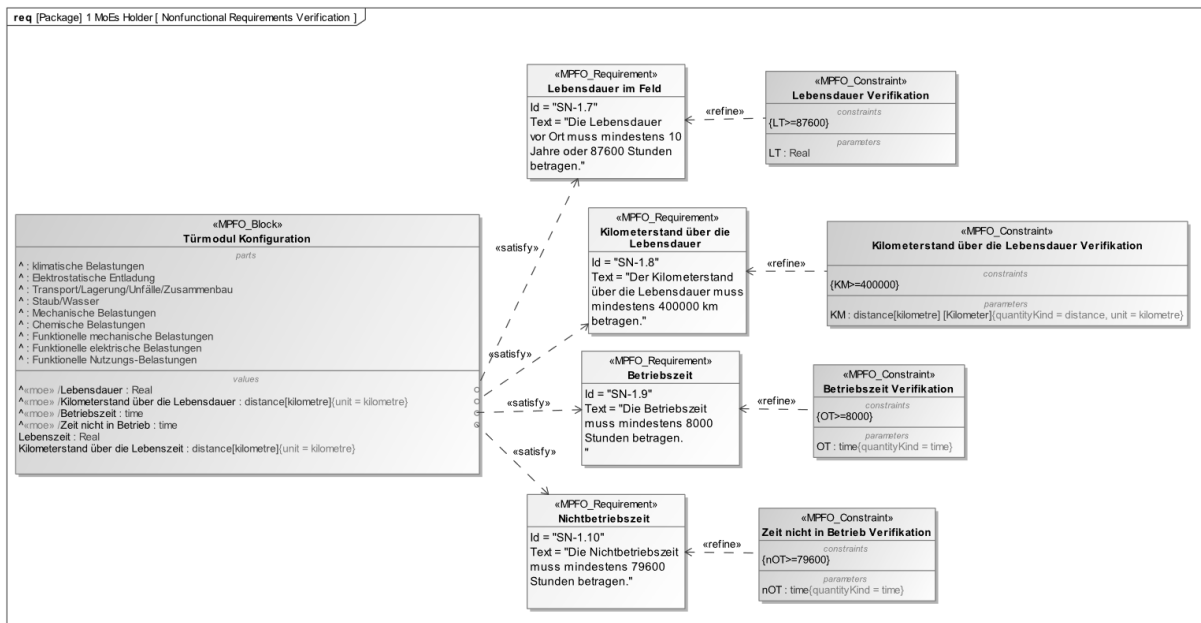


Abbildung 8 Durchgängige Modellierung des Mission Profiles

4 Ausblick

Bei einer interdisziplinären Gesamtentwicklung ist das Betrachten von Lastfällen, welche auf das System einwirken, unabdingbar. Mit dem auf dem Kaiserslauterner Innovation Roadmapping V-Modell (KIRV) basierenden Ansatz ist es möglich, funktionale und nichtfunktionale/Umweltlasten im Entwicklungsprozess zu integrieren und diese somit zu einem Teil des modellbasierten Requirements Engineering zu integrieren. Mikroelektronikkomponenten erfordern eine Validierung hinsichtlich der Robustheit, die weit über den klassischen Ansatz des dokumentenbasierten Requirements Engineering

hinaus geht. Für die Zukunft der Kollaborationsunterstützung entlang der Wertschöpfungsnetze wäre es von Vorteil, eine standardisierte Abbildung des MP Ansatzes in der SysML auf der Grundlage eines standardisierten SysML-Profiles zu etablieren. Hierzu wurden erste Aktivitäten in Zusammenarbeit mit der Object Management Group (Mollahassani 2019) initiiert. Eine standardisierte Integration könnte den Einsatz in den jeweiligen Unternehmen und deren Kollaborationsprozessen mit Entwicklungspartnern hinsichtlich der Validierung von Mikroelektronik grundlegend unterstützen. Eine Umsetzung im industriellen Kontext des Ansatzes ist mit den Partnern des Forschungsprojektes GENIAL! geplant. Bestandteil dieser Umsetzung ist auch das Kaiserslauterer Innovation Roadmap V-Modell (KIRV), hierbei werden die weiteren Phasen anhand von Industrieller Use Cases untersucht.

Literaturverzeichnis

- Abramovici et al. 2017 Abramovici, Michael; Göbel, Jens C.; Savarino, Phillipp und Gebus, Philip: Dynamische Rekonfiguration als neue Engineering-Herausforderung im Lebenszyklus Smarter Produkte, In: SSP 2017 Proceedings Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Stuttgart, Germany, 28-29 June 2017, ISSN: 2364-4885
- Apostolov und Mollahassani 2018 Apostolov, H.; Mollahassani, D.: Current Status of SysML Model Interchange between Common Modeling Tools via XMI – A Practical Study. INCOSE EMEA SECTOR SYSTEMS ENGINEERING CONFERENCE 2018 / GfSE Tag des Systems Engineering 2018, November 5-7 2018, Berlin.
- autoSWIFT 2018 autoSWIFT: Schnellere Innovationszyklen für Elektroniksysteme entlang der Automobilwertschöpfungskette. URL: <https://www.edacentrum.de/autoswift/>, abgerufen am 21.11.2020
- Burger et al. 2014 Burger, Andreas; Goeran, Jerke; Straube Stefan; Hahn Daniel; Abelein Ulrich; Bringmann Oliver und Rosenstiel Wolfgang: Mission Profile gestützter Entwurf von Automobilelektronik, DOI:10.13140/2.1.3117.3921, 2014
- Davenport 2019 Davenport, Jonathan: 3 Automotive Hype Cycle Innovations That Should Be on Your Connected Vehicle Roadmap, ID: GOO418227, Gartner Inc. 10.10.2019
- Dickopf et al. 2019 Dickopf, T.; Apostolov, H.; Müller, P.; Göbel, J.C.; Forte, S.: A Holistic System Lifecycle Engineering Approach – Closing the Loop between System Architecture and Digital Twins. 29th CIRP Design 2019 (CIRP Design 2019), Póvoa de Varzim, Portugal. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.257>
- DIN 69901 2009 Norm DIN 69901 2009. Projektmanagement – Projektmanagementsysteme, 2009
- Eigner et al. 2014 Eigner, Martin; Roubanov, Daniil und Zafirov, Radoslav: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg, ISBN 978-3-662-43816-9, 2014
- ELDA-MP 2020 ELDA-MP: ELDA-MP Entwicklung eines Standards für ein elektronisches Datenformat zur Beschreibung von Mission Profiles. URL: <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/core-safety/elda-mp>
- Estefan 2008 Estefan, Jeff A.: Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies. URL: http://www.omgsysml.org/MBSE_Methodology_Survey_RevB.pdf, abgerufen am 25.11.2020
- Friedenthal 2015 Friedenthal, Sanford: A practical guide to SysML: The systems modeling language. Third edition. Waltham, MA: Morgan Kaufman, 2015

- GENIAL! 2018 GENIAL!: Gemeinsame Elektronik-Roadmap für Innovationen der
automobilen Wertschöpfungskette (GENIAL!). URL:
<https://www.edacentrum.de/genial/>, abgerufen am 20.11.2020
- Göbel und Eickhoff 2020 Göbel, Jens C. und Eickhoff, Thomas: Konzeption von Digitalen Zwillingen
smarter Produkte. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115
(2020), S. 74–77
- ISO/IEC/IEEE 24765 2010 Norm ISO/IEC/IEEE 24765 2010. Systems and software engineering—
vocabulary, 2010
- JEDEC JEP 148 2004 Norm JEDEC JEP 148 2004. Reliability Qualification of Semiconductor Devices
Based on Physics of Failure Risk and Opportunity Assessment, 2004
- Mollahassani 2019 Mollahassani, Damun: GENIAL!-Research Approach: Integrating Mission
Profiles in Automotive Innovation Processes. Long Beach, 2019
URL: <https://www.omg.org/cgi-bin/doc.cgi?mantis/2019-12-09>, abgerufen
am 28.10.2020
- OMG 2015 OMG: XML Metadata Interchange. URL:
<https://www.omg.org/spec/XMI/About-XMI/>, abgerufen am 26.11.2020
- OMG 2016 OMG: OMG Requirements Interchange Format. URL:
<https://www.omg.org/spec/ReqIF/About-ReqIF>, abgerufen am 26.11.2020
- OMG 2019 OMG: OMG System Modelling Language. URL: <https://www.omg.org/spec/SysML/About-SysML/>, abgerufen am 26.11.2020
- Paquin 2014 Paquin, Reid: Product Development Success= Tools, Talent and Eliminating
Waste, Aberdeen Group, URL: https://resources.altium.com/sites/default/files/uberflip_docs/file_975.pdf, abgerufen am 3.12.2020
- ResCar 2014 ResCar: ResCar: Robuster Entwurf von neuen Elektronikkomponenten für
Anwendungen im Bereich Elektromobilität. URL:
<https://www.edacentrum.de/rescar/>, abgerufen am 20.11.2020
- Tille 2016 Tille, Thomas: Automobil-Sensorik: Ausgewählte Sensorprinzipien und deren
automobile Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg,
DOI: 10.1007/978-3-662-61260-6, 2016
- Valentini et al. 2013 Valentini, Uwe; Weißbach, Rüdiger; Fahney, Ralf; Gartung, Thomas; Glunde,
Jörg; Herrmann, Andrea; Hoffmann, Anne und Knauss, Eric: Requirements
Engineering und Projektmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013
- Volkswagen VW80000 2013 Norm Volkswagen VW80000 2013. LV124 Elektrische und elektronische
Komponenten in Kraftfahrzeugen bis 3,5 t Allgemeine Anforderungen,
Prüfbedingungen und Prüfungen, VW AG, 2013
- ZVEI 2013 ZVEI: Handbook for Robustness Validation of Automotive
Electrical/Electronic Modules. URL:
https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2013/Oktober/Handbook_for_Robustness_Validation_of_Automotive_Electrical/Robust-Validation-EE-Modules.pdf, abgerufen am 18.11.2020
- ZVEI 2015 ZVEI: Handbook for Robustness Validation of Semiconductor Devices in
Automotive Applications. URL:
https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/mai/Handbook_for_Robustness_Validation_of_Semiconductor_Devices_in_Automotive_Applications__3rd_edition_/Robustness-Validation-Semiconductor-2015.pdf, abgerufen am 18.11.2020

Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen am Beispiel der Sportwagenentwicklung

Product Portfolio-spanning Specifying of Product Functions using the Example of Sports Car Development

Joshua Fahl¹, Tobias Hirschter¹, Albert Albers¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe
joshua.fahl@partner.kit.edu, tobias.hirschter@partner.kit.edu,
albert.albers@kit.edu

Abstract (deutsch): Das Funktionsspektrum heutiger Generationen hochentwickelter Fahrzeuge hat sich, aufgrund steigender Kunden- und Anwenderanforderungen u.a. an Fahrerassistenz, Digitalisierung und Elektromobilität, im letzten Jahrzehnt mehr als vervierfacht. In der automobilen Entwicklungspraxis lässt sich beobachten, dass solche teilweise komplexen Funktionen übergreifend für das gesamte Produktportfolio eines Anbieters und nicht mehr nur für einzelne, automobiler Produktgenerationen entwickelt werden müssen. Produktentwickler stehen daher vor der Herausforderung, bereits beim Spezifizieren der Funktionen teils diametrale Anforderungen sowie Wechselwirkungen vielfältiger Produktgenerationen aus verschiedenartigen Produktlinien zu berücksichtigen. Im vorliegenden Beitrag wird daher die prozessuale und methodische Entwicklungsunterstützung beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren aus Funktionssicht empirisch analysiert, in einem Referenzprozess synthetisiert sowie in der Entwicklungspraxis am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ in der Sportwagenentwicklung angewandt und evaluiert.

Keywords (deutsch):

Produktportfolio-übergreifend, Spezifizieren, Produktfunktion, Sportwagenentwicklung, Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Abstract (english): The functional spectrum of today's generations of highly developed vehicles has more than quadrupled due to increasing customer and user requirements, such as driver assistance, digitalization and electro mobility in the last decade. In automotive development practice, it has become apparent that such functions, often complex in nature, no longer have to be developed for individual automotive product generations but rather for the entire product portfolio of a provider. Product developers are therefore faced with the challenge of considering partly diametrical requirements as well as interactions of diverse product generations from different product lines already when specifying the functions. In this paper, the process-related and methodical development support for product-portfolio-spanning specifying is therefore empirically analyzed from a functional point of view, synthesized in a reference process and applied and evaluated in development practice using the example of the product function "*Actively Controlling Vehicle Aerodynamics*" in sports car development.

Keywords (english):

Product Portfolio-spanning, Specifying, Product Function, Sports Car Development, Model of PGE – Product Generation Engineering

1 Herausforderungen und Motivation

Technologische „Quantensprünge“ bei grundlegenden Subsystemen und Infrastruktur bringen in der automobilen Produktentwicklung in zunehmendem Maße Innovationen hervor, die zu neuen, technischen Produkten und Dienstleistungen führen (Beihoff et al. 2014). Hochentwickelte Fahrzeuge, die gegenwärtig am Markt eingeführt werden, müssen von Generation zu Generation steigende Kunden- und Anwenderanforderungen, u.a. an Fahrerassistenz, Digitalisierung und Elektromobilität, befriedigen. Aufgrund dessen hat sich das Funktionsspektrum im letzten Jahrzehnt mehr als vervierfacht (Weissler 2018). Der Fokus liegt hierbei auf den für den Kunden oder Anwender wahrnehmbaren Funktionen, die einen direkt greifbaren Wert oder Nutzen des Gesamtproduktes schaffen. Gleichmaßen zeigt sich in der automobilen Entwicklungspraxis ein kontinuierlicher Trend hin zur übergreifenden Funktionsentwicklung für das gesamte Produktportfolio eines Anbieters. Bedingt durch bspw. Kosten- und Effizienzoptimierungen in der wettbewerbsgetriebenen Automobilindustrie können daher solche mitunter komplexen Funktionen nicht mehr nur für einzelne Fahrzeuge entwickelt werden. Aus diesem Grund hat der bspw. der Volkswagen-Konzern eine neue Gesellschaft zur übergreifende Funktionsentwicklung gegründet. Im Zuge dessen soll die *Car.Software-Organisation* Synergien und Skaleneffekte durch eine Produktportfolio-übergreifende Entwicklung von Produktfunktionen – zunächst mit hohem Software-Anteil – für alle Konzernmarken ausschöpfen und realisieren (Volkswagen AG 2019). Das Zusammenführen teils diametraler Anforderungen sowie Wechselwirkungen vielfältiger Produktgenerationen aus verschiedenartigen Produktlinien stellt Produktentwickler*innen bereits beim Spezifizieren der Funktionen vor ein komplexes Problem. Eine verstärkte Einführung des Systems Engineering Ansatzes verspricht in diesem Kontext die Sicherstellung von Transparenz und Durchgängigkeit zwischen den einzelnen Fahrzeugen bzw. Produktfunktionen des gesamten Produktportfolios in der Produktspezifikation (Königs et al. 2012).

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Systemisches Verständnis in der Produktentwicklung

Das übergeordnete Ziel der Aktivitäten in der Produktentwicklung ist die Generierung funktionsfähiger, produzierbarer und letztlich vermarktungsfähiger Produkte (Ponn und Lindemann 2011). Die Verantwortung konzentriert sich in der Entwicklungsorganisation, die jedoch über vielfältige Schnittstellen verfügt und zunehmend *interdisziplinäre Problemlösungsteams* einsetzt (Ehrlenspiel 2009). Darüber hinaus verschiebt sich der Entwicklungsfokus zunehmend von singulären Produktgenerationen auf der Abstraktionsebene ganzer *Produktlinien* (konsekutive Generationen von bspw. Fahrzeugen) oder gar des gesamten *Produktportfolios* eines Anbieters (Fahl et al. 2019). Aus diesen Gründen ist ein *systemisches Verständnis des Produkts und der Entwicklungsaufgabe* unerlässlich. Geboren aus der Notwendigkeit heraus, mit der Komplexität in der Luft-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie umzugehen, beruhen die Praktiken des *Systems Engineering* in erster Linie auf Erfahrung – Versuch und Irrtum (Beihoff et al. 2014). Im Laufe der Zeit wurden *Heuristiken* entwickelt, um komplexe Probleme systematisch anzugehen und Produkte und deren Wechselwirkungen ganzheitlich zu betrachten. Eine Fragebogenstudie zu den Herausforderungen im Zeitalter der Digitalisierung konnte darüber hinaus den hohen praktischen Bedarf an *Funktionsorientierung in Produktentwicklungsprozessen* identifizieren (Albers et al. 2018). Der Entwicklungsansatz der *modellbasierten Systementwicklung* (MBSE, engl. Model-Based Systems Engineering) integriert Prozesse und Methoden des Systems Engineerings mit dem Potenzial einer verbesserten Beherrschung von Komplexität im Entwicklungsprozess durch die Verwendung eines *zentralen, visualisierten Modells* für die Produktspezifikation (D'Ambrosio und Soremekun 2017). Das interdisziplinäre Modell kann hierbei von den unterschiedlichen Stakeholdern genutzt sowie bearbeitet werden und erhöht die Systemqualität durch eine Erweiterung des Wissensmanagements (Walden et al. 2017).

2.2 Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Das *Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung* nach Albers et al. (2015) beschreibt Produktentwicklung auf Basis der prinzipiellen Annahme einer gezielten Verwendung bereits existierender *Referenzsystem-Elemente* (RSE) als Grundlage für die Entwicklung eines neuen Produkts. Ausgehend vom sogenannten *Referenzsystem* (Albers et al. 2019) können die RSE durch die drei *Variationsarten* der *Prinzip-, Ausprägungs- und Übernahmevariation* in ein neues Entwicklungsprojekt systematisch überführt werden (Albers et al. 2020c). Die Annahme der Existenz eines Referenzsystems basiert dabei auf Beobachtungen aus praktischen Entwicklungsprojekten. Produktentwickler*innen streben grundsätzlich, unter Sicherstellung ausreichender Innovationskraft, einen geringen Neuentwicklungsanteil an, um Aufwände und Risiken in Folge unbekannter Wechselwirkungen zu reduzieren (Ehrlenspiel und Meerkamm 2013). In einem generischen *Referenz-Produktmodell* strukturieren Albers et al. (2020b) technische Produkte nach den drei *Systemsichten* *Eigenschaften, Funktionen* und *physischen Elementen* entlang verschiedener *Systemebenen* (Supersystem(e), Gesamtsystem, Subsystem(e)). In diesem Zusammenhang wird eine *Produktfunktion* im Modell der PGE definiert als eine *Funktion* eines technischen Systems, anhand der sich eine *lösungsoffene Wirkbeziehung des Gesamtproduktes* zwischen einer Menge von *initiierenden Ereignissen* und *resultierenden Ergebnissen* sowie den (inhärenten) *Zuständen* aus u.a. Kunden-, Anwender- und/oder Anbietersicht in einem *definierten Kontext* beschreiben lässt (Albers et al. 2020a).

2.3 Produktspezifikation in der Frühen Phase der Produktentwicklung

Der *Produktspezifikation* wird eine zentrale Rolle im Entwicklungsprozess zuteil. Die *formale Beschreibung des Produkts* (Lindemann 2009) in einer Spezifikation dient der Definition *wesentlicher Anforderungen hinsichtlich der technischen Umsetzung* (Albers et al. 2018). Die Produktspezifikation ist Bestandteil des *Zielsystems* einer Produktgeneration und enthält u.a. eingesetzte Technologien, Funktionen sowie Übernahme- und Neuentwicklungsanteile der entsprechenden Systemelemente (Albers et al. 2017). Die Spezifikation stellt somit die Dokumentation relevanter Ziele dar, auf der die weitere Entwicklungsarbeit basiert. Infolgedessen wird zum Abschluss der *Frühen Phase im Modell der PGE* eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Produkts hinsichtlich der *relevanten Parameter* (z.B. Herstellbarkeit, notwendige Ressourcen) sowie des *technischen* und *wirtschaftlichen Risikos* ermöglicht. Gleichermäßen dient die Produktspezifikation in der industriellen Praxis oftmals der Kommunikation und Verhandlung zwischen *Auftraggeber* und (externem) *Auftragnehmer* (Lindemann 2009; Nellore und Söderquist 2000). Die Spezifikation wird im weiteren Verlauf des Produktentwicklungsprozesses als offenes Medium kontinuierlich angepasst und erweitert (Darlington und Culley 2002). Neben der *Spezifikation i.S.v. Artefakt* bezeichnet das *Spezifizieren* im Rahmen des Prozesses der Entstehung zudem eine *Aktivität* (Nellore und Söderquist 2000).

2.4 Fazit: Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit

Die Betrachtung von *Produktfunktionen* in den Aktivitäten der Spezifikation bieten die Chance, einerseits die Stakeholdersicht in der Frühen Phase zu stärken und dies andererseits mit Methoden zur Unterstützung der Produktentwickler*innen zu verknüpfen. Hierbei sollte ein *Produktportfolio-übergreifender Fokus* gesetzt werden, um *Synergiepotentiale* zu heben und Aufwand, Kosten und Zeit zu sparen. Die logische Konsequenz daraus ist der Bedarf an *prozessualer Entwicklungsunterstützung* beim *Spezifizieren solcher Funktionen*, die – analog der Baukastenentwicklung physischer Elemente – in mehreren Produktgenerationen verschiedener Produktlinien im Portfolio eingesetzt werden sollen.

3 Forschungsprofil

Die Forschungsarbeit untersucht das übergreifende Spezifizieren aus Funktionssicht in zunehmend diversifizierten Produktportfolios. Der Untersuchungsgegenstand ist insbesondere die automobile

Produktentwicklung eines Original Equipment Manufacturer (OEM). Ziel ist es, den/die Produktentwickler*in beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen methodisch und prozessual in der Produktspezifikation effektiv zu unterstützen. Angesichts der Operationalisierung der Zielsetzung sollen folgende Forschungsfragen (FF) das Vorgehen strukturieren:

- FF1** *Wie und wann werden Produktfunktionen aktuell für einen übergreifenden Einsatz in unterschiedlichen Fahrzeugen des Produktportfolios eines OEM spezifiziert?*
- FF2** *Wie lässt sich ein Vorgehen zum Spezifizieren aus Funktionssicht deduzieren und methodisch für den/die Produktentwickler*in unterstützen?*
- FF3** *Wie effektiv kann der/die Produktentwickler*in einen Referenzprozess und methodische Unterstützung in der Sportwagenentwicklung anwenden?*

Die Vorgehensweise innerhalb des Forschungsprojektes wurde systematisch geplant, um belastbare Ergebnisse zu erzeugen und eine nachvollziehbare Argumentationskette aufzubauen. Grundlage bildete die *Design Research Methodology* (DRM) nach Blessing und Chakrabarti (2009). Dazu wurde zunächst eine *Deskriptive Studie I* (DS-I) zur Analyse der Herausforderungen und möglicher Lösungsansätze in der automobilen Produktentwicklung durchgeführt. Die Erkenntnisse wurden anschließend in der *Präskriptiven Studie* (PS) in Form eines Referenzprozesses und methodischer Unterstützung der Produktentwickler*in synthetisiert. Zu guter Letzt erfolgte eine Evaluation der entwickelten Systematik in der *Deskriptiven Studie II* (DS-II) anhand der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ in der Sportwagenentwicklung.

4 Empirische Untersuchung der Herausforderungen und Analyse möglicher Lösungsansätze der Spezifikation aus Funktionssicht (DS-I)

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurden in der *Deskriptive Studie I* zunächst *Prozesse, Methoden* und *Artefakte* in Bezug zur funktionalen Produktspezifikation in der automobilen Produktentwicklungspraxis analysiert. Ziel der Studie war es, Schwachstellen, Herausforderungen und Verbesserungspotenziale der aktuellen Entwicklungsprozesse von Funktionen, die in mehreren Produktlinien des Portfolios eingesetzt werden sollen, einzugrenzen. Zu diesem Zweck sollte die *erste Forschungsfrage* in einer 3-jährigen teilnehmenden Beobachtung sowie Expertengesprächen bei einem deutschen, automobilen Original Equipment Manufacturer (OEM) beantwortet werden.

4.1 Analyse von Prozessen und Methoden der funktionalen Produktspezifikation in der automobilen Produktentwicklungspraxis

Schnittstellen der Entwicklung von Funktionen in der Frühen Phase sowie die existierenden Methoden und Werkzeuge, die den/die Produktentwickler*in dabei unterstützen, wurden in einem ersten Schritt in der Forschungsumgebung analysiert. Daran anknüpfend wurden die Prozesse und Meilensteine der Funktionsentwicklung in den automobilen Produktentstehungsprozess (PEP) eingeordnet. Anschließend folgte eine Erforschung zugehöriger Artefakte, die im Laufe der Spezifikation von Funktionen erzeugt werden, um ein tieferes Verständnis zu gewinnen. Diese Inhaltsanalyse in der automobilen Produktspezifikation wurde mit der Synthese der Erkenntnisse abgeschlossen.

In dieser Forschungsarbeit werden Produktfunktionen betrachtet, die nicht nur Produktgenerations-spezifisch, sondern in mehreren Produktlinien des Produktportfolios eines Anbieters eingesetzt werden sollen. Eine bedeutende Rolle hierbei spielt insbesondere die Verknüpfung zu den Eigenschaften. Der kontinuierliche Anstieg von Produktlinien, Produktvarianten sowie die steigenden Stakeholder-Anforderungen in Bezug zur Individualisierung von Fahrzeugen ist ein weiterer Komplexitätstreiber (Lindemann et al. 2006). In der Entwicklungspraxis in der Frühen Phase lässt sich die Spezifikation des initialen Zielsystems in den *Eigenschafts- und den Funktionsdefinitionsprozess* gliedern (vgl. Bild 1). In diesem Zusammenhang handelt es sich um Produktgenerations-spezifische

Prozesse, indem bspw. insbesondere Funktionen jeweils nur spezifisch für ein Fahrzeugprojekt definiert werden. Aus Eigenschaftssicht erfolgt eine Definition jedoch teilweise auf Grundlage des strategischen Produktportfolios. Im Kontrast zur Baukastenentwicklung existiert bisher kein systematisches Vorgehen zur Produktportfolio-übergreifenden Entwicklung von Produktfunktionen.

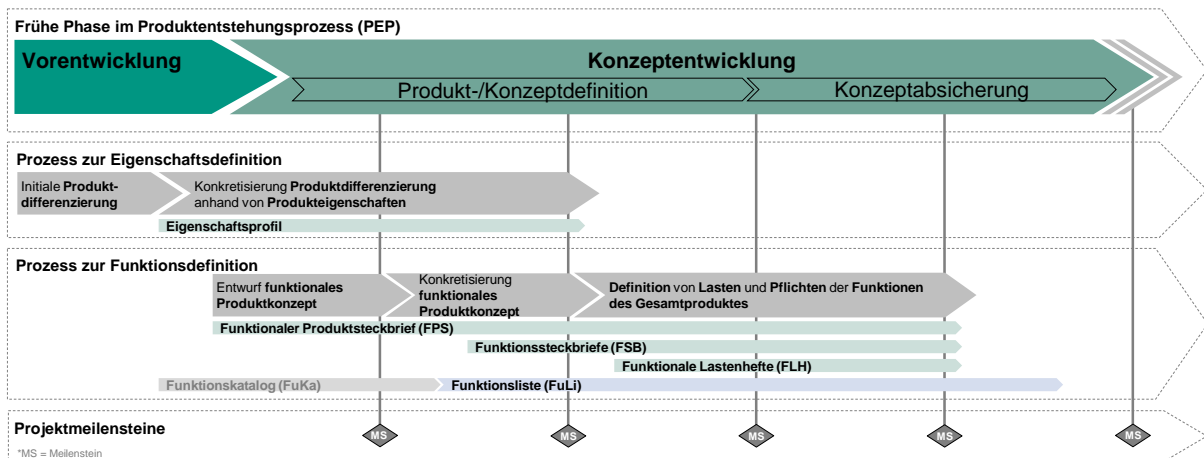


Bild 1: Einordnung der Methoden und Werkzeuge der Funktionsentwicklung in den Produktentstehungsprozess (PEP)

Der Entwicklungsprozess von Funktionen wird durch einige Methoden und Werkzeuge zumindest Produktgenerations-spezifisch unterstützt. Die im Rahmen der Methoden- und Dokumentenanalyse identifizierten Artefakte können – wie in Bild 1 abgebildet – im PEP in die Funktionsentwicklung eingeordnet werden. Insgesamt wird ersichtlich, dass die Funktions-Artefakte teilweise unvollständig und auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen vorhanden sind. Produktfunktionen, die in mehreren Produktlinien eingesetzt werden sollen, sind vor allem durch den sogenannten „Ersteinsetzer“ getrieben. Vor diesem Hintergrund kann es zu einer *unzureichenden Berücksichtigung oder Intransparenz von Anforderungen* (i.S.v. „Scheuklappen“-Sicht) weiterer Produktlinien und deren -generationen kommen. Im schlimmsten Fall führt das dazu, dass die Funktion in weiteren Produktlinien noch einmal einzeln entwickelt werden muss, da ggfs. keine Entwicklungssynergien realisiert wurden. Des Weiteren gibt es *keine strukturierte Betrachtung der Auslöser* von Produktportfolio-übergreifenden Funktionen. In dieser Betrachtung können *endogene* (bspw. Technologie, Strategie) und *exogene Faktoren* (bspw. Wettbewerb, Gesetze) differenziert werden. Zudem kann eine *Unterscheidung zwischen neuen, weiterzuentwickelnden sowie stillzulegenden Funktionen* getroffen werden. Auf dieser Basis könnte eine Abschätzung oder strategische Definition der *Übernahme- und Neuentwicklung von Funktionen* – in Analogie zu dem Verständnis der Variationsarten im Modell der PGE – Indizien für einerseits *Innovationspotenzial* und andererseits *Entwicklungsrisiko* bereits in der Frühen Phase liefern. Weiterhin existiert die Herausforderung, belastbare Aussagen über *Vollständigkeit* und *Konsistenz* zwischen „funktionalem“ Portfolio und den einzelnen Produktgenerationen zu treffen. Ebenso gilt dies gleichermaßen, um frühzeitig relevante Produktgenerationen zu einer generierten Funktionsidee zu identifizieren. Den Entscheidern fällt es daher schwer, *Funktionen objektiv zu priorisieren*, und sie fassen Entschlüsse zu neuen Funktionsideen in der Frühen Phase oftmals „aus dem Bauch heraus“. Die Entwicklung einer *systematischen Bewertung und Auswahl von Funktionsideen* in der Frühen Phase kann strukturierte Entscheidungen auf der Abstraktionsebene des Produktportfolios fördern und auf die Produktgenerations-spezifische Spezifikation funktionaler Produktkonzepte übertragen.

Die tiefgreifende Methoden- und Dokumentenanalyse konnte *verschiedene Abstraktionsgrade von Funktionen* in den unterschiedlichen Artefakten herauskristallisieren. Diese *Systemebenen*, auf denen Funktionen beobachtbar sind, werden teilweise *spezifisch für Fachbereiche* oder *externe Dienstleister* festgelegt. Durch die mitunter *singuläre Betrachtung* innerhalb der Organisationsstrukturen, sind die

Auswirkungen im Gesamtsystem (bspw. i.S.v. beeinflussten Eigenschaften oder möglichen Optimierungen/Synergien von physischen Elementen) *nicht transparent darstellbar* oder *zurückzuverfolgen*. Auf Ebene der *Elektrik/Elektronik-Architecturentwicklung* wird dieser Ansatz über einen Produktportfolio-übergreifenden *Funktionskatalog* bzw. die daraus ausgeleiteten Produktgenerations-spezifischen *Funktionslisten* bereits grundsätzlich gelebt. In der operativen Entwicklungspraxis fehlt es an einer Art „*funktionalem Baukasten*“, der eine *übergreifende Planung und Steuerung der Produktfunktionen* ermöglicht, um der Komplexität nicht nur Produktgenerations-spezifisch zu begegnen und Wissen zu zentralisieren. Eine Konsolidierung in einem systematischen *Funktionsmodell* unterstützt die Synchronisation zwischen funktionspezifischen Modellen und den Produktmodellen der Produktgenerationen im Produktportfolio.

4.2 Fazit: Identifizierte Handlungsfelder und Anforderungen an die Präskriptive Studie

Im Kontext der teilnehmenden Beobachtung sowie einer tiefgreifenden Inhaltsanalyse von Prozessen und Methoden in der automobilen Produktentwicklung wurden mehrere Handlungsfelder zur Weiterentwicklung bestehender Modelle, Prozesse und Methoden identifiziert:

- Strukturierung von Prozessen sowie Vereinheitlichung der Abstraktionsgrade und -ebenen in der Entwicklung des „funktionalen“ Portfolios eines Anbieters
- Betrachtungsfokus in der Frühen Phase stärker auf den für Kunde oder Anwender wahrnehmbaren Funktionen legen, die einen direkt greifbaren Wert oder Nutzen des Gesamtproduktes schaffen
- Aufwertung der Entwicklungsunterstützung, die der/die Produktentwickler*in flexibel und anpassbar beim Spezifizieren einsetzen kann
- Unterstützung der gezielteren Generierung und Priorisierung von neuen Funktionsideen in der Frühen Phase
- Systematisierung der transparenten und rückverfolgbaren Spezifikation von Produktfunktionen in Generationen
- Stärkere Berücksichtigung der Auswirkungen auf Realisierung von Funktionen oder sogar der Stilllegung bzw. der Beendigung von Funktionslebenszyklen bereits in der Spezifikation

Auf Basis synthetisierter Erkenntnisse wurden Anforderungen an prozessuale und methodische Unterstützung der Produktentwickler*innen abgeleitet und drei relevante Fälle der Produktportfolio-übergreifenden Funktionsentwicklung identifiziert (vgl. Bild 2).

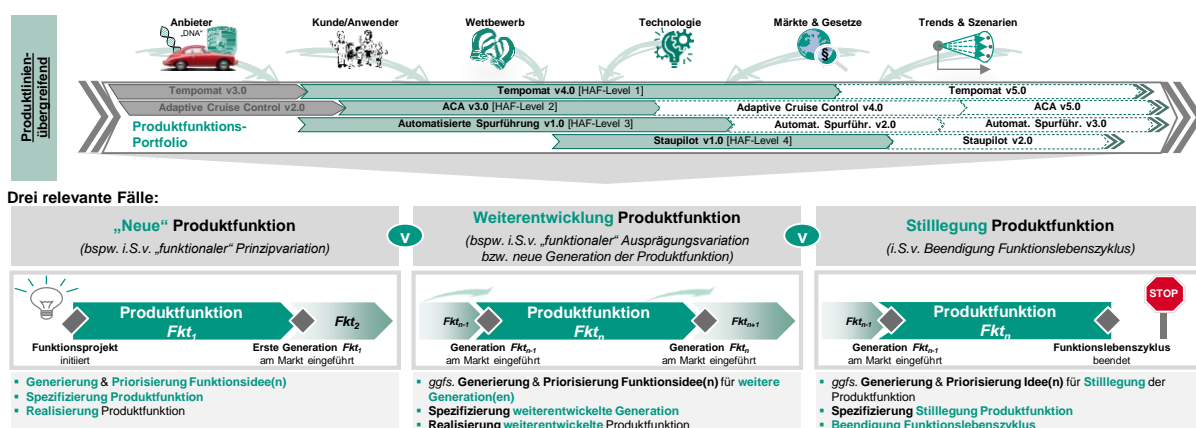


Bild 2: Die drei relevanten Fälle der Produktportfolio-übergreifenden Funktionsentwicklung.

In Anbetracht der *ersten Forschungsfrage* führten die Analyseergebnisse zu der Erkenntnis, dass die prozessuale und methodische Unterstützung beim Spezifizieren aus Funktionssicht die Phasen der Generierung und Priorisierung von Funktionsideen fördern sowie die Spezifikation von Produktfunktionen systematisieren muss. Flexibel anwendbare und adaptive Entwicklungsunterstützung erlaubt das Produktportfolio-übergreifende Spezifizieren aus

Funktionssicht durch den/die Produktentwickler*in. Die Systematik muss dabei ebenso frühzeitig funktionale Weiterentwicklungen in Generationen vorausdenken und die Spezifikation von Produktfunktionen mit Realisierungsphase und ggf. der Beendigung des Funktionslebenszyklus verknüpfen.

5 Produktportfolio-übergreifendes Spezifizieren von Produktfunktionen (PS)

Mit dem Ziel, den/die Produktentwickler*in beim Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen der automobilen Produktentwicklung prozessual und methodisch zu unterstützen, wird in der *Präskriptiven Studie* (PS) ein *Referenzprozess im Modell der PGE* vorgestellt. Vor diesem Hintergrund wird die *zweite Forschungsfrage* beantwortet.

5.1 Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen

In Anlehnung an die Phasen des Produktlebenszyklus und der Produktentstehung (VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11) differenziert der Referenzprozess zum *Produktportfolio-übergreifende Spezifizieren von Produktfunktionen* die vier Phasen *Generierung und Priorisierung Funktionsidee(n)* [1], *Spezifikation Produktfunktion* [2], *Realisierung Produktfunktion* [3] und optional die *Stilllegung Produktfunktion* [4].

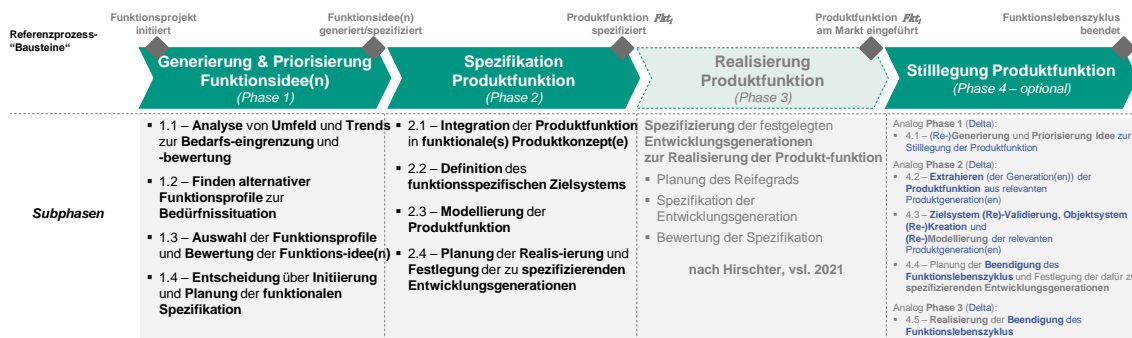


Bild 3: Referenzprozess zum Produktportfolio-übergreifenden Spezifizieren von Produktfunktionen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Die erste Phase des Referenzprozesses „*Generierung und Priorisierung von Funktionsidee(n)*“ initiiert das Funktionsprojekt, analysiert Umfeld und Trends zur Bedarfseingrenzung und -bewertung und sucht nach alternativen Funktionsprofile zur identifizierten Bedürfnissituation. Anschließend erfolgt eine systematische Auswahl der Funktionsprofile und Bewertung der Funktionsideen anhand der Formel *Weighted Shortest Job First* (WSJF, vgl. Leffingwell (2011)) Formel über das Konsent-Prinzip. Hierbei werden *Markt- und Entwicklungspotenzial* sowie *Zeitkritikalität* (i.S.v. „*Kosten der Verzögerung*“) dem *Entwicklungsaufwand* und *-risiko* (i.S.v. „*Größe des Entwicklungsauftrags*“) gegenübergestellt. In der zweiten Phase „*Spezifikation Produktfunktion*“ wird die Produktfunktion in die funktionalen Produktkonzepte verschiedener Produktgenerationen integriert. Anknüpfend daran wird das funktionsspezifische Zielsystem definiert und die Produktfunktion modelliert bzw. in Produktgenerations-spezifische Produktmodelle überführt. Die dritte Phase „*Realisierung Produktfunktion*“ zielt auf die Markteinführung der Produktfunktion. In den festgelegten Entwicklungsgenerationen wird jeweils der Reifegrad geplant, die Entwicklungsgeneration spezifiziert und die Spezifikation bewertet. Die vierte Phase „*Stilllegung Produktfunktion*“ bezweckt die Beendigung des Lebenszyklus einer am Markt eingeführten Produktfunktion oder einer ihrer spezifischen Generationen. Diese letzte Phase lehnt sich dabei an die Aktivitäten der vorigen Phasen an (vgl. Bild 3).

5.2 Methodische Entwicklungsunterstützung beim Spezifizieren aus Funktionssicht

Die Verknüpfung zwischen der strategischen Ausrichtung bzw. des zukünftigen Produktportfolios wird über eine *Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse* mit dem funktionalen Portfolio realisiert und in einer sogenannten *Produktfunktions-Roadmap* aggregiert und organisiert (vgl. Bild 4). Die Produktfunktions-Roadmap ist als eine Art „*funktionaler Baukasten*“ zu verstehen, in dem alle Produktfunktionen des gesamten Produktportfolios eines Anbieters zusammengeführt werden. Die in Generationen entwickelten Produktfunktionen werden in der Roadmap, nach Eigenschaften gruppiert, visualisiert. Hierzu zählen alle Produktfunktionen, die auf dem Markt eingeführt sind/ waren, sich in der Entwicklung befinden oder nur als Funktionsideen für die Zukunft geplant sind – unabhängig davon, ob diese bereits einer oder mehrerer Produktgenerationen des Produktportfolios zugeordnet wurden. Dementsprechend können Produktfunktionen oder Funktionsideen aufgrund ihres *lösungsoffenen Charakters* unabhängig von einzelnen Produktgenerationen spezifiziert werden.

Legende:

- Fkt_i Produktfunktion in der Generation $i \in \mathbb{N}$
- erforderliche Technologie
- optional umsetzbar mit Technologie
- keine Umsetzung der Produktfunktion Fkt_i
- ? Prüfauftrag zur Umsetzung der Produktfunktion Fkt_i

		Produktfunktion und Funktionsidee(n)		(Erforderliche) Technologien und Ressourcen				Konsistenz- und Vollständigkeitsanalyse								
		Bezeichnung	Generation in Entwicklung (n)	Antriebskonzept												
				VKM	PREV	BEV										
Produktgeneration A	Produktfunktion A	$Fkt_1 n=5$		•	•	○										
	Produktfunktion B	$Fkt_2 n=8$		•	○	•										
	Produktfunktion C	$Fkt_2 n=2$		○	•											
	Produktfunktion D	—		•	○	•										
	Bedarf einer neuer Produktfunktion					•										
[...]	[...]	[...]														
Produktgeneration B	Produktfunktion Q	$Fkt_3 n=3$		○	○	•										
	Produktfunktion R	—		•	○											
	Produktfunktion S	$Fkt_2 n=7$		•												
	Funktionsidee C	$Fkt_1 n=1$			•	○										
[...]	[...]	[...]														
[...]	[...]	[...]														

Bewertungsmaßstab

- Totale Konsistenz
- Partielle Konsistenz
- Neutral
- Partielle Inkonsistenz
- Totale Inkonsistenz

Bild 4: Produktfunktions-Roadmap als Instrument zur Konsistenz- und Vollständigkeitsanalyse

Rechts neben der *Bezeichnung einer Produktfunktion* wird, wie in Bild 4 dargestellt, die aktuelle Generation ebendieser in der Entwicklung angegeben. Darunter ist jeweils die Generation der Produktfunktion Fkt_n , die als nächstes in den Markt eingeführt wird (heutiger Zeitpunkt) zu verstehen. Ferner können bereits generierte und priorisierte Funktionsideen in der Roadmap berücksichtigt werden. Die Informationen aus einer etwaigen Technologie- und Ressourcen-Roadmap werden in den Spalten rechts davon mit der jeweiligen Produktfunktion verknüpft. In diesem Schritt kann zwischen *optional* und *erforderlichen Technologien/Ressourcen* differenziert werden. Die mitunter wichtigste Verknüpfung in der Produktfunktions-Roadmap stellt die Verbindung spezifischer Generationen der Produktfunktion mit den einzelnen *Produktgenerationen des Produktportfolios* dar. Essentiell ist, dass alle Produktgenerationen aller Produktlinien erfasst werden, die sich aktuell am Markt oder der Entwicklung befinden oder geplant sind. Zudem sollten die Produktgenerationen zeitlich nach ihrem Markteinführungszeitpunkt sortieren werden (vgl. Bild 4). Die explizite Generation der Produktfunktion, die umgesetzt wird oder werden soll, kann dementsprechend in den einzelnen Zellen, die jeweils eine Produktfunktion mit einer spezifischen Produktgeneration verknüpfen, angegeben werden. In der Entwicklungspraxis lässt sich beobachten, dass insbesondere aufgrund von Unsicherheiten in der Frühen Phase der automobilen Produktentwicklung das Produkt noch nicht vollumfänglich spezifiziert ist, weshalb die Markierung von sogenannten funktionalen „*Prüfaufträgen*“ über ein „?“ dargestellt werden kann. Die *Produktfunktions-Roadmap* kann nicht nur als *Planungs- und Steuerungswerkzeug* des *funktionalen Portfolios eines Anbieters* genutzt werden, sondern ermöglicht durch ihre Struktur die *Analyse der Vollständigkeit sowie Konsistenz zwischen Produktfunktion und Produktgeneration*. Die Einfärbung der Zelle gemäß des in Bild 4 erläuterten *Bewertungsmaßstabes* zeigt die jeweilige Konsistenz zwischen der (Generation der) Produktfunktion und Produktgeneration.

Auf Grundlage der Produktfunktions-Roadmap können anschließend gemäß dem Referenzprozess die funktionspezifischen Zielsysteme definiert werden. Ausgewählte Methoden und Werkzeuge, die den/die Produktentwickler*in unterstützen werden in der folgenden Evaluation beispielhaft erläutert.

6 Evaluation der Systematik am Beispiel von Produktfunktionen der Fahrzeugaerodynamik in der Sportwagenentwicklung (DS-II)

In der *Deskriptiven Studie II* wurde die entwickelte Systematik über eine Fallstudie in der Sportwagenentwicklung evaluiert, um die effektive Anwendbarkeit der Unterstützungswerkzeuge zu zeigen. Der Fokus wird in der vorliegenden Forschungsarbeit hierbei auf die Evaluation der zweiten Phase des Referenzprozesses (vgl. Bild 3) gelegt. In diesem Rahmen erfolgte zudem eine kritische Ergebnis- und Erkenntnisdiskussion mit dem Ziel die dritte Forschungsfrage zu beantworten.

Denkt man an einen Sportwagen, stellt man sich meist ein „windschnittig gebautes [zweisitziges] Auto mit starkem Motor“ (Dudenredaktion n.d.) in allen möglichen und unmöglichen, dynamischen Fahrzuständen vor. Die Windschlüpfrigkeit von Sportwagen hat seit dabei einen enormen Stellenwert in der Produktentwicklung, da der Luftwiderstand eines Fahrzeugs sich als den größten Verlustfaktor bei höheren Geschwindigkeiten ausmacht. Gleichmaßen können die Ausprägungen von Geradeauslauf, die Brems- und Lenkeigenschaften sowie das Kurven- und Seitenwindverhalten gerade im hohen Geschwindigkeitsbereich durch eine intelligente (adaptive) Fahrzeugaerodynamik positiv gesteuert werden. Die Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ kombiniert in Sportwagen die Funktionalitäten eines ausfahrbaren Frontspoilers mit einem verstellbaren Heckflügel, um auf der Rennstrecke hohe Abtriebswerte auf der Vorder- und Hinterachse für optimale Fahrleistung und bedarfsabhängig im Alltag einen parkhaustauglichen Böschungswinkel (bzw. Bodenfreiheit) umzusetzen. (Meder et al. 2014)

In der Evaluation der Entwicklungsunterstützung der zweiten Phase des Referenzprozesses wurde folglich die Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“ als Anwendungsbeispiel verwendet. Die Produktfunktion wird Produktportfolio-übergreifend sowohl in einigen funktionalen Produktkonzepten als auch Produktgenerationen am Markt und in der Entwicklung des betroffenen OEMs integriert und umgesetzt. In einem ersten Schritt wurde dazu ausgehend von der Produktfunktions-Roadmap (vgl. Bild 4) das funktionspezifische Zielsystem (vgl. Subphase 2.2) über einen sogenannten *Funktionssteckbrief* (FSB, vgl. Bild 5) definiert.

Produktfunktion	Generation	Funktionsverantwortlicher	Fachbereich	$\rho_{Porsche.911.tarbo}$...	1. Markteinführung	Ausblick Stilllegung
Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln	I	Mustermann, Max	EPA	X		09/2013	-
Funktionsbeschreibung		Funktionale Referenzsystem-Elemente		Mögliche Weiterentwicklung/Stilllegung			
Aktive Koordination der Um- und Durchströmung des Fahrzeugs zur Sicherstellung der maximalen Effizienz bzw. Performance je nach Betriebszustand mit hoher aerodynamischer Fahrstabilität. Der Fahrer kann zudem über Fahrprogramme-definierte Strategien der Fahrzeugaerodynamik auswählen oder direkt bedienen.		Funktionalität der Fahrzeugaerodynamik aus dem Serienfahrzeug „Supersportwagen“ sowie weiteren Motorsport-Fahrzeugen der OEMs		* [...]			
Initiiierende Ereignisse		Resultierende Ergebnisse		Lösungsoffene Funktionsarchitektur			
<ul style="list-style-type: none"> Fahrer möchte sportliches Fahrverhalten festlegen Fahrer möchte effizientes Fahrverhalten festlegen Fahrzeug wird mit offenem Verdeck bewegt Fahrzeugverzögerung [...] 		<ul style="list-style-type: none"> Optimales Setup der Fahrzeugaerodynamik bspw. für gute Rundenzzeit auf der Rennstrecke Sportspendee oder hochweites-optimiertes Fahren Kompensation der negativen, aerodynamischen Effekte durch offenes Verdeck auf Fahrstabilität Aerodynamische Unterstützung zur Erreichung eines möglichst kurzen Bremswegs 					
Anforderungen		Initiiierende/beeinflusste Eigenschaften		Lösungsspezifische Funktionsarchitektur			
<ul style="list-style-type: none"> Parkhaus-tauglicher Böschungswinkel <10° [...] 				* [...]			
Validierung der Funktion durch ...		Physische Elemente					
<ul style="list-style-type: none"> Entwicklungsgenerationen (virtuell/physisch) der Produktlinie A 		<ul style="list-style-type: none"> Spoilersystem (Front/Heck), Kühlflügel, Verdecksystem inkl. Windschott oder Schiebedachsystem inkl. Windabweiser, [...] UX-Relevanz: Kombiinstrument, Centerdisplay, Fahrprogrammsschalter, [...] [...] 					
Relevant für Function-on-Demand <input type="checkbox"/>		Relevant für Connect-Verbund <input type="checkbox"/>		Realisierung in E/E-Architektur A <input type="checkbox"/>		Realisierung in E/E-Architektur C <input checked="" type="checkbox"/>	
Relevant für [...] <input checked="" type="checkbox"/>		Relevant für [...] <input checked="" type="checkbox"/>		Realisierung in E/E-Architektur B <input type="checkbox"/>		Realisierung in [...] <input checked="" type="checkbox"/>	

Bild 5: Beispielhafter Funktionssteckbrief (FSB) der Produktfunktion „Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln“

Auf Grundlage des FSB kann eine detaillierte Modellierung und schlussendlich valide Bewertung der zu entwickelnden Produktfunktion hinsichtlich der relevanten Parameter (z.B. Eigenschaftserfüllung) sowie des technischen und ökonomischen Risikos durchgeführt werden. In Zuge der Anwendung der Entwicklungsunterstützung zeigte sich darüber hinaus, dass die Festlegung eines Funktionsverantwortlichen im Sinne eines „*Single-Point-Of-Truth*“ (dt. ein einziger Punkt der Wahrheit) förderlich ist, um Klarheit über lösungsoffene und -spezifische Inhalte der Produktfunktion zu schaffen und das Verbreiten von falschem Wissen zu unterbinden. In weiteren Schritten wurde die Produktfunktion inkl. der Vernetzung und Schnittstellen zu den initiiierenden und beeinflussten Eigenschaften, den Subfunktionen sowie den notwendigen physischen Elementen funktionspezifisch in Microsoft PowerBI modelliert (vgl. Albers et al. (2020a)). Über Interviews und Expertengespräche konnte positives Feedback über den Nutzen dieser Art und Weise der funktionspezifischen Modellierung gewonnen werden. Gerade die weitere Nutzung bzw. Umsetzung in MBSE-Modellen oder der Einsatz in der Realisierungsphase (z.B. zur Validierung in der Serienentwicklung) ist ein großes Potenzial des Modells. Trotz der vergleichsweise einfachen Integration und Anwendbarkeit wurde registriert, dass der Aufwand für die initiale Erstellung wie auch Pflege/Änderungsmanagement des Modells gesteigert wurde. Durch den Produktlinien- und Produktgenerations-übergreifenden Einsatz des Modells und den damit verbundenen Nutzen (z.B. bei der Spezifikation von funktionalen Produktkonzepten und der Erprobung in der Serienentwicklung) konnte dies jedoch relativiert werden.

Zur Beschließung der initialen Evaluation der zweiten Phase des Referenzprozesses wurde am Beispiel der Produktfunktion „*Fahrzeugaerodynamik aktiv regeln*“ die methodische Modellierung (vgl. Subphase 2.3) im No Magic Cameo Systems Modeler angewendet, evaluiert und mit Experten kritisch diskutiert. Die modellierten Wirkbeziehungen und Zusammenhänge der Produktfunktion wurden anknüpfend daran in die Produktmodelle von zunächst zwei Fahrzeugprojekten in der Entwicklung des OEMs integriert. Ein beispielhafter Ausschnitt der Cameo Modellierung ist in Bild 6 dargestellt.

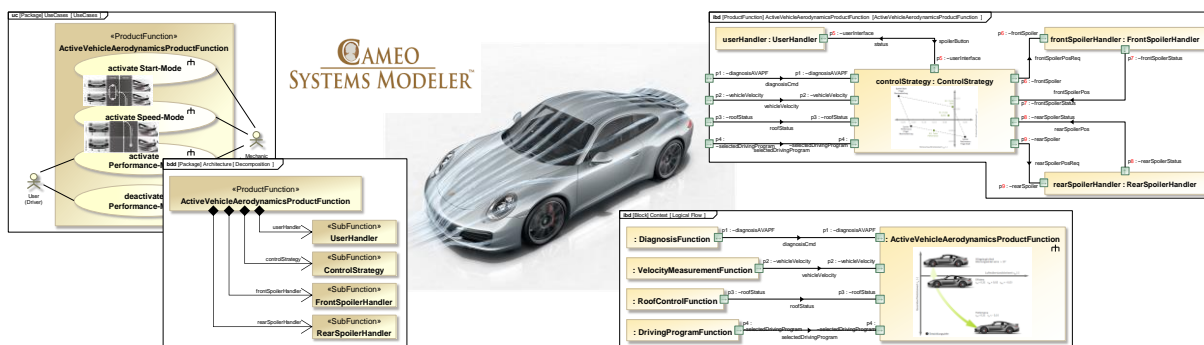


Bild 6: Beispielhafter Ausschnitt aus einem spezifizierten Produktmodell in No Magic Cameo Systems Modeler

Die existierende, funktionspezifische Modellierung wurde in ein konsistentes, interdisziplinäres SysML-Modell im Sinne des MBSE überführt. Die durchgeführte Modellierung dient dazu, die Rückverfolgbarkeit (*engl.* traceability) und Transparenz sicherzustellen. Sofern alle komplexen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen Eigenschafts-, Funktions- und physischer Sicht abgebildet sind, können automatisiert spezifische Sichten für Produktentwickler*innen oder Anwendungsfälle auf nur einen Teil des Modells ausgeleitet werden. Diese Ausschnitte können wiederum die Grundlage für weitere Analysen, Simulationen oder Identifikation von Zielkonflikten bilden. Die Bedeutung von MBSE in automobilen Entwicklungsprozessen wurde durch die befragten Experten mehrheitlich bestätigt. Das genutzte Modellierungsframework nach Albers et al. (2021) förderte zudem das Verständnis des Modellierungsansatzes bzw. der entsprechenden Methode. Zunächst wurde die Modellierung zur retrospektiven Abbildung der Produktfunktion genutzt und als zielsicheres und effektives Entwicklungswerkzeug wahrgenommen. Großes Potenzial und Nutzen wurde laut der Experten in der Unterstützung von Entscheidungsprozessen oder externer Kommunikation beobachtet. Weiterhin ergaben sich Möglichkeiten der Nutzung modellierter

Informationen und teilautomatisiert erstellter Ausschnitte in verknüpften Methoden wie der Reifegrad- oder Risikobewertung. Die gewonnenen Erkenntnisse der Anwendung in der automobilen Produktentwicklungspraxis unterstützten die positive Bewertung der prozessualen und methodischen Unterstützung durch den entwickelten Referenzprozess im Modell der PGE.

7 Ausblick

Wenngleich eine Übertragbarkeit auf weitere automobile OEMs oder Zulieferer in einem gewissen Umfang valide erscheint, erhebt der Beitrag keinen Anspruch auf bedingungslose Repräsentativität des Produktportfolio-übergreifenden Spezifizierens von Produktfunktionen und bietet daher Potenzial weitere Forschungsprojekte anzuschließen. Aufgrund zeitlicher Limitationen erfolgte noch keine Evaluation der dritten und vierten Phase des entwickelten Referenzprozesses. Die Erkenntnisse weisen auf übergeordnete Synergiepotenziale zwischen verschiedenen OEMs der Automobilindustrie und eine Abstraktion des Spezifizierens sogenannter *funktionaler Portfolios* verschiedener Anbieter oder gar einer ganzen Domäne hin. Beispielhaft hierfür sind die aktuellen Diskussionen in Bezug auf eine OEM-übergreifende Standardisierung von bspw. einem „Parkhauspiloten“. Anschließend an die Entwicklung eines Referenzprozesses und methodischer Entwicklungsunterstützung, liegt Forschungsbedarf in einer zuträglichen Referenz-Organisationsstruktur. Dementsprechend empfiehlt sich eine gleichzeitige Betrachtung und Ergänzung organisationaler Strukturen und Arbeitskreise mit den Aufgaben und Kompetenzprofilen involvierter Produktentwickler*innen, die Handlungen des Spezifizierens von Produktfunktionen in der Organisationsstruktur ausüben.

Literaturverzeichnis

- Albers et al. 2015 ALBERS, A. ; BURSAC, N.; WINTERGERST, E.: *Produktgenerationsentwicklung: Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive*. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (2015)*
- Albers et al. 2020a ALBERS, A.; FAHL, J.; HIRSCHTER, T.; HAAG, S.; HÜNEMEYER, S.; STAIGER, T.: Defining, Formulating and Modeling Product Functions in the Early Phase in the Model of PGE – Product Generation Engineering. In: *Proceedings of 6th IEEE ISSE 2020, 2020a*
- Albers et al. 2020b ALBERS, A.; HIRSCHTER, T.; FAHL, J.; WÖHRLE, G.; REINEMANN, J.; RAPP, S.: Generic reference product model for specifying complex products by the example of the automotive industry. In: *Digital Proceedings of TMCE 2020, 2020b*, S. 353–370
- Albers et al. 2018 ALBERS, A.; HEITGER, N.; HAUG, F.; FAHL, J.; HIRSCHTER, T.; BURSAC, N.: *Supporting Potential Innovation in the Early Phase of PGE – Product Generation Engineering: Structuring the Development of the Initial System of Objectives : R&D Management Conference, 2018*
- Albers et al. 2017 ALBERS, A. RAPP, S. BIRK, C.; BURSAC, N.: Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017, 2017*
- Albers et al. 2020c ALBERS, A.; RAPP, S.; FAHL, J.; HIRSCHTER, T.; REVFI, S.; SCHULZ, M.; STÜRMLINGER, T.; SPADINGER, M.: Proposing a Generalized Description of Variations in Different Types of Systems by the Model of PGE – Product Generation Engineering. In: *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 2020c*, S. 2235–2244
- Albers et al. 2019 ALBERS, A.; RAPP, S.; SPADINGER, M.; RICHTER, T.; BIRK, C.; MARTHALER, F.; HEIMICKE, J.; KURTZ, V.; WESSELS, H.: The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations, Bd. 1. In: Design Society (Hrsg.): *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, 2019, S. 1693–1702

- Bei hoffet al. 2014 BEIHOFF, B.; OSTER, C.; FRIEDENTHAL, S.; PAREDIS, C.; KEMP, D.; STOEWER, H.; NICHOLS, D.; WADE, J.; INCOSE: *A World in Motion – Systems Engineering Vision 2025*. 2014
- Blessing und Chakrabarti 2009 BLESSING, L. T.M.; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. London : Springer, 2009
- D'Ambrosio und Soremekun 2017 D'AMBROSIO, J.; SOREMEKUN, G.: Systems engineering challenges and MBSE opportunities for automotive system design. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, 2017*
- Darlington und Culley 2002 DARLINGTON, M. J.; CULLEY, S. J.: *Current Research in the Engineering Design Requirement*. In: *Journal of Engineering Manufacture* 216 (2002), Nr. 3, S. 375–388
- Dudenredaktion n.d. DUDENREDAKTION: *Sportwagen*. URL <https://www.duden.de/rechtschreibung-/Sportwagen>
- Ehrlenspiel 2009 EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München : Carl Hanser, 2009
- Ehrlenspiel und Meerkamm 2013 EHRENSPIEL, K. ; MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München : Hanser Verlag, 2013
- Fahl et al. 2019 FAHL, J.; HIRSCHTER, T.; KAMP, J.; ENDL, M.; ALBERS, A.: *Functional Concepts in the model of PGE - Product Generation Engineering by the Example of Automotive Product Development*. Piscataway, NJ, USA : IEEE, 2019 (ISSE Proceedings 5)
- Königs et al. 2012 KÖNIGS, S. F.; BEIER, G.; FIGGE, A.; STARK, R.: *Traceability in Systems Engineering – Review of industrial practices, state-of-the-art technologies and new research solutions*. In: *Advanced Engineering Informatics* (2012), Vol. 26, No. 4, S. 924–940
- Leffingwell 2011 LEFFINGWELL, D.: *Agile Software Requirements : Lean Requirements Practices for Teams, Programs, and the Enterprise*. Boston, MA, USA : Addison-Wesley Professional, 2011
- Lindemann et al. 2006 LINDEMANN, U.; REICHWALD, R.; ZÄH, M.: *Individualisierte Produkte – Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin : Springer, 2006
- Lindemann 2009 LINDEMANN, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2009
- Meder et al. 2014 MEDER, J.; WIEGAND, T.; PFADENHAUER, M.: *Adaptive Aerodynamik des neuen Porsche 911 Turbo*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2014), Vol. 116 Issue 2, S. 58–63
- Nellore und Söderquist 2000 NELLORE, R.; SÖDERQUIST, K.: *Strategic outsourcing through specifications*. In: *Omega* (2000), Vol. 28, Issue 5, S. 525–540
- Ponn und Lindemann 2011 PONN, J.; LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. Berlin : Springer, 2011
- VDI 2019 VDI-Richtlinie 2221-1:2019-11. 2019. *VDI 2221 Blatt 1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung*
- Volkswagen AG 2019 VOLKSWAGEN AG: *Start einer neuen Ära : Volkswagen auf dem 40. Wiener Motorensymposium*. URL <https://ecarandbike.com/start-einer-neuen-aera/>
- Walden et al. 2017 WALDEN, D. D.; ROEDLER, G. J.; FORSBERG, K. HAMELIN, R. D.; SHORTELL, T. M.; KAFFENBERGER, R.: *INCOSE Systems Engineering Handbuch V.4.0 : Ein Leitfaden für Systemlebenszyklus-Prozesse und -Aktivitäten*. Bremen : GfSE Verlag, 2017
- Weissler 2018 WEISSLER, Paul: *'Function on Demand' brings opportunities, security challenges*. URL <https://www.sae.org/news/2018/05/function-on-demand>

Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für mechanische Bauteile

Manufacturing Stage-Based Design Model for Mechanical Components

Kevin Herrmann¹, Tim Brockmöller¹, Paul Gembarski¹, Iryna Mozgova¹, Roland Lachmayer¹

¹Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Garbsen
herrmann@ipeg.uni-hannover.de

Abstract (deutsch): Durch fertigungsbedingte Restriktionen wird der Gestaltungsraum von mechanischen Bauteilen während der Produktentwicklung eingeschränkt. Die Einschränkungen sind in der Regel nicht vollständig bekannt und können daher nicht in vollem Umfang bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt werden. Das betrifft insbesondere prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen, die bei der Aneinanderreihung von mehreren Fertigungsschritten entstehen. Dieser Beitrag schlägt einen Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsansatz vor, um das Wissen für ein herstellungsgerechtes Bauteil möglichst früh im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung zu stellen. Grundlage dieses Gestaltungsansatzes sind Transfermodelle, welche Fertigungsprozessketten entgegen der späteren Prozessrichtung beschreiben. Dabei werden schrittweise zwischengelagerte Fertigungsstufen abgeleitet und deren Herstellbarkeit mit Hilfe geeigneter Kontrollmechanismen evaluiert.

Keywords (deutsch):

Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell, fertigungsgerechte Gestaltung, Tailored Forming, Parametrische CAD-Modelle

Abstract (english): Manufacturing restrictions limit the design scope of mechanical components during product development. Often, these restrictions are not completely known and can therefore not be taken fully into account during the design of component. This concerns in particular cross-process manufacturing restrictions, which arise when several manufacturing steps are chained together. This paper proposes a design approach based on knowledge about of manufacturing steps in order to provide a manufacturable component as early as possible in the product development process. The basis of this design approach are transfer models, which describe the manufacturing process chain against the later process direction. Thereby, intermediate manufacturing stages are derived step by step and their manufacturability is evaluated by means of suitable control mechanisms.

Keywords (english):

Manufacturing Stage Based Design Model, Design for Manufacturing, Tailored Forming, Parametric CAD-models

1 Einleitung

Die stetige Weiterentwicklung in der Produktionstechnik erweitert den konstruktiven Lösungsraum bei der Gestaltung von Bauteilen auf eine sehr grundlegende Weise. Während z.B. Verfahren der Additiven Fertigung die Freiheitsgrade bei der Formgebung von mechanischen Bauteilen eröffnen (Lachmayer et al. 2017), erschließen immer mehr Prozessketten das Potenzial, auch unterschiedliche Werkstoffe in einer einzelnen Komponente zu verarbeiten (Behrens et al. 2019, Blohm et al. 2018; Chugreeva et al. 2018). Die Entwicklung solcher Multi-Materialbauteile erlaubt hierbei, weitere Potenziale im Leichtbau und in der belastungsgerechten Konstruktion zu heben (Ashby und Cebon 1993, Kleemann et al. 2017, Brockmöller et al. 2017). Die entsprechenden Fertigungsprozessketten zeichnen sich dadurch aus, dass die Komplexität mit der Anzahl der notwendigen Fertigungsschritte steigt. Ein Beispiel dafür sind die im Sonderforschungsbereich (SFB) 1153 entwickelten Tailored Forming Prozessketten, bei denen verschiedene Füge- und Umformschritte hintereinandergeschaltet sind (Behrens et al. 2016). Besonders der Initialaufwand von der Planung bis zu einem robusten Prozess ist hoch (Özbayrak et al. 2004). Daher ist es vorteilhaft, nicht erst bei der Prozessplanung, sondern auch bei der Produktentwicklung auf möglichst viel formalisiertes Expertenwissen zurückgreifen zu können, um sicher herstellbare Bauteile zu konstruieren. Dieses Wissen kann in unterschiedlicher Form vorliegen, was von Gestaltungsrichtlinien bis hin zu wissensbasierten Analyse- oder Simulationswerkzeugen für einzelne Prozessschritte reicht (Brockmöller et al. 2020).

Da sich der Änderungsaufwand mit fortschreitender Entwicklung erhöht, wird im Rahmen von front loading-Ansätzen das Ziel verfolgt, das Wissen für ein herstellungsgerechtes Bauteil möglichst früh im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung zu stellen (Boothroyd 1994). Um das Ziel zu erreichen, wird in diesem Beitrag ein Fertigungsstufen-basierter Gestaltungsansatz vorgeschlagen, um auch Restriktionen aus zwischengelagerten Wertschöpfungsstufen beginnend bei der Halbzeuggestaltung in die Bauteilgestaltung einfließen zu lassen. Kernaspekt des Gestaltungsansatzes sind Transfermodelle, welche Fertigungsprozessketten invers, also entgegen der späteren Prozessrichtung beschreiben.

2 Theoretischer Hintergrund und verwandte Arbeiten

Um Produkte bereits gezielt auf spätere Fertigungsprozesse auslegen und entwickeln zu können, werden in Literatur und Praxis unterschiedliche Ansätze verfolgt, die sich grob in allgemeine Konstruktionsmethodiken und Problemlösungsprozesse, in Gestaltungsrichtlinien sowie in, im weitesten Sinne, modell- und wissensbasierte Ansätze gliedern lassen. Ein Beispiel für ersteres stellt die Konstruktionsmethode *Axiomatic Design* dar (Suh 2005). Dieser Ansatz beruht auf einem Domänenkonzept, das zwischen Kundendomäne (als Menge aller Kundenanforderungen), funktionaler Domäne als deren Übersetzung in die Sprache der Konstruktion, physischer Domäne als parameterhafte Beschreibung von Lösungen bis auf Ebene von Einzelteilen und ihrer Gestaltparameter (Design Parameter) und Prozessdomäne differenziert. Letztere enthält mit den Prozessvariablen die Kernparameter der Fertigungsprozesse, mit denen ein Design Parameter realisiert wird. Die vier Domänen führen zu einer starken Formalisierung des Entwurfsprozesses, bei der die Anforderungen einer Vorgängerdomäne mittels Entwurfsmatrizen auf die Lösungen der Folgedomäne abgebildet werden. Dreht man den Prozess um und beginnt die Betrachtung bei einer allgemein formulierten Prozessdomäne, so ergibt sich hieraus ein Portfolio an Fähigkeiten, wodurch Design Parameter mit einer vorhandenen Prozesskette erzeugt werden können (Gembarski 2018, Sheveleva et al. 2020).

Ein Werkzeug, welches Konstruierende bei fertigungsgerechtem Entwurf und Detaillierung unterstützt (im Englischen: Design for Manufacturing, DfM), stellen Gestaltungsrichtlinien dar. Diese bestehen aus Sammlungen von z.B. Fertigungsrestriktionen und Heuristiken, mit denen Erfahrungen aus

unterschiedlichen Fertigungsprozessen formalisiert werden (Boothroyd 1994, Huang 1996). Die Operationalisierung dieser Gestaltungsrichtlinien im Rahmen von rechnerunterstützten Konstruktions- oder Analysesystemen kann jedoch unterschiedlich aufwändig sein. Während sich der Zusammenhang zwischen Blechstärke und Biegeradius durch eine Parameterverknüpfung darstellen lässt, erfordert z.B. die Gestaltungsrichtlinie „Materialmix minimieren“ aus dem recyclinggerechten Gestalten bereits eine Auswertung von Baugruppen- oder Stücklistendaten (Dostatni et al. 2016). Gestaltungsrichtlinien wie „Materialanhäufungen vermeiden“ aus dem gießgerechten Gestalten bedingen hingegen spezialisierte Analysesoftware oder den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz (Gembariski 2020a).

Während die o.g. Gestaltungsrichtlinien eine allgemeingültige Formulierung von z.B. Fertigungsrestriktionen darstellen, beziehen modell- und wissensbasierte Ansätze konkrete Fertigungseinrichtungen und ihre spezifischen Restriktionen wie z.B. den maximalen Verfahrenweg einer NC-Achse mit ein (Vajna et al. 2018, Siqueira et al. 2019). Ein Ansatz, der auf die Gestaltung von mehrstufigen Fertigungsprozessen abzielt, wurde von Milisavljevic-Syed et al. (2019) vorgestellt. Auf Basis eines state-space Modells werden hierbei die Fähigkeiten der einzelnen Fertigungsprozesse unter Berücksichtigung von verfügbaren Werkzeugen, Einstellparametern, Prozessgrößen und Sensoren der Maschinen formalisiert. Für eine bekannte Bauteilgeometrie lassen sich anschließend auf dieser Basis über ein Entscheidungsnetzwerk diejenigen Fertigungsprozesse auswählen, die den geringsten Aufwand bei der Prozessüberwachung bei gleichzeitig größter Prozesssicherheit bieten. Lassen sich Geometrielemente nicht herstellen, wird dieses zurückgemeldet. Das Modell wird anhand eines mehrstufigen Stanzbiegeprozesses aus dem Automobilbau diskutiert. Einen anderen Ansatz wählt Gembariski (2020b). Hier wird das Portfolio der Fähigkeiten einer Fertigungsprozesskette direkt als wissensbasiertes System modelliert. Dieses lässt sich anschließend mit rechnerunterstützten Konstruktionssystemen koppeln, um z.B. neue Produktvarianten direkt im Hinblick auf ihre Fertigbarkeit zu überprüfen oder die Auswirkung von einer Geometrieänderung auf die Fertigungsprozesskette beurteilen zu können. Das Modell wird anhand von Spulenteilen eines Hairpin-Stators erläutert.

3 Ansatz des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell

Wenngleich Konstruktionsmethoden wie *Axiomatic Design* eine grundsätzliche formelle Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen oder Gestaltungsrichtlinien ermöglichen, werden hierbei in der Regel keine Fertigungsstufen berücksichtigt. In den Wissensbasierten Ansätzen geschieht dieses lediglich implizit über die ausgedrückten Fähigkeiten einzelner Prozesse. Der im Folgenden vorgestellte Ansatz soll beide Sichtweisen verbinden, indem die Herstellungskette entgegengesetzt zur Prozessrichtung betrachtet wird. Damit lassen sich ausgehend von einer vorgeschlagenen Bauteilgestalt schrittweise die einzelnen Bauteilzustände zwischen den Fertigungsstufen ableiten und jede Stufe für sich hinsichtlich ihrer Herstellbarkeit überprüfen (siehe Bild 1).

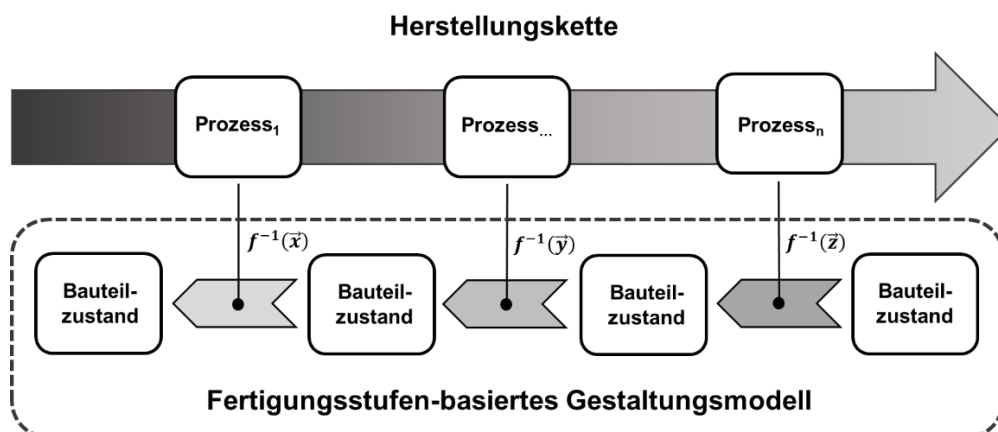


Bild 1: Ansatz des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodells

Die Bewertung der Herstellbarkeit wird im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell unter Zuhilfenahme der vorhandenen Fertigungsressourcen, z. B. Maschinen oder Werkzeuge, durchgeführt. Dafür ist eine rechnergestützte Formalisierung der Spezifikationen notwendig, die im Modell über Parameter hinterlegt werden.

3.1 Aufbau des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell

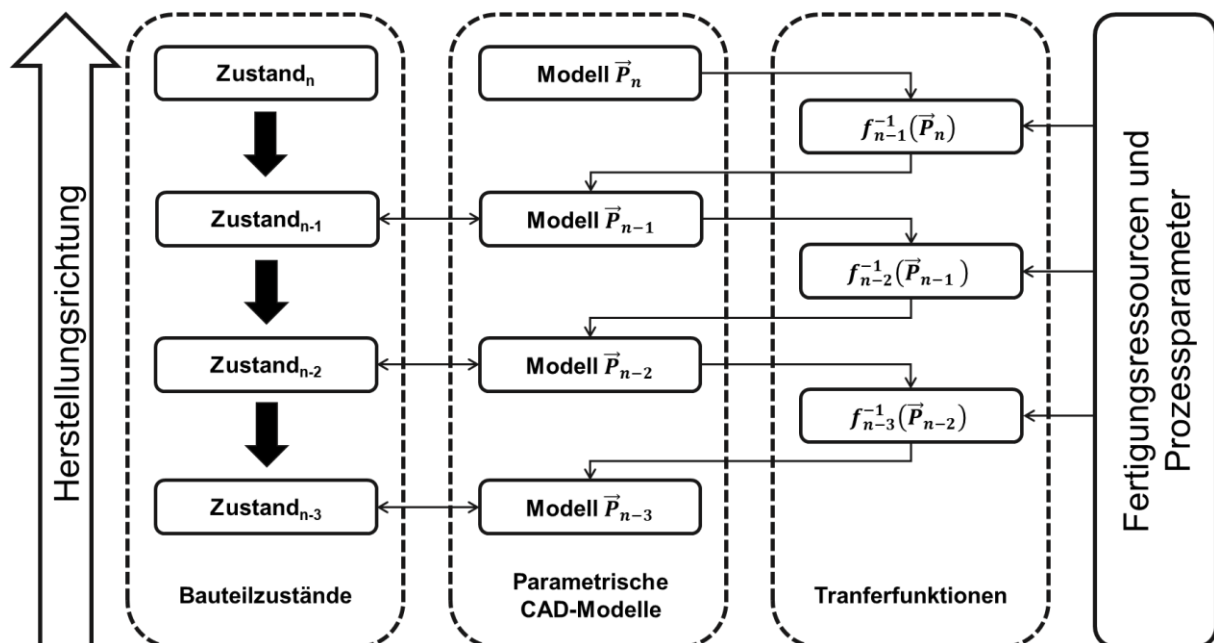
Die Grundlage des Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells bilden miteinander verknüpfte parametrische CAD-Modelle von dem betrachteten Bauteil und dessen Bauteilzuständen während der Herstellung. Die Parametrisierung ermöglicht die Darstellung der Bauteilzustände durch eine Vektor \vec{P}_i von geometrischen Parametern, wie beispielsweise Längen, Winkel und Durchmesser.

$$\vec{P}_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\} \quad (1)$$

Die Verknüpfung der Bauteilzustände erfolgt durch Transferfunktionen f^{-1} , die aus den im Modell hinterlegten Fertigungsprozessen und -ressourcen abgeleitet werden und den jeweiligen Herstellungsschritt entgegen der Prozessrichtung abbilden. Mit den Transferfunktionen wird aus dem Parametervektor \vec{P}_i eines Bauteilzustands der Parametervektor \vec{P}_{i-1} des vorgelagerten Bauteilzustands berechnet.

$$\vec{P}_{i-1} = f_{i-1}^{-1} f_{i-1}(\vec{P}_i) \quad (2)$$

Diese Verknüpfung erlaubt es, die Zustandsänderungen des Bauteils während der Herstellung auf die parametrischen CAD-Modelle zu übertragen und damit die Fertigungsstufen des Bauteils rechnerunterstützt abzubilden (siehe Bild 2).

**Bild 2:** Verknüpfung der Bauteilzustände

Der Begriff Transferfunktion wird an dieser Stelle als parametergebundene Zustandsänderung von einem Bauteilzustand in den vorgelagerten Bauteilzustand aufgefasst. Eine Transferfunktion kann

beispielsweise aus einer Menge an analytischen Funktionen bestehen, die die Parameter zweier Bauteilzustände miteinander verknüpfen, auf einer numerischen Simulation basieren, welche über den Austausch von Parametern in dem Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell implementiert ist. Neben den Transferfunktionen verfügt das Modell über Kontrollstrukturen, die die Herstellbarkeit der Bauteilzustände überprüfen. Diese Überprüfung erfolgt ebenfalls parametergebunden über ein Abgleich mit zulässigen Grenzen, die von den Fertigungsressourcen abgeleitet sind. Dafür ist es notwendig, die verfügbaren Fertigungsressourcen (z.B. Maschinen oder Werkzeuge) ebenfalls in Form von Parametern zu beschreiben. Diese sind in einer Datenbank abgelegt, die mit dem Modell verknüpft ist. Damit lassen sich die verfügbaren Fertigungsressourcen und die Fertigungsrestriktionen dynamisch anpassen, wenn ein neues Werkzeug zur Verfügung steht.

3.2 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur des Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells setzt sich aus drei festen Systemkomponenten und einer optionalen Komponente zusammen, die über Schnittstellen miteinander verknüpft sind (siehe Bild 3). Das zentral steuernde Element ist eine skriptbasierte Anwendung. Die Fertigungsstufen des betrachteten Bauteils werden innerhalb eines CAD-Systems modelliert und parametrisiert. Ausgehend von der skriptbasierten Anwendung lassen sich nun die Parameter der einzelnen Fertigungsstufen aus dem CAD-System auslesen und verändern, sodass eine Steuerung der parametrischen Modelle möglich ist. Die im Modell hinterlegten Fertigungsressourcen sind im Rahmen einer Datenbank abgelegt. Dadurch lassen sich die zur Verfügung stehenden Fertigungsressourcen beliebig erweitern oder modifizieren, indem neue Datenbankeinträge erstellt oder vorhandene Datenbankeinträge angepasst werden. Mit Hilfe von Abfragen hat die skriptbasierende Anwendung Zugriff auf die Parameter der Fertigungsressourcen innerhalb der Datenbank. Als optionale Komponente lassen sich in dem Modell zusätzlich externe Simulationsprogramme, wie Finite-Elemente-Analysen, implementieren. Dies ist notwendig, wenn die Transferfunktionen für Zustandsänderungen oder die Kontrollstrukturen zur Überprüfung der Herstellbarkeit nicht in Form von expliziten Gleichungen oder Aussagen innerhalb der skriptbasierten Anwendung abgebildet werden können.

Durch diesen Systemaufbau laufen alle Parameter in der skriptbasierten Anwendung zusammen, wo sie mit Hilfe der Transferfunktionen und der Kontrollstrukturen verarbeitet, verändert, berechnet und überprüft werden können.

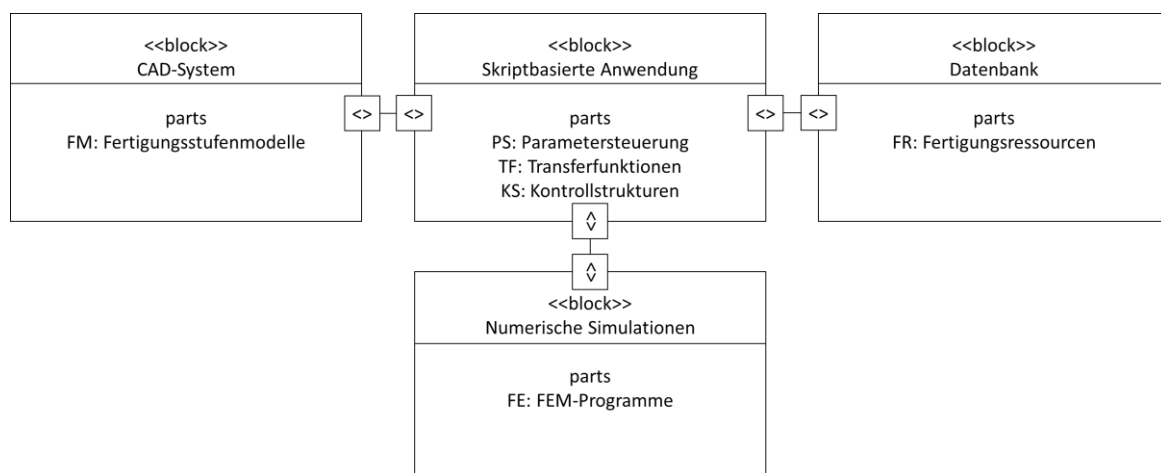


Bild 3: Systemarchitektur des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodells

3.3 Ablauf einer Zustandsänderung und Prüfung der Herstellbarkeit

Der Übergang von einem Bauteilzustand in den vorgelagerten Bauteilzustand wird im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell mit Hilfe der Transferfunktionen umgesetzt. Bevor jedoch aus einem Zustand der vorgelagerte Zustand eines Bauteils im Rahmen seiner Herstellungskette modelliert wird, muss die Durchführbarkeit dieses Herstellungsschrittes untersucht werden. Dabei wird einerseits die physikalische Durchführbarkeit geprüft und andererseits inwieweit die benötigten Fertigungsressourcen zur Verfügung stehen. Der Prozess, um von einem Bauteilzustand in den vorgelagerten Bauteilzustand zu gelangen, umfasst fünf Schritte, die im Folgenden beschrieben werden (siehe Bild 4).

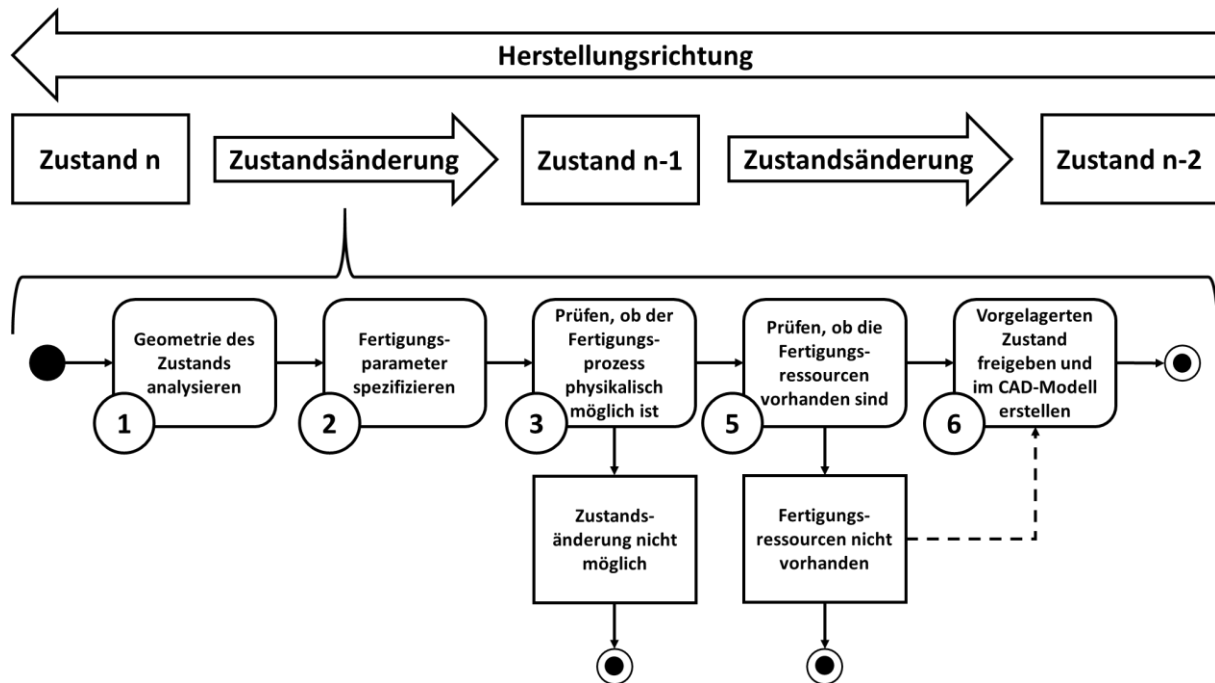


Bild 4: Ablauf einer Zustandsänderung und Prüfung der Herstellbarkeit

Der erste Schritt bei einer Zustandsänderung ist das Erfassen der Geometrie des Ausgangszustands. Dabei werden die im CAD-Modell hinterlegten Parameter in Form eines Vektors ausgelesen und an die skriptbasierte Anwendung übergeben. Dort werden im zweiten Schritt diejenigen Fertigungsparameter spezifiziert, die benötigt werden, um die vorgelagerte Fertigungsstufe zu erhalten. Demnach werden sowohl Werkzeuggeometrien als auch Maschinenparameter, wie beispielsweise eine benötigte Umformkraft auf Basis der Ausgangsgeometrie berechnet. Sind die Fertigungsparameter spezifiziert, wird im dritten Schritt die physikalische Durchführbarkeit der Zustandsänderung überprüft. Neben der Betrachtung von Näherungsformeln, wie einem maximal zulässigen Umformgrad, können an dieser Stelle z.B. auch externe FEM-Simulationen implementiert werden, die beispielsweise lokale Spannungsspitzen oder maximale Fließspannungen in die Bewertung der physikalischen Herstellbarkeit miteinbeziehen. Die Überprüfung im dritten Schritt besitzt zwei mögliche Ausgänge, die Zustandsänderung ist durchführbar oder sie ist nicht durchführbar. Bei letzterem wird der Prozess der Zustandsänderung abgebrochen und eine Meldung ausgegeben, die den Grund der Nichtdurchführbarkeit nennt. Nun muss der Konstruierende die Bauteilgestalt so anpassen, dass eine Zustandsänderung in den betrachteten Prozessschritt möglich wird. Ist die Zustandsänderung durchführbar, wird im vierten Schritt überprüft, ob die im zweiten Schritt spezifizierten Fertigungsparameter von den in der Datenbank hinterlegten Fertigungsressourcen abgedeckt werden. Dies erfolgt über ein Abgleich von zuvor abgeleiteten Parametern aus den Fertigungswerkzeugen und -maschinen. Hierbei sind wieder zwei Ausgänge möglich, die Fertigungsressourcen sind vorhanden oder sie sind nicht vorhanden. Wenn die Ressourcen nicht

vorhanden sind, kann einerseits das Bauteil angepasst oder andererseits ein neues Werkzeug und / oder Maschine entwickelt beziehungsweise beschafft werden. Lässt sich das Bauteil durch die vorhandenen Fertigungsressourcen herstellen, wird im letzten Schritt die Freigabe zur Zustandsänderung erteilt und die vorgelagerte Fertigungsstufe wird unter Anwendung der jeweilig hinterlegten Transferfunktion im CAD-Modell modelliert. Dieser Ablauf einer Zustandsänderung wird im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell mehrfach durchgeführt. Bei k Fertigungsstufen innerhalb einer Herstellungskette sind $k - 1$ Zustandsänderungen notwendig. Dadurch, dass bei jeder Zustandsänderung die Durchführbarkeit des jeweiligen Herstellungsschritts erfolgt, lassen sich die prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen identifizieren.

Das Fertigungsstufen-basierte Gestaltungsmodell ist als modulares Rahmenwerk zu verstehen, mit dessen Systemarchitektur die Modellierung unterschiedlicher Herstellungsketten ermöglicht wird. Dafür ist eine individuelle Entwicklung der parametrischen CAD-Modell, der Transferfunktion, der Kontrollstrukturen sowie der Formalisierung der vorhandenen Fertigungsressourcen notwendig.

4 Methodik zur Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells

Die Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells ist individuell und abhängig von dem betrachteten Bauteil und dessen Herstellungskette. Dennoch lassen zentrale Schritte im Rahmen einer Methodik identifizieren, die bei der Entwicklung notwendig sind. Die Grundlage dieser Methodik bietet eine Empfehlung nach Stokes zur Entwicklung von wissensbasierten technischen Anwendungen mit dem Schwerpunkt in den späten Phasen des MOKA-Lebenszyklus, das heißt erfassen, formalisieren, verpacken und aktivieren (Stokes 2001). Die Erfassung beinhaltet das Identifizieren, Sammeln und Validieren aller notwendigen Wissensentitäten, die zu dem Zeitpunkt in unstrukturierter Form vorliegen, während der Formalisierung wird das unstrukturierte Wissen in eine formal, maschinenlesbares Wissensmodell überführt. Die Verpackung und die Aktivierung umfassen abschließend die Implementierung, das Testen und die Einführung des wissensbasierten Systems. Die Übertragung der vier Spätphasen von MOKA auf die Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells ist im Folgenden beschrieben.

Im ersten Schritt der **Erfassung** wird das zu betrachtende Bauteil ausgewählt und daraufhin dessen Herstellungskette analysiert. Das bedeutet, es werden alle Fertigungsprozesse und -ressourcen innerhalb der Herstellungskette aufgenommen und die zugehörigen Prozessparameter sowie prozessbezogene Fertigungsrestriktionen identifiziert. Neben der Herstellungskette müssen zudem die Fertigungsstufen zwischen den Herstellungsschritten erfasst werden. Das Ergebnis der Phase Erfassung ist eine Dokumentation von allen relevanten Informationen im Hinblick auf die Fertigung des gewählten Bauteils. Während der **Formalisierung** werden die gesammelten Informationen in ein maschinenlesbares Modell überführt. Im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell werden dafür parametrische Darstellungen der Informationen genutzt. Um diese zu nutzen, werden die identifizierten Fertigungsstufen, -ressourcen und -restriktionen parametrisiert. Im nächsten Schritt müssen die Transferfunktionen für die Zustandsänderung von einer Fertigungsstufe in die vorgelagerte Fertigungsstufe formuliert und die prozessbezogenen Fertigungsrestriktionen über Kontrollstrukturen abgebildet werden. Dieser Schritt beinhaltet ebenfalls die Überlegung, ob für die Transferfunktionen oder die Kontrollstrukturen externe Simulationen notwendig sind. Zum Ende der Formalisierung sind alle Fertigungsstufen, -ressourcen und -restriktionen über Transferfunktionen und Kontrollstrukturen in einem formalen und maschinenlesbaren Modell miteinander verknüpft. Im Rahmen der **Verpackung** wird das formale Modell in eine Systemanwendung übersetzt, wie sie in Abschnitt 3.2 beschrieben ist. Dazu müssen parametrische CAD-Modelle für die Fertigungsstufen erstellt, die Transferfunktionen und die Kontrollstrukturen innerhalb der skriptbasierten Anwendung implementiert und gegebenenfalls externe Simulationen in das System eingebunden werden. Zudem ist eine Datenbank aufzusetzen und Einträge für die zur Verfügung stehenden Fertigungsressourcen anzulegen. Abschließend müssen die

Schnittstellen zwischen den einzelnen Systemkomponenten geschaffen werden. Die **Aktivierung** ist die letzte Phase und beinhaltet die Einführung des fertigungsstufen-basierte Gestaltungsmodells innerhalb der gewünschten Zielgruppe. Dabei ist zu klären, über welche Kanäle wird das Modell bekannt gemacht, wie erhalten die Nutzer Zugang zu dem Modell und wie erfolgt die Einweisung zum Umgang mit dem Modell.

Um die dargestellte Methode zur Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells zu veranschaulichen folgt im nächsten Abschnitt ein Fallbeispiel.

5 Fallbeispiel

Als Fallbeispiel dient eine multimateriale Welle, die mit Hilfe der Tailored Forming Technologie hergestellt wird. Die hierbei betrachtete Herstellungskette wurde im Sonderforschungsbereich 1153 entwickelt und besteht aus den Prozessen zum Fügen, Umformen und Zerspanen. Im ersten Schritt werden zwei Mono-Material-Halbzeuge miteinander durch Reibschweißen gefügt. Das dabei entstandene multimaterielle Halbzeug wird anschließend durch Fließpressen thermomechanisch umgeformt. Im nächsten Schritt folgt die Zerspanung, in der das Bauteil seine Endkontur erhält (Behrens et al. 2019). Innerhalb der Herstellungskette lassen sich vier Fertigungsstufen identifizieren (s. Bild 5)

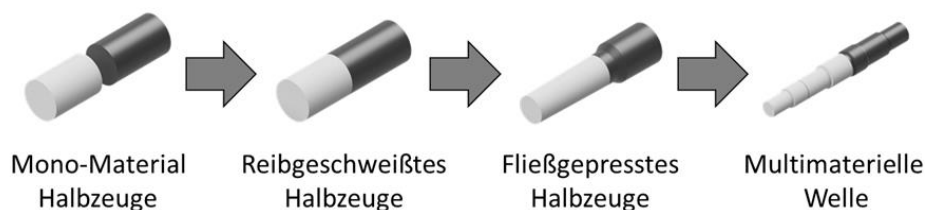


Bild 5: Fertigungsstufen des Fallbeispiels

Im Fokus dieses Fallbeispiels steht der Fließpressprozess, der die Zustandsänderung vom reibgeschweißten Halbzeug zum fließgepressten Halbzeug erzeugt. Da der Schwerpunkt bei der Entwicklung eines fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells in den Phasen der Erfassung und Formalisierung liegt, werden diese anhand des Fließpressprozesses schematisch skizziert. In diesem Fallbeispiel werden thermomechanische und metallografische Aspekte nicht berücksichtigt. Ziel dieses Fallbeispiels ist es nicht, ein ausgearbeitetes Modell für den genannten Anwendungsfall vorzustellen, sondern den Entwicklungsansatz durch ein Beispiel zu verdeutlichen.

Beim Fließpressen wird das Halbzeug mittels eines Stempels durch eine Matrize gepresst und umgeformt. Dabei ergibt sich die Geometrie des umgeformten Halbzeugs aus dem verwendeten Fließpresswerkzeug und den eingestellten Prozessparametern. In der Erfassung ist es daher wichtig neben den Spezifikationen der Presse, wie beispielsweise maximale Presskraft oder mögliche Stempelwege, insbesondere die Geometrien des Fließpresswerkzeugs aufzunehmen. Diese sind maßgebliche Fertigungsrestriktionen, welche die umformbaren Geometrien festlegen. Im Rahmen des Fließpressens sind zwei Fertigungsstufen relevant, das reibgeschweißte Halbzeug vor und das umgeformte Halbzeug nach dem Fließpressprozess. Diese werden ebenfalls geometrisch erfasst.

Nun werden die identifizierten Objekte und Zusammenhänge beim Fließpressen formalisiert. Dafür werden die betrachteten Fertigungsstufen und das Fließpresswerkzeug parametrisiert. Diese Parametrisierung ist in Bild 6 und Bild 7 zu sehen.

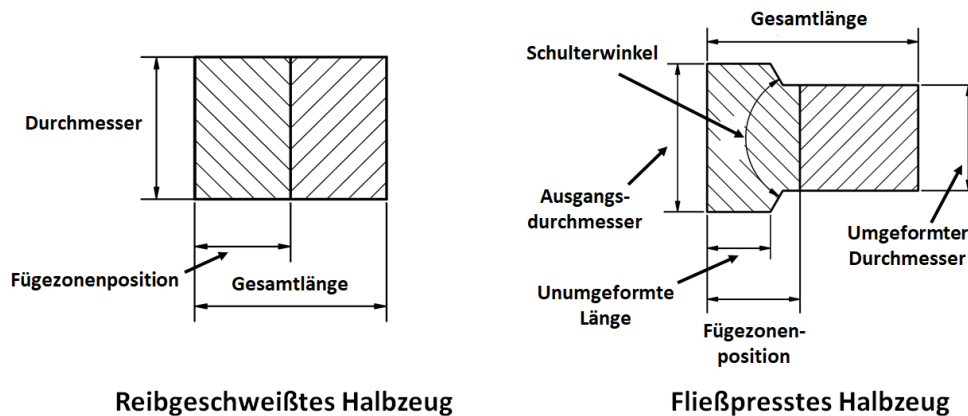


Bild 6: Parametrisierung des reibgeschweißten (links) und des fließpressten (rechts) Halbzeugs

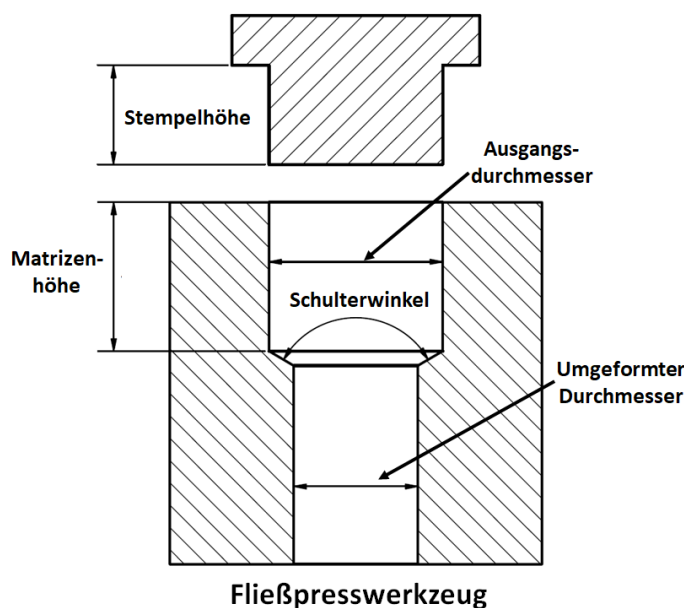


Bild 7: Parametrisierung des Fließpresswerkzeugs

Aufbauend auf den abgeleiteten Parametern werden Zusammenhänge zwischen ihnen mithilfe von Transferfunktionen formuliert. Dabei wird die Herstellungsrichtung rückwärts betrachtet. D. h. der Ausgangszustand ist das fließpresste Halbzeug, welches durch einen inversen Fließpressprozess in den Zustand des reibgeschweißten Halbzeugs überführt wird. Dementsprechend werden die Parameter des fließpressten Halbzeugs als Eingangsgrößen und die Parameter des reibgeschweißten Halbzeugs sowie die des Fließpresswerkzeugs als Ausgangsgrößen der Transferfunktionen betrachtet. Ein analytischer Ansatz, die Transferfunktionen beim Fließpressen zu formulieren, ist die Annahme der Volumenkonstanz während des Prozesses. Über die Volumenkonstanz

und die Vorgaben des Fließpresswerkzeugs lässt sich ein Gleichungssystem aufstellen, mit dem alle geometrischen Parameter des reibgeschweißten Halbzeugs berechnen werden können. An dieser Stelle kann auch eine numerische Umformsimulation eingesetzt werden, um die geometrischen Parameter des reibgeschweißten Halbzeugs zu berechnen. Die Kontrollstrukturen für die Prüfung der Herstellbarkeit des Fließpressprozesses werden in zwei Stadien betrachtet. Zuerst werden Regeln definiert, welche die physikalische Durchführbarkeit des Prozesses überprüfen. Dafür lassen sich beispielsweise Umformgrade berechnen und mit zulässigen Erfahrungswerten vergleichen oder zulässige Fließspannungen betrachten. Letztere können ebenso aus einer Umformsimulation stammen können oder analytisch berechnet werden. Zudem werden Kontrollstrukturen eingebunden, die überprüfen, ob der Prozess mit den zur Verfügung stehenden Fertigungsressourcen durchgeführt werden kann. Diesbezüglich lassen sich die Parameter des fließpressten Halbzeugs mit den Parametern des Fließpresswerkzeugs vergleichen. Wenn beispielsweise der Schulterwinkel des fließpressten Halbzeugs 120° beträgt, dann muss der Schulterwinkel des Fließpresswerkzeugs ebenfalls 120° betragen. Andernfalls ist die Herstellung nicht möglich. Neben der Geometrie der Werkzeuge müssen auch die Prozessgrößen der Presse, wie die maximale Presskraft, mit betrachtet werden. Sind alle Transferfunktionen und Kontrollstrukturen formuliert, werden diese mit den Fertigungsstufen im Rahmen eines formalen Modells miteinander verknüpft.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um Bauteile fertigungsgerecht zu gestalten, muss das Fertigungswissen möglichst früh in der Produktentwicklung verfügbar sein. Dieser Beitrag schlägt hierfür ein Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell vor, um insbesondere prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen in expliziter Form Konstruierenden bereitzustellen. Neben dem Aufbau und der Systemarchitektur wird ebenfalls eine Methode aufgezeigt, mit der ein Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für eine beliebige Herstellungskette unter Zuhilfenahme von Transfermodellen entwickelt werden kann. Anhand eines schematischen Fallbeispiels wird die Entwicklungsmethode abschließend veranschaulicht.

Gegenstand der weiteren Erforschung des Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells wird die Umsetzung des beschriebenen Fallbeispiels über die analytische Ebene hinaus. Das bedeutet, es wird untersucht, wie sich gezielt numerische Fertigungssimulationen einbinden lassen, um die Transferfunktionen oder Kontrollstrukturen abzubilden. Hierbei ist von besonderem Interesse, wie z.B. sich Wissen über Erwärmungsstrategien mit einbinden lassen, die für die Warmumformverfahren der Tailored Forming-Prozessketten grundlegend sind.

Des Weiteren soll der Aufbau von wissensbasierten CAD-Modellen in den Ansatz mit einbezogen werden. Hierbei ist zu untersuchen, inwieweit explizite Modelle in Form von Feature-basierten oder generativen, parametrischen Modellen geeignet sind, große Lösungsräume adäquat abbilden zu können, oder ob implizite Modellierungsansätze, wie z.B. graphenbasierte Verfahren oder Multi-Agentensysteme für diese Aufgabe besser geeignet sind.

Danksagung

Die Ergebnisse dieser Publikation sind im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1153 „Prozesskette zur Herstellung hybrider Hochleistungsbauteile durch Tailored Forming“ innerhalb des Teilprojekts C2 entstanden. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle und organisatorische Unterstützung des Projektes (Projektnummer: 252662854).

Literatur

- Ashby und Cebon 1993 ASHBY, Michael; CEBON, David. *Materials selection in mechanical design*. J. Phys. IV (1993), 3, 1–9. DOI: 10.1051/jp4:1993701.
- Behrens et al. 2016 BEHRENS, Bernd-Arno; BOUGUECHA, Anas; FRISCHKORN, Conrad; HUSKIC, Adis; DURAN, Deniz: *Tailored Forming Technology for Three Dimensional Components: Approaches to Heating and Forming*. In Proceedings of the 5th International Conference on Thermomechanical Processing, Milan, Italy, 6–28 October 2016.
- Behrens et al. 2019 BEHRENS, B.-A.; BREIDENSTEIN, B.; DURAN, D.; HERBST, S.; LACHMAYER, R.; LÖHNERT, S.; MATTHIAS, T.; MOZGOVA, I.; NÜRNBERGER, F.; PRASANTHAN, V.; SIQUEIRA, R.; TÖLLER, F.; WRIGGERS, P.: *Simulation-Aided Process Chain Design for the Manufacturing of Hybrid Shafts*. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 74 (2019), Nr. 2, S. 115-135. DOI: 10.3139/105.110378.
- Blohm et al. 2018 BLOHM, T.; NOTHDURFT, S.; MILDEBRATH, M., OHRDES, H.; RICHTER, J.; STONIS, M.; LANGNER, J.; SPRINGER, A.; KAERLE, S.; HASSEL, T.; WALLASCHEK, J.; OVERMEYER, L.: *Investigation of the Joining Zone of Laser Welded and Cross Wedge Rolled Hybrid Parts*. In: *International Journal of Material Forming* 11 (2018), Nr. 6, S. 829-837. DOI: 10.1007/s12289-017-1393-0.
- Boothroyd 1994 BOOTHROYD, G.: *Product Design for Manufacture and Assembly*. In: *Computer-Aided Design* 26 (1994), Nr. 7, S. 505-520. DOI: 10.1016/0010-4485(94)90082-5.
- Brockmüller et al. 2017 BROCKMÖLLER, T.; MOZGOVA, I.; LACHMAYER, R.: *An approach to analyse the potential of tailored forming by TRIZ Reverse*. In Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) (2017), Vol 4: Design Methods and Tools, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017.
- Brockmüller et al. 2020 BROCKMÖLLER, Tim; SIQUEIRA, Renan; GEMBARSKI, Paul Christoph; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: *Computer-Aided Engineering Environment for Designing Tailored Forming Components*. In: *Metals* (2020), 10(12), 1589. DOI: 10.3390/met10121589.
- Chugreeva et al. 2018 CHUGREEVA, A.; MILDEBRATH, M.; DIEFENBACH, J.; BARROI, A.; LAMMERS, M.; HERMSDORF, J.; HASSEL, T.; OVERMEYER, L.; BEHRENS, B.-A.: *Manufacturing of High-Performance Bi-Metal Bevel Gears by Combined Deposition Welding and Forging*. In: *Metals* 8 (2018), Nr. 898, S. 1-11. DOI: 10.15488/4634.
- Dostatni et al. 2016 DOSTATNI, Ewa; DIAKUN, Jacek; GRAJEWSKI, Damian; WICHNIAREK, Radoslaw; ANNA, Karwasz: *Multi-agent system to support decision-making process in design for recycling*. In *Soft Computing* (2016), 20(11): 4347-4361. DOI: 10.1007/s00500-016-2302-z.
- Gembarski 2018 GEMBARSKI, Paul Christoph: *Komplexitätsmanagement mittels wissensbasiertem CAD—Ein Ansatz zum unternehmenstypologischen Management konstruktiver Lösungsräume*. Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Dissertation, 2018.
- Gembarski 2020a GEMBARSKI, Paul Christoph: *On the conception of a Multi-Agent Analysis and Optimization Tool for Mechanical Engineering Parts*. In: G. Jezic, J. Chen-Burger, M. Kusek, R. Sperka, R. Howlett, and L. Jain (Hrsg.): *Agents and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, Smart Innovation, Systems*

- and Technologies* (2020), vol. 186.2020, pp. 93-102, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-5764-4_9.
- Gembarski 2020b
GEMBARSKI, Paul Christoph: *Modelling the Portfolio of capabilities for product variant creation and assessment*. In: Proceedings of the 9th International Conference on Mass Customization and Personalization – Community of Europe (MCP - CE 2020), 2020. DOI: 10.1016/j.procs.2020.08.061.
- Huang et al. 2016
HUANG, George Q.: *Design for X - Concurrent engineering imperatives*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1996.
- Kleemann et al. 2017
KLEEMANN, S.; FRÖHLICH, T.; TÜRCK, E.; VIETOR, T.: *A Methodological Approach Towards Multi-Material Design of Automotive Components*. In: *Procedia CIRP* 60 (2017), S. 68-73. DOI: 10.1016/j.procir.2017.01.010.
- Lachmayer et al. 2017
LACHMAYER, Roland; GEMBARSKI, Paul Christoph; GOTTWALD, Philipp; LIPPERT, René Bastian: *The potential of product customization using technologies of additive manufacturing*. In *Managing Complexity* (2017), pp. 71-81. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-29058-4_6.
- Milisavljevic-Syed et al. 2019
MILISAVLJEVIC-SYED, Jelena; COMMURI, Sesh; ALLEN, Janet K.; MISTREE, Farrokh: A method for the concurrent design and analysis of networked manufacturing systems. In: *Engineering Optimization* (2019), 51:4, 699-717. DOI: 10.1080/0305215X.2018.1484121.
- Özbayrak et al. 2004
ÖZBAYRAK, M.; AKGÜN, M.; TÜRKER, A.K.: *Activity-based Cost Estimation in a Push/Pull Advanced Manufacturing System*. In: *Journal of Production Economics* 87 (2004), S. 49-65. DOI: 10.1016/S0925-5273(03)00067-7.
- Sheveleva et al. 2020
SHEVELEVA, T.; KOEPLER, O.; MOZGOVA, I.; LACHMAYER, R.; AUER, S.: *Development of a Domain-Specific Ontology to Support Research Data Management for the Tailored Forming Technology*. In *Procedia Manufacturing* (2020), Vol. 52, 2020, pp. 107-112. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.11.020.
- Siqueira et al. 2019
SIQUEIRA, R.; MOZGOVA, I.; LACHMAYER, R.: *An interfacial zone evolutionary optimization method with manufacturing constraints for hybrid components*. In *Journal of Computational Design and Engineering* (2019), Vol. 6, Issue 3, pp. 387–397. DOI: 10.1016/j.jcde.2018.10.003
- Stokes 2001
STOKES, M.: *Managing engineering knowledge: MOKA: methodology for knowledge based engineering application*, London: Professional Engineering Publishing, 2001.
- Suh 2005
SHU, Nam Pah: *Complexity: theory and applications*. Oxford: Oxford University Press on Demand, 2005.
- Vajna et al. 2018
VAJNA, S.; WEBER, C.; ZEMAN, K.; HEHENBERGER, P.; GERHARD, D.; WARTZACK, S.: *CAX für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung*. 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2018.

Konzept eines Konstruktionskatalogs für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen

Concept of a design catalog for the function-integrated design of additively manufactured components

Enno Garrelts^{1,2}, Daniel Roth², Hansgeorg Binz²

¹Universität Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart
Enno.Garrelts@gsame.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart
Enno.Garrelts@iktd.uni-stuttgart.de
Daniel.Roth@iktd.uni-stuttgart.de
Hansgeorg.Binz@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Mit additiven Fertigungsverfahren können Bauteile von hoher Komplexität mit wenigen Restriktionen erzeugt werden. Da die Gestaltung viele Möglichkeiten bietet, ist es empfehlenswert, den Bauteilnutzen über Funktionsintegration zu steigern. Eine Methode, die Konstrukteure bei der Funktionsintegration unterstützen kann, ist das Aufzeigen von geeigneten Beispielen. In diesem Beitrag werden die wichtigen Aspekte einer solchen Sammlung in Form eines Konstruktionskatalogs anhand der Literatur diskutiert. Darauf aufbauend wird ein Konzept eines Konstruktionskatalogs für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen hergeleitet. Es wird gezeigt, dass ein solcher Katalog mit Hilfe eines multidimensionalen Gliederungsteils und einer Erläuterung der Effekträger die funktionsintegrierte Gestaltung unterstützt.

Keywords:

Leichtbau in der Produktentwicklung, Konstruktionsmethodiken, Additive Fertigung, Konstruktionskatalog

Abstract: With additive manufacturing processes, components of high complexity can be produced with few restrictions. Since the design offers many possibilities, it is recommended to increase the component usefulness through function integration. One method that can support designers in function integration is to provide suitable examples. In this paper, the important aspects of such a collection in the form of a design catalog are discussed based on the literature. Building on this, a concept for a design catalog for the function-integrated design of additively manufactured components is derived. It is demonstrated, that such a catalog supports the function-integrated design with the help of a multidimensional catalog-structure and an explanation of the effect carriers.

Keywords:

Lightweight construction in product development, design methodologies, additive manufacturing, design catalog

1 Einleitung

Das konstruktive Ausnutzen der möglichen Bauteilkomplexität ist essenziell für den wirtschaftlichen Einsatz von additiven Fertigungsverfahren. Grundlage der möglichen hohen Komplexität von additiv gefertigten Bauteilen sind die geringeren Restriktionen hinsichtlich Hinterschnitten, die Erstellbarkeit von feinen Strukturen und hohe erzeugbare Aspektverhältnisse (Klahn et al. 2018, S. 13 f.). Additive Fertigung ermöglicht die Steigerung der Komplexität derart, dass das Nachvollziehen der integrierten Funktionen sehr aufwändig ist (Blösch-Paidosh et al. 2017, S. 92). Aufgrund des schichtweisen Aufbauprinzips der Verfahren beeinflusst die Komplexität die Herstellkosten nur geringfügig (Möhrle 2018, S. 171). Um eine hohe Wirtschaftlichkeit der Bauteile zu erreichen, sollte in der Konstruktion daher eine hohe Komplexität der Bauteile angestrebt werden, wenn sich hierdurch der Nutzen der Bauteile steigern lässt.

Eine Strategie, um diese Steigerung des Bauteilnutzens mit Hilfe von Bauteilkomplexität zu erreichen, ist die Funktionsintegration (Klahn et al. 2018, S. 100). Durch die Reduzierung der benötigten Anzahl an Bauteilen steigt der Nutzen des einzelnen Bauteils. Die funktionsintegriert konstruierten Bauteile weisen somit eine deutlich höhere Komplexität auf, als Bauteile, die nach dem Prinzip der Funktionstrennung konstruiert sind. Um funktionsintegrierte Konstruktionen effizient zu erzielen, bietet sich das Anlegen von Beispielsammlungen in Form von Konstruktionskatalogen an (Ziebart 2012, S. 35). Konstruktionskataloge können ein gezieltes Auffinden multifunktionaler Lösungen und eine effektive Unterstützung beim Verstehen von möglichen Lösungen bieten (Birkhofer 1980, S. 130). Kataloge für multifunktionale Lösungen sind vorzugsweise verfahrensspezifisch anzulegen, um die Eigenschaften des Fertigungsverfahrens möglichst umfänglich ausnutzen zu können (Wagner 2018, S. 44).

1.1 Problemstellung

Im Stand der Technik gibt es nur zwei Sammlungen von multifunktionalen Lösungen (Wagner 2018; Ziebart 2012). Diese Sammlungen weisen jedoch keinen gezielten Zugriff auf die Inhalte auf. Im Kontext der additiven Fertigung gibt es keine solche Sammlung. Die in der Literatur erarbeiteten Lösungssammlungen für die additive Fertigung konzentrieren sich auf einen effektiven Zugriff auf Lösungen einzelner Funktionen und ein tiefgreifendes Verständnis dieser Inhalte durch den Anwender. Das Aufzeigen von integrierten Lösungen und das Vermitteln des notwendigen Verständnisses für die Abwandlung dieser multifunktionalen Lösungen wird nicht berücksichtigt.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieses Beitrags ist das Erarbeiten eines konzeptionellen Konstruktionskatalogs, welcher die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen unterstützt und die Inhalte verständlich darstellt. Um dieses Ziel zu erreichen, werden zwei Forschungsfragen beantwortet:

- Wie muss ein Lösungskatalog für additive Fertigungsverfahren erweitert werden, um das gezielte Auffinden von funktionsintegrierten Lösungen zu ermöglichen?
- Wie sind die Inhalte des Katalogs aufzubereiten, um dem Anwender ein tiefgreifendes Verständnis der multifunktionalen Inhalte zu vermitteln?

1.3 Gliederung des Beitrags

Der Beitrag stellt im Stand der Technik (Abschnitt 2) die notwendigen Grundlagen dar. In Abschnitt 2.1 wird auf Funktionsintegration eingegangen. Die vielversprechende Möglichkeit der „Verwendung von integralen Lösungen“ zur Funktionsintegration benötigt für die Verwendung einen Katalog, der diese Lösungen beinhaltet. Welche Formen Konstruktionskataloge annehmen und was wichtige Eigenschaften sind, wird in Abschnitt 2.2 dargelegt. Warum insbesondere die additiven Prozesse eigene Kataloge benötigen, wird anhand der spezifischen Eigenschaften dieser Prozesse in Abschnitt 2.3 ausgeführt.

Die bestehenden Konstruktionskataloge für additive Fertigungsverfahren werden in Abschnitt 2.4 besprochen. Abschnitt 2.5 zieht ein Fazit aus den behandelten Themen. Aufbauend hierauf werden die unterschiedlichen Anforderungen an einen Konstruktionskatalog für die integrative Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen in Abschnitt 3 ermittelt. Abschnitt 4.1 diskutiert das Auffinden von multifunktionalen Lösungen und Abschnitt 4.2 das Vermitteln eines tiefgreifenden Verständnisses der Inhalte, um eine Abwandlung der gefundenen Lösungen zu erleichtern. Eine Diskussion der Ergebnisse sowie ein Vergleich mit anderen Konzepten (aus Abschnitt 2.4) anhand der gefundenen Anforderungen (aus Abschnitt 3) erfolgt in Abschnitt 5. Zusammenfassung und Ausblick (Abschnitt 6) schließen den Beitrag ab.

2 Stand der Technik

2.1 Funktionsintegration

„Funktionsintegration ist ein konstruktiver Vorgang, der ein technisches System mit gegebener Funktion derart verändert, dass [...] die Anzahl der Bauelemente reduziert wird.“ (Ziebart 2012, S. 112) Diese Reduzierung kann konstruktiv durch das Zusammenfassen von Wirkräumen- oder Wirkflächen erfolgen (Roth 1994, S. 237). Die praktische Umsetzung dieser konstruktiven Operationen ist jedoch meist nicht direkt ersichtlich, sodass eine Vielzahl von Methoden entwickelt wurden, um die Umsetzung zu unterstützen. Ziebart (2012) gibt eine umfangreiche Übersicht über die bestehenden Methoden und stellt fest, dass sich die Methoden im Kern auf fünf Grundideen reduzieren lassen.

Eine dieser Grundideen ist das „Verwenden integraler Lösungen“. Die Basis dieser Grundidee ist die Feststellung, dass es für verschiedene Funktionen und zusammengesetzte Funktionen bereits Konzepte gibt, um diese funktionsintegriert zu konstruieren. So können die Funktionen der Positionierung und Befestigung einer Komponente beispielsweise durch die Verwendung einer Passschraube erfüllt werden. Wenn einem Konstrukteur diese funktionsintegrierte Lösung bekannt ist, kann er durch ihre Verwendung die benötigte Bauteilanzahl reduzieren. Die Grundidee, „integrale Lösungen“ zu verwenden, zielt darauf ab, solche bereits bekannten Lösungen zu finden und zu nutzen. Verschiedene Autoren stellen die Vorteile eines Katalogs von funktionsintegrierten Elementen heraus (vgl. Birkhofer 1980; Franke et al. 2009; Füssel et al. 1999; Ziebart 2012), der möglichst verfahrensspezifisch ist, um auf die Spezifik der erzeugten Effekträger eingehen zu können (Wagner 2018). Für das Aufstellen eines solchen Katalogs führt Ziebart (2012, S. 142) aus, dass es zwei Möglichkeiten gibt: Einerseits kann durch systematische Gestaltvariation auf jegliche mögliche Gestalt geschlossen werden und anschließend Funktionen zugeordnet werden, andererseits kann eine Sammlung durch eine empirische Suche erstellt werden. Ziebart leitet her, dass die empirische Suche besser geeignet ist, da die Umsetzbarkeit der beinhalteten Lösungen sichergestellt werden kann. Als Einschränkung der Anwendbarkeit stellt Ziebart fest, dass die Strukturierung der beinhalteten Lösungen schwierig ist. Die beiden erwähnten ausgearbeiteten Kataloge integraler Lösungen basieren auf empirischen Suchen. Bei der Verwendung der Kataloge wird nicht gezielt nach integrierten Lösungen gesucht, sondern es werden lediglich zu Hauptfunktionen von Bauteilen weitere Funktionen aufgezeigt, die ohne Mehraufwand integriert werden können. Der eine dieser Kataloge (Ziebart 2012) wurde durch eine Sammlung aus der Literatur erstellt und ist nach Autoren der Literaturquelle gegliedert. Der andere Katalog (Franke et al. 2009) beinhaltet funktionsintegrierte Stahl-Rollprofile und ist nach dem Verlauf der gerollten Profile gegliedert. Die beiden Kataloge folgen den allgemeinen Empfehlungen für Konstruktionskataloge.

2.2 Konstruktionskataloge

Konstruktionskataloge sind Informationssammlungen, die bei der methodischen Konstruktion unterstützen. Wenn der Inhalt aus konstruktiven Lösungen besteht, werden sie als Lösungskataloge bezeichnet. Die Kataloge enthalten Lösungen für wiederkehrende Aufgaben und beinhalten somit gängige Ergebnisse der Konstruktionsphase. Zudem helfen sie bei der Zuordnung von Funktionen zu Effekten,

von diesen Effekten zu geeigneten Effekträgern und von diesen wiederum zu geeigneten Konturteilen. Eine Funktion ist dabei der Zusammenhang von Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems mit dem Ziel, einen Zweck zu erfüllen. Effekte sind physikalische Erscheinungen oder Abläufe eines physikalischen Geschehens. Effekträger sind die den Effekt realisierenden Struktur- oder Konturelemente. Ein Konturteil ist ein stoffschlüssig zusammenhängendes Fertigungsteil. Die häufigste Verwendung der Kataloge ist, Funktionen direkt einem Konturteil zuzuordnen. Bild 1 veranschaulicht diesen Ablauf. (Roth 1994; VDI 1982)



Bild 1: Zuordnungen in Lösungskatalogen

Konstruktionskataloge sollten für verschiedene Produkte innerhalb ihres Einsatzbereichs verwendbar sein und einen möglichst umfangreichen Informationsspeicher darstellen. Das Auffinden der Informationen, die im Hauptteil des Konstruktionskatalogs enthalten sind, erfolgt im Gliederungsteil und im Zugriffsteil. Der Gliederungsteil soll, ähnlich dem Inhaltsverzeichnis eines Buchs, dem Konstrukteur eine Orientierung geben und kann die Suche nach Informationen beschleunigen. Die Gliederung sollte in sich widerspruchsfrei und logisch sein. (VDI 1982)

Der Zugriffsteil gibt spezifische Anhaltspunkte zur Anwendbarkeit der Objekte im Katalog. Die hier aufgeführten Gliederungsmerkmale sind katalogspezifisch und sollten wichtige Ausschlusskriterien zum Aussortieren der Objekte beinhalten. (Roth 1994; VDI 1982)

Im Hauptteil des Katalogs sind die eigentlichen Informationen aufbereitet (Roth 2000; VDI 1982). Die Aufbereitung erfolgt so, dass ein schnelles Erfassen der Inhalte ermöglicht wird (Roth 2000; VDI 1982). Umso konkreter die Darstellung ist, desto einfacher ist das Verstehen von Inhalten (Barsalou 2008, S. 631). Abstrakte Begriffe sind schwieriger zu erfassen als konkrete Begriffe, Bilder sind einfacher zu erfassen als Texte und physische Modelle sind einfacher zu erfassen als Bilder (Barsalou 2008 S. 631). In Konstruktionskatalogen erfolgt die Darstellung der Inhalte meist in Bildern, Prinzipskizzen und Texten. Es ist darauf zu achten, dass die präsentierten Inhalte nicht durch ein Übermaß an Details zu komplex für das schnelle Erfassen durch den Anwender wird. (Roth 1994)

2.3 Spezifische Eigenschaften additiver Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren sind eine Gruppe von Verfahren, welche besonders komplexe Bauteile erzeugen können, ohne dabei die Fertigungskosten zu erhöhen. Dies liegt am schichtweisen Aufbauprinzip, das diesen Verfahren zugrunde liegt (VDI 2014 S. 3). Für den Aufbau der Bauteile werden ihre digitalen Modelle zunächst in Schichten zerlegt und dann Schicht für Schicht aufgebaut. Dabei werden kontinuierlich neue Elemente dem Bauteil hinzuaddiert (VDI 2014 S. 3). Es wird immer an einem Bauteilquerschnitt Material in einer zweidimensionalen Schicht hinzugefügt. Durch dieses Hinzufügen am Bauteilquerschnitt im zweidimensionalen können viele Restriktionen, die andere Fertigungsverfahren einschränken, vernachlässigt werden. Der schichtweise Aufbau der Bauteile ermöglicht beispielsweise Hinterschnitte. Durch das Hinzudaddieren der Materialelemente sind Dickensprünge, hohe Aspektverhältnisse oder Materialanhäufungen weniger problematisch als bei Gießprozessen. Durch den digital gesteuerten Aufbau, ist der Aufwand zum Generieren von zusätzlichen Effekträgern pro Volumen sehr gering. Die Anzahl der Effekträger pro Volumen ist nur durch die Auflösung der Fertigungseinrichtung begrenzt und die mögliche Komplexität folglich hoch.

Verschiedene additive Verfahren lassen zusätzlich die Variation der Werkstoffe oder ihrer Eigenschaften zu. Beim „Fused Layer Modeling“ erfolgt das Hinzudaddieren eines thermoplastischen Materials durch eine Extrusion. Das Material kann während des Bauprozess ausgetauscht werden. Hierdurch sind einzelne Bauteile aus mehreren verschiedenen Materialien herstellbar (VDI 2014 S. 12 f). Beim Laserstrahlschmelzen kann durch Variation von Laserleistung und Fokusgeschwindigkeit gezielt eine Porosität eingestellt werden (Reinemuth 2018, S. 20 ff.).

Damit ist die erzeugbare Komplexität der Bauteile weiter gesteigert. Neben der hohen Anzahl an geometrischen Elementen können die werkstofflichen Eigenschaften der einzelnen Elemente variiert werden. Es ergeben sich viele konstruktive Möglichkeiten, um Funktionen zu erfüllen und somit auch, um Funktionsintegration zu betreiben. Durch die Umsetzung der geforderten Funktionen mit einer an den additiven Prozess angepassten Konstruktion können diese Möglichkeiten in einen Mehrwert umgesetzt werden (Schumacher et al. 2017). Die so erzeugten Lösungen unterscheiden sich häufig von Konstruktionen für andere Fertigungsverfahren. Selbst innerhalb der additiven Verfahren gibt es große Unterschiede. So sind beispielsweise die verwendbaren Materialien sehr unterschiedlich und Aspekte wie Pulverentfernung (LBM) oder Aufquellen durch Feuchtigkeitseinlagerungen (FDM) sind zu berücksichtigen. Verschiedene Autoren legen deshalb Sammlungen von spezifischen AM-gerechten Lösungen an.

2.4 Beispielsammlungen für additive Fertigungsverfahren

Es existieren unterschiedliche Sammlungen additiv gefertigter Bauteile, die alle mit einer unterschiedlichen Zielsetzung angelegt wurden. Im Folgenden werden diese Sammlungen erläutert.

Einer der ältesten dieser Kataloge wird in Bin Maidin (2011) vorgestellt. Hierbei handelt es sich um eine Sammlung von additiv gefertigten Bauteilen verschiedener Verfahren, die Inspirationen für weitere Anwendungen schaffen soll. Die Gliederung erfolgt nach Einsatzgründen für das additive Fertigungsverfahren. Die Oberkategorien sind „Benutzeranpassung“, „Verbessern der Funktionalität“, „Funktionsintegration“ und „Ästhetik“. Ein zielgerichtetes Auffinden von Elementen ist nur bis zu einer bestimmten Größe des Katalogs möglich. Der Katalog unterstützt durch das Aufzeigen bestehender Bauteile als Anregung. (Bin Maidin 2011)

Der Beitrag von Doubrovski et al. (2012) stellt die Wichtigkeit von schnellen Änderungen in einer Informationssammlung für additive Fertigungsverfahren heraus. Aus diesem Grund wird ein nicht moderiertes WIKI erstellt, in welchem Studierende Informationen zu additiver Fertigung ablegen können. Eine klare Struktur für die Ablage von Informationen wird in diesem Beitrag nicht beschrieben. (Doubrovski et al. 2012)

Weiss et al. (2018) stellen einen Konstruktionskatalog nach klassischem Aufbau (wie in Abschnitt 2.2 beschrieben) vor. Der Zugriff in diesem Katalog erfolgt nach Elementarfunktionen. Weiss et al. (2016) stellen heraus, dass der Zugriff über die Elementarfunktionen besonders geeignet ist für einen Katalog für additive Fertigungsverfahren. Diese Funktionen sind von verschiedenen Autoren unterschiedlich eng definiert, beinhalten aber meist Funktionen wie „Speichern“, „Leiten“ oder „Wandeln“ jeweils von „Energie“, „Stoff“ oder „Information“. Der Fokus des Katalogs liegt auf dem effizienten Zugriff von jeweils einer Funktion auf eine Lösung. Der Katalog beinhaltet Beispiele verschiedener additiver Fertigungsverfahren. Dabei geht der Zugriffsteil insbesondere auf die Herstellbarkeit und die Besonderheiten von Fused-Layer Modeling, Laser Sintern und Laserstrahlschmelzen ein. Einen Auszug aus dem Katalog zeigt Bild 2.

Blösch-Paidosh und Shea (2017) erarbeiten eine Sammlung von Heuristiken zur Konstruktion für die additive Fertigung. Die Heuristiken repräsentieren typische Vorgehensweisen, um zu gewünschten Zielen in einer bestimmten Domäne zu gelangen. Blösch-Paidosh und Shea (2017) vermitteln diese Heuristiken durch physische Repräsentationen in Form von kleinen Anschauungsobjekten. Der Ansatz, die Informationen in Beispielbauteilen zu veranschaulichen, ist für additiv gefertigte Bauteile besonders vorteilhaft (Rias et al. 2017). Die Sammlung beinhaltet 29 Heuristiken zu denen beispielsweise „Auslösen zum Einsparen von Gewicht“ genauso wie „Teile konsolidieren, um mehrere Funktionen zu erfüllen“ gehören. Eine Strukturierung dieser Heuristiken wird nicht vorgenommen. Die gesammelten Heuristiken sind allgemein beschrieben und sollen sich für die Verwendung in allen additiven Herstellungsverfahren eignen und nicht speziell auf einen Prozess zugeschnitten sein. (Blösch-Paidosh und Shea 2017)

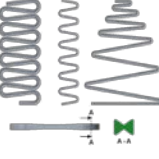

Gliederungsteil				Hauptteil	Zugriffsteil			
1	2	3	Nr.	AM-Design	Konventionelles Design	Funktionsbeschreibung AM-Lösung	Allgemeine Konstruktionshinweise	Anmerkungen / konstruktive Hinweise nach Fertigungsverfahren
1	2	3	Nr.	4	5	6	7	8
Energie speichern	Mechanische Energie	Zug-/ Druckfedern	1			In Reihe geschaltete Biegeelemente zur Aufnahme der axialen Zug-/Druckkräfte	<ul style="list-style-type: none"> Federverlauf nach Belastungssituation beliebig einstellbar Krafteinleitung integrieren; erste und letzte Windung massiver konstruieren biegebelastungsgerecht Konstruieren: plastische Deformation im Windungsbereich vermeiden bei Druckbelastung Führung erforderlich [...] 	<ul style="list-style-type: none"> optimale Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften nur bei liegender Fertigung <ul style="list-style-type: none"> Ablegerichtung längs der Richtung der Hauptspannungen in den Biegeelementen min. Abstand der Federelemente 0,6 mm als integriertes Bauteil keine Vorspannung möglich, sowie min. Neigungswinkel beachten <ul style="list-style-type: none"> LS: [...] LBM: <ul style="list-style-type: none"> geringere Anisotropie Stützstrukturen zur Bauplattenanbindung erforderlich min. Abstand der Federelemente 0,6 mm <ul style="list-style-type: none"> liegende Fertigung ist zu bevorzugen Entfernbarkeit der Stützstrukturen sicherstellen Oberflächenqualität der Downskin-Flächen gering

Bild 2: Auszug aus dem Katalog nach Weiss (2018)

Auch Yang et al. (2019) verfolgen den Ansatz, Heuristiken zu verwenden, um Konstruktionswissen zu vermitteln. Sie verwenden hierfür jedoch keine physischen Modelle, sondern Karteikarten. Ihre Sammlung umfasst zehn Heuristiken, beispielsweise Bauteilintegration.

Verschiedene Autoren stellen Kataloge vor, die eine vergleichbare Gliederung zu Weiss (2018) verwenden, jedoch keine klare Einteilung in Hauptteil und Zugriffsteil vornehmen. Valjak und Bojčetić (2019) stellen einen digitalen Katalog vor, der die Merkmale Hauptfunktion, Beschreibung, Herstellbarkeitsdaten, Beispiele sowie ein 3D-Modell der Lösungen beinhaltet. Insbesondere das 3D-Modell wird als Mehrwert herausgestellt, da hierdurch die Verständlichkeit der Inhalte erhöht werden kann. Schumacher et al. (2019) und Watschke et al. (2019) stellen einen Katalog vor, der insbesondere auf Multimateriallösungen eingeht. Der Katalog beinhaltet zusätzlich die Felder „positiv und negativ beeinflusste Gestaltungsziele“ und „besondere Möglichkeiten der Prinzipien“.

Neben diesen wissenschaftlichen Beiträgen gibt es eine Reihe weiterer Sammlungen die von den Anlagenherstellern bereitgestellt werden. Diese Sammlungen enthalten meist verschiedene Fallstudien die ohne Sortierung oder gezielten Zugriff bereitgestellt werden.

2.5 Fazit aus dem Stand der Forschung

Funktionsintegration ist ein probates Vorgehen um den Nutzen von einzelnen Bauteilen zu steigern. Dabei muss meist eine gesteigerte Bauteilkomplexität in Kauf genommen werden. Bei der Fertigung der gewünschten Bauteile durch additive Fertigungsverfahren bringt diese gesteigerte Bauteilkomplexität keine erhöhten Kosten mit sich. Für die Konstruktion additiv gefertigter Bauteile bietet sich eine Funktionsintegration im besonderen Maße an. Kataloge von funktionsintegrierten Lösungen sind eine Methode, um Konstrukteure auf Möglichkeiten der Funktionsintegration hinzuweisen. Die existierenden Kataloge zu additiv gefertigten Bauteilen konzentrieren sich jedoch nicht auf das Aufzeigen von multifunktionalen Lösungen, sondern auf die Vermittlung eines Verständnisses für die Lösung einzelner Funktionen. Aufgrund der hohen möglichen Bauteilkomplexität von additiv gefertigten Bauteilen wird dieses Verständnis meist als unbedingt notwendig erachtet, um eigene Konstruktionen zu generieren. Ausgehend vom Stand der Technik sind folglich die zwei Fragen aus der Zielsetzung (Abschnitt 1.2) weiterhin von Bestand.

3 Anforderungen an einen Konstruktionskatalog für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen aus dem Stand der Technik zusammengefasst. Die Anforderungen an einen Konstruktionskatalog für die integrative Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen können in drei Kategorien eingeordnet werden:

Zu den „Anforderungen an Konstruktionskataloge“ gehören alle Forderungen, die an einen Konstruktionskatalog im Allgemeinen zu stellen sind. Dazu gehören die im Abschnitt 2.2 besprochenen Forderungen nach universeller Einsetzbarkeit, Struktur des Katalogs und logischem Gliederungsteil. Gewünscht ist zusätzlich ein großer Umfang an Lösungen und eine logisch nachvollziehbare Gliederung. „Spezifische Anforderungen der additiven Fertigung“ sind neben dem Beinhalt von Verfahrensspezifischen Wirkprinzipien und Restriktionen auch eine möglichst intuitive Verständlichkeit der Inhalte, wie es in einigen Katalogen aus Abschnitt 2.4 erzielt wird. Der Zugriff über allgemein anwendbare Funktionen ist zudem vorteilhaft.

Die spezifischen Anforderungen für die Funktionsintegration sind der gezielte Zugriff auf multifunktionale Lösungen und das Aufzeigen der spezifischen Eigenschaften der Effekträger die mit einem Fertigungsverfahren hergestellt sind.

Tabelle 1: Anforderungen an einen Konstruktionskatalog für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen

F/W	Nr.	Anforderungen	Beschreibung, Quantifizierung	Quelle
1. Anforderungen an Konstruktionskataloge				
F	1.1	Universelle Einsetzbarkeit	Anwendbar auf alle additiv gefertigten Produkte	Bin Maidin 2011, S. 173 f.; Weiss 2016;
F	1.2	Struktur des Katalogs	Gliederungsteil, Hauptteil und Zugriffsteil	VDI 1982, S. 27
F	1.3	Logischer Gliederungsteil	Gliederung nach erkennbarer, widerspruchsfreier Systematik	VDI 1982, S. 4
W	1.4	Umfang	Möglichst vollständig und erweiterbar	VDI 1982, S. 10; VDI 1982, S. 4
W	1.5	Handhabung	Verständliche Handhabung	VDI 1982, S. 4; Bin Maidin 2011, S. 173 f.; Keller 2009, S. 317
2. Spezifische Anforderungen der additiven Fertigung				
F	2.1	Aufzeigen von technologie-spezifischen Wirkprinzipien	Aufzeigen, wie Effekträger mittels dem Verfahren aufgebaut werden	Wagner 2018, S. 44, 49, 60; Valjak 2019, S. 1372
F	2.2	Fertigungsprozessspezifische Informationen	Konstruktionsrestriktionen des Verfahrens aufzeigen	Bin Maidin 2011, S. 173 f.; Schumacher 2019, S. 755; Watschke 2019, S. 661
F	2.3	Intuitive Verständlichkeit der Inhalte	Vermitteln eines tiefgreifenden und umfassenden Verständnisses der Inhalte	Blösch-Paidosh 2017, S. 92; Valjak und Bojčetić 2019, S. 694
W	2.4	Einfacher Zugriff	Zugriff über allgemein anwendbare Funktionen	Weiss 2016; VDI 1982, S. 7-8
3. Spezifische Anforderungen der Funktionsintegration				
F	3.1	Zugriff auf multifunktionale Lösungen	Zugriff auf Lösungen, die mehr als eine Funktion erfüllen	Birkhofer 1980, S. 130; Rodenacker 1976, S.280
F	3.2	Aufzeigen der Eigenschaften der Effekträger	Aufzeigen der Eigenschaften der Funktionsträger, um Kombinationen zu erleichtern	Schumacher 2019, S. 755; Wagner 2018, S.49; Füssel 1999, S. 110

4 Konzept eines Konstruktionskatalogs für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen

Wie diese Anforderungen in einem Katalog erfüllt werden können, wird in den folgenden beiden Abschnitten vorgestellt. Dabei wird zunächst die Forschungsfrage nach einem effizienten Zugriff auf multifunktionale Lösungen beantwortet und anschließend die Frage nach dem Vermitteln von einem tiefgreifenden Verständnis der Inhalte des Katalogs. Um diese theoretischen Überlegungen zu veranschaulichen und im späteren zu validieren wurde ein spezifisch auf LBM zugeschnittener Katalog angelegt, welcher aktuell 50 beispielhafte Bauteile und neun Effekträger beinhaltet.

4.1 Zugriff auf multifunktionale Lösungen

Um einen Zugriff auf multifunktionale Lösungen zu ermöglichen, sind zunächst Lösungen im Katalog vorgehalten, die mehrere Funktionen in einem Bauteil erfüllen. Hierzu ist nach Ziebart (2012) eine geeignete Möglichkeit, Bauteile aus der Literatur zu analysieren und in einem Katalog bereitzustellen. Um ein gezieltes Aufzeigen der Eigenschaften der Effekträger zu ermöglichen ist der Katalog nur auf das Fertigungsverfahren LBM zugeschnitten. Die Abwandlung der Lösungen auf den konkreten Anwendungsfall wird somit erleichtert. Ebenso sind eine einfache Erweiterbarkeit sowie die Fertigbarkeit der Kataloginhalte erreichbar.

Kataloge des klassischen Aufbaus (mit Gliederungsteil, Hauptteil und Zugriffsteil) sind bei Anwendern bekannt und erhöhen so die Anwendungsfreundlichkeit. In diesem Aufbau erfüllt der Gliederungsteil die Aufgabe der Vorauswahl von Inhalten. Ein einfacher, logischer Gliederungsteil lässt sich durch die Verwendung von Elementarfunktionen erreichen und ist bei Katalogen für die additive Fertigung bereits etabliert. Ein eindimensionaler Gliederungsteil, der von einer Elementarfunktion auf eine Lösung verweist, ist hier jedoch nicht mehr ausreichend.

Durch die Erweiterung des Gliederungsteils auf mehrere Dimensionen wird das Auffinden von multifunktionalen Lösungen ermöglicht. Für multifunktionale Inhalte ist dies eine Neuerung im Vergleich zum Stand der Technik. Ein Bauteil im Katalog ist nicht nur einer Elementarfunktion zugeordnet, sondern mehreren. Der multidimensionale Zugriff wird durch ein Ausschlussprinzip erreicht. Der Anwender kann aus der Liste der Elementarfunktionen alle Funktionen auswählen, die er integrieren möchte. Er bekommt dann nur diejenigen Bauteile angezeigt, die mindestens den angeforderten Elementarfunktionen zugeordnet sind.

In Bild 3 ist das Interface des Gliederungsteils für den digitalen Katalog dargestellt. Hier sind die 15 Elementarfunktionen durch spaltenweise Zuordnung der Funktion und zeilenweise Zuordnung der Flüsse sortiert. Beispielhaft sind die beiden Elementarfunktionen „Stoff Leiten“ und „Stoff Verknüpfen“ ausgewählt. Links oben ist angezeigt, wie viele Lösungen zu den geforderten Randbedingungen im Katalog enthalten sind.

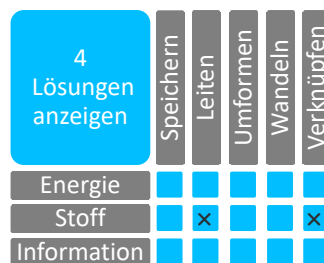


Bild 3: Gliederungsteil eines digitalen Katalogs zum Zugriff auf multifunktionale Lösungen

4.2 Verständnis von multifunktionalen Inhalten

Mit dem zuvor beschriebenen Vorgehen kann auf funktionsintegrierte Bauteile zugegriffen werden, da mehrere integrierte Funktionen gesucht werden können. Über die Schaltfläche „Lösungen anzeigen“ (vgl. Bild 3) kann der Nutzer auf eine Liste von spezifisch auf den Anwendungsfall passenden Lösungen zugreifen. Der angezeigte Katalogausschnitt wird in Bild 4 dargestellt. Der Stand der Technik gibt einige Hinweise, wie diese Lösungen veranschaulicht werden können. Während die primäre Auswahl der Bauteile durch die vorgestellte erste Gliederung (Bild 3) erfolgt, werden die passenden Lösungen anhand der Literaturquelle, in der sie auftauchen, das zweite Mal gegliedert. Im Hauptteil des Katalogs werden die Bauteile durch ein Bild sowie einen Schnitt oder eine Prinzipskizze vermittelt. Der Zugriffsteil des Katalogs beinhaltet eine Beschreibung der gefundenen Bauteile sowie Hinweise zu deren Gestaltung. In Bild 4 ist ein Auszug dieser Liste der Bauteile veranschaulicht. Durch den Gliederungsteil, der in Bild 3 dargestellt ist, findet der Anwender beispielsweise den Pulvermischer in Bild 4. Dieser leitet ein Schutzgas durch poröses Material und vermischt es mit einem Pulver. Das Einpressen des Gases fluidisiert

das Pulver und macht es somit fließfähig. Über diesen Zwischenschritt kann der Austrag des Pulvers aus dem Bauteil reguliert werden. „Stoff leiten“ und „Stoff verknüpfen“ sind hier integriert.


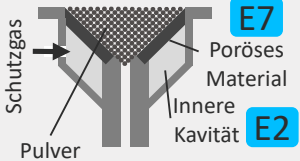
Gliederung II		Hauptteil		Zugriffsteil	
Quelle	Bild	Schnitt		Beschreibung	Gestaltung
[Garrelts2019]			<p>E7</p> <p>Poröses Material</p> <p>E2</p> <p>Innere Kavität</p>	<p>Pulvermischer leitet ein Schutzgas durch poröses Material und vermischt es mit einem Pulver. Das Einpressen des Gases fluidisiert das Pulver und somit kann über den Druck die Menge des ausfließenden Pulvers reguliert werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kavität muss von Pulver befreit werden ▪ ...

Bild 4: Bauteile im Hauptteil des Katalogs mit zugehörigem Zugriffsteil

Mit dem Katalog können die Bauteile erläutert werden, und das Zusammenspiel der einzelnen Effektträger zur Erfüllung der Elementarfunktionen wird verständlich gemacht. Bei additiv gefertigten Bauteilen sind die einzelnen Effektträger jedoch häufig komplex und nicht direkt verständlich, weshalb verschiedene Autoren physische Bauteile zur konkreten Vermittlung des Verständnisses einsetzen. Eine physische Sammlung aller im Katalog beinhalteten Bauteile ist jedoch nicht zweckmäßig, da eine solche Sammlung sehr umfangreich wäre.

Um dennoch eine hohe Konkretheit und damit eine intuitive Verständlichkeit zu erzielen, werden anstatt der Bauteile nur einzelne Effektträger in einem Effektträgerkatalog bereitgestellt. Im Beispiel in Bild 4 sind die zwei wichtigen Effektträger das poröse Material (E7) und die innere Kavität (E2). Durch ein Klicken auf die Schaltfläche „E7 – poröses Material“ wird der Konstrukteur auf die Seite des Effektträgers geleitet und findet hier eine Beschreibung sowie Hinweise zur Herstellbarkeit und den besonderen Möglichkeiten. Ein physisches Bauteil kann ebenfalls vorgehalten werden, da es erheblich weniger Effektträger gibt als Bauteile. Die Seite des Effektträgers ist in Bild 5 veranschaulicht.

Effektträger 7 [E7] - Poröses Material				Physisches Bauteil
Bild	Beschreibung	Herstellbarkeit	Besondere Möglichkeiten	
	Porosität kann entweder geometrisch durch Verwendung von Gitterstrukturen erzeugt werden, oder durch eine Anpassung der Laser...	<p>Geometrisch:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Überhanglänge beachten • Pulverentfernbarkeit • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Leiten von Fluiden • Trennen • ... 	

Bild 5: Zugriff von Objekten im Hauptteil des Katalogs auf Effektträger im Effektträgerkatalog

5 Diskussion

Um dieses neue Konzept eines Konstruktionskatalogs für die funktionsintegrierte Gestaltung von additiv gefertigten Bauteilen beurteilen zu können, erfolgt im Folgenden ein Vergleich mit den in Abschnitt 2.4 besprochenen Beispielsammlungen. Die Sammlung nach Doubrovski et al. (2012) wird hiervon ausgenommen, da von diesem lediglich eine textuelle Beschreibung vorliegt. Der Vergleich erfolgt anhand der in Abschnitt 3 definierten Anforderungen. Eine Ausnahme stellt hierbei der Wunsch nach einem großen Umfang dar, da diese Anforderung ohne Zugriff auf die Sammlungen nicht zu vergleichen ist. Für den Vergleich wurden zwei Experten aus dem Gebiet der Konstruktionstechnik und dem Gebiet der additiven Fertigung befragt. Eine kompakte Zusammenstellung des Vergleichs findet sich in Tabelle 2. Bei Anforderungen, zu denen keine einheitliche Meinung gefunden wurde, ist jeweils ein Bereich angegeben.

Die allgemeinen Anforderungen an Konstruktionskataloge werden von allen Sammlungen gut erfüllt. Einzig der Gliederungsteil aus Bin Maidin (2011) ist unklar, worunter ebenfalls die Handhabung leidet. Die Zuordnung der einzelnen Elemente zu genau einer der Gliederungskategorien ist hier nicht immer

eindeutig. Bei den Sammlungen, die über Heuristiken arbeiten (Blösch-Paidosh und Shea 2017; Yang et al. 2019), sind die Zuordnungen ebenfalls nicht logisch ableitbar. Das in diesem Beitrag vorgeschlagene Konzept soll sich auf nur ein Verfahren konzentrieren, woran die universelle Einsetzbarkeit leidet. Die Handhabung und Gliederung des Katalogs sind ungewöhnlich und daher nicht ohne Erklärung verständlich.

Technologiespezifische Wirkprinzipien und fertigungsspezifische Informationen sind nicht in allen Katalogen klar erkennbar. Die abstrakte Darstellung in den Katalogen von Blösch-Paidosti und Shea (2017) und Yang et al. (2019) lässt diese Informationen nur erahnen. Schumacher et al. (2019) haben kein dezidiertes Inhaltselement, das das Fertigungsverfahren der dargestellten Objekte angibt, und in Weiss (2018) sind die Informationen nicht überall aufgeführt. Die intuitive Verständlichkeit der Inhalte steigt mit der Konkretheit der Darstellung. Während in Bin Maidin (2011) lediglich eine Darstellung je Bauteil aufgeführt ist, zeigen Blösch-Paidosh und Shea (2017) physische Bauteile. In den anderen Katalogen wird über mehrere Bilder und Schnitte (Weiss 2018, Yang et al. 2019) bis zu digitalen 3D Modellen (Valjak und Bojčetić 2019, Schumacher et al. 2019) eine sehr unterschiedliche Verständlichkeit erreicht. Das Konzept dieses Beitrags greift ebenfalls auf physische Bauteile für die einzelnen Effektträger zurück. Einen Zugriff über Elementarfunktionen bieten vier der Kataloge. Der Zugriff auf multifunktionale Lösungen wird nur durch das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept ermöglicht. In den anderen Katalogen können zwar multifunktionale Lösungen enthalten sein, das gezielte Auffinden wird jedoch nicht unterstützt.

Die Eigenschaften der Effektträger werden außer in Bin Maidin (2011) sowie Blösch-Paidosh und Shea (2017) in allen Katalogen genannt. Die Ausführlichkeit ist jedoch stark unterschiedlich.

Tabelle 2: Übersicht über die Bewertungsergebnisse

Anforderungen		Kataloge							
		Bin Maidin 2011	Blösch-Paidosh und Shea 2017	Weiss 2018	Yang et al. 2019	Valjak und Bojčetić 2019	Schumacher et al. 2019	Garrelts et al. (SSP 2021)	
1.1	Universelle Einsetzbarkeit	●	●	●	●	●	●	●	
1.2	Struktur des Katalogs	●	●	●	●	●	●	●	
1.3	Logischer Gliederungsteil	●	●	●	●	●	●	●	
1.5	Handhabung	●	●	●	●	●	●	●	
2.1	Technologiespezifische Wirkprinzipien	●	●	●	○-●	●-●	○-●	●	
2.2	Fertigungsspezifische Informationen	●	●	●	○-●	●	○-●	●	
2.3	Intuitive Verständlichkeit der Inhalte	●	●	●	●	●-●	●-●	●	
2.4	Einfacher Zugriff	○	○	●	○	●	●	●	
3.1	Zugriff auf multifunktionale Lösungen	●	●	○	○-●	○-●	○	●	
3.2	Aufzeigen der Eigenschaften	●	●	●	●	●	●-●	●	

Beim Vergleich der Kataloge ist zu erkennen, dass das hier vorgestellte Konzept für die gewählte Zielsetzung passender ist, als die anderen Kataloge. Das Auffinden von funktionsintegrierten Konzepten wird einfacher und die Inhalte können dennoch verständlich vermittelt werden. Unter der Zielsetzung leiden jedoch andere Aspekte. So kann nur ein Fertigungsverfahren mit dem Katalog unterstützt werden. Da dieses Auffinden sowohl einen anderen Aufbau, als er in klassischen Katalogen aufzufinden ist, erfordert als auch die Benutzung des Katalogs verändert, ist die Handhabung etwas erschwert. Die Zielsetzung des Konzepts wird dennoch erfüllt, und für den spezifischen Einsatz ist dieses Konzept zu bevorzugen.

- Reinemuth 2018 REINEMUTH, Jürgen: *Entwicklung funktionsintegrierter Komponenten für das Selective Laser Melting*. Rapid.Tech. Erfurt, 2018.
- Rias et al. 2017 RIAS, Anne-Lise; SEGONDS, Frédéric; BOUCHARD, Carole; ABED, Stéphane: *Towards additive manufacturing of intermediate objects (AMIO) for concepts generation*. In: *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 11 (2017), Nr. 2, S. 301–315.
- Roth 1994 ROTH, Karlheinz: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 2: Kataloge*, 2. Auflage, wesentlich erweitert und neugestaltet, Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1994.
- Schumacher et al. 2017 SCHUMACHER, Felix; RICHTER, Timo; VIETOR, Thomas: *Ein Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung für die Nutzung von Potentialen additiver Fertigung in der Produktentwicklung*. In: *15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (2017)*, S. 131–140.
- Schumacher et al. 2019 SCHUMACHER, Felix; WATSCHKE, Hagen; KUSCHMITZ, Sebastian; VIETOR, Thomas: *Goal Oriented Provision of Design Principles for Additive Manufacturing to Support Conceptual Design*. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1*, Nr. 1 (2019), S. 749–758.
- Wagner 2018 WAGNER, Christian: *Funktionsintegration im Rahmen einer fertigungsgetriebenen Produktentwicklung*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2018.
- Valjak und Bojčetić 2019 VALJAK, Filip; BOJČEĆIĆ, Nenad: *Conception of Design Principles for Additive Manufacturing*. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1*, Nr. 1 (2019), S. 689–698.
- VDI 1982 Verein Deutscher Ingenieure 2222. *Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1982.
- VDI 2014 Verein Deutscher Ingenieure 3405. *Additive Fertigungsverfahren*. Berlin: Beuth, 2014.
- Watschke et al. 2019 WATSCHKE, Hagen; KUSCHMITZ, Sebastian; HEUBACH, Julius; LEHNE, Guido; VIETOR, Thomas: *A Methodical Approach to Support Conceptual Design for Multi-Material Additive Manufacturing*. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1*, Nr. 1 (2019), S. 659–668.
- Weiss et al. 2016 WEISS, Florian; BINZ, Hansgeorg; ROTH, Daniel: *Conception of a design catalogue for the development of functionalities with additive manufacturing*. In: *DS 85-2: Proceedings of NordDesign (2016), Volume 2, Trondheim, Norway*, S. 2–11.
- Weiss et al. 2018 WEISS, Florian; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg: *Content and functions of an internet-based platform for supporting development of additively manufactured parts*. In: MARJANOVIĆ, D.; ŠTORGA, M.; ŠKEC, S.; BOJČEĆIĆ, N.; PAVKOVIĆ, N. (Hrsg.): *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*. Croatia; The Design Society, Glasgow, UK, S. 1417–1428.
- Yang et al. 2019 YANG, Yujing; BRIK, Natalie; JONG, Peter de; GUERREIRO GONCALVES, Milene: *Visualised Frames: How Sketching Influences Framing Behaviour in Design Teams*. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design (2019)*, Nr. 1, S. 419–428.
- Ziebart 2012 ZIEBART, Jan Robert: *Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration*. Universität Braunschweig, Dissertation, 2012.

Bauteiltrennung zur Reduzierung der Prozesszeit und -kosten in der Additiven Fertigung

Component separation to reduce process time and costs in additive manufacturing

Jannik Reichwein¹, Kay-Eric Steffan¹, Eckhard Kirchner¹

¹Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente, Darmstadt
reichwein@pmd.tu-darmstadt.de

Abstract (deutsch): Die additive Fertigung bietet durch die schichtweise Herstellung von Bauteilen ein großes Potenzial in der geometrischen Gestaltung. Dies wird bei der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile häufig dazu genutzt, Bauteile leichter zu gestalten. Eine weitere Reduzierung der Masse ist möglich, wenn mehrere Bauteile zu einem komplexeren Bauteil zusammengefasst werden. Mit der höheren Komplexität steigen jedoch auch die Herstellkosten, durch einen höheren Bedarf an Stützkonstruktionen, Nachbearbeitung und längerer Fertigungszeit. Gerade bei komplexen Bauteilen, die den Bauraum der additiven Fertigungsanlage nur schlecht ausnutzen, ist Bauteiltrennung zielführend, um eine Reduzierung der Herstellkosten zu erreichen. In diesem Beitrag wird ein Vorgehen zur automatisierten Bauteiltrennung vorgestellt, welches eine bezüglich der Herstellkosten optimale Schnittebene unter Berücksichtigung der Bauteilanzahl, der Fertigungszeit und dem Volumen der Stützkonstruktionen ermittelt. Anhand eines Evaluierungsbeispiels wurde bei einer größeren Stückzahl eine Kostenreduzierung von bis zu 50 % erreicht.

Keywords (deutsch):

Additive Fertigung, Bauteiltrennung, Herstellkosten, Bauteilorientierung

Abstract (english): Additive manufacturing offers great potential in geometric design through the layer-by-layer production of components. This is often used in the development of additively manufactured components to make components lighter. A further reduction in mass is possible if several components are combined into a more complex component. However, the higher complexity also increases the manufacturing costs, due to a higher demand for supporting structures, reworking and longer production time. Especially for complex components, which make poor use of the space available in the additive manufacturing system, component separation is a good way to reduce manufacturing costs. In this paper a procedure for automated component separation is presented, which determines an optimal cutting plane with respect to the manufacturing costs, taking into account the number of components, the manufacturing time and the volume of the supporting structures. Based on an evaluation example, a cost reduction of up to 50 % was achieved for a larger number of parts.

Keywords (english):

Additive manufacturing, part separation, manufacturing costs, part orientation

1 Einleitung

Die additive Fertigung hat aufgrund der Forderung nach einer Individualisierung der Produktion und einem hohen Bedarf an Leichtbau bereits heute eine große wirtschaftliche Bedeutung in der Fertigung. Dies wird vor allem durch die große Freiheit in der geometrischen Gestaltung der Bauteile und der Individualisierung der Bauteile durch die kostengünstige Fertigung von kleinen Stückzahlen ermöglicht. Die technischen Möglichkeiten und Potenziale der additiven Fertigung sind daher ein wichtiger Wettbewerbsfaktor für Unternehmen. Trotzdem wird die additive Fertigung bislang in wenigen Branchen für die Herstellung von Endprodukten eingesetzt und eine weitere Verbreitung fehlt. (Wohlers 2018) Es gibt daher große Anstrengungen in Industrie und Forschung, um eine größere Verbreitung der additiven Fertigung zu erreichen. Während die Produktivität der Fertigungsverfahren steigt, die Vielfalt an verarbeitbaren Materialien wächst und die additiven Fertigungsanlagen günstiger werden, können zusätzlich Potenziale durch die gezielte Gestaltung der Bauteile für die additive Fertigung gehoben werden. Somit können die Vorteile der additiven Fertigung in Zukunft auch in weiteren Branchen eingesetzt werden. Ein Beispiel ist die Nutzung des Leichtbaupotenzials, um CO₂ Einsparungen zu erreichen.

Um die additive Fertigung insgesamt günstiger zu gestalten, ist es aus Sicht der Produktentwicklung notwendig, die bestehenden Limitierungen der additiven Fertigung zu überwinden. Restriktionen sind hier insbesondere die Ausrichtung der Bauteile und damit auch der Funktionsflächen. Gerade bei komplexen Bauteilen ist die Ausrichtung der Bauteile nicht trivial und führt dazu, dass viele Stützkonstruktionen benötigt werden. Stützkonstruktionen sind in der additiven Fertigung notwendig, um Bauteile mit der Plattform zu verbinden, Überhänge abzustützen und je nach Verfahren auch thermische Energie abzuführen. Diese müssen nach dem Fertigungsprozess wieder von den Bauteilen entfernt werden, wodurch die Kosten für Material und Prozess steigen. Außerdem besteht ein Zielkonflikt bei der Ausrichtung verschiedener Funktionsflächen, wodurch der Nachbearbeitungsaufwand steigt. Neben diesen Einschränkungen ist vor allem die starke Beschränkung des Bauraums vieler additiver Fertigungsanlagen ein limitierender Faktor. Um diese Herausforderungen anzugehen, wird im Folgenden ein Vorgehen zur Bauteiltrennung und Orientierung der Bauteile im Bauraum vorgestellt, welches eine günstigere Fertigung von komplexen Bauteilen und die Fertigung von bauraumüberschreitenden Bauteilen ermöglicht.

2 Stand der Forschung

Aus der Literatur sind bereits Methoden zur Gestaltung für die Fertigung bekannt, die unter dem Oberbegriff Design for Manufacturing (DfM) zusammengefasst werden. Diese haben das Ziel dem Entwickler Wissen bereitzustellen, um während der Produktentwicklung bestimmte Aspekte, zum Beispiel die Montierbarkeit, des Produktes zu verbessern. Speziell für die additive Fertigung werden diese Ansätze unter dem Begriff des Design for Additive Manufacturing (DfAM) zusammengefasst. Hierunter fallen an die Additive Fertigung angepasste Vorgehensmodelle (Kumke 2018; Kranz 2017) sowie eine Reihe einzelner Methoden, die sich wiederum in restriktive und opportunistische unterteilen lassen (Laverne et al. 2015). Restriktive Methoden schränken dabei den Lösungsraum ein, stellen die Fertigbarkeit sicher und werden häufig in Form von Gestaltungsrichtlinien präsentiert (Kranz et al. 2015; Adam 2015). Opportunistische Methoden sollen den Lösungsraum erweitern und den Entwickler im Finden neuer Lösungen unterstützen. Hierzu zählen verschiedene Arten von Lösungsdatenbanken (Reichwein et al. 2019) oder auch Anpassungen der TRIZ Methodik an die additive Fertigung (Schulte et al. 2020).

Die Fertigungsrestriktionen additiver Verfahren unterscheiden sich stark von anderen Fertigungsverfahren, da zum Beispiel deutlich komplexere Bauteile gefertigt werden können und der Bauraum der Fertigungsanlagen beschränkt ist. Im Rahmen des DfAM gibt es daher Ansätze, zur Variation der Produktarchitektur. Dies ist bei einer Anpassungskonstruktion bestehender Produkte, die additiv gefertigt werden sollen, häufig sinnvoll, um die Potenziale der additiven Fertigung zu nutzen

und den Fertigungsrestriktionen gerecht zu werden. Hierzu zählen Methoden zur gezielten Zusammenfassung von mehreren Bauteilen zu einem komplexen Bauteil (Kim und Moon 2020; Nie et al. 2020). Eine Auftrennung von Bauteilen für die additive Fertigung wird in der Literatur zum DfAM jedoch deutlich seltener thematisiert und bestehende Ansätze sehen meist nur eine Trennung von Bauteilen vor, die ansonsten zu groß für den Bauraum einer additiven Fertigungsanlage sind (Deka und Behdad 2019; Oh et al. 2018).

Die Produktarchitektur kann durch den Grad der Konsolidierung beschrieben werden, wobei ein hoher Grad der Konsolidierung einer Integralbauweise entspricht und ein niedriger Grad der Differentialbauweise. (Nie et al. 2020) haben den Zusammenhang der Fertigungskosten über dem Grad der Konsolidierung der Bauteile aufgetragen (siehe Bild 1).

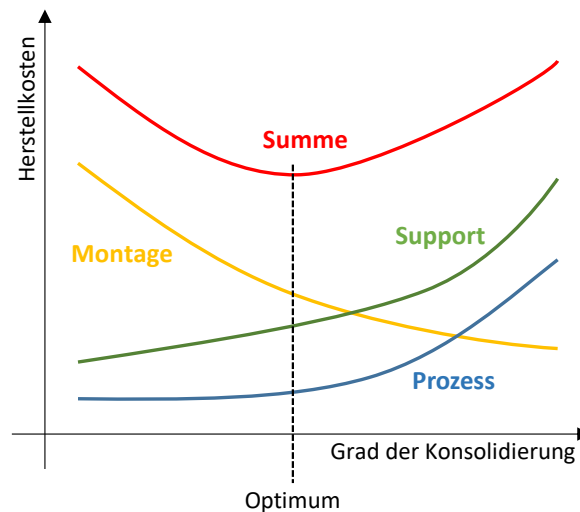


Bild 1 Grad der Konsolidierung in Anlehnung an (Nie et al. 2020)

Die Montagekosten sinken mit steigender Konsolidierung der Bauteile, weil weniger Montageoperationen notwendig sind. Jedoch werden die Bauteile mit steigender Konsolidierung komplexer und benötigen daher mehr Stützkonstruktionen. Dies wiederum führt zu einem höheren Materialverbrauch und mehr Nachbearbeitungsaufwand. Wie in Bild 1 zu sehen ist, existiert dadurch für viele Bauteile ein Optimum der Fertigungskosten bezüglich des Grades der Konsolidierung, welches nicht zwangsläufig bei einem hohen Grad der Konsolidierung zu finden ist. (Nie et al. 2020)

3 Problemstellung

Eine Trennung von Bauteilen für die additive Fertigung bietet mehrere Potenziale. Ein Aspekt ist die Notwendigkeit vieler Stützkonstruktionen bei komplexen Bauteilen. Dies führt zu einem größeren Materialverbrauch, längerer Fertigungsprozessdauer und mehr Nachbearbeitungsaufwand durch das Entfernen der Stützkonstruktionen. Durch die Trennung eines komplexen Bauteils in Einzelteile kann das Volumen an Stützkonstruktionen erheblich reduziert werden. Dies resultiert aus der Möglichkeit der unabhängigen Orientierung jedes Einzelteils im Bauraum. Ein weiterer Vorteil der Bauteiltrennung liegt in der Fertigung von Funktionsflächen. An diese werden besondere Anforderungen gestellt, welche durch die Ausrichtung im Bauraum beeinflusst werden. Häufig führt die Ausrichtung der einzelnen Funktionsflächen eines Bauteils, um diese Anforderungen zu erfüllen, zu widersprüchlichen Ausrichtungen des Gesamtbauteils. Es ist daher ein Kompromiss notwendig, wodurch die Anforderungen an die Funktionsflächen nicht mehr optimal erfüllt werden. Durch eine Trennung des komplexen Bauteils ist wiederum eine unabhängige Positionierung der Einzelteile möglich, um so die Nachbearbeitung von Funktionsflächen zu minimieren.

Ein weiterer entscheidender Aspekt ist die Größe des Bauteils, die die maximalen Abmessungen des Bauraums der additiven Fertigungsanlage nicht überschreiten darf. Durch eine Trennung von zu

großen Bauteilen, ist die Fertigung derselben möglich. Zusätzlich kann die unabhängige Positionierung der Bauteile dazu genutzt werden, das zur Verfügung stehende Bauraumvolumen besser zu nutzen. Im Stand der Technik werden vorrangig Methoden zur Konsolidierung von Bauteilen vorgestellt, wodurch das oben beschriebene Optimum bezüglich der Herstellkosten nicht erreicht werden kann. Ziel dieses Beitrags ist daher die Entwicklung eines Vorgehens zur Bauteiltrennung, um die Herstellkosten additiv gefertigter Bauteile zu reduzieren.

4 Vorgehen zur Bauteiltrennung

Eine Trennung von Bauteilen für die additive Fertigung weist Vorteile gegenüber der Fertigung eines komplexen Bauteils auf. Im Folgenden wird daher ein Vorgehen vorgestellt, um die Entscheidung über eine Bauteiltrennung zu unterstützen. Ausgangspunkt des Vorgehens bildet ein Bauteil, welches bereits mit bestehenden Ansätzen des DfAM gestaltet wurde. Dabei wird durch existierende Methoden, wie beispielsweise der Strategie der einteiligen Maschine (Ehrlenspiel 1985) oder auch der gezielten Zusammenfassung einzelner Bauteile (Nie et al. 2020) eine möglichst hohe Konsolidierung angestrebt. Ziel des folgenden Vorgehens ist die Minimierung der Fertigungskosten durch Bauteiltrennung. Die Berechnung der Herstellkosten c_{HK} ist angelehnt an das Kostenmodell nach Kranz (2017) und setzt sich dabei zusammen aus den Fertigungskosten c_F und den Materialkosten c_M :

$$c_{HK} = c_F + c_M$$

Die Materialkosten berechnen sich nach:

$$c_M = (V_{\text{Bauteil}} + V_{\text{Support}}) \cdot \rho \cdot c_{\text{Werkstoff}} \cdot k_v$$

Mit den Volumen des Bauteils V_{Bauteil} und der Stützkonstruktion V_{Support} , der Dichte des Bauteils ρ den Werkstoffkosten $c_{\text{Werkstoff}}$ und einem konstanten Faktor k_v für die Verluste des überschüssigen, nichtverschmolzenen Pulvers beim Recyclen. Die Fertigungskosten setzen sich aus den Kosten für die Vorbereitung c_{pre} , dem eigentlichen Fertigungsprozess c_{process} und der Nachbearbeitung c_{post} der Bauteile zusammen:

$$c_F = c_{\text{pre}} + c_{\text{process}} + c_{\text{post}} = c_{\text{pre}} + c_{m,h} \cdot t_{\text{process}} + c_{\text{post}}$$

Dabei bezeichnet $c_{m,h}$ den Maschinenstundensatz der Anlage und t_{process} die Dauer des Fertigungsprozesses. Für das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (PBF von engl. Powder-Bed-Fusion) setzt sich diese wiederum aus der Zeit für die Beschichtung und der Belichtungszeit der einzelnen Schichten zusammen. Die Zeit, die die Anlage für die Beschichtung mit neuem Pulver benötigt ist dabei unabhängig von der Anzahl der Bauteile, die gleichzeitig gefertigt werden. Außerdem fallen Kosten für das Vorbereiten der Anlage und das anschließende Abtrennen der Bauteile an, die ebenfalls nicht stückzahlabhängig sind. Daher ergibt sich auch bei der additiven Fertigung eine Abhängigkeit der Herstellkosten von der zu fertigenden Stückzahl. Den folgenden Beispielrechnungen liegen die Daten einer EOS M 290 PBF-Anlage zugrunde. In dem in Bild 2 gezeigten Beispiel betragen die Herstellkosten des dargestellten Bauteils bei der Fertigung von nur einem Bauteil 670 € und bei einer Fertigung von fünf Bauteilen 294 € pro Bauteil.

Darüber hinaus ergibt sich eine Abhängigkeit der Kosten von der Orientierung der Bauteile. Die Orientierung beeinflusst zum einen die Menge an Stützkonstruktionen, die für den Fertigungsprozess notwendig sind und zum anderen die Höhe des Bauteils im Bauraum. Bild 2 zeigt die Kosten für zwei verschiedene Orientierungen des gleichen Bauteils. Die erste Orientierung zeichnet sich durch das minimal notwendige Volumen an Stützkonstruktionen aus und für die andere wurde die Anzahl gleichzeitig fertiger Bauteile maximiert. Es zeigt sich, dass abhängig von der Anzahl an Bauteilen, die insgesamt gefertigt werden sollen, unterschiedliche Ausrichtungen zu den geringsten Herstellkosten pro Bauteil führen können. Die in Bild 2 auftretenden Sprünge in den Kosten entstehen, wenn eine neue Plattform notwendig ist. In diesem Beispiel passen jeweils zwölf beziehungsweise 20

gleiche Bauteile auf eine Plattform, sodass die Kosten ab dem 13. Beziehungsweise 21. Bauteil sprunghaft steigen, weil ein zweiter Fertigungsprozess durchgeführt werden muss.

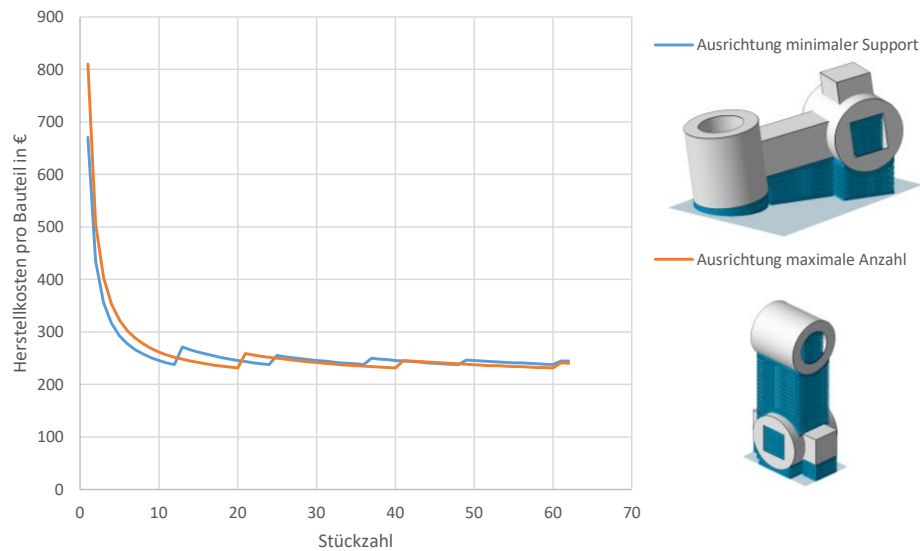


Bild 2 Fertigungskosten in Abhängigkeit der Stückzahl und Ausrichtung

Bild 3 zeigt die Orientierung und Anordnung des Beispielbauteils in den beiden Ausrichtungen auf einer virtuellen Bauplattform. Dabei ist das Volumen des Stützmaterials und die Höhe des Bauteils in der stehenden Ausrichtung höher, was zu deutlich höheren Herstellkosten bei kleinen Stückzahlen führt, bei größeren Stückzahlen jedoch die wirtschaftlichere Lösung ist.

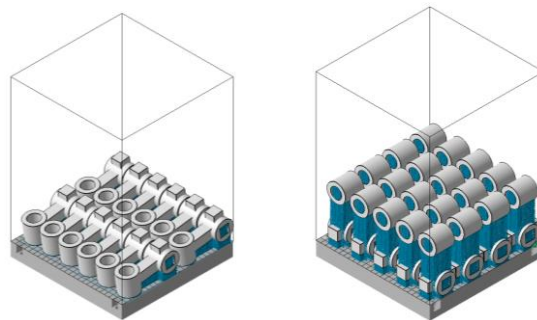


Bild 3: Anordnung der Bauteile auf der Plattform

Die zu fertigende Stückzahl beeinflusst die Herstellkosten der additiven Fertigung. Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung der Stückzahl bei der Wahl der Orientierung und der daraus resultierenden Anordnung auf der Bauplattform erforderlich. Allgemein ist die Anzahl der Bauteile, die auf eine Plattform passen von der Größe der Bauteile abhängig. Bei komplexen Bauteilen kann der Bauraum der Anlage besser ausgenutzt werden, wenn diese getrennt werden, um eine bessere Anordnung auf der Plattform zu ermöglichen. Dadurch ist oft bei geringerem Grad der Konsolidierung die Fertigung einer höheren Anzahl von Bauteilen auf einer Plattform möglich. Dies wird im folgenden Vorgehen zur Bauteiltrennung berücksichtigt.

Das Vorgehen zur Bauteiltrennung umfasst die in Bild 4 dargestellten Schritte. Zunächst wird das Bauteil an beliebigen Ebenen getrennt, diese sind in Bild 4 als gelbe Rechtecke dargestellt. Dabei werden die Ebenen sowohl translatorisch verschoben als auch um zwei Achsen gedreht, sodass jede beliebige Position der Schnittebene erreicht werden kann. Die Schrittweite für die Verdrehung beziehungsweise Verschiebung kann angepasst werden und beeinflusst maßgeblich die Laufzeit des Programmes und die Anzahl an generierten Varianten. Für jede der so erstellten Ebenen wird eine Bauteiltrennung durchgeführt und die Einzelteile als separate Dateien gespeichert. Dabei können pro

Schnitt zwei oder mehr Einzelteile entstehen. Je nach Schrittweite entstehen so mehrere tausend Varianten, unter denen im nächsten Schritt eine Vorauswahl getroffen wird.

Die Vorauswahl wird auf Basis der Anzahl der entstandenen Einzelteile und dem Volumen der Einzelteile getroffen. Dabei kann die maximale Anzahl an Einzelteilen, die aus einem Bauteil entstehen, begrenzt werden, sodass beispielsweise nur Varianten mit bis zu drei Einzelteilen berücksichtigt werden. Außerdem sollen Varianten ausgeschlossen werden, bei denen sich die entstandenen Einzelteile zu stark in ihrem Volumen unterscheiden. Dafür wird das Verhältnis des Volumens der Einzelteile berechnet und ein Grenzwert festgelegt, der nicht unterschritten werden darf. Dies führt dazu, dass Varianten bei denen nur ein sehr kleiner Teil des ursprünglichen Bauteiles abgetrennt wurde, nicht weiter berücksichtigt werden. Die Vorauswahl führt zu einer stark reduzierten Variantenzahl, für die im Folgenden eine Ausrichtung ermittelt wird. Das Vorgehen läuft vollständig automatisiert durch ein Skript für ein CAD-Programm ab.

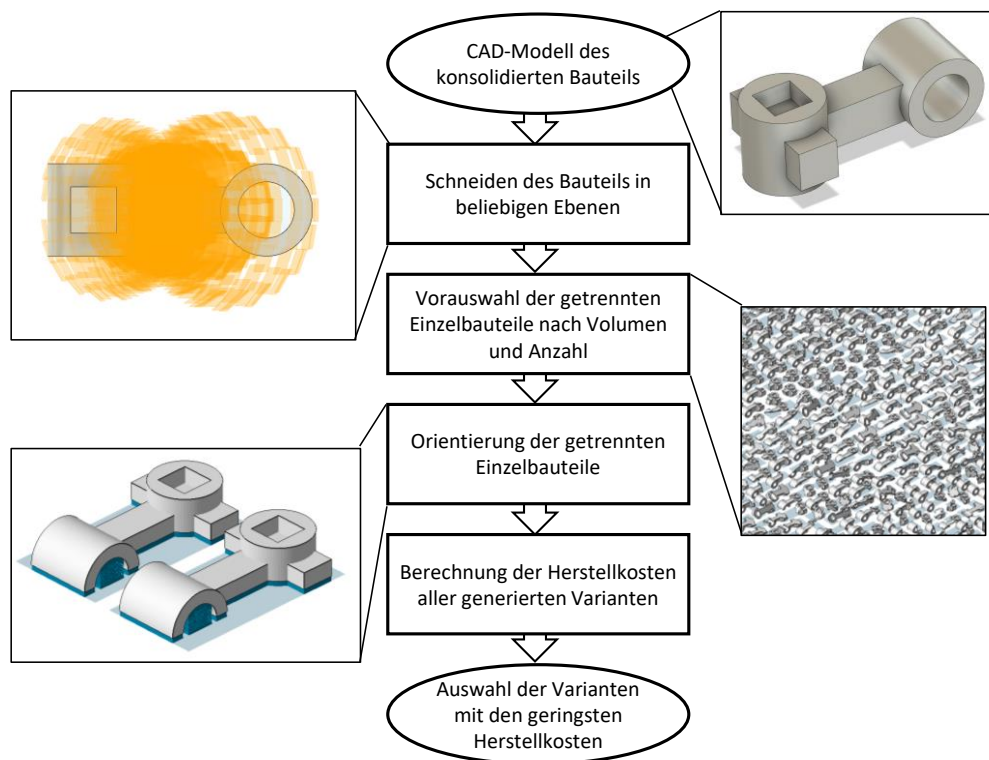


Bild 4 Vorgehensmodell zur Bauteiltrennung

Zusätzlich zu den automatisch generierten Einzelteilen, besteht die Möglichkeit das Bauteil manuell zu trennen. Auf diese Weise sind auch Schnitte möglich, die von einer einfachen Ebene abweichen. Die manuell erstellten Einzelteile können dann im weiteren Verfahren zusammen mit den automatisch erstellten ausgerichtet und hinsichtlich der Herstellungskosten verglichen werden. Die Ausrichtung der Bauteile beeinflusst die Herstellungskosten und die optimale Ausrichtung ergibt sich anhand der zu fertigen Stückzahl. Aus diesem Grund ist für die Berechnung der Herstellungskosten die Stückzahl notwendig. Alle weiteren erforderlichen Daten für die Berechnung der Herstellungskosten können direkt aus den CAD-Modellen der Bauteile berechnet werden oder sind anlagen- beziehungsweise materialspezifisch. Nach der Ermittlung aller Daten, werden im nächsten Schritt die Herstellungskosten für beliebige Orientierungen des Einzelteils berechnet. Die Automatisierung erfolgt über ein weiteres Skript. Aufbauend auf diesen Ergebnissen kann die kostengünstigste Ausrichtung ausgewählt werden. Neben der Minimierung der Herstellungskosten können auch andere Kriterien, wie beispielsweise eine Minimierung des Volumens der Stützkonstruktionen oder der Fertigungszeit angestrebt werden. Nach der Orientierung der Einzelteile werden die verbliebenen Varianten hinsichtlich ihrer Herstellungskosten bewertet. Dazu werden die Herstellungskosten der Einzelteile aufsummiert und es erfolgt

ein Abgleich mit den Herstellkosten des nicht getrennten Bauteils. Hierbei muss abgeschätzt werden, wie die Verbindung der Bauteile nach der additiven Fertigung erfolgt und welche Kosten die Montage verursacht, um eine abschließende Entscheidung zu treffen. Hierzu eignen sich beispielsweise stoffschlüssige Verbindungen, die den Zusammenhalt der Einzelteile ohne weitere Verbindungselemente und mit gleichzeitig hoher Festigkeit ermöglichen. Die Wahl der Verbindungstechnik ist dabei stark von dem verwendeten Material, der Art des Bauteils und den zur Verfügung stehenden Technologien abhängig und wird an dieser Stelle nicht tiefergehend betrachtet.

5 Evaluierung

Bild 5 zeigt als Evaluierungsbeispiel des vorgestellten Vorgehens die Halterung für die Lenkwellenlagerung eines Formula Student Rennwagens. Die Struktur wird aus Aluminium gefertigt und wurde bereits topologieoptimiert, um eine möglichst geringe Masse zu erreichen. Bei der Orientierung des Bauteils auf der Bauplattform im Rahmen des Pre-Processings zeigt sich, dass unabhängig von der Orientierung des Bauteils ein hohes Volumen an Stützkonstruktionen notwendig ist. Dies resultiert aus der komplexen Geometrie und den großen Flächen, die einen Winkel von 50° zur Bauplattform überschreiten und daher abgestützt werden müssen.

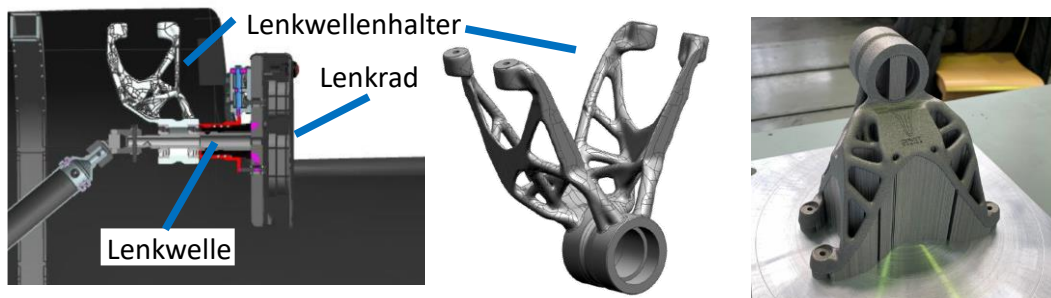


Bild 5 Lenkwellenhalter im eingebauten Zustand (links) im Detail (mitte) und nach dem additiven Fertigungsprozess (rechts)

Die kostenoptimale Orientierung der Bauteile ist von der herzustellenden Stückzahl abhängig. Dies zeigt sich auch bei der Lenkwellenhalterung. Die Orientierung wurde jeweils für eine Stückzahl von eins und für eine Stückzahl von 50 berechnet. Bild 6 zeigt das Ergebnis der automatisierten Ausrichtung der Lenkwellenhalterung. Bei einer zu fertigenden Lenkwellenhalterung, hat die Höhe des Bauteils einen höheren Einfluss auf die Herstellkosten und die optimale Orientierung ist möglichst niedrig. In dieser Ausrichtung passt jedoch nur ein Bauteil auf die Plattform, wodurch bei einer Fertigung von mehreren Teilen eine andere Orientierung zu insgesamt niedrigeren Herstellkosten führt. Im rechten Teil der Abbildung ist die optimale Orientierung für eine Stückzahl von 50 gezeigt. Diese Orientierung ermöglicht die gleichzeitige Fertigung von zwei Lenkwellenhalterungen auf einer Plattform.

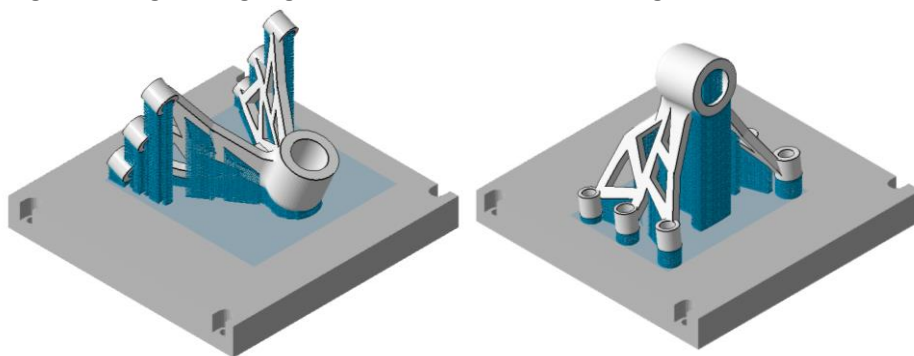


Bild 6 Optimale Orientierung der Lenkwellenlagerung auf der Bauplattform bei einer Stückzahl von eins (links) und bei einer Stückzahl von 50 (rechts)

Insgesamt benötigen beide Ausrichtungen ein relativ großes Volumen an Stützkonstruktionen und auch bei einer Fertigung von zwei Lenkwellenhalterungen wird der Bauraum der Anlage nur schlecht ausgenutzt. Um die Stützkonstruktionen zu verringern und die Ausnutzung zu verbessern, wird eine Trennung des Bauteils durchgeführt. Hierzu wird das vorgestellte Vorgehen zur Bauteiltrennung angewendet und verschiedene Alternativen hinsichtlich der Herstellungskosten miteinander verglichen. Die Trennung des Bauteils erfolgt an beliebigen Trennungsebenen, wie sie in Bild 7 dargestellt sind. Bei einer Verdrehung der Ebenen um die beiden Achsen in Schritten von jeweils 15° und einer parallelen Verschiebung der Ebenen um 20 mm ergeben sich zunächst 1590 Varianten zur Trennung der Lenkwellenhalterung. Im Rahmen der Vorauswahl werden nur Bauteiltrennungen berücksichtigt, die zu maximal vier Einzelteilen führen. Außerdem darf das Verhältnis des Volumens des kleinsten Einzelteils zum Gesamtvolumen 0,1 nicht unterschreiten. Durch diese Vorauswahl reduziert sich die Anzahl der Varianten auf 346, einen Ausschnitt zeigt der rechte Teil von Bild 7.

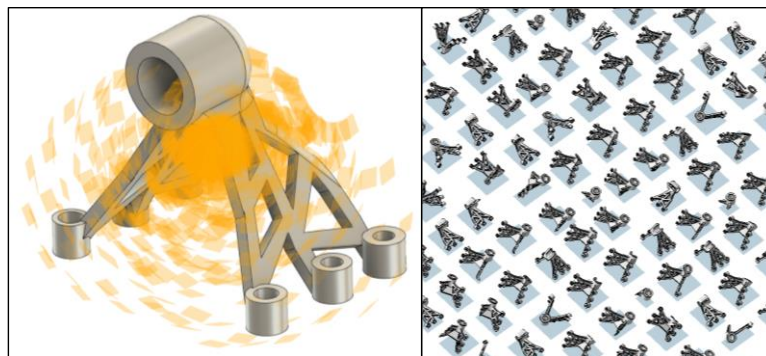


Bild 7: Automatisch generierte Schnittebenen (links) und resultierende Varianten (rechts)

Anschließend wird für jedes Einzelteil eine hinsichtlich der Herstellungskosten optimale Orientierung berechnet. Dies ermöglicht eine Bewertung der Trennungsebenen, um die Ebene mit den niedrigsten Herstellkosten für die geforderte Anzahl an Bauteilen auszuwählen. Neben den Herstellkosten können die Ebenen auch anhand von Kriterien wie beispielsweise dem Volumen der Stützkonstruktionen, Dauer des Fertigungsprozesses oder wie viele gleiche Bauteile auf einer Plattform gefertigt werden können bewertet werden. So kann beispielsweise auch die Trennungsebene ausgewählt werden, die die geringste Fertigungsdauer ermöglicht.

Die in Bild 8 gezeigten Bauteile, sind das Ergebnis der durchgeführten Bauteiltrennung und stellen jeweils die günstigsten Varianten dar. Für die Herstellung von 50 Lenkwellenhalterungen ist eine Trennung des Bauteils in drei Einzelteile das Optimum bezüglich der Herstellkosten. Hier können die Kosten auf weniger als die Hälfte im Vergleich mit dem ungeteilten Bauteil reduziert werden. Eine Trennung in zwei Teile führt zu einer Reduktion der Herstellkosten um 43 %. Diese Reduzierung resultiert vor allem aus der besseren Ausnutzung des Bauraums bei den geteilten Varianten. Für die Fertigung von nur einer Lenkwellenhalterung ist eine Trennung daher nicht zielführend und führt zu höheren Fertigungskosten. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Herstellkosten der verschiedenen Varianten.

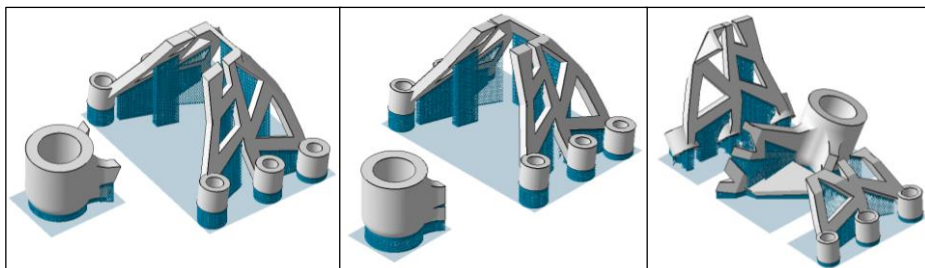


Bild 8: Optimale Orientierung der getrennten Varianten für eine Stückzahl von eins (links), 50 (mitte) und 50 bei drei Einzelteilen (rechts)

Tabelle 1: Vergleich des Gesamtbauteils mit den getrennten Varianten für verschiedene Stückzahlen

Beschreibung	Herstellkosten	
	Stückzahl 1	Stückzahl 50
Konsolidiertes Bauteil	1 102 €	1 029 €
In zwei Teile getrenntes Bauteil	1 264 €	586 €
In drei Teile getrenntes Bauteil	1 547 €	484 €

Bei den genannten Herstellkosten werden die Kosten für die Verbindung der Bauteile bislang nicht berücksichtigt. Diese sind stark von dem Verfahren, welches zur Verbindung der Bauteile genutzt wird, abhängig. Auf Basis der berechneten Herstellkosten kann jedoch eine Entscheidung getroffen werden, ob die Bauteiltrennung im konkreten Einzelfall sinnvoll ist. Zur Verbindung der Einzelteile der Lenkwellenhalterung bietet sich beispielsweise das Diffusionschweißen beziehungsweise Laserstrahlschweißen an, da hier eine Verbindung der Aluminiumbauteile möglich ist, bei der die Werkstoffkennwerte in der Fügestelle nicht wesentlich von denen des additiv gefertigten Grundmaterials abweichen und eine Übertragung der mechanischen Kräfte durch das Bauteil sichergestellt ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Potenziale der additiven Fertigung werden in der Produktentwicklung häufig noch nicht vollständig ausgenutzt. Gerade bei der Produktarchitektur, der Orientierung und Anordnung der Bauteile auf der Plattform besteht noch Verbesserungsbedarf. Daher wurde ein Vorgehen entwickelt, welches die automatisierte Ermittlung einer Trennungsebene ermöglicht, um die additive Fertigung von komplexen Bauteilen bzw. Bauteilen, die größer als der zur Verfügung stehende Bauraum sind, hinsichtlich verschiedener Kriterien zu optimieren. Damit ergänzt das Vorgehen die generellen Bestrebungen des DfAM Bauteile zu konsolidieren unter besonderer Berücksichtigung der Fertigungsrestriktionen. Anhand eines Beispiels wurde gezeigt, dass durch eine Trennung eines komplexen Bauteils eine Reduktion von Herstellkosten, Prozessdauer, Volumen der Stützkonstruktion und Anzahl der gleichzeitig zu fertigenden Bauteile erreicht werden kann.

Nach der additiven Fertigung der Einzelteile, müssen diese wieder verbunden werden. Hierfür bieten sich vor allem stoffschlüssige Bauteilverbindungen an, wie beispielsweise verschiedene Schweißverfahren (Diffusions-, Ultraschallschweißen) und insbesondere für Kunststoffbauteile auch Klebverfahren. Die Gestaltung und Dimensionierung der Fügstellen wird daher Thema zukünftiger Untersuchungen sein. Darüber hinaus werden aktuell nur Schnitte anhand von Ebenen durchgeführt und komplexere Schnittgeometrien vernachlässigt. Dies bietet ebenfalls Potenzial für Verbesserungen des Vorgehens. Die bereits erwähnte Möglichkeit das Bauteil zusätzlich zu der automatisch durchgeführten Bauteiltrennung manuell zu trennen, kann durch eine methodische Herangehensweise unterstützt werden. So können weitere Aspekte berücksichtigt werden. Zum Beispiel die Austauschbarkeit bestimmter Elemente, die erhöhtem Verschleiß im Betrieb ausgesetzt sind.

Literatur

- Adam (2015) ADAM, G. A. O.: Systematische Erarbeitung von Konstruktionsregeln für die additiven Fertigungsverfahren Lasersintern, Laserschmelzen und Fused Deposition Modeling Guido A. O. Adam. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2015. Aachen : Shaker, 2015
- Deka und Behdad (2019) DEKA, A.; BEHDAD, S.: Part Separation Technique for Assembly-Based Design in Additive Manufacturing using Genetic Algorithm. In: Procedia Manufacturing 34 (2019), S. 764–771
- Ehrlenspiel (1985) EHRENSPIEL, K.: Kostengünstig konstruieren: Kostenwissen, Kosteneinflüsse, Kostensenkung; mit 44 Tabellen. Berlin: Springer, 1985 (Konstruktionsbücher 35)
- Kim und Moon (2020) KIM, S.; MOON, S. K.: A Part Consolidation Design Method for Additive Manufacturing based on Product Disassembly Complexity. In: Applied Sciences 10 (2020), Nr. 3, S. 1100
- Kranz et al. (2015) KRANZ, J.; HERZOG, D.; EMMELMANN, C.: Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. In: Journal of Laser Applications 27 (2015), S1, S14001
- Kranz (2017) KRANZ, J.: Methodik und Richtlinien für die Konstruktion von laseradditiv gefertigten Leichtbaustrukturen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- Kumke (2018) KUMKE, M.: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018
- Laverne et al. (2015) LAVERNE, F.; SEGONDS, F.; ANWER, N.; LE COQ, M.: Assembly Based Methods to Support Product Innovation in Design for Additive Manufacturing: An Exploratory Case Study. In: Journal of Mechanical Design 137 (2015), Nr. 12, S. 121701
- Nie et al. (2020) NIE, Z.; JUNG, S.; KARA, L. B.; WHITEFOOT, K. S.: Optimization of Part Consolidation for Minimum Production Costs and Time Using Additive Manufacturing. In: Journal of Mechanical Design 142 (2020), Nr. 7
- Oh et al. (2018) OH, Y.; ZHOU, C.; BEHDAD, S.: Part decomposition and 2D batch placement in single-machine additive manufacturing systems. In: Journal of Manufacturing Systems 48 (2018), S. 131–139
- Reichwein et al. (2019) REICHWEIN, J.; KASPAR, J.; VIELHABER, M.; KIRCHNER, E.: Exploitation of AM-Potentials by Linking Manufacturing Processes to Function-Driven Product Design. In: Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1 (2019), Nr. 1, S. 739–748
- Schulte et al. (2020) SCHULTE, F.; WÜRTEMBERGER, J.; STEFFAN, K.-E.; KIRCHNER, (2020): TRIZ als Schlüssel zu den Potentialen additiver Fertigungsverfahren. In: E. LACHMAYER, R.; LIPPERT, R. B., KAIERLE, S. (Hrsg.) Konstruktion für die additive Fertigung 2018, S. 55-75, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, ISBN 978-3-662-59057-7
- Wohlert (2018) WOHLERS, T. T.: Wohlert Report: 3d printing and additive manufacturing state of the industry. Fort Collins: WOHLERS Associates, 2018

Eine Methodik zur Identifizierung der leichtbaugetriebenen Massenpotenziale für die frühe Konzeptphase

A methodology for identifying the lightweight-driven mass potentials for the early conceptual phase

Felix Laufer¹, Daniel Roth¹, Hansgeorg Binz¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart

felix.laufer@iktd.uni-stuttgart.de

daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

hansgeorg.binz@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Die Treiber zum Einsatz von Leichtbau sind vielfältig. Performancesteigerung, Reduzierung des Materialverbrauchs oder Senkung des Treibhausgasausstoßes sind einige Beispiele. Des Weiteren fordern Anwender, dass Leichtbauoptimierungen nicht um jeden Preis umgesetzt werden dürfen. Die Frage nach kosteneffizienten Lösungen steht somit häufig im Mittelpunkt des Optimierungsprozesses. Dem Beginn dieses Prozesses ist demnach die Ableitung von Leichtbaupotenzial unter Berücksichtigung aller relevanten Treiber vorzuschalten. Der vorliegende Beitrag stellt hierzu eine Methodik vor, welche auf Grundlage eines breiten Motivatorensatzes für Leichtbau Massenpotenziale ableitet. Hierbei werden nicht nur Möglichkeiten der Massenreduzierung untersucht, sondern auch Potenziale für eine Massenumverteilung abgeleitet. Eine finale Bilanzierung der Aufwände und Nutzen erlaubt dem Produktentwickler im Rahmen der Methodik eine gezielte Entscheidung für konkrete Leichtbaumaßnahmen sowie eine Priorisierung von Bauteilen im Optimierungsprozess.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Leichtbau, Massenverteilung, Produktarchitektur, DSM

Abstract (english): The drivers for performing lightweight design are manifold. Increasing performance, reducing material consumption or lowering greenhouse gas emissions are some examples. Moreover, users demand that lightweight design optimizations must not be implemented at any price. The question of cost-effective solutions poses therefore often the core challenge of the optimization process. Thus, the start of this process should be preceded by the derivation of lightweight design potential, taking into account all relevant drivers. The present paper presents a methodology for this purpose, which derives mass potentials based on a broad set of motivators for lightweight design. In this context, not only possibilities of mass reduction are investigated, but also potentials for mass redistribution are derived. A final balance of the efforts and benefits allows the product developer to make a targeted decision for lightweight design measures and to prioritize components in the optimization process.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Lightweight design, mass distribution, product architecture, DSM

1 Einleitung

Der Forschungsfokus im Leichtbau hat sich in den letzten Jahren in Richtung der frühen Produktentwicklungsphasen verschoben (Friedrich, 2017). Hier besitzt die Konzeptphase ein hohes Maß an Freiheit in der Gestaltung und erlaubt somit die leichtbaugerechte Entwicklung ganzer Produktkonzepte. Bei diesem Konzeptionierungsprozess wird häufig auf bestehenden Vorgängerprodukten aufgebaut, die mit Hilfe des Leichtbaus massengerecht optimiert werden. Dem Beginn dieser Optimierung geht meist eine Bewertung des Leichtbaupotenzials voran (Posner, 2016). Das Leichtbaupotenzial kann hierbei von zwei verschiedenen Sichtweisen aus betrachtet werden. Auf der einen Seite lässt sich bestimmen, an welchen Stellen eine Massenreduktion technologisch überhaupt durchführbar ist. Wenn bspw. ein Bauteil aus Stahl eine Substitution durch Aluminium erlaubt (vorhandener Bauraum, notwendige Zugfestigkeit etc.), besitzt dieses Bauteil technologisch gesehen Leichtbaupotenzial. Auf der anderen Seite kann die Bestimmung des Leichtbaupotenzials auf die strategischen Randbedingungen bzw. auf die Motivatoren für Leichtbau abzielen (Henning und Moeller, 2020). Ob nämlich ein Bauteil, welches aus Stahl besteht, aus Aluminium gefertigt werden *sollte*, ist eine Abwägung der Aufwand-Nutzen-Relation vorzuschalten (Friedrich, 2017). Der Aufwand ist in der Regel aus ökonomischer Sicht zu beurteilen und unternehmensintern meist durch eine Kostengröße abbildbar. Der Nutzen ist die Summe aller Verbesserungen bzgl. der Motivatoren, die der Einsatz von Leichtbau am Produkt bewirkt. Die Motivation „Performancesteigerung“ bei einer Werkzeugmaschine verweist im Leichtbaukontext bspw. auf die dynamischen Baugruppen wie die Spindel oder den Arbeitstisch. Werden diese massenreduziert, steigt die Performance der Maschine. Somit haben diese bewegten Baugruppen ein hohes Leichtbaupotenzial verglichen zu statischen Baugruppen wie dem Maschinenbett oder dem Gehäuse. Des Weiteren wird im konkreten Beispiel die Arbeitsleistung der Spindel nicht nur durch die *Größe* der Masse beeinflusst, sondern auch durch deren *Verteilung*. Diese Verteilung wirkt sich direkt auf das Massenträgheitsmoment aus, welches die Performance der Anfahr- und Abbremsvorgänge der Spindel beeinträchtigt.

2 Problemstellung, Zielsetzung und Struktur

Neben dem einleitenden Beispiel der Performancesteigerung existieren im Leichtbau eine Reihe von Motivatoren, um Masse zu reduzieren. Verschiedene Autoren weisen darauf hin, dass alle masserelevanten Faktoren sowie deren Abhängigkeiten transparent darzustellen sind, um Anwendungsbereiche für den Leichtbaueinsatz zu identifizieren (vgl. Henning und Moeller, 2020; Posner, 2016). Diese relevanten Faktoren werden zu Beginn eines Leichtbauprojekts durch alle Motivatoren für den Leichtbau abgebildet, die eingangs zu dem Bedarf für den Einsatz von Leichtbau geführt haben (Laufer et al., 2019b). Leichtbau wird dann als technologische Antwort auf diesen Bedarf gesehen, unabhängig, ob der Bedarf aus einem Kundenwunsch, einer gesetzlichen Regulierung oder einer technisch-physikalischen Schranke abgeleitet wird. Somit stellt die ganzheitliche Sammlung eines repräsentativen Motivatorensatzes den Ausgangspunkt jeder Leichtbauoptimierung und damit auch der Ableitung von Leichtbaupotenzial dar. Mehrere Autoren haben im Rahmen einer Methodenentwicklung zur Leichtbaupotenzialanalyse eine Erweiterung der zu berücksichtigenden Motivatoren vorgeschlagen (vgl. Posner, 2016; Albers et al. 2018), jedoch wird die Möglichkeit der Einbeziehung verschiedenster, projekt-individueller Motivatoren im Rahmen einer Methodik zur Potenzialanalyse bisher nicht geleistet.

Des Weiteren werden an den Leichtbau hohe Anforderungen bzgl. der Effizienz im Kontext der Kosten-Nutzen-Bilanz gestellt (Friedrich, 2017). In diesem Zusammenhang ist die Art der Erfüllung der unterschiedlichen Leichtbaumotivatoren von Bedeutung. So wird Leichtbau häufig nur aus Sicht einer *Reduzierung* von Masse betrachtet. Verschiedene Motivatoren für Leichtbau erlauben jedoch eine positive Beeinflussung durch eine *Umverteilung* von Masse im Produkt (Laufer et al., 2019a). So ist bspw. der Motivator für Leichtbau bei einem Sportwagen „Absenkung der Schwerpunktslage“ sowohl durch eine Massenreduzierung des Dachs als auch durch die Absenkung (Massenumverteilung) des

Motors zu erreichen. Diese Möglichkeiten, Leichtbaumotivatoren durch beide Operationen – Reduzierung und Umverteilung von Masse – zu befriedigen, verlangt demnach unter Effizienzgesichtspunkten eine umfassende Betrachtung des Gegenstands „Masse“.

Das Problem, welches diese Arbeit adressiert, ist zum einen der fehlende Fokus bestehender Leichtbaumethoden auf allen relevanten Motivatoren als Start des Optimierungsprozesses, sowie zum anderen die Ineffizienzen der Methoden durch die Betrachtung der Masse rein in Bezug auf ihre Größe. Im Speziellen liegt der Schwerpunkt auf der Potenzialfindung in der frühen Konzeptphase.

Das Ziel des Beitrags ist die Vorstellung einer Methodik zur Ableitung von leichtbaugetriebenen Massenpotenzialen. Während der „leichtbaugetriebene“ Charakter auf die Grundlagenbedeutung aller relevanten Leichtbaumotivatoren für die Analyse hinweist, zielt der Term „Massenpotenzial“ auf die analytische Behandlung der Größe *und* der Verteilung von Masse ab. Zur Erreichung dieses Ziels widmet sich die Arbeit der Beantwortung der folgenden Forschungsfrage: *Welche Schritte sollte eine Methodik zur leichtbaugetriebenen Analyse von Massenpotenzialen zu Beginn der Konzeptphase enthalten und wie sollten diese Schritte strukturiert sein?*

Die vorliegende Arbeit gliedert sich hierzu in die Darstellung des Stands der Technik (Kapitel 3), die Aufarbeitung bekannter Leichtbaumotivatoren (Kapitel 4), die Erarbeitung einer Methodik zur Identifizierung von Massenpotenzialen (Kapitel 5) sowie einer Diskussion inklusive erster Evaluationsergebnisse (Kapitel 6).

3 Stand der Forschung

Produktentwicklungsprozesse bzw. -methodiken für die Leichtbau-Produktentwicklung orientieren sich häufig am allgemeinen Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 (u. a. Klein, 2013; Posner, 2016; Henning und Moeller, 2020). Ausnahmen zu diesen Methodiken bilden an die Leichtbauanforderungen angepasste Prozesse. Hier beschreibt Friedrich (2017) ein Vorgehen mit zwei parallelen Strängen, welches auf der einen Seite die Betrachtung des Gesamtsystems vornimmt sowie auf der anderen Seite die Betrachtung des Bauteils im Leichtbaukontext forciert. Entlang dieser Stränge wird Leichtbau (von früher bis später Entwicklungsphase) vom strategischen (Zielfindung) über den taktischen (Planungsphase) bis hin zum operativen Leichtbau (Konzeptionierung, Entwurf) untergliedert. Die Autoren Kaspar und Vielhaber (2017) orientieren den Leichtbauentwicklungsprozess an der VDI 2206 zur Entwicklung mechatronischer Produkte. Im vorgestellten W-Modell werden auf System-, Subsystem- sowie Komponentenebene verschiedenste Leichtbaustrategien berücksichtigt als auch Verbindungs-technologien in den Gestaltungsprozess mit einbezogen.

Als zentrale Aufgabe des Beginns dieser Leichtbau-Entwicklungsmethodiken steht meist die Analyse des Leichtbaupotenzials (vgl. Posner, 2016; Friedrich, 2017; Henning und Moeller, 2020). Dieser Methodikbaustein der Potenzialanalyse ist Gegenstand diverser Methodenentwicklungen der letzten Jahre. Alonso et al. (2012) präsentieren eine analytische Methode zur Ableitung von Leichtbaupotenzial bezogen auf sekundäre Masseneinsparungen. Der Ansatz fokussiert sich auf die Fortpflanzung von Masseneffekten (bspw. Verkleinerung des Antriebsstrangs auf Grund von Leichtbau am Fahrzeugchassis) auf Komponentenebene und erlaubt keine Miteinbeziehung anderer Kriterien.

Cheah und Heywood (2011) verwenden die Szenario-Technik, um den Einfluss verschiedener Leichtbaustrategien auf den Verbrauch von Automobilen zu beurteilen. Durch Normalisierung der Verbräuche von Verbrenner- und Hybridautos werden Aussagen über die Erreichbarkeit von gesetzlich vorgeschriebenen Verbrauchsdaten getroffen. Lewis et al. (2014) erweitern das Modell durch das Hinzuziehen von Treibhausgasemissionen. Die in einer Design-Harmonisierungs-Methode zusammengefassten Kriterien erlauben den Vergleich von Standard- und Leichtbaufahrzeugkonzepten. In beiden Potenzialanalysen werden die Kriterien einzeln behandelt, und gegenseitige Einflüsse bleiben unberücksichtigt.

Ein Abstraktionslevel, das die Einbeziehung mehrerer Kriterien erlaubt, ist das der Energie. Laufer et al. (2018) erfassen mit kinetischer und potenzieller Energie Performance und Schwerpunktslage. Der

Ansatz verhindert durch das Abstraktionslevel Energie den Einbezug von Kriterien wie bspw. „Herstellkosten“ oder „Verschleißreduzierung“.

Eine letzte Gruppe an Leichtbaupotenzialmethoden bedient sich der Funktionen, um Kundenanforderungen als Kriterien in die Analyse zu integrieren (Posner et al., 2016). Albers et al. (2018) erweitern die Analyse durch Miteinbeziehung der Herstellkosten sowie des CO₂-Fußabdrucks. Der gegenseitige Einfluss der Kriterien bleibt durch die Bildung eines leichtbauspezifischen Funktionsaufwands unberücksichtigt.

Während die Analyse von Potenzialen zur Massenreduzierung im Leichtbaukontext einen hohen Stellenwert in der Forschung einnimmt, sind die Potenziale zur Massenumverteilung wenig untersucht und die Analyse bisher nicht durch einen präskriptiven Ansatz unterstützt (Posner, 2016). Nichtsdestoweniger besitzt das Thema der Verteilung von Masse einen hohen Stellenwert im Kontext von Leichtbaukonstruktionen. Im Flugzeugdesign spielt die Verteilung von Masse bzgl. des *Schwerpunkts* eine zentrale Rolle. Dieser muss sich in einem fest definierten Bereich befinden, um die Flugstabilität des Flugzeugs zu garantieren. Hierzu werden an die verschiedenen Konstruktionsabteilungen (Kabine, Flügel, etc.) feste Massenrichtwerte vergeben, die sich an den Vorgängerprodukten orientieren und akkurat eingehalten werden müssen. Die Positionierung (Verteilung) der einzelnen Komponentenmassen wird auf dieser Basis im Konzeptentwurf für einen optimalen Schwerpunkt vorgenommen. (Scholz, 2012)

Bei der Konstruktion von Robotern liegt der Fokus bei der Massenverteilung auch auf der Reduzierung des *Trägheitsmoments* von bspw. rotierenden Roboterarmen. Die Bewegungsvorgänge dieser Komponenten hängen in ihren Beschleunigungscharakteristiken maßgeblich von der Verteilung der Masse ab (Posner, 2016). So demonstrieren Borchert et al. (2015), wie durch zweckmäßige Positionierung von relativ massereichen Motoren und die einhergehende Absenkung des Massenträgheitsmoments die Performance eines Delta-Roboters gesteigert werden kann.

In der Medizintechnik hat das Design von Prothesen mehrere Leichtbaubezüge. Ein geringes Gewicht ist neben der Verteilung von Masse ausschlaggebend für die Gang-Effizienz bei bspw. Beinprothesen (Lehmann et al., 1998). Des Weiteren wird der Tragekomfort durch einen hohen Grad an *Kompaktheit* begünstigt (Ahn et al., 2017). Die Erhöhung der Kompaktheit, respektive die Reduzierung des Bauraums, kann ebenfalls positiv durch zweckmäßige Massenumverteilung beeinflusst werden. Bild 1 illustriert die diskutierten Möglichkeiten der Massenumverteilung in Produkten an einem schematischen, dreiteiligen Produkt.

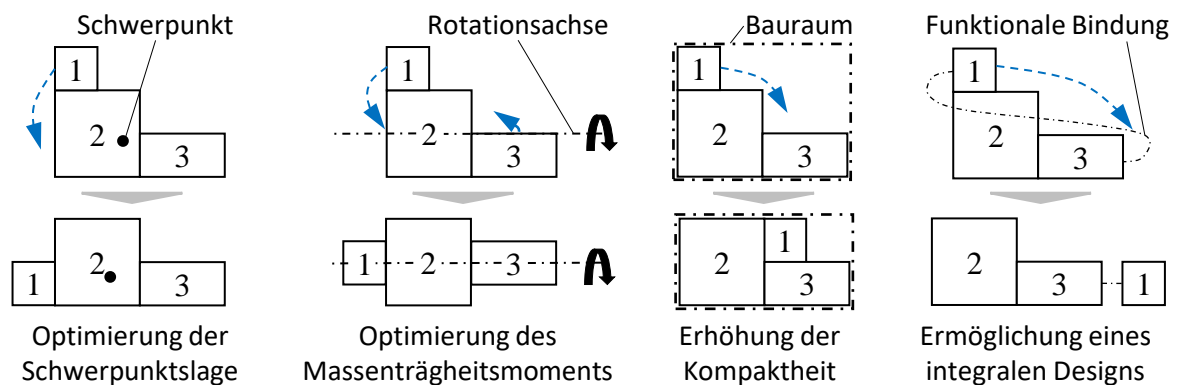


Bild 1: Massenumverteilungen auf Basis verschiedener Leichtbaumotivatoren (i. A. a. Laufer et al., 2019a)

Schließlich erlaubt eine Umverteilung von Masse die Forcierung eines *integralen Designs*. Sind zwei Komponenten mit hoher funktionaler Bindung im Produkt räumlich voneinander getrennt, ermöglicht eine Massenumverteilung (Repositionierung der Komponenten) eine räumliche Annäherung. „Integral“ ist in diesem Zusammenhang als „Zusammenführung“ der entsprechenden funktional abhängigen Komponenten zu verstehen (vgl. Pimpler und Eppinger, 1994). Dies bewirkt in der Regel eine Verkürzung der Bindungen (bspw. Kraftpfade), was einem Leichtbauprinzip nach Klein (2013)

entspricht. Pimmler und Eppinger (1994) demonstrieren in diesem Kontext die positionelle Restrukturierung eines Klimakontrollsystems für ein Automobil mit Hilfe der Design Structure Matrix.

4 Warum Leichtbau? – Die Leichtbaumotivatoren

In der Planungsphase des Produktentwicklungsprozesses stellt die exakte Sammlung der Kundenanforderungen eine der wichtigsten Aufgaben dar (Ponn und Lindemann, 2011). Die Anforderungen bestimmen in der Folge die Produktfunktionen und stellen darüber hinaus entwicklungsbegleitend eine entscheidende Orientierung für den Produktentwickler bei der Konzeptionierung dar. Im Value Engineering werden Funktionen anhand der Kundenanforderungen entsprechenden Kosten zugeordnet, um der Frage gerecht zu werden, was der Kunde bereit ist, für die jeweiligen Funktionen und somit letztlich für das gesamte Produkt zu bezahlen (VDI 2800, 2010). Diese Korrelation von Funktionen zu Kosten ist dahingehend zweckmäßig, da Kosten eine für den Kunden direkte Bezugsgröße darstellen. Beim Kauf des Produkts – die physisch gewordene Summe aller Funktionen – bezahlt er mit eigenem Geld. Der Übertrag dieses Verfahrens auf die Größe der Masse anstelle der Kosten wurde von einigen Autoren vorgeschlagen und in Analysemethoden zur Ableitung von Leichtbaupotenzial umgesetzt (vgl. Posner, 2016; Albers et al., 2018). Dieser Übertrag der Funktionsbeziehungen bringt jedoch Schwierigkeiten mit sich. Masse besitzt für den Kunden manchmal einen ähnlich direkten Bezug wie Kosten, häufig aber auch nicht. So ist die Masse bei einem handgeführten Produkt wie einer Heckenschere direkt für den Kunden wahrnehmbar. Leichtbau wird hier aus Gesichtspunkten der Ergonomie meist als positiv aufgefasst. Die Kundenanforderung „angenehmes Handling“ ist somit direkt mit einem subjektiven Maximalwert an Masse verbunden, den der Kunde bereit ist, in der Hand zu halten, oder anders formuliert: Der Kunde wünscht bzw. fordert ein relativ leichtes Produkt.

Die Situation stellt sich bei einem Auto anders dar. Die bspw. vom Kunden geforderte „hohe Beschleunigungsdynamik“ bei einem Sportwagen ist für ihn nicht notwendigerweise mit einer geringeren Masse assoziiert. Neben einer Massenreduzierung kann ein leistungsstärkerer Motor diese Charakteristik ebenfalls positiv beeinflussen. Des Weiteren sind für die Kundenanforderung „agile Kurvenfahrt“ insbesondere ein niedriger Schwerpunkt von Vorteil – auch dieser Punkt, die Verteilung von Masse bzgl. der vertikalen Achse, ist nicht zwangsläufig Teil der Anforderungsliste. Diese Beispiele zeigen, dass Kundenanforderungen vom Produktentwickler möglicherweise in technische Sachverhalte bzgl. der Masse übersetzt werden müssen. Diese Sachverhalte stellen dann eine *Motivation* für, um bei dem Sportwagenbeispiel zu bleiben, einen leistungsstärkeren Motor oder eben Leichtbau dar. Ebenso können auch Rahmenbedingungen des Gesetzgebers für bspw. den vorgeschriebenen Ausstoß an Treibhausgasen für die Flotte eines Autoherstellers den Anstoß für Leichtbau geben. Leichtbau wird in diesem Szenario nicht direkt vom Gesetzgeber gefordert, sondern der Produktentwickler übersetzt die neuen Anforderungen hinsichtlich Schadstoffausstoß in eine Motivation, Leichtbau einzusetzen.

Es ist festzuhalten, dass der Einsatz von Leichtbau durch viele verschiedene Gründe angestoßen werden kann. Diese Gründe lassen sich in Leichtbaumotivatoren übersetzen, mit denen der Produktentwickler verschiedenste Randbedingungen und Anforderungen durch Leichtbau zu befriedigen versucht. Eine Übersicht über verschiedenste Motivatoren, die aus einer Literaturrecherche entstanden ist (vgl. Laufer et al., 2019b), ist in Tabelle 1 gelistet. Eine Kategorisierung teilt die Sammlung, entsprechend des Life Cycle Engineerings (Hottle et al., 2017), in ökonomische, ökologische sowie technische Motivatoren ein. Die orangenen Hervorhebungen in den ersten vier Spalten deuten die Möglichkeit einer positiven Beeinflussung der Motivatoren durch eine Massenumverteilung an (vgl. Bild 1). Häufig sind in Leichtbauprojekten mehrere Motivatoren der gezeigten Auflistung gleichzeitig relevant. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass eine Recherche nie Anspruch auf Ganzheitlichkeit besitzt. Die Sammlung ist somit nicht als final vollständig anzusehen und entsprechend erweiterbar. Nichtsdestotrotz stellen die gesammelten Leichtbaumotivatoren eine Basis für den Produktentwickler bezogen auf den Start der Leichtbauoptimierung dar.

Tabelle 1: Übersicht der Leichtbaumotivatoren (i. A. a. Laufer et al., 2019b)

		Motivation: Leichtbau wird eingesetzt, um folgende Ziele zu erreichen:	Quellen
Kategorie	Technisch	Optimierung der strukturellen Eigenschaften (bspw. Verkürzung der Kraftpfade)	(Klein, 2013)
		Optimierung der Schwerpunktslage	(Laufer et al., 2018)
		Optimierung des Massenträgheitsmoments	(Trzesniowski, 2014)
		Reduzierung des Bauraums/Erhöhung der Kompaktheit	(Ahn et al., 2017)
		Verbesserung des Handlings (Ergonomie)	(Ahn et al., 2017)
		Verbesserung der Performance	(Trzesniowski, 2014)
	Ökologisch	Reduzierung der Treibhausgase (Nutzung)	(Hottle et al., 2017)
		Reduzierung der Treibhausgase (gesamter Lebenszyklus)	(Albers et al., 2018)
		Reduzierung des Energieverbrauchs (Nutzung)	(Kaspar und Vielhaber, 2017)
		Reduzierung des Energieverbrauchs (gesamter Lebenszyklus)	(Delogu et al., 2018)
	Ökonomisch	Reduzierung des Verschleißes	(Hottle et al., 2017)
		Erhöhung der sekundären Masseneinsparungen (bspw. Antriebsstrang)	(Alonso et al., 2012)
		Reduzierung des Materialverbrauchs	(Kaspar und Vielhaber, 2017)
		Reduzierung der Logistikkosten	(Posner, 2016)
		Reduzierung der Lebenszykluskosten	(Delogu et al., 2018)
		Reduzierung der Herstellkosten	(Hottle et al., 2017)

5 Methodik zur Identifizierung der leichtbaugetriebenen Massenpotenziale

Aufbauend auf der Problemstellung, dem Stand der Forschung sowie den Erläuterungen zu den Leichtbaumotivatoren, wird in diesem Kapitel die Methodik zum Ableiten leichtbaugetriebener Massenpotenziale vorgestellt. Eine Auswahl der für ein spezifisches Leichtbauprojekt relevanten Motivatoren aus Tabelle 1 stellt den ersten Methodikbaustein dar. Dieser ist auf Grund der Wichtigkeit und des Grundlagencharakters – nicht nur für die Ableitung des Leichtbaupotenzials, sondern auch für den Fokus der Leichtbauentwicklung als Ganzes – vorangestellt behandelt worden.

Weiterführend ist festzuhalten, dass Leichtbau im Produktentwicklungskontext meist als Optimierungsverfahren eingesetzt wird (Henning und Moeller, 2020). Dies bedeutet, dass von einem bestehenden Produkt-Istzustand ausgegangen wird, um bzgl. der Massenanforderungen einen Sollzustand zu erreichen. Somit kann im Rahmen der Produktgenerationentwicklung (Albers et al., 2018) auf Produktdaten der Vorgängergeneration (G_n) zurückgegriffen werden, die, neben den Leichtbaumotivatoren für die neue Generation (G_{n+1}), zu Beginn in die Analyse (Daten über Masse, Geometrie, etc.) mit in diese einfließen (Ponn und Lindemann, 2011; Posner, 2016; Albers et al., 2018). Der auf die Sammlung der Motivatoren und der Vorgängerproduktdaten folgende Baustein der Methodik ist zweigliedrig. Er basiert auf der in der Einleitung beschriebenen Beobachtung, dass eine bestimmte Anzahl der in Tabelle 1 vorgestellten Leichtbaumotivatoren nicht nur durch eine Massenreduzierung, sondern durch eine Massenverteilung positiv beeinflussbar sind (Laufer et al., 2019a). Diese wurden im Stand der Forschung in Kapitel 3 vorgestellt (vgl. Bild 1). Somit hat eine Methodik bezogen auf diese Motivatoren beide Massenpotenziale – die der Reduzierung und die der Umverteilung – zu untersuchen. Bei der Anordnung dieser beiden Operationen innerhalb der Struktur der Methodik ist in der Folge eine Unterscheidung zu treffen. Bezogen auf den Gegenstand Masse, selbst Eigenschaft eines physischen Artefakts, beziehen sich diese Operationen auf zwei voneinander *unabhängige* physikalische Merkmale – die Größe und den Ort. Die Abhängigkeit wird nur in Bezug auf die Erfüllung einzelner Motivatoren hergestellt, bei derer sie sich dann gegenseitig beeinflussen. Aus diesem Grund wird innerhalb des methodischen Vorgehens jeweils das Potenzial zur Reduzierung von Masse getrennt von dem Potenzial zur Umverteilungen von Masse analysiert, was zu einer Parallelisierung der Methodikbausteine führt. Ein notwendiger Vergleich der beiden bauteilbezogenen Potenzialgrößen wird nachgeschaltet und ermöglicht eine Abwägung und Synthese beider Operationen innerhalb der Konzeptionierung der neuen Produktgeneration. Die gleichzeitige Berücksichtigung der motivatorengelassenen gegenseitigen Beeinflussung ist hierbei zu beachten. Bild 2 zeigt das fünfgliedrige Vorgehen der Methodik.

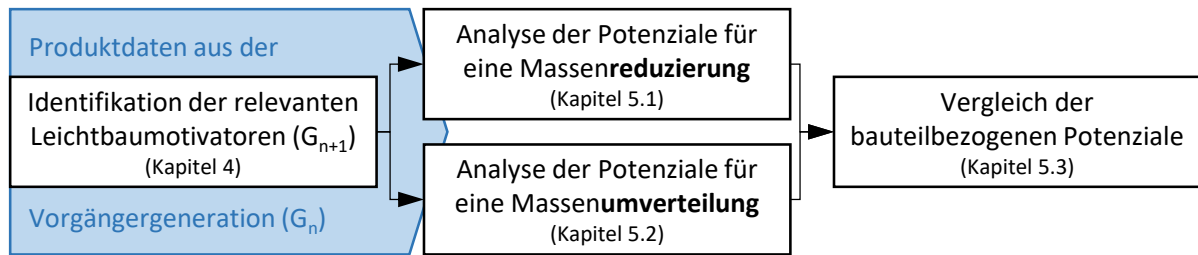


Bild 2: Fünfgliedriges Vorgehen zur Ableitung leichtbaugetriebener Massenpotenziale

Im Weiteren werden in den folgenden Unterkapiteln die einzelnen Bausteine kurz vorgestellt und erläutert.

5.1 Analyse der Potenziale für eine Massenreduzierung

Eine Analyse von Potenzialen für eine Massenreduzierung bedarf der Möglichkeit zur Einbeziehung und des Vergleichs aller für ein Projekt relevanten Motivatoren, wie sie in Tabelle 1 gelistet sind. Die im Stand der Forschung präsentierten präskriptiven Ansätze erlauben diesen Vergleich auf einem Niveau nicht. Der von den Autoren präsentierte Ansatz bedient sich dem Abstraktionslevel des „Erfüllungsgrads“ und ist der Kosten-Nutzwert-Analyse entlehnt (Laufer et al., 2020b). Das konkrete fünfstufige Vorgehen ist in Bild 3 illustriert.

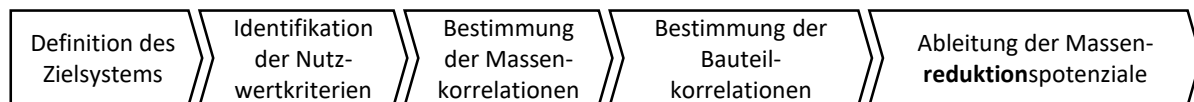


Bild 3: Fünf Stufen der Ableitung von Massenreduktionspotenzial (i. A.a. Laufer et al., 2020b)

Im ersten Schritt werden *alle* relevanten Motivatoren ausgewählt und gegeneinander gewichtet. Des Weiteren wird die Granularität der Systemzerlegung (Baugruppe, Komponente, etc.) festgelegt und durch eine ABC-Analyse die masserelevanten Elemente dieser Zerlegung identifiziert. Zusätzlich wird das Massenreduktionsziel festgelegt.

Darauf folgend werden in Schritt 2 die ausgewählten Motivatoren in messbare Nutzwertkriterien übersetzt. So ist der Motivator „Reduzierung des Energieverbrauchs (Nutzung)“ bspw. durch die in *Watt* messbare *Nutzungsenergie* abbildbar. Analog sind die „Reduzierung der Treibhausgase“ bspw. durch das Treibhauspotenzial in *kg CO₂-Äquivalent* messbar. Jedes Messkriterium ist jedoch projektindividuell abzuleiten und anzupassen.

Entsprechend der ausgewählten Nutzwertkriterien werden im dritten Schritt die entsprechenden Korrelationen zu der Größe Masse gebildet. Hierbei ist entscheidend, dass ein formelmäßiger, tabellarischer oder empirischer Zusammenhang zwischen Masse und dem Nutzwertkriterium abgeleitet wird. So ist bspw. der Nutzungsenergieverbrauch von bewegten Baugruppen in der Regel kausal an die Höhe der Masse gebunden. Eine Massenreduzierung kann hier formelmäßig zur Reduzierung der Nutzungsenergie in Bezug gesetzt werden.

Im vierten Schritt werden bzgl. der gewählten Massenkorrelationen die Bauteile identifiziert, die von dieser Korrelation beeinflusst sind. Bezogen auf das Beispiel der Nutzungsenergieverbrauchsreduktion sind bspw. bei einer Werkzeugmaschine der bewegte Maschinentisch und die Spindel relevante Elemente. Der Energieverbrauch des Kontrollpults der Maschine ist hier nicht durch eine Massenreduktion beeinflussbar und wird somit nicht beachtet. Final werden die Nutzwertkriterien durch die Einführung eines dimensionslosen „Erfüllungsgrads“ (0 bis 6 Punkte) auf ein Abstraktionsniveau gehoben, um sie mit anderen Kriterien vergleichbar und verrechenbar zu machen. Für jedes Nutzwertkriterium wird ein Best-Case-Szenario festgelegt, welches mit der Höchstpunktzahl von 6 Punkten besetzt wird. Am Beispiel der Werkzeugmaschine würde dann die Spindel bei einer zuvor festgelegten Massenreduktion bspw. 5 kW weniger Nutzungsenergie verbrauchen. Wenn,

bezogen auf dieses Kriterium, das Best-Case-Szenario vorher auf 10 kW beziffert wurde (\cong 6 Punkte), erhält die Spindel 3 Punkte. Mit den anderen Nutzungsenergieverbrauchern sowie mit allen anderen Nutzwertkriterien wird analog verfahren und entsprechende Punkte verteilt.

Im letzten Schritt erlaubt nun eine Aufsummierung dieser dimensionslosen Punkte über alle relevanten Nutzwertkriterien die Bildung einer Gesamtpunktzahl (inklusive Gewichtung), die dem Gesamtnutzwert jeder Baugruppe entspricht. Durch die initiale Miteinbeziehung der Massenreduktion auf die Kriterienerfüllung entspricht dieser kumulierte Nutzwert dem *Massenreduktionspotenzial*.

5.2 Analyse der Potenziale für eine Massenumverteilung

Masse ist immer an physische Objekte bzw. Produktkomponenten gebunden. Somit impliziert eine Analyse von Massenumverteilungspotenzialen (Anordnung von Masse) immer auch eine Analyse der Produktstruktur. Werden Komponenten als Folge der Analyse im Produkt umverteilt, wird häufig eine neue Produktstruktur bzw. Produktarchitektur (PA) synthetisiert. Diese Erkenntnis erlaubt eine Übertragung von PA-Methoden auf die Analyse von Massenumverteilungen. Als Ergebnis dieses Übertrags erweist sich die Design Structure Matrix (DSM) als zweckmäßiges Methodenwerkzeug. (Laufer et al., 2019a)

Die Autoren präsentieren eine Möglichkeit, die verschiedenen, durch Massenverteilung positiv beeinflussbaren Leichtbaumotivatoren (siehe Bild 1) als Interaktionen bzw. Abhängigkeiten in der DSM zu interpretieren (Laufer et al., 2020a). Dementsprechend ist der hier vorgestellte Methodikbaustein nur einzusetzen, wenn eine oder mehrere dieser vier Motivatoren für das Projekt Relevanz besitzen. Das resultierende fünfstufige Ablaufschema ist in Bild 4 dargestellt.

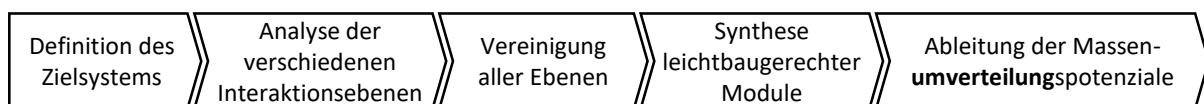


Bild 4: Fünf Stufen der Ableitung von Massenumverteilungspotenzial

Im ersten Schritt wird das Vorgehen der Systemzerlegung von der Massenreduktionsanalyse übernommen bzw. analog durchgeführt.

Die anschließende Analyse der verschiedenen Interaktionsebenen der zerlegten Systemelemente bildet den nächsten Schritt. Hierzu werden drei eigenständige symmetrische Matrizen mit den gleichen Bauteilen aufgestellt. Die erste DSM (*integrales Design*) bildet im klassischen Vorgehen die funktionalen Verbindungen (Stoff-, Energie- und Signalaustausch) zwischen den Bauteilen ab. Dies geschieht durch einen Matrixeintrag in der korrespondierenden Zelle zweier Elemente. Dieser Eintrag wird nach Leichtbaurelevanz von 0 bis 4 Punkten (angelehnt an VDI 2225, Blatt 3) gewichtet. Beispielsweise hat der Energiefluss einer Welle eine höhere Gewichtung als ein elektrisches Kabel (vgl. Bild 5).

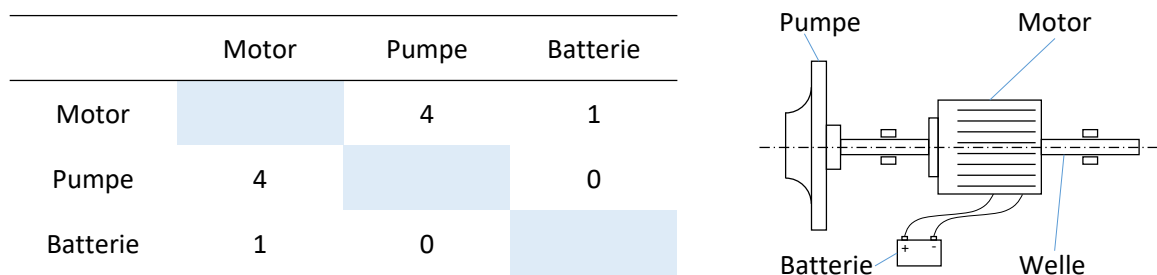


Bild 5: Gewichtete Leichtbau-DSM eines beispielhaften Motor-Pumpen-Aufbaus

In der nächsten Betrachtungsebene (*Kompaktheit*) mit entsprechender DSM ist die Interaktion zweier Elemente durch die Möglichkeit des „Einbettens“ ineinander definiert. Ein Beispiel hierfür ist das Einbetten bzw. Einlegen eines Tanks in eine freie Stelle in einem Gehäuseelement. Zu unterscheiden ist hierbei, dass Einbetten nicht Integrieren in irgendeiner Art bedeutet, sondern lediglich ein „räumliches Ineinandersetzen“. Anhand der einbettbaren Bauteilgrößen ist hier ebenfalls eine

Gewichtung (0 – 4 Punkte) im Leichtbaukontext zu treffen. So würde im Kontext eines Autos ein 80 Liter Benzintank eine höhere Bepunktung als die in den Ausmaßen kleinere Autobatterie erhalten.

Die letzte Betrachtungsebene interpretiert eine physikalische Grundlage. Beide Motivatoren (*Schwerpunkt* und *Trägheitsmoment*) zeichnen sich durch Massenanhäufungen bezogen auf verschiedene Produktachsen aus. Für die Bestrebung eines tief liegenden Schwerpunkts mag das im Falle eines Autos bspw. die Gravitationsachse sein, im Falle eines angestrebten niedrigen Trägheitsmoments die Rotationsachse einer Werkzeugmaschinen spindle. Diese „Areale mit hoher Masse“ können in der DSM nicht analog als „Interaktionen“ interpretiert werden. Aus diesem Grund werden entsprechend dem vierstufigen Punktesystem die Absolutmassen der betrachteten Bauteile bewertet (1 für kleine, 4 für sehr große Massen). In eine korrespondierende Matrixzelle wird dann der Mittelwert der Punkte eingetragen. Somit kann die Bildung massereicher Module forciert werden.

Das Ziel des dritten Schritts ist die Vereinigung der motivatorengetriebenen verschiedenen Sichtweisen auf das Produkt (*integrales Design/Kompaktheit/massereiche Module*). Es werden die „Produktsichten“ gegeneinander gewichtet und im Anschluss eine alle Sichten vereinende DSM erzeugt. Hierzu ist in jeder DSM-Zelle die Summe aus den Einzel-DSM-Zellen unter Berücksichtigung der Gewichtungen zu errechnen.

Im vierten Methodenschritt erfolgt die algorithmenbasierte Clusterung der zusammengesetzten „Einheits-DSM“, um sogenannte leichtbaugerechte Module zu erzeugen. Hierzu kann entweder eine numerische DSM verwendet werden oder alle Zellenwerte sind durch einen Schwellwert zu filtern, der eine binäre DSM (bestehend aus den Werten 0 oder 1) erzeugt, welche ebenfalls modularisierbar ist.

Die erfolgte Modularisierung erlaubt im letzten Schritt eine Identifizierung der *Massenumverteilungspotenziale*. Durch den Vergleich der Produktmodule des Ausgangsprodukts mit den leichtbaugerechten Modulen aus der DSM-Synthese sind Bauteile bestimmbar, die durch eine Repositionierung das Produkt hinsichtlich der Leichtbaumotivatoren verbessern. Der hierbei entstehende *Nutzen* durch die Massenumverteilung ist dahingehend quantifizierbar, dass eine Abschätzung der optimierten *funktionalen Bindung* in bspw. eingesparter Masse [kg], des *reduzierten Bauraums* in bspw. Volumen [m³], der optimierten *Lage des Schwerpunktes* in bspw. Metern [m] sowie des optimierten *Trägheitsmoments* [kgm²] von Produktexperten vorgenommen werden kann. Analog zu Schritt 4 und 5 der Massenreduktionsanalyse sind in der Folge durch den dimensionslosen Erfüllungsgrad diese vier Motivatoren zu einem bauteilbezogenen Nutzwert für eine mögliche Umverteilung zu verrechnen. Auf Grund des abschätzenden Charakters der einzelnen Verbesserung bzgl. der Motivatoren ist dieser Nutzwert i. d. R. mit einer größeren Unsicherheit behaftet als der Nutzwert der Massenreduktionsanalyse.

5.3 Vergleich der bauteilbezogenen Potenziale

Der Vergleich der Massenpotenziale mittels Reduzierung und Umverteilung setzt aus ökonomischer Sicht eine Gegenüberstellung des Aufwands für die Produktentwicklung voraus. Die Aufwandsbetrachtungen unterscheiden sich hierbei grundlegend.

Der Aufwand einer Massenreduzierung ist in der Regel an das entsprechende Bauteil gebunden und beeinflusst zusätzlich die räumliche Peripherie (bspw. Krafteinleitung) des selbigen (Klein, 2013). Somit sind konkret Leichtbaukonzepte zu entwerfen, die verschiedene Leichtbaumaßnahmen wie bspw. Topologieoptimierung oder Materialsubstitution enthalten (Henning und Moeller, 2020). Anhand der dabei aufkommenden Material-, Fertigungs- und Entwicklungskosten ist der Aufwand meist durch eine kumulierte Kostengröße abbildbar.

Hinsichtlich der Aufwandsabschätzung einer Massenumverteilung ist die Betrachtung makroskopischer und mitunter komplexer. Im Kontext dieser Arbeit ist mit Umverteilung von Komponentenmasse zunächst die reine Ortsänderung eines Bauteils gemeint. Bei diesem Umpositionierungsvorgang bleibt die Funktion sowie das Wirkprinzip gleich, auch wenn der Konzeptleichtbau hier Methoden zur leichtbaugerechten Anpassung bereitstellt (vgl. Posner, 2016). Kleinere oder größere Gestaltänderungen sind spezifisch und produktabhängig vorzunehmen. Weitaus entscheidender als die Änderungen am Bauteil selbst ist die Fortpflanzung dieser Änderungen an

einem Bauteil auf die Änderungen anderer Bauteile. Je nach Verflechtung des umpositionierten Bauteils in der Produktstruktur, kann sich eine Änderung mehr oder minder stark auf andere Bauteile auswirken, was dann zu einem komplexen *Netzwerk von Änderungen* führen kann (Eckert et al., 2001). So kann die Repositionierung eines Motors (Front-, Mittel-, Heckmotor) neben den Motorkomponenten den gesamten Antriebsstrang bis hin zu den Reifen beeinflussen. Die Umverteilung eines Transistors auf einer Platine geht unter Umständen nur mit zwei neuen Lötstellen einher. In diesem Zusammenhang unterscheiden Eckert et al. (2001) Produktelemente in drei Kategorien: „Absorber“ sind Bauteile, die mehr Änderungen absorbieren, als sie selbst verursachen (Komplexitätsreduzierend); „Carrier“ nehmen ähnlich viele Änderungen auf, wie sie selbst entstehen lassen (Komplexität wird beibehalten); sowie „Multipliiert“, die die Komplexität des Konstruierens erhöhen, indem sie mehr Änderungen an anderen Bauteilen generieren als sie selbst erfahren. Ein hierauf basierender Ansatz von Clarkson et al. (2001) erlaubt eine semiquantitative Abschätzung des Änderungsrisikos durch die Berechnung des Produkts von Änderungswahrscheinlichkeit (Likelihood) und Neukonstruktionsaufwand (Impact).

Da die Auftragung der gegenseitigen Beeinflussung von Änderungen auf einem bauteilweisen Vergleich beruht, ist es möglich, dieses Risiko als zusätzliche Information in die funktionsbasierte DSM aus Schritt 5.2 einzutragen. Nach Clarkson et al. (2001) sind die Entwicklungs- und Fertigungskosten in der Regel kausal mit dem Änderungsrisiko verknüpft. Somit erlaubt die Ableitung dieses Risikos auch eine qualitative Abschätzung des monetären Aufwands einer Massenumverteilung.

Werden diese beiden Abschätzungen über den Aufwand einer Massenreduzierung und Massenumverteilung gegenübergestellt, werden beide Operationen vergleichbar gemacht. Hierbei ist auf zwei Charakteristiken hinzuweisen. Erstens ist die Aufwandsabschätzungen in beiden Fällen stark vom Reifegrad des Leichtbaukonzepts abhängig und häufig sind belastbare Daten erst in späteren Reifephase ableitbar. Zweitens ist die Abschätzung des Kostenrisikos bei der Umverteilung von Masse auf Grund des häufig komplexeren systemischen Änderungsaufwands mit einer größeren Unsicherheit verbunden als die in vielen Fällen an ein Bauteil (und direkte Peripherie) gebundene Reduzierung der Masse. Final ist die Entscheidung für eine reine Reduzierung, eine reine Umverteilung von Masse oder eine Kombination beider Operationen sowohl von der zu erreichenden Zielmasse bzw. von der Verbesserung der Motivatoren abhängig zu machen. Iterationsschleifen sowie ständige Expertenabschätzungen der Umsetzbarkeit neuer Leichtbaukonzepte sind hierbei notwendig und zweckmäßig.

6 Erste Evaluationsergebnisse und Diskussion

Beide Einzelmethoden sowie das Motivatorensset (Kapitel 4, 5.1 und 5.2) konnten im Rahmen erster Evaluationsrunden mit Konstruktionsexperten (jeweils drei Konstrukteure und ein Gruppenleiter) in zwei verschiedenen Unternehmen aus dem Mittelstand vorgestellt und an Produkten der Unternehmen durchgeführt werden. Durchgängig wurde hierbei das vorgestellte Motivatorensset positiv hinsichtlich der Ausführlichkeit bewertet, sodass neben bestehenden Motivatoren für Leichtbau weitere relevante Aspekte für die Unternehmen aus der Sammlung entnommen wurden konnten.

Die Analyse für Potenziale der Massenreduktion wurde als objektiv und reproduzierbar eingestuft, was insbesondere mit der individuellen Anpassung der messbaren Nutzwertkriterien an die relevanten Motivatoren begründet wurde. Weiterführend sind die monetäre Aufwandsabschätzung der Leichtbaumaßnahmen als durchführbar bewertet worden. Hier wurde insbesondere der prozessbegleitende Charakter der Kostendetailierung und die daraus folgende Verfeinerung der Kosten-Nutzen-Bilanz als gewinnbringend wahrgenommen. Als weiterführende Maßnahme ist die Anwendung einer Sensitivitätsanalyse auf den tatsächlichen Einfluss der einzelnen Kriterien als Verbesserungsvorschlag eingebracht worden. Durch die Entlehnung der Methode aus der bekannten Kosten-Nutzen-Analyse wurde der Umgang mit dem methodischen Prozess als unproblematisch wahrgenommen.

Bezugnehmend auf die Massenumverteilungsanalyse wurde die abstrahierte Sicht auf das Produkt hinsichtlich der Produktanalyse als positiv gewertet. Der Nutzen, komplex vernetzte Bauteile zusätzlich

– neben den funktionalen Bindungen – hinsichtlich Kompaktheit, Schwerpunkt und Trägheitsmoment leichtbaugerecht zu optimieren, wurde als effektive Synthesemaßnahme eingestuft. Ein Nachteil sahen die Anwender in den mehrfachen Selektionsschritten (Leichtbaurelevanz von 0 – 4, Motivatorengewichtung, Schwellwertbildung), da sich hier Ungenauigkeiten, Annahmen sowie Fehleinschätzungen potenzieren können. Die Verwendung einer numerischen DSM (ohne Schwellwert) sowie Messwerte für die Leichtbauskalen (0 – 4) sind an dieser Stelle als Abhilfemaße genannt worden. Ein weiteres Problem wurde in auftretenden Zielkonflikten einer Massenverteilung mit anderen Randbedingungen genannt. So sind von Seite der Konstrukteure insbesondere Service- und Montagevorgänge als limitierend für eine Umverteilung von Komponenten genannt worden. Um hier Zielkonflikte frühzeitig zu identifizieren, ist es möglich, neben den leichtbaugerechten Treibern für Module eine Abwägung mit anderen Modultreibern durchzuführen, wie sie bspw. von Ericsson & Erixon (1999) vorgestellt werden. Final besteht durch die Hinzunahme von Energiebilanzen eine Verfeinerungsmöglichkeit, modulinterne Bauteilanordnungen zu optimieren (vgl. Laufer et al., 2018). Der Gesamtnutzen der Methode wurde von allen Befragten als gut eingestuft. Was im Rahmen einer Gesamtevaluation zu beantworten ist, ist das Zusammenspiel beider Methoden und der anschließenden Aufwandsbilanzierung beider Operationen (Reduktion und Umverteilung) gegeneinander an einem Produkt (Kapitel 5.3). Vor dem Hintergrund beider Leichtbaupotenziale wird die Herausforderung vor allem darin bestehen, basierend auf einem initialen Reifegrad *gleichwertige* Abschätzungen der Aufwände zu bestimmen und sie somit vergleichbar zu machen. Entscheidend bzgl. des Nutzens der gesamten Methodik ist die Effizienz der Anwendung von hoher Relevanz. Der zeitliche Aspekt der Durchführung (Potenzialberechnung und Aufwandsabschätzung) muss in einem vertretbaren Rahmen für den Anwender liegen. Die Evaluationsteilnehmer bezifferten hier für beide Methoden den Wunsch einer effizienteren Durchführung (10 – 20 % Zeitersparnis).

Literatur

- Ahn et al., 2017 AHN, H.-J., LEE, K.-H., LEE, C.-H.: *Design optimization of a knee joint for an active transfemoral prosthesis for weight reduction*. In: *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31 (2012), No. 12, S. 5905–5913.
- Albers et al., 2018 ALBERS, A., MOESER, G., REVFI, S.: Synergy effects by using sysml models for the lightweight design method extended target weighing approach. In: Laroche, Florent; Bernard, Alain (Hrsg.): *Procedia CIRP*. Vol. 70, 2018, S. 434-439.
- Alonso et al., 2012 ALONSO, E., LEE, T. M., BJELKENGREN, C., ROTH, R., KIRCHAIN, R.E.: *Evaluating the potential for secondary mass savings in vehicle lightweighting*. In: *Environmental science & technology* (2012), Vol. 46, No. 5, S. 2893–2901.
- Borchert et al. 2015 BORCHERT, G., BATTISTELLI, M., RUNGE, G., RAATZ, A.: *Analysis of the mass distribution of a functionally extended delta robot*. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (2015), Vol. 31, S. 111–120.
- Cheah und Heywood, 2011 CHEAH, L., HEYWOOD, J.: *Meeting U.S. passenger vehicle fuel economy standards in 2016 and beyond*. In: *Energy Policy* (2011), Vol. 39, No. 1, S. 454–466.
- Clarkson et al., 2001 CLARKSON, P. J., SIMONS, C. S., ECKERT, C. M.: Change Prediction for Product Redesign. In: Folkeson, A.; Gralen, K.; Norell, M.; Sellgren, U. (Hrsg.): *Proceedings of ICED*. Glasgow, 21-23 August 2001.
- Delogu et al., 2018 DELOGU, M., ZANCHI, L., DATTILO, C.A.; IERIDES, M.: Parameters affecting the sustainability tradeoff between production and use stages in the automotive lightweight design. In: *Procedia CIRP*. Vol. 69, 2018, S. 534–539.
- Eckert et al., 2001 ECKERT, C., ZANKER, W., CLARKSON, P.: Aspects of a better understanding of changes. In: Folkeson, A.; Gralen, K.; Norell, M.; Sellgren, U. (Hrsg.): *Proceedings of ICED*. Glasgow, 5-8 August, 2019.

- Ericsson und Erixon, 1999 ERICSSON, A., ERIXON, G.: *Controlling Design Variants: Modular Product-Platforms*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, 1999.
- Friedrich, 2017 FRIEDRICH, Horst E: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- Henning und Moeller, 2020 HENNING, F., MOELLER, E.: *Handbuch Leichtbau*, München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- Hottle et al., 2017 HOTTLE, T., CAFFREY, C., McDONALD, J., DODDER, R.: *Critical factors affecting life cycle assessments of material choice for vehicle mass reduction*. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2017), Vol. 56, S. 241–257.
- Kaspar und Vielhaber, 2017 KASPAR, J., VIELHABER, M.: Sustainable lightweight design – relevance and impact on the product development & lifecycle process. In: Günther Seliger, Holger Kohl, Gert Adriaan Oosthuizen (Hrsg.): *Procedia Manufacturing*. Vol. 8, 2017, S. 409–416.
- Klein, 2013 Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion*. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2013.
- Lauffer et al., 2018 LAUFER, F., ROTH, D., BINZ, H.: Supporting engineers in lightweight design: The Energy Distribution Analysis (EDA). In: Marjanović, D.; Štorga, M.; Škec, S.; Bojčetić, N.; Pavković, N. (Hrsg.): *Proceedings of DESIGN*. Glasgow, 2018, S. 829-840.
- Lauffer et al., 2019a LAUFER, F., ROTH, D., BINZ, H.: An investigation into the influence of mass distribution on conceptual lightweight design. In: Putnik, Goran D. (Hrsg.): *Procedia CIRP*. Vol. 84, 2019, S. 1041–1047.
- Lauffer et al., 2019b LAUFER, F., ROTH, D., BINZ, H.: Derivation of Criteria for Identifying Lightweight Potential – A Literature Review. In: Badke Schaub, P.; Kleinsmann, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 22 ICED19*. Delft, 2019, 5-8 August.
- Lauffer et al., 2020a LAUFER, F., ROTH, D., BINZ, H.: Mass Distribution as an Approach for Designing Lightweight-Driven Product Architectures. In: Mortensen, N.H.; Hansen, C.T. and Deininger, M. (Hrsg.): *Proc. of the NordDesign Conference*. 1, 2020, S. 977-986.
- Lauffer et al., 2020b LAUFER, F., ROTH, D., BINZ, H.: An approach for the multi-criteria derivation of lightweight potential. In: Marjanović, D.; Štorga, M.; Škec, S.; Bojčetić, N.; Pavković, N. (Hrsg.): *Proceedings of the DESIGN Conference*. 1, 2020, S. 977-986.
- Lehmann et al., 1998 LEHMANN, J. F., PRICE, R., OKUMURA, R., QUESTAD, K., de LATEUR, B. J., & NÉGRETOT, A.: *Mass and Mass Distribution of Below-Knee Prostheses: Effect on Gait Efficacy and Self-Selected Walking Speed*. In: *Arch. Phys. Med. Rehabil.* (1998), Vol. 79, S. 162–168.
- Lewis et al., 2014 LEWIS, A. M., KELLY, J. C., KEOLEIAN, G. A.: *Vehicle lightweighting vs. electrification. Life cycle energy and GHG emissions results for diverse powertrain vehicles*. In: *Applied Energy* (2014), Vol. 126, S. 13–20.
- Pimmler und Eppinger, 1994 PIMMLER, T. U., EPPINGER, S. D.: Integration Analysis of Product Decompositions. In: Hight, T. K.; Mistree, F. M. (Hrsg.): *ASME Conference on Design Theory and Methodology*. Minneapolis, September, 1994, S. 343-351.
- Ponn und Lindemann, 2011 PONN, J., LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2011.
- Posner, 2016 POSNER, B.: *Methodik zum Leichtbaugerechten Konzipieren*, Dissertation, Stuttgart, Report / Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, University Stuttgart, No. 656; 2016.
- Scholz, 2012 SCHOLZ, D.: *Entwurf von Flugzeugen*. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2012.
- Trzesniowski, 2014 TRZESNIOWSKI, M.: *Rennwagentechnik*. 4. Aufl., Wiesbaden: Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- VDI 2800, 2010 VDI-RICHTLINIE 2800: *Value Analysis*. Düsseldorf: Beuth Verlag, 2010.

Performancesteigerung von Faserverbundstrukturen in Schienenfahrzeugen

Performance increase of fiber composite structures in rail vehicles

Robert Winkler-Höhn¹, Lars Trampe², Kay-Uwe Kohlshorn³, Peer Heß⁴, Jörg Bünker⁵,
Friedrich von Dungern⁶, Stefan Lindner⁷

¹Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
robert.hoehn@dlr.de

²Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik, Braunschweig
lars.trampe@dlr.de

³J.M. Voith SE & Co. KG, 38239 Salzgitter
Kay-Uwe.Kohlshorn@voith.com

⁴Forster System-Montage-Technik GmbH (SMT), 03149 Forst (Lausitz)
p.hess@smt-forst.de

⁵SAERTEX GmbH & Co. KG, 48369 Saerbeck
j.buenker@saertex.com

⁶INVENT GmbH, 38112 Braunschweig
Friedrich.vonDungern@invent-gmbh.de

⁷EAST-4D® Carbon Technology GmbH, 01239 Dresden
s.lindner@east-4d.de

Abstract (deutsch): Für eine signifikante Masseinsparung ist ein ganzheitlicher Leichtbauansatz notwendig. Dieser ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekts „Signifikante Masseinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem“ (faWaSiS) verfolgt worden.

Der Ansatz konnte am Beispiel einer Seitenschürze eines Triebzugs der Baureihe 612 umgesetzt werden, die nachfolgend im realen Betrieb erprobt wird. Die gewonnenen Erkenntnisse werden des Weiteren innerhalb des Projekts auf eine methodisch leichtbauoptimierte, faser-verbundintensive Dachstruktur eines Eisenbahnwagenkastens übertragen.

Keywords (deutsch):

Ganzheitlicher Leichtbau, Structural-Health-Monitoring (SHM), Faserverbundwerkstoffe, leichtbauoptimierte Dachstruktur, Seitenschürze

Abstract (english): A holistic lightweight construction approach is necessary to achieve significant weight savings. This was pursued within the framework of the joint project "Significant mass savings through structurally supporting fibre-composite-intensive car body structures of rail vehicles with integrated damage diagnosis system" (faWaSiS) funded by the Federal Ministry of Economics Affairs.

The approach was implemented using the example of a side skirt of a class 612 multiple unit train and testing it in real operation. Within the project, the knowledge gained from this was transferred to a methodically lightweight construction-optimised, fibre-composite-intensive roof structure of a railway car body.

Keywords (english):

Holistic lightweight construction, Structural-Health-Monitoring (SHM), Fibre composite materials, roof structure optimised for lightweight construction, side skirt

1 Einleitung

Der Masseinsparung von Schienenfahrzeugen kommt eine bedeutende Rolle zu. Gründe hierfür sind unter anderem die Reduzierung des Energiebedarfs und der CO₂-Emission sowie die Einhaltung der vorgegeben Radsatzlasten bei Erhöhung der Zuladung (Nickel 2016) und die Reduzierung des Rad/Schiene-Verschleißes. Für einen weitreichenden Effekt ist eine signifikante Masseinsparung durch einen gesamtheitlichen Leichtbauansatz notwendig, der auch den Einsatz neuartiger Auslegungsmethoden, innovativer Materialien wie Faserverbundwerkstoffe (FVW) und wirtschaftliche Fertigungsverfahren beinhaltet.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekts „faWaSiS“ (Signifikante Masseinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem) wird ein solcher Ansatz verfolgt und an zwei ausgewählten Strukturen (Seitenschürze und Dachstruktur) dargestellt. Dieser Ansatz umfasst dabei alle Leichtbaustrategien: den Anforderungsleichtbau, den Konzeptleichtbau, den Gestalt- und Form-Leichtbau, den Werkstoffleichtbau und den Leichtbau durch Funktionsintegration.

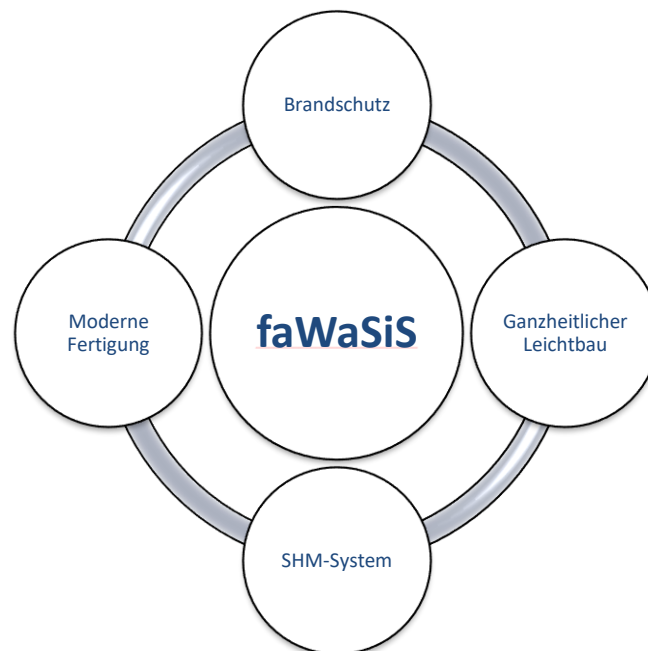


Bild 1: 4-Säulen des faWaSiS-Projekts

Neben diesem Leichtbauansatz stellen das Structural-Health-Monitoring System, die Brandschutzentwicklungen und die modernen Fertigungsverfahren die weiteren Säulen im faWaSiS-Projekt dar. (Bild 1).

Faserverbundstrukturen als innovative Leichtbauwerkstoffe weisen ein komplexeres Schadensverhalten als metallische Werkstoffe auf. Aus diesem Grund ergibt sich in der Praxis ein erhöhter Inspektionsaufwand (Trampe 2020). Dieser lässt sich unter anderem dadurch verringern, dass ein Schadensdiagnosesystem (Structural-Health-Monitoring, SHM) in die Struktur eingebettet wird, was anhand der Struktur der Seitenschürze im Projekt realisiert werden konnte.

Um ein leichtbaugerechtes Brandschutzsystem zu gewährleisten, kam im Rahmen des Projekts das LEO® System der Firma SAERTEX zum Tragen, das höchsten Brandschutz mit größtmöglicher mechanischer Performance verbindet.

Die Optimierung in Bezug auf geringe Masse und wirtschaftliche Fertigung von Schienenfahrzeugstrukturen wird im Rahmen des Projekts durch die Anwendung und Verbesserung

zweier praxisbewährter Technologien angegangen - das VARI-Verfahren (Vakuuminfusionsverfahren) und das Wickelverfahren.

Das vom Projektträger TÜV Rheinland begleitete Konsortium besteht aus den folgenden Partnern: J.M. Voith SE & Co. KG (Federführer), Forster System-Montage-Technik GmbH, SAERTEX GmbH & Co. KG, EAST-4D Carbon Technology GmbH, INVENT GmbH sowie Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR).

2 Structural-Health-Monitoring am Beispiel einer Seitenschürze

Die Projektinhalte zur Schadensdetektion sind anhand einer Seitenschürze mit integriertem SHM-System für den Einsatz an der Baureihe 612 (BR612) der DB AG (Bild 2) entwickelt worden.



Bild 2: Seitenschürze der Baureihe 612 (Trampe 2020)

Die Auslegung erfolgt nach DIN SPEC 91326 2016 als monolithisches, Glasfaser verstärktes Bauteil, welches den Einsatz eines leichtbaugerechtes Brandschutzsystem in Kombination mit dem LEO System ermöglichte und die Anforderung der DIN 45545 Teil 1 1998 HL2 R17 (Hazardlevel) und R7 (Exterieur) erfüllt.

Das zur Verwendung kommende SHM-System beruht auf der Verwendung von sog. geführten Ultraschallwellen „Lamb-Wellen“, was die Identifikation unterschiedlichster Schadensarten, z. B. Delamination oder Materialermüdung, erlaubt. Diese Ultraschallwellen arbeiten in einen Wellenlängenbereich von 40 kHz bis 300 kHz und breiten sich flächig im Bauteil aus und interagieren dabei mit Steifigkeitsübergängen. Erzeugt und detektiert werden die Wellen von piezoelektrischen Wandlern, die das Bauteil sowohl aktiv anregen, um Schäden zu detektieren, als auch inaktiv „lauschen“, ob infolge eines Impacts Schall emittiert wird. (Trampe 2020)

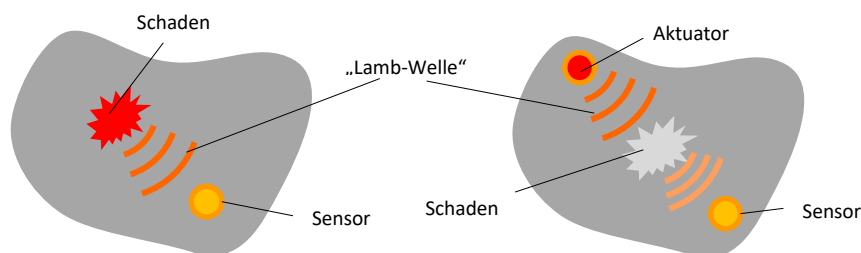


Bild 3: Messmoden des SHM-Systems: links passiver und rechts aktiver Messmodus (Trampe 2020)

Mit den oben beschriebenen Wandlern sind zwei Messmoden möglich: erstens der aktive Messmodus und zweitens der passive Messmodus.

Beim aktiven Modus wird ein piezoelektrischer Wandler aktiv angesteuert und erzeugt damit, sich im Bauteil ausbreitende, geführte Ultraschallwellen. Diese interagieren bspw. mit einem Schaden, vgl. Bild 3, rechts. Die Ultraschallwellen werden anschließend von einem weiteren piezoelektrischen Wandler detektiert. Durch den Vergleich der ermittelten Laufzeit, der Amplitude sowie der Phasenverschiebung mit einem bereits erfassten Referenzzustand („Gutzustand“) des Bauteils können Veränderungen in Folge eines Schadens in der Struktur ermittelt werden. Eine Lokalisation der Veränderung in der Struktur ist durch die räumliche Zuordnung der betroffenen Übertragungspfade zwischen zwei piezoelektrischen Wandlern möglich. Durch eine weiterführende Datenanalyse ist es weiterhin möglich Veränderungen in der Struktur zu klassifizieren. Bewertung der Auswirkung des Schadens auf die Struktur sind Bestandteil aktueller Forschungen. Der große Vorteil dieser Messmethode ist die aktive Ermittlung des Bauteilzustands. (Trampe 2020)

Der passive Modus beruht auf der Detektion von Körperschallwellen, welche bei einem Impact auf die Oberfläche eines Bauteils emittiert werden, vgl. Bild 3, links. Diese emittierten Körperschallwellen können, wie beim aktiven Messmodus, durch den piezoelektrischen Wandler detektiert werden. Eine Lokalisierung des Schadensereignisses (Ursprungsort der Körperschallwellen) ist durch eine Triangulation zwischen mehreren Sensoren möglich. Weiterhin kann durch eine weiterführende Signalanalyse, eine Einschätzung auf die Auswirkung des Impacts auf die Struktur gegeben werden. Dies können z. B. durch die Ermittlung der emittierten Frequenzen sowie der dazugehörigen Amplituden geschehen. (Trampe 2020)

Um eine möglichst großflächige Abdeckung im Bauteil zu ermöglichen, besteht das im faWaSIS-Projekt eingesetzte Sensornetzwerk aus 34 piezoelektrischen Wandlern, welches mit einem Messsystem verbunden ist, vgl. Bild 4.

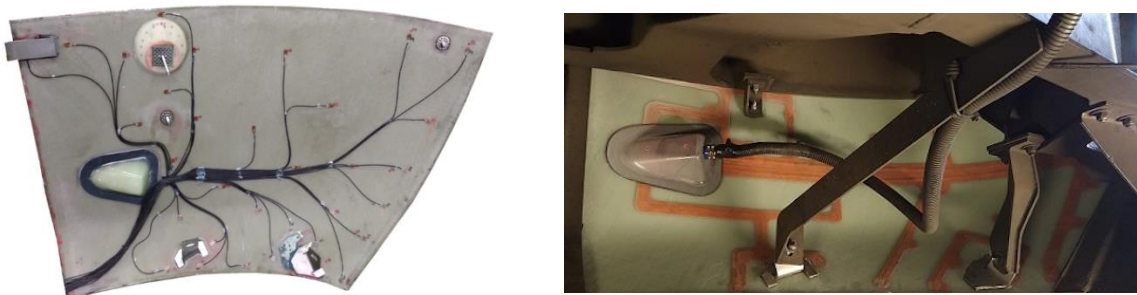


Bild 4: Sensornetzwerk: links: provisorisch auf der Innenseite der Seitenschürze (Trampe 2020); rechts: Seitenschürze eingebaut im Fahrzeug der Baureihe 612

Durch die zusätzlichen, mehrmonatigen realen Feldversuche ist es möglich die Konzeptionierung des Sensornetzwerks, die Zuverlässigkeit und die Robustheit des Netzwerks im Realbetrieb zu überprüfen. Die während den Fahrversuchen ermittelten Daten werden genutzt, um die Auswertungsalgorithmen anzupassen und weiterzuentwickeln. Hierbei können weiterhin mögliche zusätzliche Störquellen, wie z. B. Umwelteinflüsse untersucht werden.

Weiter kann die vorhandene Datenbasis genutzt werden, um die prädiktive Instandhaltung anzupassen. Da der aktuelle Bauteilzustand zu jedem Zeitpunkt ermittelbar ist, wird die Überwachung eventueller Schäden infolge von Impacts, Fertigungsproblemen oder fehlerhafter Handhabung ermöglicht. Somit wird ein Austausch von defekten Bauteilen frühzeitig planbar. Dies würde ungeplante Ausfallzeiten stark reduzieren und die Zuverlässigkeit sowie die Akzeptanz von FVK-Strukturen in Schienenfahrzeugen steigern.

Besonders wichtig ist dies, wenn FVK-Bauteile in strukturell tragenden Bereichen von Schienenfahrzeugen wie der Dachstruktur zum Einsatz kommen sollen. Hierfür werden die gewonnen Erkenntnisse aus der Seitenschürze herangezogen und ein Konzept eines SHM-Netzwerks für die Dachstruktur weiterentwickelt. Dieses soll die höchstbelasteten Stellen, im Bereich des Klimaanlageausschnitts als auch oberhalb der Türbereiche der Dachstruktur, überwachen.

3 Entwicklung einer Dachstruktur

Die Dachstruktur von Wagenkästen - als große homogene Flächen mit wenigen Ausschnitten - ist besonders geeignet für den Einsatz von FVW. Im Gegensatz zu den Arbeiten an der Seitenschürze ist zu Beginn des Projekts kein Referenzwagenkasten für eine entsprechende Dachstruktur definiert. Diese ist aber erforderlich, da eine Dachstruktur und die darauf wirkenden Belastungen in enger Wechselwirkung mit der Reststruktur eines Wagenkastens stehen. Somit ist es notwendig einen Wagenkasten nach dem Stand der Technik konstruktiv umzusetzen und zu dimensionieren.

Für das im Projekt angestrebte, möglichst kraftflussoptimierte Faserverbund-Dachkonzept werden, unter Einwirkung relevanter Lasten aus der DIN 12663 Teil 1 2010, Topologie- und Free-Size-Optimierungen des Dachbereichs durchgeführt. Hierzu ist eine existierende methodische Vorgehensweise (König 2016a, König 2016b) genutzt und weiter ausgebaut worden (Bild 5). Im Folgenden werden die einzelnen Bereiche der methodischen Vorgehensweise näher beleuchtet.

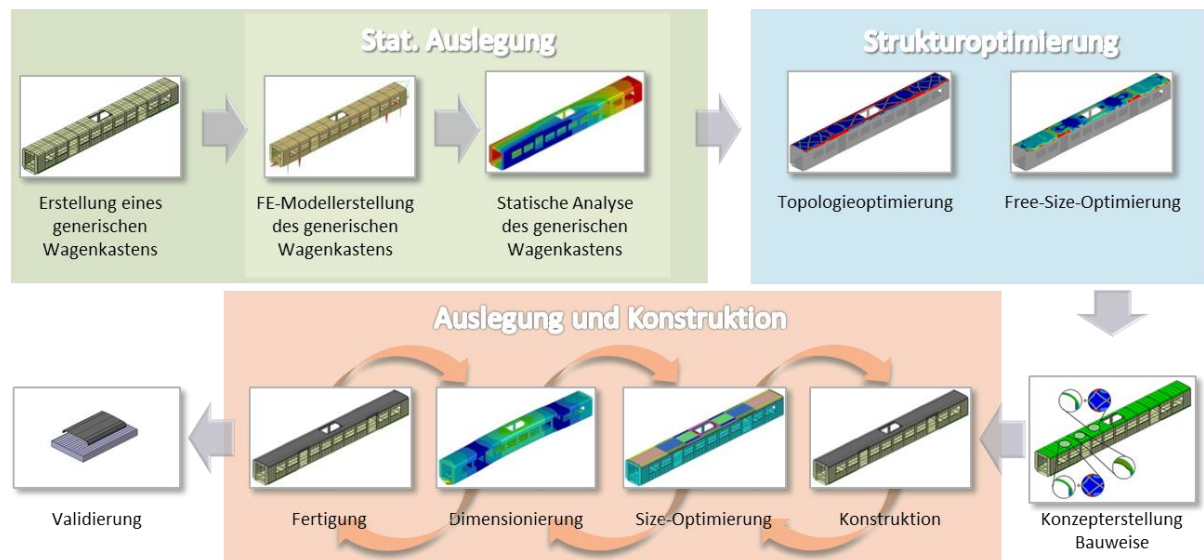


Bild 5: Systematische und methodische Vorgehensweise

3.1 Erstellung und Auslegung eines generischen Wagenkastens

Aus den genannten Gründen werden Analysen durchgeführt, welches Fahrzeug und welche Bauweise für die folgenden Arbeiten im Projekt als Basis dienen sollten. Bei der Auswahl spielen unterschiedliche Aspekte eine Rolle, wobei unter anderem die Fahrzeugstückzahl sowie eine möglichst günstige strukturelle Integration der faserverbundintensiven Dachstruktur im Fokus stehen.

Basierend auf den Ergebnissen der Analysen ist es notwendig, einen kompletten und repräsentativen generischen Wagenkasten (gen. WK) eines Regionalfahrzeugs in Stahl-Differenzialbauweise entsprechend des Stands der Technik zu konstruieren und zu dimensionieren. Der Wagenkasten ist als Hochflurwagen konzipiert und weist dabei eine Gesamtlänge von 26,4 m und einer Breite von 2,8 m auf, sowie einen Dachausschnitt in Wagenkastenmitte für die Klimaanlage.

Die Dimensionierung des Wagenkastens erfolgt nach DIN 12663 Teil 1 2010 und umfasst insgesamt 18 Lastfälle sowie eine Modalanalyse. Der gen. WK muss die geforderten Steifigkeiten und Festigkeiten der EN 12663 erfüllen. Exemplarisch sind die Ergebnisse für die wichtigsten Lastfälle: 1g, Anhebelastfall sowie die ersten 4 Eigenfrequenzen in Tabelle 1 aufgeführt. Hierbei beschreibt der Lastfall 1g die maximale Durchbiegung in z-Richtung bei Auslegungsmasse, wobei 1‰ der Stützwerte nicht überschritten werden darf. Der Anhebelastfall wiederum beschreibt das Anheben des Wagenkastens an einer Seite. In der Simulation wird der Wagenkasten an drei Seiten gehalten. Die sich aufgrund des Eigengewichts und der Steifigkeit einstellende Verformung darf 100 mm in negativer z-Richtung nicht

überschreiten. Die Eigenfrequenzen des Wagenkastens sollen, um Komfortanforderungen zu erfüllen, oberhalb der Anregungsfrequenz der Fahrwerke liegen. (Nach Popprath (2006) und Schandl et al. (2007) liegen Anregungsfrequenz für die meisten Fahrzeuge in der Regel bei 10 Hz.)

Tabelle 1: Referenzwerte des generischen Wagenkastens

	Gen. WK
1g (Gesamtfahrzeug) [mm]	-18,80
1g (Dach) [mm]	-16,65
Anheben (Gesamtfahrzeug) [mm]	-43,50
1. Vertikale Biegeeigenfrequenz [Hz]	12,51
1. Verwölbungseigenfrequenz [Hz]	12,89
2. Verwölbungseigenfrequenz [Hz]	13,45
1. Laterale Biegeeigenfrequenz [Hz]	17,74

Die oben aufgeführten Werte dienen als Referenzwerte für die Auslegung der neu zu entwickelnden Dachstruktur. Diese sollen vom gen. WK mit der neu entwickelnden Dachstruktur erfüllt oder sogar übererfüllt werden bei gleichzeitiger Gewichtseinsparung.

3.2 Statische Auslegung und Optimierung der Dachstruktur für die Konzeptfindung

Unter Verwendung der erstellten Wagenkastenstruktur und unter Einwirkung der Lasten aus DIN 12663 Teil 1 2010 sind eine Topologieoptimierung sowie eine Free-Size-Optimierung des Dachbereichs durchgeführt worden, vgl. Bild 6.

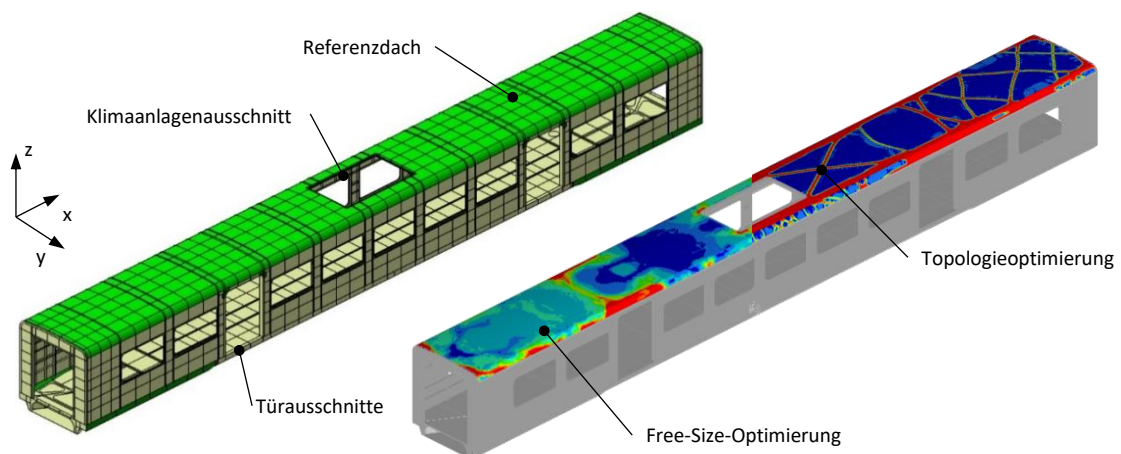


Bild 6: Gewählter Dachbereich des gen. WK in Grün und die Ergebnisse der Topologieoptimierung sowie der Free-Size-Optimierung

Die Ausprägung der Topologieoptimierung als auch der Free-Size-Optimierung werden im Bild 6, recht ersichtlich. Für die Topologieoptimierung sind isotrope Materialeigenschaften angenommen worden. Diese Vorgehensweise dient dazu Anhaltspunkte zu erhalten, an welchen Stellen Versteifungsprofile am sinnvollsten eingesetzt werden könnten.

Für die Free-Size-Optimierung sind Einzellagen mit 0° , 90° , $\pm 45^\circ$ sowie ein Sandwichkern definiert worden. Hierdurch wird ein möglicher Lagenaufbau identifiziert, wobei, bei der neuartigen Dachstruktur, Gelege aus Kohlenstofffasern Verwendung finden. Die entsprechenden Materialparameter sind vom Projektpartner SAERTEX zur Verfügung gestellt worden.

Im Bild 6 (rechts) wird deutlich, dass im Bereich oberhalb der Türausschnitte die Ergebnisse der Topologieoptimierung und der Free-Size-Optimierung eine signifikante Verstärkung vorsehen, was darauf schließen lässt, dass dieser Bereich einen starken Einfluss auf die Durchbiegung des gesamten Wagenkastens hat.

3.3 Konzepterstellung der Dachstruktur

Das im Projekt verfolgte Konzept für die Dachstruktur basiert auf einer Sandwichbauweise aus CFK-Gelegen und einem homogenen Schaumkern sowie Längsversteifungen im Übergangsbereich des Dachs zur Seitenwand. Der entscheidende Punkt bei der Konzeption ist, dass die Sandwichbauweise eine konstante Dicke über die gesamte Dachlänge aufweist. Dies hat den Vorteil, dass die Anbindungsprofile als einfache Blechbiegeteile umgesetzt werden können und in der benötigten Stückzahl mittels Walzprofilierung kosteneffizient herzustellen sind. Die Anbindungsprofile sind als zweigeteilte Stahlprofile (Material entsprechend der Reststruktur) ausgeführt und mit der Sandwichstruktur strukturell verklebt. Als struktureller Klebstoff ist ein MMA-Klebstoff ausgewählt worden. Die so entstandene, separat fertige Dachbaugruppe wird mittels Schweißen mit der Reststruktur des Wagenkastens verbunden. Um keine Degradation des Klebstoffs und somit einen ungewollten Festigkeitsverlust zu verursachen, wird bei der nachfolgenden Konstruktion der Anbindungsprofile darauf geachtet, dass der Abstand der Schweißung zur Klebefläche ausreichend konzipiert ist.

Ein großer Vorteil der gewählten Sandwichbauweise liegt darin, dass die Isolation, die in der Referenzstruktur zusätzlich notwendig ist, ersetzt bzw. direkt integriert werden kann. Um dies zu ermöglichen wird bei der Konzeption darauf geachtet, dass die Bauweise die gestellten Anforderungen an die Isolierung nach DIN 13129 Teil 1 2002 „Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs Teil 1: Behaglichkeitsparameter“ für entsprechende Klimazonen innerhalb Europas erfüllt. Darüber hinaus ist bei der Konzepterstellung darauf geachtet worden, dass eine gute Vergleichbarkeit der Fertigungsverfahren gegeben ist. Dies vor allem in Bezug auf die im Laufe des Projekts gefertigten Komponenten.

3.4 Auslegung und konstruktive Ausarbeitung

Der nachfolgende Abschnitt der methodischen Vorgehensweise beinhaltet die Konstruktion, die Size-Optimierung, die Dimensionierung sowie die Fertigung (vgl. Bild 5). Zu beachten ist, dass alle vier Bereiche in Wechselwirkung stehen und nicht isoliert betrachtet werden können.

Bei der Konstruktion der Dachstruktur wird darauf geachtet, dass das finalisierte Konzept einen möglichst einfach verarbeitbaren Lagenaufbau aufweist. Es sollen komplexe Zuschnitte innerhalb der Decklagen als auch der jeweiligen Einzellagen vermieden werden, um so einen zeitsparenden Effekt bei der Drapierung der Einzellagen zu erzielen.

Der Sandwichaufbau ist als symmetrischer Aufbau umgesetzt worden. Hierbei zeigen die ersten Berechnungen, dass für die gesetzten Anforderungen an die Durchbiegung eine konstante Dicke von 65 mm notwendig ist. Weiterhin ist es erforderlich, neben den Längsversteifungen zusätzlich oberhalb der Türausschnitte (siehe Bild 6, links) Verstärkungsprofile vorzusehen, die als FVW-Hohlkammerprofile nach Vorbild des Next Generation High Speed Train (NGT HST) des DLR (König 2016b) ausgeführt sind.

3.4.1 Weiterführende Optimierung

Um eine weitere Performancesteigerung der Dachstruktur zu erzielen, wird der Lagenaufbau an lokale und globale Belastungen und deren erforderliche Steifigkeiten angepasst. Dies erfolgt mithilfe einer

Size-Optimierung, bei der die Dicke jeder Einzellege innerhalb des Laminats entsprechend der auftretenden Belastungen optimiert wird.

In Bezug auf die fertigungstechnischen Vorgaben wird ein zur Fahrzeugmitte symmetrischer Aufbau der gesamten Dachstruktur bei der Size-Optimierung berücksichtigt.

Die weiterführende Unterteilung der Dachstruktur in Fahrzeug-x-Richtung gliedert den Aufbau in fünf Einzelsegmente. Diese Segmente weisen in lateraler Richtung (y-Richtung) drei Bereiche auf, die wie folgt unterteilt sind: die beiden Längsversteifungsbereiche (Bereich 1 und 3, vgl. Bild 7) und den Deckenbereich (Bereich 2, vgl. Bild 7). Weiter werden die Längsversteifungsbereiche außen, um den lokalen sowie globalen Belastungen gerecht zu werden, in zwei Zonen unterteilt. Die Ecken des Segments 5 mit der mittig im Dach sitzenden Klimaanlage sind zusätzlich verstärkt, um auftretende Spannung aufzunehmen. (vgl. Bild 7)

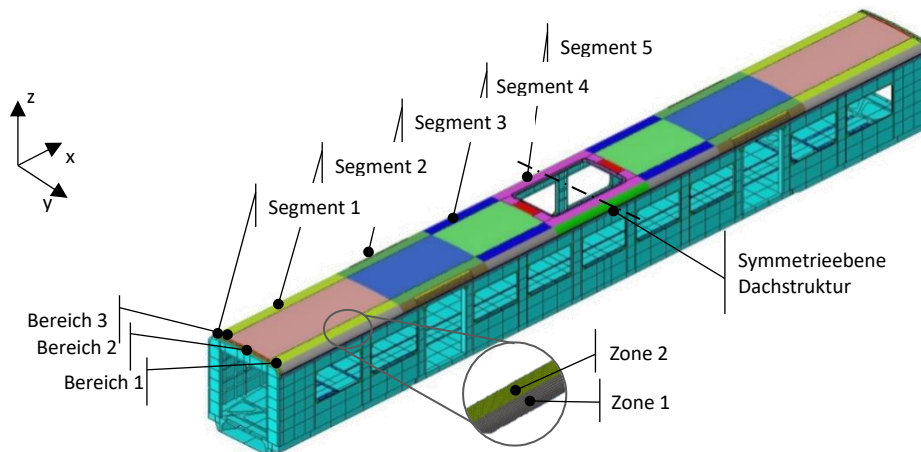


Bild 7: Konzeption der symmetrischen Dachstruktur mit fünf Segmente, unterteilt in je drei Bereiche und 2 Zonen der Versteifungsbereiche

Im Rahmen des Projekts werden zwei verschiedene Fertigungsverfahren für die konzipierte und dimensionierte Dachstruktur angedacht, das VARI- und das Wickelverfahren. Beim Einsatz dieser Verfahren müssen verschiedenste Fertigungsrandbedingungen berücksichtigt werden.

Hierzu zählen beispielsweise, dass bei einem kontinuierlichen Wickelprozess keine 0° -Lagen, sondern nur 10° -Lagen möglich sind. Weiter müssen die Faserlagen winkelsymmetrisch und über die gesamte Länge identisch aufgebaut werden.

Beim VARI-Verfahren hingegen ist jedes Segment der Dachstruktur aus unterschiedlichen Faserlagen individuell aufgebaut. Hierbei sind nur die verwendeten Halbzeuge das limitierende Maß. Für beide Varianten gilt, dass Faserlagen, die bei allen Segmenten identisch vorgesehen sind und gleich dimensioniert werden müssen, über die komplette Wagenlänge verlaufen, sodass das finale Dach aus einem Stück mit durchgängigen Lastpfaden besteht und gefertigt werden kann.

Bild 8 zeigt am Beispiel der für das VARI-Verfahren optimierten Dachstruktur, wie der Lagenaufbau für die innere und äußere Deckschicht des Sandwichaufbaus an die lokalen und globalen Belastungen angepasst worden ist. Der Deckenbereich ist aus biaxialem Gelege mit einer Dicke von ca. 0,2 mm je Einzellege in den Orientierungen $0/90^\circ$ und $\pm 45^\circ$ aufgebaut. Die Längsversteifungen sind hingegen aus unidirektionalen Gelege mit einer Dicke von ca. 0,4 mm je Einzellege ausgebildet. Beide Gelegetypen werden für die Fertigung vom Partner SAERTEX zur Verfügung gestellt.

Die Anzahl der Einzellagen der äußeren Deckschicht des Sandwichaufbaus im Deckenbereich steigt zur Mitte des Wagenkastens an. Dominierend ist hier die Torsionsbelastung infolge des Lastfalls „Anheben“, woraus vor allem ein Anstieg der Einzellagen mit $\pm 45^\circ$ Orientierung folgt. Ebenso steigt in Richtung zur Fahrzeugmitte die Anzahl der Einzellagen der Längsversteifungen der Zone 2. Diese nehmen hauptsächlich die Belastung infolge der Biegebeanspruchung auf. Im Gegensatz hierzu, ist die Zone 1 der Längsversteifungen an die lokal auftretenden Belastungen infolge der zu übertragenden Kräfte von der Seitenwand über die Anbindungsprofile in die Sandwich-Struktur optimiert.

Die Bereiche des Türausschnitts (Segment 3) sowie der Bereich des Klimaanlagenausschnitts (Segment 5) sind maßgebend für den Lagenaufbau der Zone 1 in der äußeren Deckschicht des Sandwichaufbaus. Dies führt bei den Segmenten 3 und 5 zu einer maximalen Anzahl von 18 unidirektionalen Lagen, was einer Dicke der Längsversteifung von circa 7,2 mm entsprechen würde. Die innere Deckschicht des Sandwichs ist hingegen sehr gleichmäßig über die Segmente hinweg aufgebaut. Jedoch steigt infolge der Biegebeanspruchung die Anzahl der Einzellagen innerhalb der Zone 2 der Längsversteifung an, wie schon bei der äußeren Deckschicht ersichtlich wird.

Es wird ersichtlich, dass ein optimierter Sandwichaufbau unterschiedliche Anzahl an Einzellagen in der äußeren und inneren Deckschicht aufweist. Somit kann geschlossen werden, dass die globale Steifigkeit des Wagenkastens gegenüber der lokalen Steifigkeit der Sandwich-Struktur überwiegt.

Die im Wagenkasten wirkenden Kräfte werden über die Seitenwand zu einem großen Teil in die äußere Deckschicht des Sandwichaufbaus der Dachstruktur geleitet und nur ein geringer Teil wird über das Anbindungsprofil auf die innere Deckschichtseite übertragen.

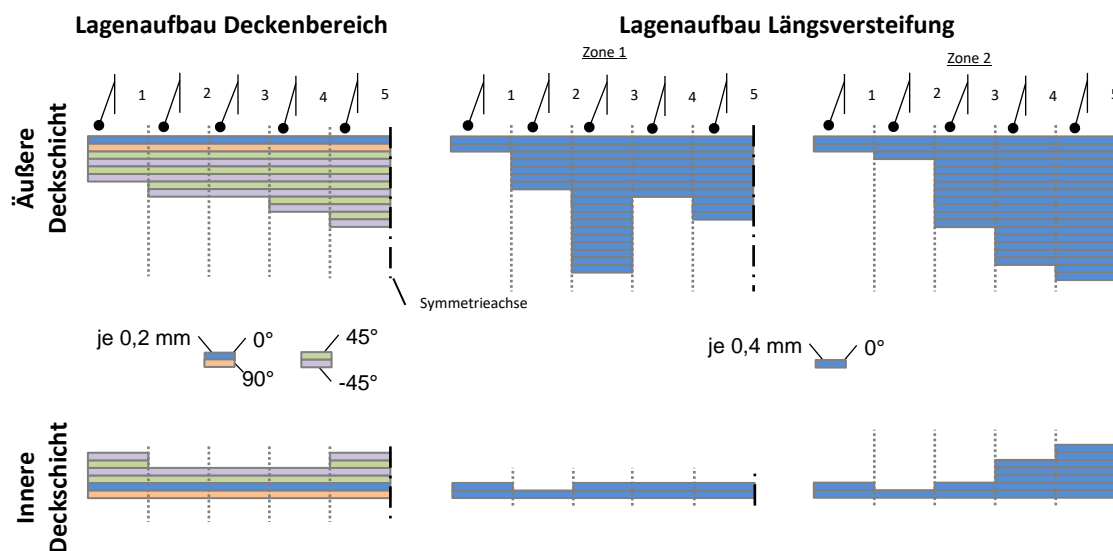


Bild 8: Laminatdicken für die Segmente 1 bis 5 am Beispiel des VARI-Verfahrens für äußere und innere Deckschicht des Sandwichaufbaus und der dazugehörigen Längsversteifungen. Links: der Lagenaufbau des Deckenbereichs; Mitte: der Lagenaufbau für die Zone 1 der Längsversteifung; Rechts: der Lagenaufbau für die Zone 2 der Längsversteifung

Durch diesen Optimierungsschritt ist es gelungen die Systemmasse der Dachbaugruppe auf circa 1.350 kg für beide Fertigungsverfahren zu reduzieren. Die Systemmasse umfasst hierbei die Massen für die Sandwich-Struktur, für den Blitzschutz, den Brandschutz-Gelcoat und für die Anbindungselemente. Die einzelnen Komponenten mit den zugehörigen Massen sind in Bild 9 aufgeführt. Die Systemmasse entspricht im Vergleich zum Referenzdach einer Masseinsparung von 30%, wobei die Systemmasse (Struktur plus Isolierung) des Referenzdachs 1.920 kg beträgt.

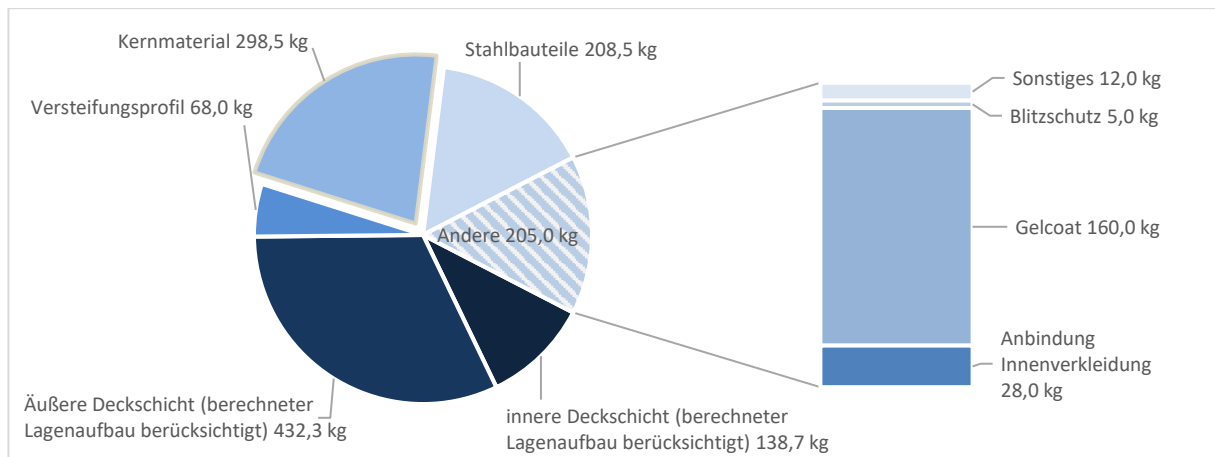


Bild 9: Massebilanz der Dachbaugruppe entsprechend der Simulation

Darüber hinaus ist es gelungen die geforderten Steifigkeitsanforderungen der Referenzstruktur zu erfüllen. Dies zeigen die Berechnungen am Beispiel der Dachstruktur, welche mittels VARI-Verfahren hergestellt werden soll. Tabelle 2 zeigt die rechnerisch nachgewiesenen, verbesserten Werte der optimierten Dachstruktur gegenüber dem Referenzdach. Es wird deutlich, dass trotz einer Massereduktion die Durchbiegung des Gesamtfahrzeugs bei der Auslegungsmasse nach DIN 12663 Teil 1 2010 um 3,0% bzw. 3,4% gegenüber der Referenz zu reduzieren. Darüber hinaus liegen die ersten 4 Eigenfrequenzen des Wagenkastens mit der faWaSiS-Dachstruktur mit ca. 13,2 Hz bis 18,4 Hz um 4% bis 8 % oberhalb der Eigenfrequenz des Referenzwagenkastens. Hierbei wird noch einmal deutlich, dass die Optimierung einer Strukturkomponente nicht ohne die Reststruktur zielführend ist.

Tabelle 2: Durchbiegung und Eigenfrequenzen des gen. WK und des gen. WK mit faWaSiS-Dach im Vergleich (Optimierungsvariante basierend auf VARI-Fertigungsrestriktionen)

	Gen. WK	Gen. WK + faWaSiS-Dach	Abweichung [%]
1g (Gesamtfahrzeug) [mm]	-18,80	-18,24	-3,0
1g (Dach) [mm]	-16,65	-16,09	-3,4
Anheben (Gesamtfahrzeug) [mm]	-43,50	-45,15	3,8
1. Vertikale Biegeeigenfrequenz [Hz]	12,51	13,20	5,1
1. Verwölbungseigenfrequenz [Hz]	12,89	13,95	8,2
2. Verwölbungseigenfrequenz [Hz]	13,45	13,98	3,9
1. Laterale Biegeeigenfrequenz [Hz]	17,74	18,40	3,7

3.5 Validierung

Die Validierung der Dachstruktur im faWaSiS-Projekt umfasst zum einen die Massebilanz und die quasistatische Bauteilversuche eines mittels VARI-Verfahren gefertigten Dachausschnitts im Maßstab 1:1, welche erfolgreich durchgeführt worden sind. Hierfür sind insgesamt zwei Dachausschnitte mit den Abmessungen 2,8 x 4 m im VARI-Verfahren durch den Partner SMT hergestellt worden. Welche ebenfalls im LEO® System umgesetzt worden sind und somit die Anforderung der DIN 45545 Teil 1 1998 HL3 R7 (Exterieur) und HL2 R1 (Interieur) erfüllt werden konnten.

Des Weiteren wird ein Technologiedemonstrator des Gesamtdachs im Maßstab 1:4 im Wickelverfahren zum Vergleich umgesetzt.

Bei den gefertigten Dachsegmenten im VARI-Verfahren zeigt sich, dass diese eine deutlich höhere Masse aufweisen als in der Simulation hervorgesagt. Prozentual liegt der Massezuwachs für den gewählten Dachausschnitt der Dachstruktur bei circa 25% gegenüber den Simulationen. Untersuchungen der gefertigten Dachstruktur zeigen, dass der Hauptgrund des Massezuwachs in einer unerwarteten hohen Harzaufnahme des Schaumkerns liegen, welcher zuvor in der Simulation nicht berücksichtigt werden konnte. Die Ursachen, welche zu einer erhöhten Harzaufnahme führen, sind die Fließkanäle, die Oberfläche sowie die Stoßkanten der einzelnen Schaumkernplatten. Diese Ursachen führen zu einer Zunahme der Dichte des Schaumkerns von rund 75 %.

In Bild 10 sind die einzelnen Komponenten der gesamten Dachbaugruppe mit den zugehörigen Massen nach Anpassung der Kerndichte aufgeführt. Die resultierende Masse der Dachbaugruppe beträgt folglich 1.576 kg. Dies entspricht einer Massenersparnis von noch circa 18 %.

Weiterführende Untersuchungen zeigen, dass die am Demonstrator auftretenden Herausforderungen durch den Wechsel des Schaummaterials verringert werden könnten. Beispielsweise könnte durch einen Saerfoam-Kern, der sich durch seine hohe Steifigkeit und gleichzeitiger reduzierten Schaumkerndicke auszeichnet, bei gleichbleibender globaler Steifigkeit der Wagenkastenstruktur, Masseinsparungen realisiert werden. Ebenso ist eine weitere Massereduktion durch die Optimierung des Fertigungsprozesses möglich.

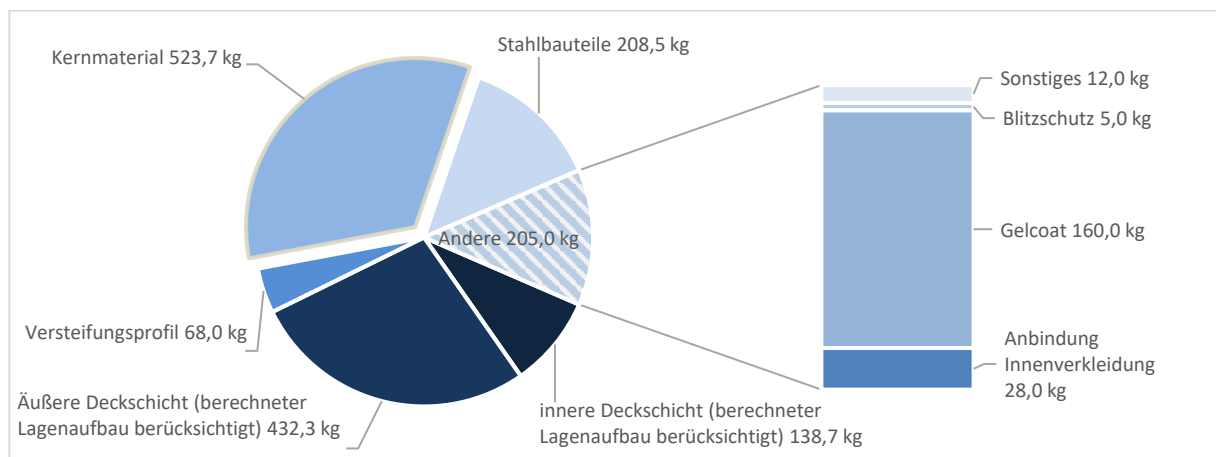


Bild 10: Massebilanz der Dachbaugruppe nach Anpassung der Kerndichte

4 Fazit

Im Projekt faWaSiS sind vier wesentliche Aspekte im Bereich des Schienenfahrzeugleichtbaus anhand einer Seitenschürze und eines Fahrzeugdachs betrachtet worden. Es konnte dargelegt werden, dass SHM-Systeme in Schienenfahrzeugen eingesetzt werden können. Das SHM-System erkannte während der Feldversuche sowohl Fehler in der Fertigung, die sich während des Versuchs zu Schäden entwickelten als auch Impact-Schäden durch den Betrieb.

Des Weiteren ist es durch die methodische Vorgehensweise gelungen, einen strukturelevanten Bereich des Wagenkastens - die Dachstruktur - auszulegen und zu optimieren. Mit einem Wechsel des Kernmaterials, Optimierung der Fertigung als auch mit einem zusätzlichen Optimierungsschritt in der Auslegung könnte zukünftig eine Massereduktion von über 25 % erzielt werden.

Literatur

- DIN 12663 Teil 1 2010 Norm DIN EN 12663 Teil 1 Juli 2010. Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen –Teil 1: Lokomotiven und Personenzüge.
- DIN 13129 Teil 1 2002 Norm DIN EN 13129 Teil 1 2002. Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs Teil 1: Behaglichkeitsparameter.
- DIN 45545 Teil 1 1998 Norm DIN EN 45545 Teil 1 Dezember 1998. Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil1: Allgemeine Regeln.
- DIN SPEC 91326 2016 Norm DIN SPEC 91326 März 2016. Brandhemmend ausgerüstete, multiaxial verstärkte Kunststoffbauteile, hergestellt in Vakuumverfahren für Schienenfahrzeuganwendungen.
- König 2016a König, Jens Holger: *Neuartige Leichtbau-Konzepte und Bauweisen für Schienenfahrzeuge im Hochgeschwindigkeitsverkehr unter besonderer Berücksichtigung des Wagenkastenleichtbaus*. Universität Stuttgart, DLR Forschungsbericht 2016-33, Dissertation, 2016.
- König 2016b König, J.; Winter, J.; Kopp, G.; Friedrich, H. E.: *Konsequente und neuartige Leichtbauansätze bei Schienenfahrzeugen des Personenverkehrs*. In: ZEVrail 140, (2016), S. 432-439.
- Nickel 2016 Nickel, J.; Fischer, F.; Friedrich, M.; Hühne, C.; Köke, H.; König, J.; Kopp, G. und Wolff, J.; Projektstudie: *Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau*, DLR, Hrsg., Braunschweig: Meinders & Elstermann, 2016.
- Popprath 2006 Popprath, S.; C. Benatzky; Bilik, C.; Kozek, M.; Stribersky, A. and Wassermann, J.: *Experimental modal analysis of a scaled car body for metro vehicles*. ICSV13 The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, Vienna, Austria, 2006, July 2-6,
- Trampe 2020 Trampe, Lars; Wierach, Peter; Moix-Bonet, Maria; Schmidt, Daniel: *Structural-Health-Monitoring System für den Einsatz in Faserverbundstrukturen in Schienenfahrzeugen*. Auf: 17. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, Dresden, 2020.
- Schandl et al. 2007 Schandl, Gerhard; Lugner, Peter; Benatzky, Christian; Kozek, Martin; Stribersky, Anton: *Comfort enhancement by an active vibration reduction system for a flexible railway car body*. In: *Vehicle System Dynamics - International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility Volume 45* (2007), Nr. 9, S. 835-847.

Überwindung der Herausforderungen beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich

Overcoming the challenges of designing with aluminum foam sandwich

Patrick Hommel¹, Daniel Roth¹, Hansgeorg Binz¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)

patrick.hommel@iktd.uni-stuttgart.de

daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

hansgeorg.binz@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract:

Aluminiumschaum-Sandwich (AFS) ist eine innovative Materialkombination für die Konstruktion von leichten Bauteilen und besitzt viele Vorteile, wie eine hohe Biegesteifigkeit bei geringer Dichte und ein gutes Dämpfungsverhalten. Obwohl das Material serienreif entwickelt ist, fehlt es auch erfahrenen Konstrukteuren an Konstruktionskenntnissen, weshalb die Anzahl der industriellen Anwendungen unter dem Potenzial des Materials liegt. Dieser Beitrag beschreibt die notwendigen Inhalte für eine Unterstützung für das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich und erläutert in welcher Bereitstellungsform diese Informationen zur Verfügung gestellt werden können. Auf Grundlage definierter Anforderungen an die Unterstützung wird die Form einer Konstruktionsrichtlinie ausgewählt, die das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich zukünftig erleichtern soll, sodass das volle Potenzial dieses Materials genutzt werden kann.

Keywords:

Aluminiumschaum-Sandwich, Konstruktionsrichtlinie, Design for X (DfX), Leichtbau

Abstract:

Aluminum foam sandwich (AFS) is an innovative material combination for designing lighter products and has many advantages such as a high bending stiffness at a low density and a good damping behavior. Although the material is ready for series production, even experienced designers do not have the necessary design knowledge, so that the number of industrial applications is below the material's potential. This paper describes the necessary contents for a design support for aluminum foam sandwich and explains in which form this information can be provided. On the basis of defined requirements for the support, a design guideline is selected which is intended to simplify designing with aluminum foam sandwich in the future, allowing the full potential of this material to be realized.

Keywords:

Aluminum foam sandwich, Design guideline, Design for X (DfX), Lightweight design

1 Einführung und Motivation

Aluminiumschaum-Sandwich gilt insbesondere für den Einsatz in Leichtbaukonstruktionen als innovative Materialkombination (Banhart et al. 2019, S. 72; Binz et al. 2018, S. 78; Sviridov 2011, S. 11). Typischerweise bestehen sowohl der Kern als auch die Deckschichten aus Aluminiumlegierungen, wobei für die Deckschichten homogene Bleche verwendet werden und der Kern in Form einer porösen Schaumstruktur vorliegt, die durch Erhitzen des Rohmaterials erzeugt wird (Seeliger 2011, S. 16). Neben einer Vielzahl an möglichen Herstellungsverfahren (Banhart 2018, S. 348 ff.) hat sich vor allem das pulvermetallurgische Verfahren etabliert, da es für industrielle Anwendungen gut geeignet ist (Orovčík et al. 2016, S. 463). Bei diesem Herstellungsverfahren entsteht eine metallische Verbindung zwischen den Deckschichten und dem Kern, welche keine Klebstoffe erfordert und auch deshalb eine hohe Recyclingqualität aufweist (Seeliger 2011, S. 16). Für die Herstellung von Aluminiumschaum-Sandwich sind in Bild 1 zwei gängige Verfahrensvarianten innerhalb der pulvermetallurgischen Route dargestellt, die sogenannte AFS-Technologie (Banhart und Seeliger 2012; Baumeister et al. 1994) und die AAS-Technologie (Schuller et al. 2017; Hohlfeld et al. 2018).

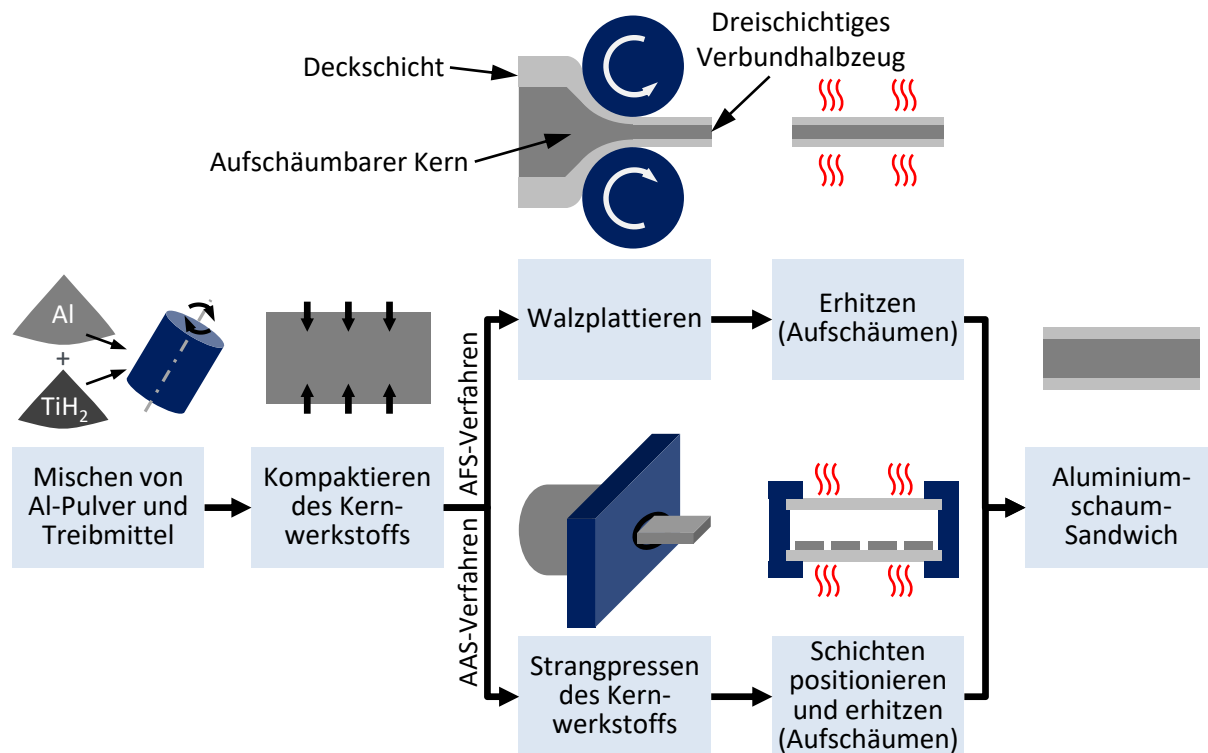


Bild 1: Pulvermetallurgische Herstellungsverfahren für Aluminiumschaum-Sandwich nach Sviridov (2011, S. 44) und Hohlfeld et al. (2018, S. 5)

Aufgrund der vielfältigen Vorteile, wie beispielsweise einer hohen Biegesteifigkeit bei geringer Dichte, einem guten Dämpfungsverhalten sowie einer nützlichen mechanischen Energieabsorption besitzt das Aluminiumschaum-Sandwich ein breites potenzielles Anwendungsgebiet (Banhart et al. 2019, S. 62 ff.; Sviridov 2011, S. 11). Bauteile aus Aluminiumschaum-Sandwich können vor allem im Maschinen- und Anlagenbau, beispielsweise in tragenden Strukturen von Werkzeugmaschinen (Hipke et al. 2007, S. 155 ff.) sowie im Automobilbau, unter anderem in Batteriekästen für Elektrofahrzeuge (Havel 2019; Hommel et al. 2019, S. 8; Schmerler et al. 2017, S. 32) oder in crashrelevanten Bauteilen (Banhart et al. 2019, S. 66 ff.) gewinnbringend eingesetzt werden.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Obwohl Aluminiumschaum-Sandwich serienreif auf dem Markt verfügbar ist (Seeliger 2011, S. 16) und viele Vorteile sowie potenzielle Anwendungsfelder besitzt, liegt die Anzahl der industriellen Anwendungen weit unter dem tatsächlichen Potenzial (Banhart et al. 2019, S. 71; Sviridov 2011, S. 47). Die Gründe für die Einsatzhemmnisse von Aluminiumschaum-Sandwich wurden in einer Umfrage im industriellen Umfeld näher untersucht (Hommel et al. 2020). Dabei konnten fehlende Konstruktionskenntnisse mit dem Material als zweithäufigstes Einsatzhemmnis (nach dem hohen Preis) identifiziert werden. Im Rahmen der Umfrage wurde explizit der Wunsch nach effektiv handhabbaren und übersichtlichen Darstellungen sowie Empfehlungen beispielsweise von Einsatzmöglichkeiten, Gestaltungsrichtlinien, Verbindungsmöglichkeiten und Berechnungsansätzen für Aluminiumschaum-Sandwich genannt. Das spezielle Konstruktionswissen, das aufgrund der spezifischen Materialeigenschaften der Schaumstruktur notwendig ist, liegt bisher nicht in entsprechend komprimierter Form vor oder ist teilweise noch nicht ausreichend erforscht, weshalb die Verwendung des Materials erschwert und eingeschränkt wird.

Auf Grundlage der bereits identifizierten Hemmnisse für den Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich sowie dem nachgewiesenen Bedarf einer Unterstützung für das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich soll in diesem Beitrag nun geprüft werden, welche konkreten Inhalte aus konstruktions-technischer Perspektive notwendig sind, um die Herausforderungen beim Einsatz und Konstruieren zu verringern. Außerdem wird untersucht, in welcher Form diese Informationen aufbereitet und zugänglich gemacht werden sollen. Das Ziel dieses Beitrags ist die Beantwortung der folgenden Forschungsfrage:

Was sind notwendige Inhalte, um das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich zu unterstützen, und was ist eine geeignete Bereitstellungsform dieser Inhalte zum Überwinden der identifizierten Hemmnisse beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich?

3 Aufbau des Beitrags

Auf Grundlage einer Literaturrecherche sowie einer durchgeführten Umfrage zu Einsatzhemmnissen werden in Kapitel 4 zunächst die aktuell vorhandenen Hemmnisse beim Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich aufgezeigt und analysiert, um zu identifizieren, welche Hemmnisse mit einer methodischen Unterstützung abgebaut werden sollen. Der Fokus in diesem Beitrag liegt dabei auf den fehlenden Konstruktionskenntnissen, sodass die notwendigen Inhalte für eine Unterstützung beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich in Kapitel 5 hergeleitet werden. In Kapitel 6 folgt eine Übersicht über verschiedene Unterstützungsmöglichkeiten bei der Konstruktion, wie beispielsweise Konstruktionskataloge oder Konstruktionsrichtlinien. Anhand von zuvor definierten Anforderungen an die Unterstützung wird dabei bewertet, welche Art der Unterstützung die geforderten Inhalte bestmöglich vermitteln kann. Der Aufbau und die Hauptbestandteile dieser ausgewählten Konstruktionshilfe werden in Kapitel 7 kurz vorgestellt. Der Beitrag schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse und einem Ausblick über weitere notwendige Forschungstätigkeiten.

4 Hemmnisse beim Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich

Obwohl viele potenzielle Anwendungen existieren (siehe Kapitel 1) und Prototypen gefertigt wurden, wird Aluminiumschaum-Sandwich in Serienanwendungen kaum eingesetzt (Banhart et al. 2019, S. 71; Florek et al. 2014, S. 323). Ein Hauptgrund für den geringen Einsatz in der Industrie ist der Preis des Materials (Florek et al. 2014, S. 323). Außerdem sind die Anisotropie und die Streuung der mechanischen Eigenschaften aufgrund der herstellungsbedingten Inhomogenität in der Struktur weitere Aspekte, die zu einer geringen industriellen Akzeptanz führen (Nosko et al. 2010, S. 5900).

Um die Hemmnisse bei der Verwendung von Aluminiumschaum-Sandwich besser zu verstehen, wurde in Hommel et al. (2020, S. 930 ff.) eine Umfrage über die Einsatzhemmnisse und fehlenden

Informationen von Aluminiumschaum-Sandwich vorgestellt. Die 65 Teilnehmer waren vor allem der Automobilbranche und dem Maschinenbau zugeordnet, wobei eine gleichmäßige Verteilung der Unternehmensgrößen vorlag. Obwohl 89 % der Befragten das Material kannten, wurde es lediglich von einer knappen Hälfte aller Befragten überhaupt in der Materialauswahl berücksichtigt. Nur etwa ein Viertel (26 %) der Teilnehmer verwendeten Aluminiumschaum-Sandwich in früheren oder aktuellen Projekten. Als Gründe für die Nichtberücksichtigung des Materials wurde neben den hohen Kosten am häufigsten genannt, dass es den Konstrukteuren an Erfahrung beim Konstruieren mit AFS mangelt und spezielle Konstruktionskenntnisse nicht vorliegen. Außerdem sind geeignete Anwendungen aufgrund mangelnder Informationen über das Material nicht bekannt. Eine ausführliche Auflistung der genannten Einsatzhemmnisse ist in Bild 2 dargestellt. Diese Aussagen lassen sich nicht nur in der Literatur finden, sondern wurden auch von einem führenden Aluminiumschaum-Produzenten bestätigt.

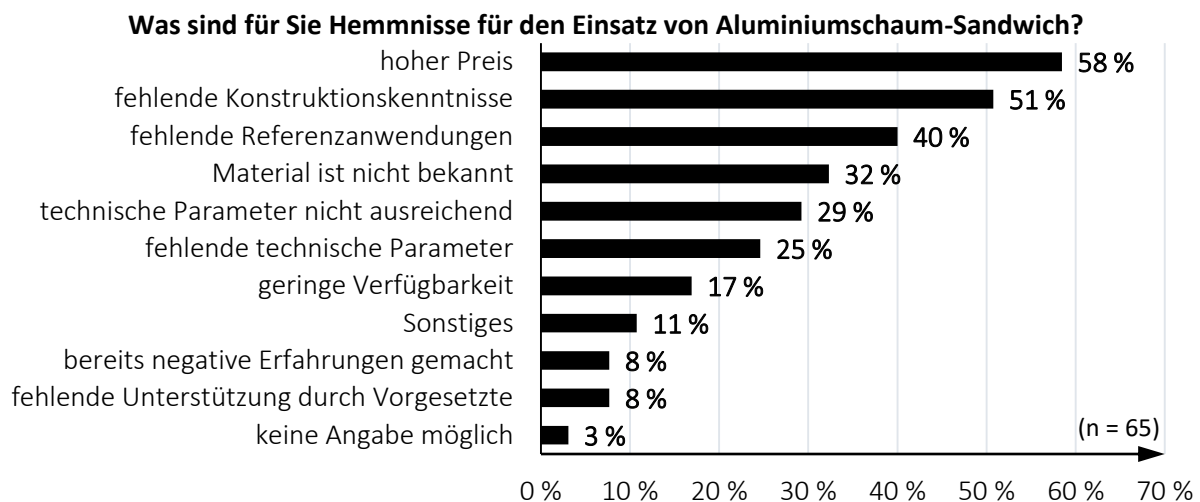


Bild 2: Hemmnisse für den Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich nach (Hommel et al. 2020, S. 933)

Die Kosten des Materials sind durch konstruktive Maßnahmen nicht direkt beeinflussbar. Es ist jedoch anzustreben, dass Aluminiumschaum-Sandwich zielgerichtet eingesetzt wird, sodass Anwendungsfälle gefunden werden, bei denen mehrere Vorteile des Materials genutzt werden können, um somit das Kosten-Nutzen-Verhältnis positiv zu beeinflussen und den Preis zu rechtfertigen. Mithilfe von Sparleichtbau-Strategien (vgl. Wiedemann 2007, S. 2) soll durch den AFS-Einsatz an den richtigen Stellen möglichst kostenneutral gearbeitet werden. Für diesen zielgerichteten Einsatz könnte eine Auswahlmethode eine geeignete Hilfestellung sein. Außerdem wird der Preis mit zunehmender Akzeptanz und Nutzung des Materials zukünftig weiter sinken (vgl. Hipke 2002, S. 63). Um den Mangel an Konstruktionswissen zu beheben, sind spezielle Konstruktionskenntnisse zunächst zu erarbeiten und schließlich durch eine geeignete Wissenssammlung bereitzustellen.

Erste Ideen existieren auch für die Umsetzung der gewünschten Referenzanwendungen, welche in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden können, indem potenzielle Anwendungen und entwickelte Demonstratoren sowie Serienanwendungen übersichtlich dargestellt und entsprechend der Materialeigenschaften die jeweiligen Vorteile aufgezeigt werden. Mit vorhandenen Referenzanwendungen und reduzierten Materialkosten wird sich die Zahl der umgesetzten Anwendungen erhöhen und sich somit die Bekanntheit von AFS steigern. Auch weitere Forschungsergebnisse und Veröffentlichungen in diesem Bereich tragen zusätzlich zur Bekanntheit des Materials bei.

Mithilfe von notwendigen Experimenten können genauere Materialkennwerte ermittelt und weitere Aussagen über den Aluminiumschaum getroffen werden. Die weiteren Einsatzhemmnisse sind nicht unmittelbar beeinflussbar und wurden in der referenzierten Umfrage auch nur vereinzelt angegeben. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass insbesondere der Mangel an Konstruktionskenntnissen sowie die fehlenden Referenzanwendungen einen Forschungsbedarf nahelegen. Der Hauptfokus liegt in diesem Beitrag auf den fehlenden Konstruktionskenntnissen und wie diese bereitgestellt werden

können. Der Inhalt und die Form für die am besten geeignete Unterstützungsmöglichkeit werden in den nachfolgenden Kapiteln erarbeitet.

5 Notwendige Inhalte einer Unterstützung für das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich

Um technische Produkte weiter zu entwickeln, müssen Informations- und Wissensdefizite bei der Gestaltung, bei der Werkstoffauswahl, bei der Dimensionierung von Bauteilen und hinsichtlich der Fertigungsmöglichkeiten verringert werden. Einem Konstrukteur muss dabei möglichst viel Wissen rechtzeitig zur Verfügung stehen, welches insbesondere in der Phase des Konzipierens notwendig ist, da zu diesem Zeitpunkt eine Vielzahl an relevanten Entscheidungen für ein Produkt getroffen werden (Schmidt und Puri 2001, S. 28). Bei der technischen Umsetzung von Leichtbauprojekten ist eine geeignete Übersicht über die Möglichkeiten des ausgewählten Werkstoffs eine große Unterstützung (Klein 2013, S. 11), ebenso wie Sammlungen von bereits bekannten Leichtbaulösungen und Anwendungsbeispielen (Schmidt und Puri 2001, S. 28).

Besondere Materialkombinationen wie Aluminiumschaum-Sandwich stellen aufgrund ihres Sandwichaufbaus und der charakteristischen Schaumstruktur spezielle Anforderungen an den richtigen Materialeinsatz und eine entsprechende Bauteilgestaltung. Daher sind spezifische Kenntnisse vor allem beim Konstruieren mit diesem Material erforderlich. Um das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich zu erleichtern, werden die für eine Unterstützung notwendigen Inhalte im Folgenden anhand einer Literaturrecherche, einer Umfrage und einem Interview mit einem Hersteller von Aluminiumschaum-Sandwich erarbeitet.

In der Literatur werden häufig die fehlenden Gestaltungsrichtlinien, Referenzanwendungen, Fertigungs- und Prozessparameter, Werkstoffkennwerte sowie Simulationsdaten bemängelt, welche allesamt zu einem verringerten industriellen Einsatz des Materials führen (u. a. Hipke et al. 2008, S. 24). Nach Hantelmann et al. (2015, S. 14) fehlen für die Fertigung von AFS-Bauteilen zunächst vor allem ausreichende Hinweise zur Gestaltung der entsprechenden Strukturen. Aber auch an die Bearbeitung von Aluminiumschaum-Sandwich werden besondere Ansprüche gestellt, welche die Konstrukteure mit diversen Herausforderungen konfrontieren (Bauernhansl et al. 2017, S. 668), sodass Erfahrungswerte und Fertigungsparameter wünschenswert sind. Aufgrund des anisotropen Aufbaus des Aluminiumschaum-Sandwichs und der charakteristischen Schaumstruktur innerhalb der Kernschicht bestehen unter anderem in der Verbindungstechnik und der Krafteinleitung Herausforderungen (Binz et al. 2018, S. 78; Hipke et al. 2007, S. 60 ff.). So sind beispielsweise besondere Vorkehrungen für Schraubverbindungen notwendig, da im Aluminiumschaum keine tragenden Gewinde erzeugt werden können. Somit sind Gewindeeinsätze erforderlich, und es muss darauf geachtet werden, dass der Schaum aufgrund seiner geringen Druckfestigkeit nicht beschädigt wird. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Verbindungstechnik von Sandwichstrukturen mit Metallschäumen wurde außerdem in einer VDI-Studie über Werkstoffinnovationen bestätigt (VDI 2014, S. 81). Nach Reuter (2014, S. 104) ist bei Verbundwerkstoffen zudem ein hohes Know-how bei der konstruktiven Gestaltung notwendig.

Neben explizit genannten Inhalten für eine Unterstützung von AFS-Konstruktionen ist auch eine Analyse von Unterstützungen zu anderen Materialkombinationen oder Bauweisen hilfreich, um zu prüfen, ob hier ein Transfer der Inhalte möglich ist. So werden für die Unterstützung der Entwicklung additiv gefertigter Bauteile beispielsweise folgende Informationen verwendet, welche ebenfalls für eine Unterstützung bei AFS nützlich sein können: Werkstoffeigenschaften/Materialdaten, allgemeine Grundlagen der Fertigung, verschiedene Herstellungsverfahren, Oberflächen- und Fertigungsgenauigkeiten, beispielhafte Anwendungen, Gründe für einen zweckmäßigen/wirtschaftlichen Einsatz, Konstruktionsrestriktionen/-regeln, X-gerechte Gestaltung, Möglichkeiten der Funktionsintegration, Methodik zur Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens, spezifische Verfahrensbeschreibungen und technische Möglichkeiten, Simulationshinweise sowie analytische Berechnungsmethoden (Weiss 2019, S. 63 ff.).

Im Rahmen der bereits erwähnten Umfrage (siehe Kapitel 4) wurden die Teilnehmer zum Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich befragt (Hommel et al. 2020, S. 930 ff.), wobei einige Aspekte bisher noch nicht vollständig betrachtet wurden. Diese noch nicht veröffentlichten Aussagen zu fehlenden Informationen und gewünschten Unterstützungen beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich werden an dieser Stelle und im nächsten Kapitel aufgeführt. Um zunächst die notwendigen Inhalte für eine Konstruktionsunterstützung aus Anwendersicht zu erhalten, wurden die Teilnehmer in einer Freitextfrage nach den für sie fehlenden Informationen befragt. Die Antworten wurden entsprechend gruppiert und sind in Bild 3 zusammengefasst. Am häufigsten wurden fehlende Gestaltungsrichtlinien und nicht ausreichend vorhandene Werkstoffkennwerte bemängelt. Aber auch Informationen zur Herstellung, Berechnung und verschiedenen Bearbeitungsmöglichkeiten fehlen. Die Umfrage bestätigt somit, dass die in der Literatur gewünschten Inhalte weiterhin gefordert werden.

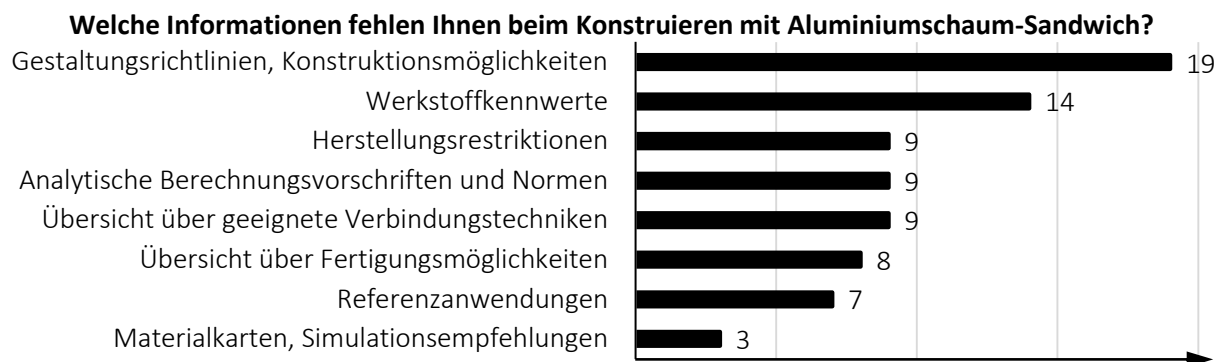


Bild 3: Fehlende Inhalte für das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich (mit Häufigkeit der Nennung in einer im Jahre 2019 durchgeführten Umfrage zum Einsatz von Aluminiumschaum-Sandwich)

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in Gesprächen mit einem führenden deutschen Materialhersteller von Aluminiumschaum-Sandwich bestätigt. Auch hier wurden insbesondere der Mangel an Konstruktionswissen und die oft unzureichenden Informationen bei den Anwendern selbst als Gründe genannt, warum das Material häufig nicht berücksichtigt wird. Ein gesammeltes Wissen soll die Kunden dazu befähigen, geeignete Einsatzszenarien zu identifizieren und selbstständig Konstruktionen mit dem Material zu erstellen.

Zusammenfassend wurden folgende notwendigen Inhalte für eine zukünftige Konstruktionsunterstützung identifiziert und entsprechend ihrer Reihenfolge im Konstruktionsprozess aufgelistet:

- **Herstellungsrestriktionen** (verschiedene Herstellungsverfahren, mögliche Geometrien, Plattendicken, Maßgenauigkeit)
- **Werkstoffkennwerte**
- **Referenzanwendungen** (geeignete Anwendungsfelder, beispielhafte Umsetzungen einzelner Funktionen sowie Möglichkeiten der Funktionsintegration, Gründe für zweckmäßigen Einsatz)
- **Gestaltungsrichtlinien** (AFS-gerechte Gestaltung, Konstruktionsvorgaben/-möglichkeiten)
- **Analytische Berechnungsvorschriften und Normen**
- **Simulationsempfehlungen** (Spezifikationen für CAD-Konstruktionen, Simulationshinweise, ausreichende Materialkarten, Topologieoptimierungsmöglichkeiten)
- **Mögliche Fertigungsverfahren** (Übersicht der Bearbeitungsverfahren sowie Empfehlungen, z. B. Prozessparameter)
- **Geeignete Verbindungstechniken** (Übersicht verschiedener Fügeverfahren für unterschiedliche Anforderungen mit Vor-/Nachteilen, Möglichkeiten der Krafteinleitung in das Sandwich)

Bei ausreichendem Wissen über Werkstoffkennwerte, Fertigungs- und Fügetechnologien sowie Referenzanwendungen wird auch die Einsatzbereitschaft für Aluminiumschäume im industriellen Umfeld weiter steigen (Hipke et al. 2008, S. 24). Hierfür ist es notwendig, dass die relevanten Inhalte auch in der richtigen Form aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden. Die unterschiedlichen Unterstützungsmöglichkeiten und -methoden werden daher im nächsten Kapitel untersucht.

6 Unterstützungsmöglichkeiten für das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich

Im Bereich der Konstruktionsmethodik ist das übergeordnete Ziel der Forschung, die Industrie durch das Entwickeln von Wissen, Methoden und Werkzeugen zu unterstützen, sodass die Chancen für die Herstellung eines erfolgreichen Produkts verbessert werden können (Blessing et al. 1998, S. 42). Das erarbeitete Wissen kann dabei häufig nicht gewinnbringend eingesetzt werden, da es für die Anwender, besonders für die Konstrukteure, gar nicht oder nicht in einer geeigneten Form zur Verfügung steht (VDI 2222-2 1982, S. 4). Nachdem im vorhergehenden Kapitel die notwendigen Inhalte für eine Konstruktionsunterstützung für Aluminiumschaum-Sandwich hergeleitet wurden, ist im nächsten Schritt eine geeignete Bereitstellungsform zu identifizieren, damit die gewünschten Informationen zur richtigen Zeit in einer nützlichen Form zur Verfügung stehen.

Insbesondere beim methodischen Konstruieren ist eine organisierte Speicherung von Informationen notwendig (VDI 2222-2 1982, S. 2), weshalb an die zu entwickelnde Methode genau definierte Anforderungen gestellt werden, um zu beurteilen, ob die Methode auch wirklich eine Unterstützung bietet. Keller und Binz (2009) haben eine Übersicht über allgemeine Anforderungen an Konstruktionsmethodiken erstellt und in acht Gruppen aufgeteilt (Überprüfbarkeit, praktische Relevanz und Konkurrenzfähigkeit, wissenschaftliche Sinnhaftigkeit, Verständlichkeit, Nützlichkeit, Problemspezifität, Strukturiertheit und Kompatibilität sowie Flexibilität). Daraus ergeben sich weitere Anforderungsbereiche wie beispielsweise Lernbarkeit, Anwendbarkeit oder Effektivität (Keller und Binz 2009, S. 2-211). Die Unterstützung für das Konstruieren mit AFS soll personenunabhängig, ortsunabhängig und einfach anzuwenden sein, indem die Inhalte kompakt und verständlich dargestellt sind sowie einen einfachen Zugriff ermöglichen. Der Umfang der Wissensspeicherung ist so zu wählen, dass er für die Konstrukteure handhabbar ist und gleichzeitig möglichst alle notwendigen Informationen für das Konstruieren mit AFS enthält. Dabei soll ein spezielles Fachwissen nicht vorausgesetzt werden, sodass die Unterstützung für unerfahrene Mitarbeiter leicht verständlich ist, beispielsweise durch eine schrittweise Vorgehensweise (VDI 2222-1 1997, S. 23), und zugleich für Experten einen Mehrwert bietet.

Produktentwicklungsprozesse können durch die Bereitstellung von Informationsträgern unterstützt werden, die sich in Personen, visuelle Träger oder Tonträger unterteilen lassen. Zu den visuellen Informationsträgern gehören Kataloge, Datenbanken, Bücher oder sonstige Texte (Ehrlenspiel und Meerkamm 2017, S. 659), die aufgrund ihrer Handhabbarkeit im Fokus dieser Arbeit stehen und nach Heinevetter (1999, S. 58) bewährte Hilfsmittel für den Konstrukteur sind. In der VDI-Richtlinie 2221 sind verschiedene Methoden zum Entwickeln von Lösungsideen zusammengefasst (VDI 2221 1993, S. 34 ff.) und in Feldhusen und Grote (2013) werden diese Produktentwicklungsmethoden detailliert beschrieben. Auch in Köhler (2002, S. 24) werden Möglichkeiten zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses genannt, beispielsweise konventionelle Hilfsmittel wie Konstruktionsrichtlinien, Konstruktionskataloge, Fachbücher, Regelwerke, Gestaltungsrichtlinien aber auch Rechnerunterstützungen oder organisatorische Maßnahmen wie eine Mitarbeiterqualifizierung oder Konstruktionsberatung.

In der bereits im vorherigen Kapitel beschriebenen Umfrage wurden Anwender von AFS befragt, wie das Konstruieren mit diesem Material erleichtert werden kann. In dieser Freitextfrage wurden Konstruktionsrichtlinie/Leitfaden (14 Nennungen), Konstruktionskatalog (1), Beispielsammlung mit Referenzanwendungen (5), Berechnungshilfen und CAD-Programmerweiterungen (5), Dienstleistung in Form einer Konstruktionsberatung (1) sowie allgemeine Wissenssammlungen (4) genannt.

Auf Grundlage dieser Umfrageergebnisse sowie nach einer Sichtung der Fachliteratur wurden zunächst verschiedene Möglichkeiten für eine Unterstützung in Tabelle 1 zusammengefasst. Diese Sammlung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, beinhaltet jedoch die von den Anwendern gewünschten Hilfsmittel sowie gängige Methoden der Literatur. Um die für diese Arbeit am besten geeignete Unterstützung zu identifizieren, müssen die zuvor erläuterten Anforderungen berücksichtigt werden. So würde beispielsweise ein Fachbuch alle notwendigen Inhalte bereitstellen können, jedoch genügt das Fachbuch aufgrund des Umfangs nicht der Anforderung einer kompakten und handlichen Ausarbeitung, weshalb ein Leitfaden vorzuziehen ist.

Tabelle 1: Sammlung an Unterstützungsmöglichkeiten für das Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich

• Anforderungsliste	• Dienstleistung (Beratung, Schulung)	• Konstruktionsrichtlinie als Leitfaden
• Berechnungshilfe	• Fachbuch	• Normen und Richtlinien
• Beispielsammlung	• Gestaltungsregeln und -richtlinien	• Rechnerunterstützte Datenbank
• Checkliste	• Konstruktionskatalog/Lösungskatalog	• Übersichtslisten (z. B. Materialdaten)

Im Folgenden wird auf die Unterstützungsmöglichkeiten *Gestaltungsrichtlinien*, *Konstruktionskatalog* sowie *Konstruktionsrichtlinie als Leitfaden* im Detail eingegangen, da insbesondere diese den Anforderungen einer Unterstützung (kompakt, übersichtlich, handhabbar etc.) gerecht werden und bereits bewährte Hilfsmittel sind. An dieser Stelle ist außerdem anzumerken, dass diese Varianten sowohl papierbasiert als auch digital, d. h. als rechnerunterstützte Datenbank, umgesetzt werden können.

Gestaltungsrichtlinien (Design for X) unterstützen die Grundregeln zur Gestaltung (eindeutig, einfach und sicher) und helfen, den jeweiligen Bedingungen gerecht zu werden (Pahl et al. 2007, S. 393). Sie werden auch als Konstruktionsregeln bezeichnet und enthalten Erfahrungen über Lösungen und Vorgehensweisen, die sich bei früheren Konstruktionstätigkeiten bewährt haben. Gestaltungsrichtlinien sind vor allem für unerfahrene Konstrukteure wertvoll, da sie konkrete Hinweise auf potenzielle Schwachstellen sowie geeignete Verbesserungen enthalten und somit zu verbesserten Gestaltungsvarianten führen. Konstruktionsregeln werden meist als Lösungssammlungen dokumentiert, wobei digitale Umsetzungen bisher nur im Einzelfall realisiert wurden (VDI 2223 2004, S. 66 f.). Beispielhafte Gestaltungsrichtlinien und typische gut-schlecht-Beispiele sind in Pahl et al. (2007, S. 393 ff.) zu finden. Ein **Konstruktionskatalog** nach Roth (1994, S. 421) ist ein Wissensspeicher, der nach methodischen Gesichtspunkten erstellt wird und eine geordnete Sammlung von bekannten und bewährten Lösungen für konstruktive Aufgaben enthält (Pahl et al. 2007, S. 150), sodass der Konstrukteur beim methodischen Konstruieren unterstützt wird (VDI 2222-1 1997, S. 27). Konstruktionskataloge sind meist in Tabellenform gegeben und bestehen aus einem Gliederungs-, einem Haupt- und einem Zugriffsteil sowie gegebenenfalls aus einem Anhang, weshalb ein gezielter Zugriff auf den Inhalt möglich ist (Roth 1994, S. 421). Um eine benutzerfreundliche Anwendung und somit einen schnellen Zugriff auf die Informationen zu gewährleisten, ist ein Konstruktionskatalog einheitlich gestaltet und im Rahmen gesetzter Grenzen vollständig, jedoch auch immer erweiterungsfähig (VDI 2222-2 1982, S. 4). Das Wissen aus Konstruktionskatalogen wird zunehmend auf verschiedene Datenbanken übertragen, sodass eine Lösungssuche über den Rechner möglich ist (VDI 2222-1 1997, S. 38).

Eine **Konstruktionsrichtlinie** enthält Vorgaben oder Erfahrungswerte, welche im Wesentlichen auf dem Wissen der Mitarbeiter zum Auslegen oder zum Lösen von konstruktiven Aufgaben basieren (Conrad 2013, S. 74). In Form eines Leitfadens geben Konstruktionsrichtlinien den roten Faden vor und gewähren ausreichend Wahlmöglichkeiten (Pesendorfer 2014, S. 15 f.), weshalb die Inhalte als Empfehlungen zu sehen sind, die berücksichtigt werden sollen (Koller 1985, S. 132). Bereits begangene Fehler sollen nicht nochmals wiederholt werden, sodass eine Konstruktionsrichtlinie nach Pesendorfer (2014, S. 11) als Dokumentation des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses angesehen werden kann. Mithilfe einer Konstruktionsrichtlinie können sich insbesondere unerfahrene Konstrukteure schneller in das jeweilige Themengebiet einarbeiten (Conrad 2013, S. 76). Außerdem erleichtern Konstruktionsrichtlinien die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Abteilungen oder mit externen Unternehmen (Pesendorfer 2014, S. 166). Langfristig führen bewährte Konstruktionsrichtlinien zu einer Sicherstellung der Systemzuverlässigkeit (Bertsche und Lechner 2004, S. 5).

Die drei zuvor beschriebenen Unterstützungsmöglichkeiten sind allesamt grundsätzlich geeignet und können insbesondere die konstruktiven Möglichkeiten nützlich darstellen. Gestaltungsrichtlinien alleine würden jedoch beispielsweise die Herstellung und die daraus resultierenden Besonderheiten des Materials nicht ausreichend berücksichtigen. Sollen weitere notwendige Inhalte wie Materialkennwerte, Simulationsempfehlungen oder Fertigungsparameter Berücksichtigung finden, so lassen sich diese besonders in Form einer Konstruktionsrichtlinie bereitstellen, welche aufgrund ihrer Heuristik und schrittweisen Anwendung zudem einfacher zu nutzen ist als ein Konstruktionskatalog. Weiterhin sei angemerkt, dass sich die Mehrheit der Teilnehmer der anfangs erwähnten Umfrage eine Konstruktionsrichtlinie in Form eines Leitfadens wünscht.

7 Konzeption der zu entwickelnden Unterstützung

Die zu erstellende Konstruktionsrichtlinie soll eine Hilfestellung beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich bieten und durch die Bereitstellung der in Kapitel 5 identifizierten Inhalte den kompletten Konstruktionsprozess unterstützen. Als Nachschlagewerk soll ein schneller Zugriff auf Hinweise sowie Empfehlungen, insbesondere zur Gestaltung, Auslegung und Fertigung von Bauteilen aus AFS ermöglicht werden. Zunächst ist ein printfähiges Dokument zu entwickeln, um jederzeit an jedem Ort einsehbar zu sein, wobei zukünftig eine digitale Umsetzung der Richtlinie ebenso möglich ist.

Bei einem Vergleich der geplanten Bestandteile der Konstruktionsrichtlinie für Aluminiumschaum-Sandwich mit bewährten Konstruktionsrichtlinien anderer Materialien lassen sich viele thematische Überschneidungen feststellen. Beispielhafte Konstruktionsrichtlinien, welche inhaltliche Ähnlichkeiten mit der zu entwickelnden Richtlinie besitzen, sind die *Konstruktionsrichtlinie Blech* der Firma Trumpf (2011) sowie die Richtlinie *Honeycomb Sandwich Design Technology* der Firma Hexcel (2000). Auch hier lassen sich Inhalte zur Materialauswahl, mechanische Eigenschaften, Empfehlungen zur Herstellung, Hinweise und Möglichkeiten zur Gestaltung, Empfehlungen zum Konstruieren, Informationen zur fertigungstechnisch optimalen Konstruktion und zu Fügetechniken sowie einfache Berechnungsformeln finden.

Die Konstruktionsrichtlinie für Aluminiumschaum-Sandwich soll in vier Abschnitte unterteilt werden. Der erste Teil wird grundlegende Informationen zur Richtlinie und dem Herstellungsprozess, Werkstoffkennwerte sowie Standardprodukte und mögliche Geometrien der Sandwichbauteile enthalten. Anhand von Referenzanwendungen werden die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und das Einsatzpotenzial verdeutlicht sowie Denkanstöße für neue Anwendungen gegeben. Im zweiten Abschnitt werden Prinzipien und Empfehlungen zur Konstruktion vorgestellt. Bei der Darstellung von verschiedenen Gestaltungsprinzipien werden sowohl allgemeine Prinzipien zum leichtbaugerechten Konstruieren mit AFS erläutert als auch fertigungsgerechte Gestaltungsrichtlinien anhand von gut-schlecht-Beispielen visualisiert. Zusätzlich soll eine Vorgehensweise zur Auswahl eines geeigneten Fügeverfahrens den Konstrukteur in der Konzeptphase unterstützen. Außerdem werden die Kraft-einleitung, verschiedene Stoßarten und Randabschlüsse betrachtet und die jeweiligen Möglichkeiten übersichtlich dargestellt. Berechnungsansätze für die häufigsten Belastungsfälle von Sandwichbauteilen werden im dritten Teil zusammengefasst, um eine Vorauslegung von Strukturen aus Aluminiumschaum-Sandwich zu unterstützen. Anschließend werden Hinweise und Erfahrungswerte zur Durchführung von Simulationen angegeben, um den Modellaufbau zu erleichtern. Materialkarten für eine möglichst genaue Simulation sollen zudem bereitgestellt werden. Im letzten Abschnitt der Konstruktionsrichtlinie werden mögliche Bearbeitungsverfahren sowie praktische Empfehlungen, Erfahrungswerte und technologische Grenzen von Fertigungstechniken bei AFS erläutert. Vor allem für die Gruppen *Trennen und Fügen* sind verfahrensspezifische Empfehlungen anhand von bewährten Prozessparametern hilfreich.

Mit dieser Aufteilung und dem beschriebenen Rahmenwerk der Konstruktionsrichtlinie können alle notwendigen Inhalte dargestellt werden. Exemplarische Bestandteile dieser Konstruktionsunterstützung sind in Bild 4 dargestellt. Anhand von Herstellerinformationen, der Literatur und durchzuführenden Versuchen werden diese Inhalte zukünftig erarbeitet und bereitgestellt.

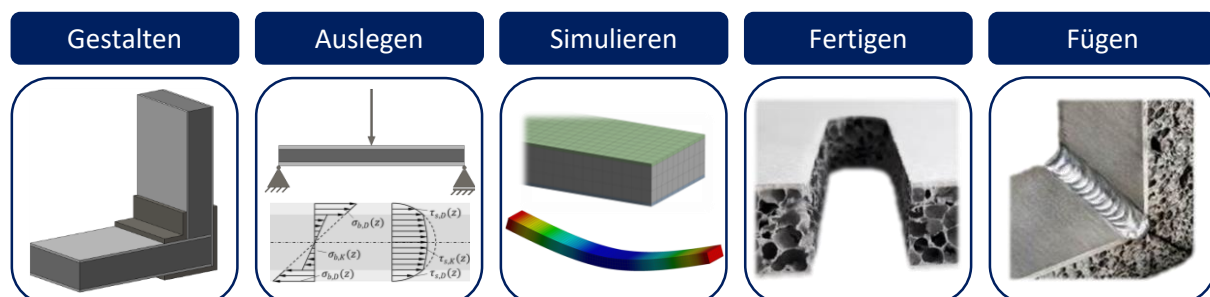


Bild 4: Exemplarische Bestandteile der Konstruktionsrichtlinie

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden notwendige Inhalte für eine Unterstützung beim Konstruieren mit Aluminiumschaum-Sandwich identifiziert und mögliche Bereitstellungsformen für die Umsetzung aufgezeigt. Anhand von Wünschen der potenziellen Anwender und definierten Anforderungen an die Unterstützung wurde eine erweiterte Konstruktionsrichtlinie als geeignetes Hilfsmittel ausgewählt. In Form eines Leitfadens soll die zu entwickelnde Konstruktionsrichtlinie die Konstruktion und Fertigung von Bauteilen aus Aluminiumschaum-Sandwich methodisch unterstützen, indem sie Hinweise und Empfehlungen unter anderem zu Materialeigenschaften, Anwendungsbeispielen, Gestaltungsprinzipien, Berechnungsmöglichkeiten sowie anwendbare Fertigungsverfahren gibt.

Weitere notwendige Forschungsaktivitäten liegen in der Erarbeitung und Aufbereitung der Inhalte. Hierfür müssen die Empfehlungen von Herstellern und der Literatur entsprechend aufbereitet und visualisiert werden. Fehlende Inhalte, wie beispielsweise eine Unterstützung bei der Auswahl einer geeigneten Fügetechnik oder Verbindungsfestigkeitswerten müssen zunächst noch entwickelt bzw. experimentell ermittelt werden. Letztendlich muss mithilfe einer Evaluation untersucht werden, ob die Konstruktionsrichtlinie tatsächlich eine zweckmäßige Unterstützung beim Konstruieren darstellt.

Zukünftige Forschungsarbeiten liegen dann auch im Bereich der Erweiterung und Weiterentwicklung der Konstruktionsrichtlinie. So sind beispielsweise digitale Ergänzungen wie eine digitale Checkliste für einen geeigneten Materialeinsatz oder ein Berechnungsprogramm hilfreich, ebenso wie die Entwicklung einer Online-Plattform mit Informationen für das AFS-gerechte Konstruieren.

Literatur

- Banhart und Seeliger 2012 BANHART, John; SEELIGER, Hans-Wolfgang: *Recent Trends in Aluminum Foam Sandwich Technology*. In: *Advanced Engineering Materials* (2012), Vol. 14, Nr. 12, S. 1082-1087.
- Banhart et al. 2019 BANHART, John; GARCÍA-MORENO, Francisco; HEIM, Korbinian; SEELIGER, Hans-Wolfgang: *Light-Weighting in Transportation and Defence Using Aluminium Foam Sandwich Structures*. In: GOKHALE, Amol A.; PRASAD, N. Eswara; BASU, Biswajit (Hrsg): *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation*. Singapur: Springer, 2019, S. 61-72.
- Banhart 2018 BANHART, John: *Production of Metal Foams*. In: *Comprehensive Composite Materials II* (2018), Vol. 4, S. 347-363.
- Bauernhansl et al. 2017 BAUERNHANSL, Thomas; SCHUSTER, Manuel; BINZ, Hansgeorg; HONOLD, Clemens; ROTH, Daniel: *Fräskanttechnik bei Aluminium-Sandwichstrukturen*. In: *WT Werkstatttechnik Online* (2017), Ausgabe 9. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, S. 668-673.
- Baumeister et al. 1994 BAUMEISTER, Joachim; BANHART, John; WEBER, Markus: *Verfahren zur Herstellung eines metallischen Verbundwerkstoffs*. Deutsches Patent DE 4426627, 1994.
- Bertsche und Lechner 2004 BERTSCHE, Bernd; LECHNER, Gisbert: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. 3. Auflage, Berlin Heidelberg New York: Springer, 2004.
- Binz et al. 2018 BINZ, Hansgeorg; HONOLD, Clemens; LAUFER, Felix; HOMMEL, Patrick; ROTH, Daniel; BAUERNHANSL, Thomas; SCHUSTER, Manuel: *Konstruktion und Herstellung eines Auslegers aus Aluminiumschaum-Sandwich unter Anwendung der Fräskanttechnik*. In: *Konstruktion*, Ausgabe 07-08/2018, S. 78-82.
- Blessing et al. 1998 BLESSING, Lucienne T.M.; CHAKRABARTI, Amaresh; WALLACE K.M.: *An Overview of Descriptive Studies in Relation to a General Design Research Methodology*. In: FRANKENBERGER, Eckart; BIRKHOFER, Herbert; BADKE-SCHAUB, Petra (Hrsg.): *Designers: The key to successful product development*. London: Springer-Verlag, 1998, S. 42-56.

- Conrad 2013 CONRAD, Klaus-Jörg: *Grundlagen der Konstruktionslehre, Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik*. 6. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- Ehrlenspiel und Meerkamm 2017 EHRENSPIEL, Klaus; MEERKAMM, Harald: *Integrierte Produktentwicklung: Denkläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2017.
- Feldhusen und Grote 2013 FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- Florek et al. 2014 FLOREK, Roman; SIMANČÍK, Fero; HARNÚŠKOVÁ, Jana; OROVČÍK, L.; DVORÁK, Tomáš; NOSKO, Martin; TEKEL, Tibor: *Injection molded plastics with aluminium foam core*. In: *Procedia Materials Science* (2014), Vol. 4, S. 323-327.
- Hantelmann et al. 2015 HANTELMANN, Cord; FRITZSCHE, Sebastian; MICHAÏLOV, Vesselin; RISSE Steffen; BOYWITT, Ralf; PAULINUS, Dietmar: *Gestaltungshinweise für geschweißte Konstruktionen aus Aluminiumschäumen*. Abschlussbericht, 2015.
- Havel 2019 HAVEL METAL FOAM GMBH: Batteriegehäuse der Zukunft aus Aluminiumschaum für die Automobilindustrie, https://havel-mf.com/unternehmen/downloads?file=files/bilder/3%20Unternehmen/6%20Downloads/D_20190815_HMF_Batterie-Geha%CC%88use.pdf (Abgerufen am 16.10.2020).
- Heinevetter 1999 HEINEVETTER, Gerd Willi: *Bereitstellung von Erfahrungswissen für die Entwicklung umweltgerechter Erzeugnisse*. Technische Universität Dresden, Dissertation, 1999.
- Hexcel 2000 HEXCEL: *HexWeb™ Honeycomb Sandwich Design Technology*, 2000.
- Hipke 2002 HIPKE, Thomas: *Analyse, Bewertung und Eignung von Aluminiumschäumen für die Werkzeugmaschinenkonstruktion*. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2002.
- Hipke et al. 2007 HIPKE, Thomas; LANGE, Günther; POSS, René: *Taschenbuch für Aluminiumschäume*. 1. Auflage, Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2007.
- Hipke et al. 2008 HIPKE, Thomas; LANGE, Günther; POSS, René: *Leichtbau und Dämpfung vereint*. In: *Lightweight Design* (2008), S. 28-32.
- Hohlfeld et al. 2018 HOHLFELD, Jörg; HIPKE, Thomas; SCHULLER, Friedrich: *Sandwich Manufacturing with Foam Core and Aluminum Face Sheets - A New Process without Rolling*. In: *Materials Science Forum* (2018), Vol. 993, S. 3-10.
- Hommel et al. 2019 HOMMEL, Patrick; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg: *Potenziale der Fräskantentechnik beim Fügen von Platten aus Aluminiumschaum-Sandwich*. In: BINZ, Hansgeorg; BERTSCHE, Bernd; BAUER, Wilhelm; RIEDEL, Oliver; SPATH, Dieter; ROTH, Daniel (Hrsg.): *5. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*. Stuttgart, 2019, S. 43-52.
- Hommel et al. 2020 HOMMEL, Patrick; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg: *Deficits in the Application of Aluminum Foam Sandwich: An Industrial Perspective*. In: *Proceedings of the DESIGN 2020 – 16th International Design Conference*, 26.-29. Oktober 2020, Cambridge University Press, S. 927-936.
- Keller und Binz 2009 KELLER, Alexander; BINZ, Hansgeorg: *Requirements on Engineering Design Methodologies*. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design* (2009), S. 203-214.
- Klein 2013 KLEIN, Bernd: *Leichtbau-Konstruktion, Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*, 10. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- Koller 1985 KOLLER, Rudolf: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau, Grundlagen des methodischen Konstruierens*. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1985.
- Köhler 2002 KÖHLER, Peter: *Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau*. 1. Auflage, Würzburg: Vogel, 2002.

- Nosko et al. 2010 NOSKO, Martin; SIMANČÍK, Fero; FLOREK, R.: *Reproducibility of aluminum foam properties: Effect of precursor distribution on the structural anisotropy and the collapse stress and its dispersion*. In: *Materials Science and Engineering A* (2010), Vol. 527 Nr. 21-22, S. 5900-5908.
- Orovčík et al. 2016 OROVČÍK, L.; NOSKO, Martin; KOVÁČIK, Jaroslav; DVORÁK Tomáš; STEPANEK, Matej; SIMANČÍK, Fero: *Effects of chemical composition on the pore structure and heat treatment on the deformation of PM aluminium foams 6061 and 7075*. In: *Metallic Materials* (2016), Vol. 54, Nr. 6, S. 463-470.
- Pahl et al. 2007 PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung*. 7. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- Pesendorfer 2014 PESENDORFER, Klaus: *Konstruktionsrichtlinien, erstellen, implementieren und anwenden*. Aichkirchen: pedo.engineering, 2014.
- Reuter 2014 REUTER, Martin: *Methodik der Werkstoffauswahl – Der systematische Weg zum richtigen Material*. 2., aktualisierte Auflage, München: Carl Hanser Verlag. 2014.
- Roth 1994 ROTH, Karlheinz: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band 2: Konstruktionskataloge*. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994.
- Seeliger 2011 SEELIGER, Hans-Wolfgang: *AFS-Weiterentwicklung erreicht Serienreife: Aluminiumschaum frisch vom Band*. In: *Aluminium Kurier News 03/2011*, S. 16.
- Schmerler et al. 2017 SCHMERLER, Rico; GEBKEN, Tobias; KALKA, Sebastian; REINCKE, Tobias: *Funktionsintegriertes Batteriegehäuse für Elektrofahrzeuge*. In: *Lightweight Design (2017)*, Ausgabe 5, S. 32-37.
- Schmidt und Puri 2001 SCHMIDT, Winfried; PURI, Werner: *Betrachtungen zur Konzeptphase im Konstruktionsprozess von Leichtbauteilen*. In: MEERKAMM, Harald (Hrsg.): *Proceedings of the 12th Symposium on Design for X*. Erlangen, 2001, S. 21-28.
- Schuller et al. 2017 SCHULLER, Friedrich; HOHLFELD, Jörg; HIPKE, Thomas: *Sandwich manufacturing with foam core and coversheets out of aluminium - A new process without rolling*. In: *10th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*. Nanjing, China, 15.-17. September 2017.
- Sviridov 2011 SVIRIDOV, Alexander: *Leichtbau mit Aluminiumschaumsandwich: Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen*. Technische Universität Cottbus, Dissertation, 2011.
- Trumpf 2011 TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG: *Konstruktionsrichtlinie Blech 1009-1*. Ditzingen, Ausgabe 10/2011.
- VDI 2014 VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI): *Studie der Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung*. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Materials Engineering, März 2014.
- VDI 2221 1993 VDI 2221 Mai 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2222-1 1997 VDI 2222 Blatt 1 Juni 1997. *Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2222-2 1982 VDI 2222 Blatt 2 Februar 1982. *Konstruktionsmethodik: Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. Berlin: Beuth Verlag.
- VDI 2223 2004 VDI 2223 Januar 2004. *Methodisches Entwerfen technischer Produkte*. Berlin: Beuth Verlag.
- Weiss 2019 WEISS, Florian: *Untersuchung des Entwicklungsprozesses für additiv gefertigte Bauteile mittels Bereitstellung einer elementaren Informationsstruktur*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2019.
- Wiedemann 2007 WIEDEMANN, Johannes: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. 3. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.

Entwicklung einer situativen Entwicklungsmethodik – ein hybrider Ansatz zur agilen Transformation im Technischen Design

Development of a situational development methodology - a hybrid approach for agile transformation in technical design

Florian Reichelt¹, Daniel Holder¹, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Forschungs- und Lehrgebiet

Technisches Design, Stuttgart, Deutschland

florian.reichelt@iktd.uni-stuttgart.de

daniel.holder@iktd.uni-stuttgart.de

thomas.maier@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): In den vergangenen Jahren konnte eine sukzessive Zunahme der Anwendung agiler Methoden in der physischen Hardwareentwicklung wahrgenommen werden. Diese Anwendung erfolgte zuerst in Pilotprojekten. Derzeit findet die Ausweitung agiler Methoden im unternehmensweiten Sinne statt. Für eine organisationsweite Anwendung agiler Methoden existieren verschiedene Frameworks, wie SAFe oder LeSS. Zahlreiche Studien und Casestudies zeigen jedoch zunehmend die Grenzen bei der derzeitigen Umsetzung solcher Transformationsansätze auf, wie z. B. Missverständnisse der agilen Werte oder organisatorische Limitationen. Ziel dieses Beitrags ist es einerseits einen Überblick über derzeit bekannte Herausforderungen bei der Agilisierung mittels recherchierter Studien und Casestudies zu geben. Andererseits wird der Ansatz einer hybriden Methodik, basierend auf Ergebnissen einer detaillierten Expertenbefragung, hergeleitet. Des Weiteren wird ein Ausblick auf die zukünftigen Forschungsarbeiten im Bereich einer situativen Entwicklungsmethodik im Technischen Design gegeben, welche den Nutzer des Produkts verstärkt in den Mittelpunkt des agilen Entwicklungsprozesses stellt.

Keywords (deutsch):

Agile Produktentwicklung, Technisches Design, nutzerzentrierte Entwicklung

Abstract (english): In recent years, a continuous increase in the use of agile methods in physical hardware development could be recognized. Initially, this application occurs in pilot projects. Currently, the expansion of agile methods in a company-wide sense is taking place. For an organizational application of agile methods different frameworks exist, such as SAFe or LeSS. However, numerous studies and case studies increasingly show the limits of the current implementation of such transformation approaches, such as misunderstanding of agile values or organizational limitations. The aim of this contribution is to give on the one hand an overview of currently known challenges. Therefore, researched studies and case studies will be used. On the other hand, the approach of a hybrid methodology based on the results of a detailed expert survey is derived. Furthermore, an outlook on future research in the area of a situational development methodology in technical design is given, which takes the user more in the focus of the agile development process.

Keywords (english):

Agile product development, technical design, user-centred development

1 Einleitung

Auch wenn agile Methoden der Produktentwicklung ihren Ursprung in der Softwareentwicklung haben, werden sie zunehmend in der technischen Entwicklung von cyber-physischen Produkten und Hardware angewendet (Atzberger et.al. 2019; digital.ai 2020; Heerwagen 2018; Komus et. al 2020). Die Einführungsphase dieser Agilisierung in der hardwarebezogenen Entwicklung zeichnete sich vor allem durch Pilotprojekte aus. Diese Phase haben viele Unternehmen derzeit schon überwunden und planen, agile Methoden im gesamten Unternehmen zu implementieren (Atzberger et. al 2020; Peters et. al. 2020). Für die Einführung agiler Methoden auf Unternehmensebene wird vermehrt das sog. Scaling – die Skalierung – agiler Methoden vorgenommen (Atzberger et al. 2020; Dikert et al. 2016; Komus et. al 2020; Putta et. al. 2018; Mathis 2018). Dieser Prozess wird als agile Transformation bezeichnet.

Nicht nur im Bereich der wirtschaftlichen Interessen geraten Methoden und Ansätze der Skalierung agiler Prinzipien in den Fokus, sondern auch in der wissenschaftlichen Forschung. Die in den letzten Jahren durchgeführten und veröffentlichten Befragungen, Casestudies oder Literaturstudien thematisieren zunehmend die Skalierung und stellen dabei die Vorteile und Probleme bei der Ausweitung von agilen Methoden im Unternehmenskontext dar.

Ziel dieses Beitrags ist es einerseits, die aktuellen Ergebnisse der Forschung zusammenzufassen und die beschriebenen Potenziale und Schwierigkeiten bei der unternehmensweiten Einführung agiler Methoden aufzuzeigen. Erweitert und vertieft werden diese Darstellungen durch die Ergebnisse einer Expertenbefragung. Andererseits wird hergeleitet, warum die Verwendung agiler Methoden auch für den Einsatz im Technischen Design prädestiniert und teilweise sogar notwendig ist. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen wird der Bedarf eines hybriden Vorgehens bei der Integration agiler Methoden hergeleitet. Als hybride Ansätze werden dabei prinzipiell Kombinationen aus prädiktiven und agilen Methoden verstanden (Timinger und Seel 2016). Für den spezifischen Anwendungsfall des Technischen Designs wird in diesem Beitrag der konkrete Ansatz einer hybriden Methodik vorgestellt, diese stellt neben der Flexibilisierung des Technischen Designs auch den Nutzer des Produkts verstärkt in den Mittelpunkt.

2 Stand der Technik zur Implementierung agiler Methoden

Im folgenden Abschnitt sollen die Herausforderungen bei der Implementierung agiler Methoden, basierend auf dem derzeitigen wissenschaftlichen Stand, dargestellt werden.

Für die Aufarbeitung dieses bestehenden Forschungsstandes wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Die verwendeten Quellen lassen sich hinsichtlich der Untersuchungsgegenstände in drei Kategorien einteilen: *Abhandlungen*, *Befragungen* und *Casestudies*.

Als Basis dieser Recherche fungieren sog. *Abhandlungen*. Diese fassen verschiedene Befragungen und Casestudies zusammen und eruieren durch Vergleiche dieser Gemeinsamkeiten und Unterschiede hinsichtlich der Bewertung bei der Integration agiler Methoden. Als Abhandlungen wurden folgende Quellen verwendet: Atzberger et al. 2019 (A1); Atzberger und Paetzold 2019 (A2); Dikert et al. 2016 (A3); Putta et al. 2018 (A4). Die Abhandlungen stellen Veröffentlichungen aus den Jahren 2016 – 2019 dar und behandeln Ergebnisse von Untersuchungen aus den Jahren 2001 – 2018.

Um einen Abgleich mit der aktuellen Implementierung agiler Methoden zu erhalten, werden die Ergebnisse von *Befragungen* zum aktuellen Stand der agilen Entwicklung aus den Jahren 2019 und 2020 herangezogen. Ziel dieser Befragungen ist es, im fast jährlichen Rhythmus die aktuelle Einschätzung hinsichtlich des allgemeingültigen Einsatzes und der Verbreitung agiler Methoden zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Studien werden in folgenden Quellen bereitgestellt: Atzberger et. al. 2020 (B1); digital.ai 2020 (B2); Komus et. al. 2020 (B3); Peters et. al. 2020 (B4); Schmidt et. al. 2019 (B5). Die betrachteten Befragungen thematisieren v. a. die allgemeinen Entwicklungen des Einsatzes agiler Methoden in der Industrie. Der aktuelle Stand bei der Skalierung agiler Methoden wird lediglich abgefragt. Einen

dezidiert wissenschaftlichen Zugang zur Skalierung agiler Methoden gibt es jedoch nur vereinzelt (Ebert und Paasivaara 2017; Putta et al. 2018).

Daher wurden zusätzlich *Casestudies* analysiert, welche die Herausforderungen bei der Umsetzung von skalierten Ansätzen aufzeigen. Die folgenden Casestudies wurden analysiert: Conboy und Carrol 2019 (C1); Ebert und Paasivaara 2017 (C2); Garzaniti et al. 2019 (C3); Paasivaara 2017 (C4).

Auf Basis der betrachteten Literatur kann beobachtet werden, dass agile Methoden zunehmend in der Entwicklung technischer Produkte eingesetzt werden (Atzberger et.al. 2019; digital.ai 2020; Heerwagner 2018; Komus et. al 2020). Des Weiteren haben viele Unternehmen die Pilot- oder Einführungsphase agiler Methoden abgeschlossen und sehen agile Methoden nicht mehr nur als Trend, sondern wollen diese unternehmensweit umsetzen (Atzberger et al. 2020; Peters et al. 2020). Peters et al. (2020) beschreiben diesen Schritt als eine Transformation von „Doing Agile“ zu „Being Agile“. Als Treiber dieser unternehmensweiten agilen Transformation werden Skalierungsansätze verwendet. Dabei wird unter Skalierung die methodische Ausweitung agiler Einzelmethoden wie SCRUM, Kanban oder DevOps auf größere Teams bzw. das gesamte Unternehmen verstanden (Dikert et al. 2016; Mathis 2018). Bei der Anwendung von Skalierung wird v. a. ein Ansatz am häufigsten verwendet (digital.ai 2020; Komus et al. 2020; Putta et al. 2018): das Scaled Agile Framework – SAFe (siehe Leffingwell 2018; Mathis 2018).

Die Untersuchung der bisherigen Forschungsarbeiten fokussierte u. a. die Identifikation aktueller Herausforderungen bei der Integration agiler Methoden. Bild 1 visualisiert diese Herausforderungen. Dabei vermittelt die Farbskala, welche der Literaturquellen die jeweilige Herausforderung nannte.

Auf Grund der Nennung bei fast allen Quellen (A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4, B5, C1, C2, C4) kann die Notwendigkeit eines Mind-Changes als größte Herausforderung identifiziert werden: Das Mindset agiler Prinzipien muss sich durchsetzen, um alle Vorteile agiler Methoden nutzen zu können.

Im direkten Zusammenhang dazu steht die am zweithäufigsten genannte Herausforderung: Um Resignation und Frustration entgegen zu wirken, wird ein einheitliches Verständnis und Wissen von agilen Methoden bei allen Beteiligten als notwendig angesehen (A1,A2, A3, A4, B1, B2, B4, C1, C2, C3, C4).

77 % der untersuchten Literatur nennen als weitere Herausforderung die notwendige Adaption agiler Methoden auf die unternehmensspezifischen Eigenschaften (A1, A2, B1, B2, B3, B4, B5, C2, C3, C4).

Das Top Management als Hinderungsgrund für die Anwendung agiler Methoden wird bei 69 % der untersuchten Literatur genannt.

Insgesamt konnte eine Homogenität der Aussagen über die drei untersuchten Literaturarten festgestellt werden. Sowohl die *Abhandlungen* als auch die aktuellen *Befragungen* und *Casestudies* stimmen über die derzeitigen Kernherausforderungen bei der Integration agiler Methoden allgemein und im Rahmen von Skalierungsansätzen überein. Darüber hinaus kann eine Reihenfolge, nach Wichtigkeit der Herausforderungen abgeleitet werden (siehe Bild 1).

Herausforderungen bei der Anwendung agiler Methoden													
Mind-Change notwendig	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C4	C3
einheitliches Verständnis und Wissen	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B4	C1	C2	C3	C4	B3	B5
Adaption agiler Methoden notwendig	A1	A2	B1	B2	B3	B4	B5	C2	C3	C4	A3	A4	C1
Top Management hindert Change	A1	A2	A3	A4	B2	B3	B4	B5	C4	B1	C1	C2	C3
Strukturwandel notwendig	A1	A2	B1	B2	B5	C1	C2	A3	A4	B3	B4	C3	C4
interne Prozesse hindern Change	A1	A2	A4	B3	B5	C1	A3	B1	B2	B4	C2	C3	C4
Synchronisation vers. Bereiche	A2	B1	C2	C3	A1	A3	A4	B2	B3	B4	B5	C1	C4
Mitarbeiter sind überfordert	A2	A3	B3	A1	A4	B1	B2	B4	B5	C1	C2	C3	C4
Legende: grün = Abhandlung; blau = Befragungen; gelb = Casestudies; grau = keine Nennung	Quellen: Atzberger et al. 2019 (A1); Atzberger und Paetzold 2019 (A2); Dikert et al. 2016 (A3); Putta et al. 2018 (A4); Atzberger et. al. 2020 (B1); digital.ai 2020 (B2); Komus et. al. 2020 (B3); Peters et. al. 2020 (B4); Schmidt et. al. 2019 (B5); Conboy und Carrol 2019 (C1); Ebert und Paasivaara 2017 (C2); Garzaniti et al. 2019 (C3); Paasivaara 2017 (C4).												

Bild 1: Übersicht über die derzeitigen Herausforderungen bei der Anwendung agiler Methoden

3 Expertenbefragung zum Einsatz agiler Methoden

Die untersuchten Literaturquellen berücksichtigten und untersuchten sowohl Hard- als auch Software. Dadurch entsteht eine gewisse Inkohärenz hinsichtlich der Relevanz der Ergebnisse in Bezug auf die technische Entwicklung, wie sie bei Produkten des Technischen Designs stattfindet. Daher wurde ein Experteninterview mit Projektleitern und -verantwortlichen aus der technischen Entwicklung durchgeführt. Die Interviewform entspricht einem strukturierten Interview (Döring et al. 2016), da überwiegend Fragen gestellt wurden, welche mit Hilfe einer fünfstufigen Likert-Skala beantwortet werden mussten. Die Pole der Skala „definitiv“ und „absolut nicht“ wurden angegeben. In Ergänzung wurden offene Fragen gestellt, die frei moderiert und diskutiert wurden. Die Interviews wurden von Juni bis September 2020 durchgeführt. In jedem Interview wurde den Experten via Bildschirmfreigabe, oder Beamerprojektion der Fragebogen präsentiert und die Fragen im Beisein und in Abstimmung mit dem Experten live ausgefüllt.

Zur Akquise wurden 35 Personen aus 17 Unternehmen aus der Maschinenbau- und Automobil-Branche angeschrieben. Es konnten 13 Termine vereinbart werden, wobei ein Teilnehmer lediglich 1,5 Jahre Erfahrungen im Projektmanagement angegeben hat und somit für die Auswertung, in der Annahme mangelnder Erfahrung, ausgeschlossen wurde. Die Ergebnisse der skalenbasierten Fragen der verbleibenden zwölf Datensätze wurden mittels deskriptiver Methoden (Kosfeld et al. 2016) ausgewertet und die Antworthäufigkeiten grafisch dargestellt. Die offenen Fragen wurden in Anlehnung der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2020) ausgewertet und die Ergebnisse dieser Auswertung mittels Häufigkeitsdarstellungen visualisiert. Die hier veröffentlichten Daten stellen den Teil der Ergebnisse dar, die für die Inhalte dieses Beitrags von Relevanz sind.

Unter den Experten waren drei Frauen (25 %) und neun Männer (75 %). Sieben Experten sind aktuell als Projektleiter oder -manager eingesetzt, wohingegen zwei derzeit als Projektingenieure angestellt sind. Als Experten mit spezifischen Kenntnissen können der Agile Coach, der Consultant und der Manager eines Unternehmens angesehen werden. Der wesentliche Teil der Experten befindet sich im Alter zwischen 30-40 Jahren; der Altersbereich liegt dabei zwischen 25 und 57 Jahren. Zwei Drittel der Experten haben eine Erfahrung im Projektmanagement von mehr als fünf Jahren (siehe Bild 2 oben).

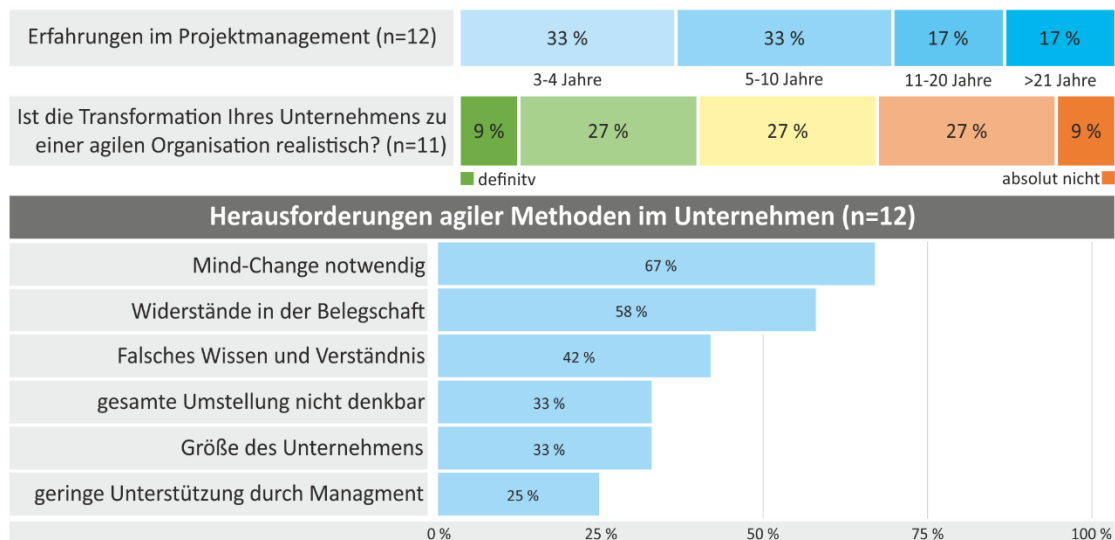


Bild 2: Darstellung der Erfahrungen im Projektmanagement der Experten (oben); Bewertung der Erfolgschancen der agilen Transformation im eigenen Unternehmen (mittig), Herausforderungen agiler Methoden (unten)

Inhaltlich wurden die Experten u. a. hinsichtlich der aktuellen Situation der agilen Transformation als solche sowie der aktuell vorherrschenden und zu beobachtenden Herausforderungen bei der unternehmensweiten Einführung der agilen Methoden befragt. Bild 2 (mittig und unten) stellt die Ergebnisse der Experteninterviews hinsichtlich der Bewertung der agilen Transformation dar.

Als Antwortmöglichkeit auf die Frage, ob sie die Transformation ihres Unternehmens zu einer agilen Organisation als realistisch ansehen, stand die fünf-stufige Likert-Skala zur Verfügung. Wie in Bild 2 (mittig) dargestellt, ist eine eindeutige Aussage oder Tendenz auf Grund der Ausgewogenheit der Antworten nicht erkennbar. Dies kann auf der einen Seite auf eine gewisse Skepsis hinsichtlich der Erfolgchancen rein agiler Organisationen, sowie auf der anderen Seite auf die positive Einschätzung der Potenziale einer agilen Transformation zurückzuführen sein. Drei Experten sind unentschieden. Die Herausforderungen, mit denen sich die agile Transformation in den jeweiligen Unternehmen konfrontiert sieht, wurden mittels einer offenen Frage erfasst. Das Ergebnis deckt sich mit den schon in der Literatur beobachteten Herausforderungen: Als Kernherausforderung wurde am häufigsten der notwendige Mind-Change genannt, gefolgt von Widerständen in der Belegschaft, das inkludiert Mitarbeiter genauso wie das Management. Auch das falsche Verständnis und daraus resultierende falsche Erwartungen an agile Methoden benannten fünf der zwölf Experten als Schwierigkeit. Neben der Bewertung der agilen Transformation wurden die Experten bewusst offen gefragt, welche Aspekte ihrer Meinung nach für die Einführung agiler Methoden sprechen. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Zehn der zwölf interviewten Experten (83 %) nannten als Vorteil agiler Methoden, dass mit Hilfe dieser schneller und flexibler auf sich ändernde Entwicklungsbedingungen und -ziele reagiert werden kann. Dieser Vorteil wird auch in der Literatur als ein Kernvorteil agiler Methoden genannt (Atzberger et al. 2020; Bergweiler et al. 2019; digital.ai 2020; Heerwagen 2018; Schmidt et al. 2019). Als zweithäufigster Vorteil (58 %) wurde von den Experten die Möglichkeit benannt, in regelmäßigen Abständen Feedback und Input durch ein iteratives und inkrementelles Vorgehen zu erhalten. Ebenfalls mit sieben Nennungen wurde das bewusst methodische Vorgehen angesprochen, welches durch den Einsatz agiler Methoden realisiert werden kann.

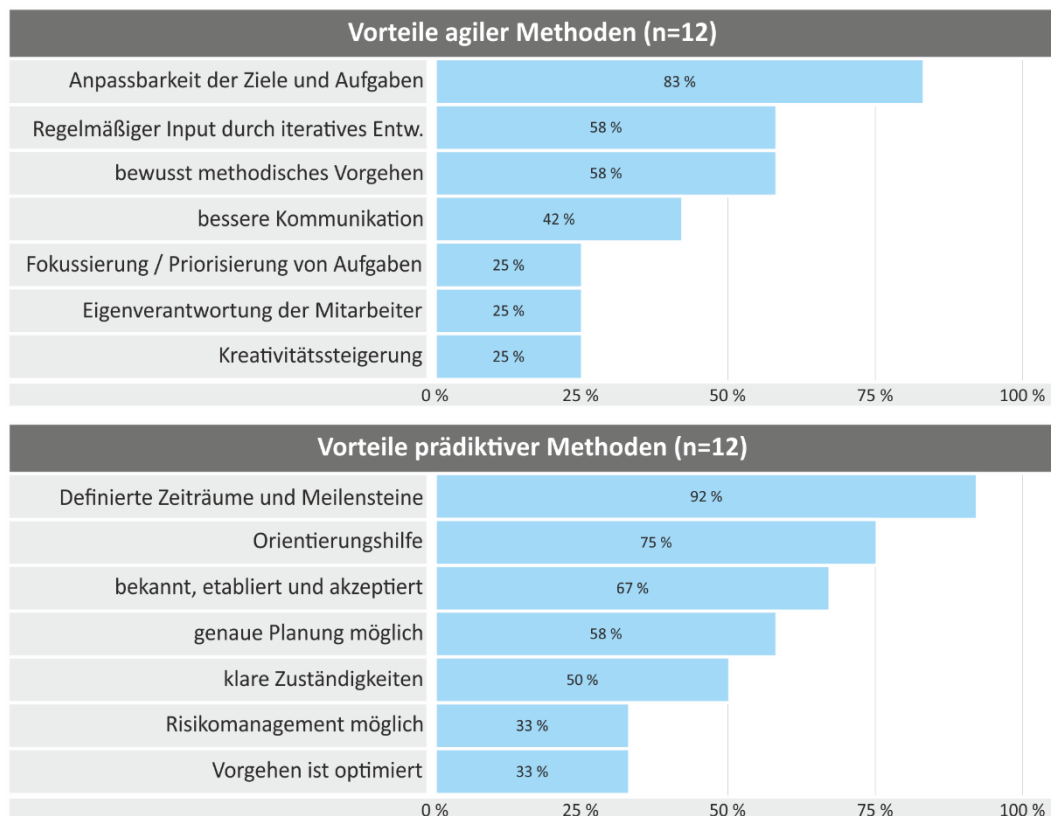


Bild 3: Ergebnisse der offenen Fragen des Experteninterviews hinsichtlich der Vorteile agiler (oben) und prädiktiver Methoden (unten)

Als weiterer Vorteil wurde in der Literatur die Verbesserung der Kommunikation und Transparenz mit einer hohen Wichtigkeit bewertet (Atzberger et al. 2020; digital.ai 2020; Schmidt et al. 2019); diesen Vorteil sehen jedoch nur fünf der zwölf der interviewten Experten (42 %).

Des Weiteren wurden die Experten hinsichtlich der Gründe für den Einsatz klassischer bzw. prädiktiver Methoden befragt. Die Ergebnisse dieser offenen Fragestellung sind ebenfalls in Bild 3 dargestellt. Mit überwiegender Mehrheit (92 %) nannten die Experten definierte Zeiträume und Synchronisierungspunkte als wesentliche Vorteile. Darauf aufbauend können prädiktive Methoden, laut der Aussage von neun Experten, als Orientierungshilfe verwendet werden. Der Vorteil, dass prädiktive Methoden etabliert und somit weitestgehend akzeptiert und bekannt sind wurde von acht Experten genannt.

4 Spezifischer Bedarf agiler Methoden im Technischen Design

Die technische Entwicklung von Produkten ist ein facettenreiches Vorgehen, welches verschiedenste Prozesse, Unterprozesse und -projekte beinhalten kann. Je nach Produkt entsteht ein sehr komplexes Entwicklungssystem. Dieser komplexe Sachverhalt lässt eine holistische Betrachtung als unmöglich erscheinen. Daher wird der Fokus dieses Beitrags im Bereich der agilen Entwicklung auf den zentralen Prozessteil des Technischen Designs gelegt. Das Technische Design lässt sich als Bestandteil des ganzheitlichen Produktentwicklungsprozesses verstehen und verbindet die Teilaspekte des Stylings (dt. Design) und der Konstruktion insbesondere in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses. Basierend auf den Grundbetrachtungen Mensch-Design-Technik wird dabei ein Spannungs- und Lösungsfeld aufgespannt, welches den Menschen als Ausgangslage der ästhetischen, in Kombination mit der technischen, Entwicklung betrachtet. In dieser sog. Design-Technik-Konvergenz arbeitet ein interdisziplinäres Team an den Gestaltungsmerkmalen des Produktes (Seeger 2005; Schmid und Maier 2017).

Im folgenden Abschnitt wird der Bedarf von Agilität im Technischen Design sukzessive hergeleitet. Dabei werden zuerst die äußeren Faktoren beleuchtet, die eine Anwendung agiler Methoden notwendig machen. Anschließend erfolgt die Betrachtung und Bedarfsdarstellung anhand der prozessbezogenen, intrinsischen Notwendigkeiten.

4.1 Extrinsische Bedarfe

Das Technische Design als Lösungs- und Betrachtungsraum zwischen Mensch-Design-Technik unterliegt in vielerlei Hinsicht einer hohen Volatilität, Unsicherheit, Komplexität sowie Ambiguität (VUCA), die im Folgenden dargelegt werden sollen: Ein dynamischer Bestandteil der Entwicklung von Produkten des Technischen Designs ist die technologische Volatilität, die sich z. B. in neuen Antriebs- oder Kommunikationstechnologien zeigt. Im Bereich der Nutzerakzeptanz sind die potenziellen Entwicklungen häufig sehr unsicher. Ein prominentes Beispiel ist der zunehmende Einsatz von Touchscreens angefangen beim Pkw bis hin zur Werkzeugmaschine. Sehr viele Nutzer, besonders jüngere, begrüßen eine Bedienung mittels Touchscreen. Dennoch sind durchaus Präzisionsaufgaben notwendig, die durch Touchscreens schwierig zu bearbeiten sind oder auch Nutzergruppen, wie ältere Menschen, wünschen sich nach wie vor physische Bedienelemente. Darüber hinaus werden die Produkte des Technischen Designs immer komplexer. Ein gutes Beispiel dafür sind vollautomatisierte Fahrzeuge mit ihren vielfach verzweigten Zusammenhängen im Bereich der Sensor- und Aktortechnik. Aber auch das Nutzerverhalten ändert sich, wie z. B. der Trend zur Shared-Mobility oder zur Digitalisierung zeigt. Hinzu gilt es die Ambiguität zu lösen, dass die Nutzer individualisierte Produkte auf der einen Seite und Use-by-all-Konzepte auf der anderen Seite wünschen. Dies wird z. B. daran deutlich, dass die Einstellungsoptionen im Bereich Smart Home nahezu stetig ansteigen und auf der anderen Seite Refurbished-Konzepte florieren. Letztlich bedarf es einer flexibleren Anpassung der Ziele und Inhalte, da die Verkürzung des Designprozesses und der Designstrategie hinsichtlich dieser extrinsischen Veränderungszwänge wettbewerbsrelevant ist.

4.2 Intrinsische Bedarfe

In Ergänzung zu den oben beschriebenen, extrinsischen Bedarfen im Technischen Design existieren intrinsische Bedarfe, welche auf prozessuale Gründe zurückzuführen sind.

Das Design stellt einen wesentlichen Bestandteil der Produkterscheinung und -wahrnehmung durch den Nutzer dar und charakterisiert somit das Produkt maßgeblich. Das Design spielt somit bei der Kaufentscheidung eine immer größere Rolle (Chassy et al. 2015). Die Nutzerwünsche und Nutzungsszenarien wirken sich unmittelbar auf die Entwicklung des technischen Designs aus, z. B. hinsichtlich adaptiver Fahrzeuggestalten (Reichelt et al. 2019) und sollten stärker berücksichtigt werden, da die Nutzerakzeptanz ein zentraler Faktor für den Markterfolg des Produkts darstellt. Diese Aspekte führen letztlich zu einer hohen Bedeutung des Designs innerhalb der Produktentwicklung. Daher werden die finalen Designentscheidungen meist durch das Top Management festgelegt. Die Entwicklung des technischen Produktdesigns zeichnet sich durch eine sehr interdisziplinäre Zusammenarbeit aus, in der neben Zielgruppenfestlegungen, Designsprache, Konstruktionsmöglichkeiten auch Gesetzeskonformitäten, Realisierungsoptionen sowie Herstellkosten berücksichtigt werden. Speziell in den Bereichen des Designs, der geometrischen Konstruktion und der ergonomischen Absicherung entsteht ein Spannungsfeld und Lösungsraum, der sich einerseits gut arbeitsteilig aufteilen lässt. Andererseits erfordert die hohe inhaltliche Verknüpfung dieser Bereiche eine stetige und gute Abstimmung untereinander. Diese Interdisziplinarität führt letztlich zu Herausforderungen bei der Zusammenarbeit der einzelnen Disziplinen. Im Rahmen der Experteninterviews gaben 60 % der Experten an, dass die Kommunikation den größten Optimierungsbedarf in der Zusammenarbeit von Designern und Konstrukteuren darstellt. 50 % der Experten sehen eine stärkere Integration des Designprozesses in den technischen Entwicklungsprozess als notwendig an. Auch beim gegenseitigen Verständnis der jeweils anderen Disziplin sowie deren Herangehensweisen sehen 50 % der Befragten Optimierungsbedarf.

Zusammenfassend zeigt sich, dass sowohl die Produkte als auch der Prozess des Technischen Designs an der Schnittstelle von Ergonomie, Design und Technik eine hohe Volatilität mit sich bringen und somit für den intelligenten Einsatz agiler Methoden prädestiniert sind.

5 Ableitung einer angepassten hybriden Vorgehensweise zur zielgerichteten Integration agiler Methoden

In der vorausgegangenen Analyse wurden die Ergebnisse der Literatur hinsichtlich der Herausforderungen, die durch die Anwendung agiler Methoden entstehen, zusammengefasst. Die Ergebnisse der Experteninterviews spiegeln diese Herausforderungen wider. Dadurch können die Güte und Relevanz der Expertenaussagen als nachgewiesen angesehen werden. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass eine gewisse Ambivalenz bzgl. der Erfolgchancen der agilen Transformation existiert. Die Nennungen der Vorteile von agilen und prädiktiven Methoden verstärkt diesen Effekt zusätzlich, da einerseits die Kernpotenziale agiler Methoden als wesentliche Vorteile wahrgenommen werden. Andererseits thematisieren die Vorteile prädiktiver Methoden die grundlegende Planung von Entwicklungsprojekten. Wie mittels hybrider Methoden dieses Spannungsfeld gelöst werden kann, wird nachfolgend erläutert.

5.1 Hybride Entwicklung als alternativer Ansatz der agilen Transformation

Die sowohl durch die Literatur als auch durch die Experteninterviews identifizierten Herausforderungen legen die aktuellen Probleme bei der Integration und Skalierung agiler Methoden offen. Es wird deutlich, dass die vollständige agile Transformation eines großen Unternehmens mit komplexen Produkten nur teilweise möglich ist, da einerseits die Skalierungsansätze an ihre organisatorischen Grenzen stoßen (Atzberger und Paetzold 2019, Conboy und Carrol 2019, Komus et al. 2020). Andererseits gestaltet sich die vollständige Übertragung agiler Methoden auf die Hardwareentwicklung ebenfalls schwierig, da agile Methoden nur bedingt für die Prozesse und Abläufe bei der Hardwareentwicklung geeignet sind und somit ein durchgängiger Einsatz agiler Methoden nicht realisierbar ist (Heerwagen 2018; Komus et al. 2020). Letztlich ist eine Adaption der Methoden an die unternehmensspezifischen Gegebenheiten notwendig, da agile Methoden und Frameworks nicht 1:1 übertragen oder als Blue-Prints für eine agile Organisation verwendet werden können (Atzberger und Paetzold 2019; Ebert und Paasivaara 2017, Heerwagen 2018).

Diese Adaption findet bereits Anwendung: Dabei werden sowohl einzelne agile Methoden (Atzberger et al. 2020; Bergweiler et al. 2019) wie auch methodische Vorgehensweisen aus den Skalierungsansätzen (Komus et al. 2020) herausgelöst und im unternehmensspezifischen Kontext adaptiert und angewendet. Diese Zusammenhänge zeigen, dass ein dringender Bedarf einer hybriden Ansatzweise vorhanden ist und in gewissem Maße schon in der Praxis umgesetzt wird (Atzberger et al. 2020; digital.ai 2020; Komus et al. 2020; Schmidt et al. 2019). Im Rahmen der Experteninterviews wurde ersichtlich, dass aus Sicht der Unternehmen sowohl triftige Gründe für agile wie auch prädiktive Vorgehensweisen existieren.

Für agile und prädiktive Vorgehensweisen gelten unterschiedliche, teils gegensätzliche Restriktionen: Agile Methoden wurden für kleine Teams konzipiert (Schwaber und Sutherland 2020, Dikert et al. 2016), die durch einen hohen Grad an Kommunikation und hoher Ressourcenbindung und -fokussierung (Heerwagen 2018) letztlich eine Flexibilisierung und Erhöhung der Nutzerzentrierung und Kommunikation ermöglichen. Dahingegen gelten prädiktive Methoden v. a. in der Entwicklung technischer Produkte als etabliert, akzeptiert und in vielerlei Hinsicht an die geltenden Rahmenbedingungen optimiert, wie bspw. für große und verteilte Teams, Multiprojektverwendung oder Risikoabschätzungen. Diese beiden „Welten“ stellen die grundlegenden Rahmenbedingungen an die agile Transformation dar, die hinsichtlich einer erfolgreichen Integration agiler Vorgehensweisen Berücksichtigung finden müssen. Für die eigentliche Umsetzung agiler Methoden in der technischen Produktentwicklung zeichnen sich zwei Pfade ab: die Skalierung und die Hybridisierung. Während durch die Skalierung agiler Methoden nicht alle Probleme und Herausforderungen gelöst werden können, kann bei der Anwendung einer hybriden Vorgehensweise durch Ausnutzung der Synergien zwischen agilen und prädiktiven Methoden der Wandel in der Produktentwicklung gelingen. Bild 4 stellt diese zwei Pfade bildlich gegenüber.

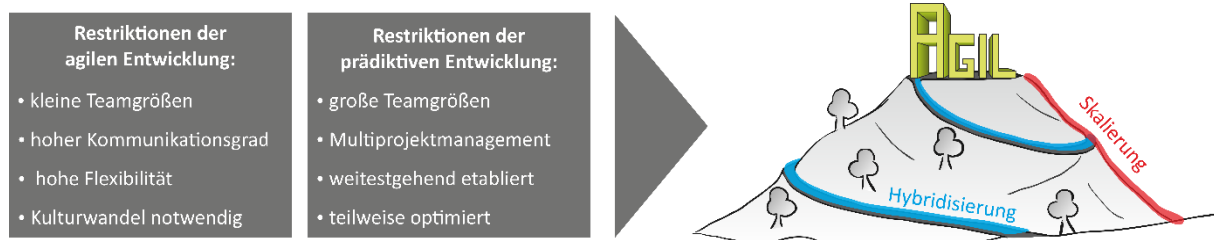


Bild 4: Wesentliche Restriktionen der agilen und prädiktiven Entwicklung als Rahmenbedingungen für die zwei Pfade der agilen Transformation: Skalierung (rot) und Hybridisierung (blau)

Im Rahmen der durchgeführten Experteninterviews wurden die Experten hinsichtlich ihrer Einschätzung zu hybridem Projektmanagement in der Entwicklung technischer Produkte befragt. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt: 84 % sehen hybrides PM als Übergangslösung der agilen Transformation. Darüber hinaus sehen 92 % der Experten eine hybride Vorgehensweise als langfristige Lösung.

Der Begriff des hybriden Projektmanagements gewinnt, wie oben hergeleitet, zunehmend an Bedeutung. Jedoch gibt es derzeit nur vereinzelte Ansätze und Methodiken, die einen ganzheitlichen hybriden Ansatz verfolgen (Timinger und Seel 2016, Timinger 2017). Dadurch besteht die Gefahr, dass jegliche Kombination agiler und prädiktiver Methoden pauschal als hybrid bezeichnet werden und diese Bezeichnung zu einem neuen Sammelbegriff wird. Eine genaue Auseinandersetzung mit beiden Vorgehensweisen ermöglicht eine zielgerichtete Kombination, die einerseits die Herausforderungen bei der Einführung agiler Methoden abdämpft und andererseits bereits optimierte Bereiche der Entwicklung nicht in ungewollte Veränderungszwänge drängt. Dazu sollte keine statische Kombination agiler und prädiktiver Methoden stattfinden, sondern eine dynamische, an die vorherrschende Situation angepasste, methodische Vorgehensweise. Dass dieser grundlegende Ansatz ein richtiger Schritt für eine zielgerichtete Integration agiler Methoden in die technische Produktentwicklung darstellt, zeigt die breite Zustimmung der interviewten Experten (75% + 17% = 92 % Zustimmung).

anstehende Phase viele Abstimmungen mit Experten, Nutzern oder anderen Abteilungen erfordern, sodass ein vermehrter Einsatz agiler Methoden, wie beispielsweise Dailys, sinnvoll sein kann.

Bild 6 visualisiert diesen situativen Ansatz. Neben der grundlegenden, prädiktiv geprägten Grundform mit den Start- und Endpunkten „Projektidee“ und „Design-Freeze“, sind die Synchronisierungspunkte schematisch abgebildet. In Ergänzung zur Abstimmung der Inhalte soll das methodische Vorgehen näher betrachtet und ggf. angepasst werden. Überdies kann eine Justierung des Methodeinsatzes im Verlauf einer Phase zwischen zwei Synchronisierungspunkten stattfinden. So kann beispielsweise situationsbedingt kurzfristig eine eher prädiktiv geprägte Methodenwahl (blau) durch den verstärkten Einsatz agiler Methoden (grün) beschleunigt werden, wenn z. B. kurzfristige Änderungen auf Grund geänderter Anforderungen notwendig sind. Die Entscheidung über die Methodenwahl hängt dabei sowohl von der aktuellen Situation, sowie von dem vorhandenen, bzw. notwendigen Wissen der Projektmitarbeiter ab und sollte daher von den direkten Teilprojektleitern der jeweiligen Bereiche (Ergonomie, Design und Konstruktion) getroffen werden.



Bild 6: Schematische Darstellung des hybriden Ansatzes einer Designmanagementmethodik

Ziel dieses Ansatzes ist es, einerseits eine flexible Struktur vorzugeben, mit welcher der Austausch stattfinden und kritische Entscheidungen getroffen werden können. Andererseits soll die Möglichkeit geschaffen werden, das methodische Vorgehen an die jeweilige Situation, welche sich im Groben aus den nächsten Zielen und Aufgaben ableiten lässt, anzupassen. Letztlich soll durch diese Erhöhung der Flexibilität und Kommunikation die Integration der Bereiche des Technischen Designs (Ergonomie, Design und Konstruktion) erhöht und somit der Prozess an sich verkürzt und effizienter gestaltet werden. Für die Umsetzung dieser Methodik ist sowohl ein breites methodisches Wissen, zumindest bei den Projektleitern und Teilprojektleitern, als auch die Bereitstellung entsprechender Tools notwendig. Ebenfalls von zentraler Bedeutung ist ein Analyse- und Bewertungstool für die Identifikation oder Auswahl geeigneter Methoden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde die derzeitige Situation der Integration agiler Methoden mittels einer systematischen Literaturrecherche zusammengefasst. Dabei lag der Fokus primär auf den derzeitigen Herausforderungen, die hinsichtlich einer unternehmensweiten agilen Transformation gelöst werden müssen. Neben der Literatur fließen die Ergebnisse von Experteninterviews in die Untersuchung und Bewertung der aktuellen Situation und Herangehensweise bei der agilen Transformation ein. Der in der Industrie vermehrt angewendete Ansatz der Skalierung agiler Methoden stößt auf Herausforderungen, sodass die Notwendigkeit einer hybriden Vorgehensweise zur Transformation der technischen Entwicklung hergeleitet wurde.

Speziell im Bereich des Technischen Designs wurde, basierend auf den extrinsischen und intrinsischen Bedarfen, ein Ansatz zur situativen und intelligenten Integration agiler Methoden vorgestellt. Dieser Ansatz wird im Folgenden weiterverfolgt. Dazu werden einerseits die Experteninterviews ausgeweitet

und zusätzlich zu technischen Projektleitern Designer und Ergonomen befragt. Basierend auf den daraus generierten Erkenntnissen und Anforderungen wird der Ansatz weiterentwickelt und soll formativ evaluiert werden. Des Weiteren sollen die Schnittstellen der Methodik definiert werden. Als wesentliche Bestandteile des Ansatzes sollen als Nächstes die Zusammenhänge zwischen agilen und prädiktiven Methoden und Tools untersucht werden. Das Ziel ist es, eine Entscheidungshilfe für den Projektverantwortlichen zu erstellen, um eine situative Auswahl des methodischen Vorgehens durchführen zu können. Dabei sollen weitere Parameter, wie die Reifegradabschätzung oder eine Komplexitätsbewertung (in Anlehnung an Schuh et al. 2018) erfasst werden und als Hilfestellung dienen.

7 Quellenverzeichnis

- Atzberger et al. 2019 ATZBERGER, Alexander ; GERLING, Christoph ; SCHROF, Julian ; SCHMIDT, Tobias Sebastian ; WEISS, Stefan ; PAETZOLD, Kristin: Evolution of the Hype around Agile Hardware Development. In: *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* : IEEE, 2019 , S. 1–8.
- Atzberger et al. 2020 ATZBERGER, Alexander ; NICKLAS, Simon Jakob ; SCHROF, Julian ; WEISS, Stefan ; PAETZOLD, Kristin: *Agile Entwicklung physischer Produkte*. 2020.
- Atzberger und Paetzold 2019 ATZBERGER, Alexander ; PAETZOLD, Kristin: *Current Challenges of Agile Hardware Development: What are Still the Pain Points Nowadays?* In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1* (2019), Nr. 1, S. 2209–2218.
- Bergweiler et al. 2019 BERGWELER, Georg ; HANSEN, Jan Ole ; DÖRFER, Marc: *Agile Entwicklung mit physischen Prototypen zur besseren Projektplanung*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 121 (2019), 7-8, S. 44–47.
- Chassy et al. 2015 CHASSY, Philippe ; LINDELL, Trym A. E. ; JONES, Jessica A. ; PARAMEI, Galina V.: A Relationship Between Visual Complexity and Aesthetic Appraisal of Car Front Images : An Eye-Tracker Study. In: *Perception* 44 (2015), 8-9, S. 1085–1097.
- Conboy und Carroll 2019 CONBOY, Kieran ; CARROLL, Noel: Implementing Large-Scale Agile Frameworks: Challenges and Recommendations. In: *IEEE Software* 36 (2019), Nr.2,S. 44-50.
- digital.ai 2020 digital.ai. 14th annual State of Agile Report, 2020.
- Dikert et al. 2016 DIKERT, Kim ; PAASIVAARA, Maria ; LASSENIUS, Casper: Challenges and success factors for large-scale agile transformations: A systematic literature review. In: *Journal of Systems and Software* 119 (2016), S. 87–108.
- Döring et al. 2016 DÖRING, Nicola ; BORTZ, Jürgen ; PÖSCHL, Sandra: *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. 5., vollst. überarb., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin : Springer, 2016.
- Ebert und Paasivaara 2017 EBERT, Christof ; PAASIVAARA, Maria: Scaling Agile. In: *IEEE Software* 34 (2017), Nr. 6, S. 98–103.
- Garzaniti et al. 2019 GARZANITI, Nicola ; BRIATORE, Simone ; FORTIN, Clement ; GOLKAR, Alessandro: Effectiveness of the Scrum Methodology for Agile Development of Space Hardware. In: *2019 IEEE Aerospace Conference* : IEEE, 2019 , S. 1–8.
- Heerwagen 2018 HEERWAGEN, Mathias: *Entwicklung im Wandel Agile Methoden auf dem Vormarsch*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 120 (2018), Nr. 4, S. 10–15.
- Komus et al. 2020 KOMUS, Ayelt ; KUBERG, Moritz ; SCHMIDT, Sonja ; ROST, Lisa ; KOCH, Claus-Peter: *Studie Status Quo (Scaled) Agile 2019/20*. Hochschule Koblenz, 2020.
- Kosfeld et al. 2016 KOSFELD, Reinhold ; ECKEY, Hans Friedrich ; TÜRCK, Matthias: *Deskriptive Statistik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

- Leffingwell 2018 LEFFINGWELL, Dean: SAFe 4.5 reference guide : Scaled agile framework for lean software and systems engineering. Second edition. Boston : Addison-Wesley, 2018.
- Mathis 2018 MATHIS, Christoph: SAFe - Das Scaled Agile Framework, 2nd Edition. 2nd edition. [Erscheinungsort nicht ermittelbar], Sebastopol, CA : dpunkt, 2018.
- Mayring 2020 MAYRING, Philipp: Qualitative Inhaltsanalyse. In: MEY, Günter; MRUCK, Katja (Hrsg.): Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 495–511.
- Paasivaara 2017 PAASIVAARA, Maria: Adopting SAFe to Scale Agile in a Globally Distributed Organization. In: 2017 IEEE 12th International Conference on Global Software Engineering (ICGSE) : IEEE, 2017 , S. 36–40.
- Peters et al. 2020 PETERS, Christoph ; SIMMERT, Benedikt ; EILERS, Karen ; LEIMEISTER, Jan Marco: Future Organization Report 2020. St.Gallen, 2020.
- Putta et al. 2018 PUTTA, Abheeshta ; PAASIVAARA, Maria ; LASSENIUS, Casper: Benefits and Challenges of Adopting the Scaled Agile Framework (SAFe): Preliminary Results from a Multivocal Literature Review. In: KUHRMANN, Marco; SCHNEIDER, Kurt; PFAHL, Dietmar; AMASAKI, Sousuke; CIOLKOWSKI, Marcus; HEBIG, Regina; TELL, Paolo; KLÜNDER, Jil; KÜPPER, Steffen (Hrsg.): Product-Focused Software Process Improvement. Cham : Springer International Publishing, 2018, S. 334–351.
- Reichelt et al. 2019 REICHELT, Florian ; HOLDER, Daniel ; INKERMANN, David ; KRASTEVA, Petia ; MAIER, Thomas ; VIETOR, Thomas: Potenziale anpassbarer Fahrzeuggestalten im Zusammenspiel des Exterieurs und Interieurs. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2019*, 2019.
- Schmid und Maier 2017 SCHMID, Markus ; MAIER, Thomas: *Technisches Interface Design*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- Schmidt et al. 2019 SCHMIDT, Tobias S. ; ATZBERGER, Alexander ; GERLING, Christoph ; SCHROF, Julian ; WEISS, Stefan ; PAETZOLD, Kristin: Agile Development of Physical Products : An Empirical Study about Potentials, Transition and Applicability. München : Universität der Bundeswehr München, 2019.
- Schuh et al. 2018 SCHUH, Günther ; REBENTISCH, Eric ; DÖLLE, Christian ; MATTERN, Christian ; VOLEVACH, Georgiy ; MENGES, Alexander: Defining Scaling Strategies for the Improvement of Agility Performance in Product Development Projects. In: *Procedia CIRP 70 (2018)*, S. 29–34.
- Schwaber und Sutherland 2020 SUTHERLAND, Jeff; SCHWABER, Ken.: *The scrum guide. The definitive guide to scrum: The rules of the game. scrumguides.org*, 2020.
- Seeger 2005 SEEGER, Hartmut: *Design technischer Produkte, Produktprogramme und -systeme – Industrial Design Engineering. 2., bearb. und erw. Aufl.* Berlin : Springer Verlag, 2005.
- Timinger 2017 TIMINGER, Holger: *Modernes Projektmanagement : Mit traditionellem, agilem und hybridem Vorgehen zum Erfolg.* Erste editie. Weinheim : Wiley, 2017.
- Timinger und Seel 2016 TIMINGER, Holger ; SEEL, Christian: Ein Ordnungsrahmen für adaptives hybrides Projektmanagement. In: *GPM-Magazin PMaktuell 04/2016 (2016)*, Nr.04, S. 55–61.
- VDI 2221 VDI Richtlinie 2221 Blatt 1 November 2019. Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung.

Erschließung der Potentiale des Requirements Engineerings auf mobilen Endgeräten

Tapping the potentials of requirements engineering for mobile devices

Kris Rudolph¹, Jannik Reichwein¹, Eckhard Kirchner¹, Jörg Stahlmann², Christian Donges³

¹Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet für Produktentwicklung und Maschinenelemente, Darmstadt

kris.rudolph@tu-darmstadt.de

²ConSenses GmbH, 64380 Roßdorf

stahlmann@consenses.de

³em engineering methods AG, 64285 Darmstadt

Christian.Donges@em.ag

Abstract (deutsch): Das Erzeugen einer vollständigen und präzisen Anforderungsliste stellt einen kritischen Erfolgsfaktor in der Produktentwicklung dar. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei die Einbindung von Kontextinformationen des zu entwickelnden Produkts. Für eine in situ Erhebung von Anforderungen liegen jedoch keine technischen Unterstützungswerkzeuge vor. Mobile Endgeräte bieten das Potential diese Lücke zu schließen und den Anforderungsingenieur während eines Kundenbesuchs zu unterstützen. In diesem Beitrag wird ein Prozessmodell des *Requirements Engineerings* vorgestellt. Es verknüpft die Teilprozesse Aufgabenklärung und Anforderungsmanagement miteinander. Anhand des Prozessmodells werden potentielle für die Aufgabenklärung nutzbare Anforderungsquellen aufgezeigt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden für die Entwicklung einer möglichen Systemarchitektur für eine *Requirements Engineering*-Anwendung genutzt. Damit wird die Grundlage zur Erschließung des *Requirements Engineerings* auf mobilen Endgeräten geschaffen.

Keywords (deutsch):

Requirements Engineering, Anforderungserhebung, mobile Endgeräte, Prozessmodell, Systemarchitektur

Abstract (english): The complete and precise elicitation of requirements plays a crucial factor for success in product development. Contextual inquiry is of particular importance to this success. However, there is no technical support to the requirements engineer for in situ analysis. Mobile devices offer the potential to close this gap and support the engineer during customer visits. This paper presents a model of the requirements engineering process, where the sub processes of requirements elicitation and requirements management are linked together. Using the process model potential requirement sources which are relevant for mobile requirements engineering are identified. A system architecture is derived from the obtained knowledge. It forms the foundation from which the potentials of requirements engineering for mobile devices can be developed.

Keywords (english):

Requirements engineering, mobile device, product development, process model, system architecture

1 Einführung, Motivation und Zielsetzung

Das *Requirements Engineering* (RE) nimmt eine essentielle Rolle in der Produktentwicklung ein und umfasst die Aufgabenklärung sowie das Anforderungsmanagement eines Entwicklungsvorhabens. Das Ziel des *Requirements Engineerings* ist die Erstellung einer vollständigen und präzisen Anforderungsspezifikation in Form einer Anforderungsliste (Baumgart 2016). Zur Unterstützung umfangreicher Entwicklungsprojekte werden spezielle Softwarelösungen zum Anforderungsmanagement verwendet, beispielsweise DOORS, Orcanos oder ReQtest. Der Funktionsumfang dieser Softwarelösungen unterstützt die Verwaltung der Anforderungen durch eine verbesserte Übersichtlichkeit und Verknüpfungsmöglichkeiten der Anforderungen untereinander. Zusätzlich ist die automatische Versionierung, der Import und Export von Dokumenten und die Ableitung von Modellen, beispielsweise UML oder SysML, möglich. Weiterhin wird die Zusammenarbeit durch Kommentarfunktionen und Reviews gefördert (Aston 2020). Diese Anforderungsmanagementplattformen werden in der Regel über Computerhardware bedient und sind somit an eine Büroumgebung gebunden.

Für eine erfolgreiche und umfangreiche Anforderungsspezifikation ist die Einbeziehung der Stakeholder und des Nutzungskontexts des zu entwickelnden Produktes unabdingbar (Blomberg et al. 2003, Holtzblatt 2003, Beyer und Holtzblatt 2009). Erhebliche Teile der Anforderungsermittlung finden beim Kunden außerhalb der Büroumgebung statt. Meist werden dafür speziellen Workshops durchgeführt (Maiden 2004). Informationen aus der Arbeitsumgebung des Kunden hingegen fließen nicht gezielt in die Anforderungserhebung mit ein. Anforderungen an ein System lassen sich jedoch dann besser beschreiben, wenn die beschreibenden Personen Zugang zu den sozialen und materiellen Aspekten des Systemumfelds erhalten (Blomberg et al. 2003). Diese Erkenntnisse zeigen die Bedeutung der Verknüpfung von Kontextinformationen mit Anforderungen auf. Traditionelle, desktopcomputerbasierte Anforderungsmanagementsysteme sind aufgrund ihres stationären Charakters für in situ Erhebungen von Anforderungen nicht verfügbar. Eine direkte Verknüpfung der ermittelten Informationen in Form von Texten, Bildern sowie Video-, Audio- oder anderen Messdateien mit den entsprechenden Anforderungen ist mit konventionellen RE-Werkzeugen nicht möglich. Daher wird der Einsatz mobiler Endgeräte wie Smartphones oder Tablets zur erweiterten Unterstützung neben den bestehenden Desktopsystemen vorgeschlagen.

Aus der *Media Richness Theory* von Daft und Lengel (1987) und ihrem Einsatz in der agilen Entwicklung (Schmidt et al. 2017) geht hervor, dass gerade während sozialen Interaktionen hohe Informationsdichten zu bewältigen sind. Aus dieser Theorie und den dargelegten Annahmen zur Einbeziehung des Kontexts leitet sich der hohe Nutzen einer situationsgerechten Unterstützung bei der Anforderungserhebung durch mobile Endgeräte ab. An das unterstützende Anforderungsmanagementwerkzeug ergeben sich Anforderungen wie beispielsweise sehr schnelle Verarbeitungsgeschwindigkeit und Bereitstellung von Inhalten sowie die Fähigkeit der Speicherung und Verarbeitung diverser Medien, um die optischen, akustischen, logischen und weiteren Informationen bestmöglich festzuhalten. Moderne, hoch performante mobile Endgeräte mit integrierter Sensorik erfüllen diese Anforderungen und bieten zusätzlich den Vorteil der hohen Verfügbarkeit aufgrund der weiten Verbreitung in unserer Gesellschaft. Daher sind die Geräte für mobiles *Requirements Engineering* geeignet. Im Rahmen des vom Land Hessen geförderten Projekts „*Requirements Engineering for Mobile Devices*“ (*ReqMoD*) wird daher an der prototypischen Entwicklung einer Anforderungsmanagementsoftware für mobile Endgeräte gearbeitet.

Das Ziel dieses Papers ist es, die Potentiale und den damit verbundenen Nutzen des *Requirements Engineerings* auf mobilen Endgeräten aufzuzeigen und zukünftiger Forschung damit die Grundlage zur Erschließung dieser Potentiale zu liefern. Dafür werden in Abschnitt 2 zunächst die Erkenntnisse bestehender Forschungsarbeiten zusammengefasst und dabei entstandene Lösungen und deren Funktionsweisen beispielhaft benannt. Anschließend wird in Abschnitt 3.1 ein Modell des *Requirements Engineering*-Prozesses vorgestellt, aus dem sich durch mobile Endgeräte unterstützbare Teilprozesse ableiten lassen. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.2 potentielle für

die Anforderungserhebung mit mobilen Endgeräten relevanten Anforderungsquellen beschrieben. In Abschnitt 3.3 wird eine mögliche Systemarchitektur präsentiert. Der Beitrag wird durch eine Zusammenfassung der Ergebnisse und einen Ausblick auf die weitere Forschung abgeschlossen.

2 Stand der Wissenschaft

Erste Ansätze zur Nutzung mobiler Endgeräte zur Anforderungserhebung in Kontextnähe sind seit 2004 bekannt. Vor allem das Forschungsteam um Maiden und Seyff hat durch die Entwicklung mehrerer prototypischer Applikationen für *Personal Digital Assistants* und deren Untersuchung in verschiedenen Anwendungsszenarien wertvolle Erkenntnisse gesammelt. Die von Maiden und Seyff entwickelten Applikationen sind *ARENA-M* (Seyff 2007), der *Mobile Scenario Presenter (MSP)* (Maiden et al. 2004) und *iRequire* (Seyff et al. 2010). Weitere in der Forschung diskutierte mobile Software-Tools sind, *SMAREP*, *M-RET* und *CREWSpace*.

ARENA-M bietet den Stakeholdern eine mobile Plattform, auf der sie den Anforderungsingenieuren ihre Ideen und Erwartungen an das zu entwickelnde Produkt jederzeit, von jedem Ort aus über ein Glossar mitteilen können (Seyff 2007). Die Möglichkeit, Umfragen zu erstellen, erlaubt es, eine Priorisierung der in einer Liste festgehaltenen Ideen und Anforderungen durchzuführen. Die Applikation bildet damit eine Plattform für die Kooperation zwischen Stakeholdern und Anforderungsingenieuren. Die Applikation zielt vor allem auf die Erfassung der Anforderungen der Stakeholder ab.

Mit dem *Mobile Scenario Presenter* lassen sich strukturierte Szenarios in situ durcharbeiten, um systematisch Anforderungen unter Einbeziehung des Kontexts zu erhalten (Seyff et al. 2004). Der *MSP* basiert auf der von Maiden entwickelten Methode *ART-SCENE* (Maiden 2004), welche eine Variante der Szenariotechnik ist. Mit diesem lassen sich über Abzweigungen Alternativszenarien erstellen. Der *MSP* ermöglicht die Dokumentation von Kontextinformationen und Anforderungen in Form von Text- und Audiodateien sowie Skizzen im Verlauf eines im Voraus strukturierten Szenarios. Dabei wird über den *MSP* auf eine zusätzliche Anwendung zur Aufnahme dieser Dateien zurückgegriffen (Maiden et al. 2006). Für Analysten besteht eine große Herausforderung in der Untersuchung der Umgebung, der Entgegennahme von Antworten und der gleichzeitigen Navigation durch ein Szenario und Dokumentation von Anforderungen. Eine Zusatzfunktion des *MSP* soll dies durch die automatische Einbeziehung von Kontextinformationen in den Szenario-Walkthrough erleichtern. Dafür werden die Kommunikationsmodule (Infrarot, Bluetooth und WiFi) des mobilen Endgeräts genutzt, um mit bestimmten Szenarioelementen, die mit Triggern versehen wurden, zu interagieren (Seyff et al. 2010b). Die Einbeziehung des Kontexts erfolgt über die Aktivierung dieser Trigger unter vorher festgelegten Bedingungen. Der *MSP* dient als Expertenwerkzeug zur methodischen Unterstützung bei der Anforderungserhebung. Ob der *MSP* eine Unterstützung des Anforderungsmanagements bietet, wird nicht erläutert. Hierzu zählt beispielsweise eine automatische Synchronisation der erhobenen Anforderungen mit einem bestehenden Anforderungsmanagementsystem.

Mit *iRequire* präsentiert Seyff eine Anwendung, die es Endnutzern ermöglicht ihre individuellen Anforderungen zu dokumentieren (Seyff et al. 2010). Die Applikation ist für Smartphones entwickelt und bietet aufgrund der Eigenschaften des mobilen Geräts die Vorteile der ad-hoc Verfügbarkeit und der kaum invasiven Verwendbarkeit. Das bedeutet, dass der Endnutzer während eines Prozesses Informationen festhalten kann, ohne diesen signifikant zu unterbrechen. Damit bietet die Anwendung das Potential, Anforderungen in Situationen zu notieren, in denen die Zeit oder die Werkzeuge für eine ausführliche Dokumentation fehlen. Um dem Experten bei der Transformation der von Endnutzern formulierte Anforderungen in technische Anforderungen zu unterstützen, müssen die Endnutzer bei der Erstellung neuer Anforderungen Kontextinformationen mittels Beschreibungen, Audiodateien, Videos oder Bildern festhalten sowie eine Begründung für ihre Anforderung benennen.

Die Anwendung *SMAREP* (*Story based Mobile Application for Requirements Engineering Process*) überträgt die Methode der *Story Cards* auf ein mobiles Endgerät (Palamalai et al. 2008) und ist für die Anwendung in der Softwareentwicklung gedacht. Traditionell schreiben Stakeholder und Endnutzer bei dieser Methode Erfahrungsberichte (die *Stories*) auf eine Karte. Im Anschluss wird die Karte diskutiert und auf Vollständigkeit überprüft, bevor sie zur Anforderungstransformation weiterverwendet wird. In der Softwareversion dieser Methode schreiben die Stakeholder digitale Karten, die über das Internet an die Experten weitergeleitet werden. Diese filtern, analysieren und kombinieren die erhaltenen *Stories*, um daraus Anforderungen abzuleiten. Diese werden zur Validierung an die Ersteller der jeweiligen *Story* zurückgeschickt. *SMAREP* bietet wie *ARENA-M* und *iRequire* eine Kommunikationsplattform zwischen Anforderungsingenieuren und Stakeholdern bzw. Endnutzern.

Fahmi et al. (2007) haben verschiedene Methoden zur Anforderungserhebung auf ihre Eignung für die Anwendung auf mobilen Endgeräten bewertet. Insbesondere Beobachtung, strukturierte Interviews und Kreativitätstechniken sind gut nutzbar. Erstaunlicherweise wird die Szenario-Technik als ungeeignet bewertet, obwohl Maiden deren Eignung in seinen Versuchen mit dem *MSP* bewiesen hat (Maiden et al. 2006). Fahmi et al. (2007) haben eine prototypische Ausgestaltung des *M-RET* (*Mobile Requirements Elicitation Tool*) geplant, über eine Umsetzung ist nichts bekannt.

Mit *CREWSpace* stellen Lutz et al (2012) eine mobile Applikation für die Anforderungsermittlung in der Softwareentwicklung vor. *CREWSpace* nutzt die Methode der *Class Responsibility Collaboration* (*CRC*). Im Rahmen eines Workshops können die Teilnehmer über ihre mobilen Endgeräte gleichzeitig *CRC*-Karten erzeugen und bearbeiten und so gemeinsam Anwendungsfälle und Objektklassen identifizieren, erstellen und analysieren.

Die entwickelten Software-Tools wurden im Rahmen verschiedener Anwendungsfälle untersucht. Die Haupteckdaten sind, dass sich mobile Endgeräte zur Anforderungserhebung nutzen lassen und einen erkennbaren Mehrwert liefern (Maiden et al 2006, Seyff et al. 2010a). Durch den Einsatz von *MSP* und *iRequire* lassen sich mehr und detailliertere Anforderungen finden. Dies lässt sich auf die Erhebung von Anforderungen direkt an den Anforderungsquellen zurückführen (Maiden et al. 2007). Die Eigenschaften und Funktionalitäten mobiler Endgeräte ermöglichen diese quellennahe Erhebung. Zu den Eigenschaften zählen beispielsweise die Portabilität und die Verbreitung. Diese führen zu einer hohen Verfügbarkeit und damit zu einer Anwendbarkeit der Software-Tools zu jeder Zeit an jedem Ort. Die Möglichkeit, Informationen in verschiedenen Formaten zu erfassen und festzuhalten, lässt einen Einsatz zu, bei dem Prozesse nicht gestört oder unterbrochen werden (Seyff et al. 2010a). Weitere Erkenntnisse sind nach Maiden et al (2007):

- Für Desktopcomputer entwickelte Funktionen und Methoden sind nicht zwingend auf mobile Endgeräte übertragbar. Aus diesem Grund werden die Features einer mobilen RE-Anwendung sorgfältig ausgewählt.
- Ein mobiles Software-Tool soll bestehende Desktoplösungen nicht ersetzen, sondern diese komplementieren, um den allgemeinen Funktionsumfang zu erweitern.
- Ziel des mobilen *Requirements Engineerings* ist es, mit mobilen Endgeräten ausreichend Informationen zu sammeln. Diese unterstützen bei der Präzisierung und Ausformulierung der Anforderungsspezifikation.
- Der Funktionsumfang der mobilen *Requirements Engineering* Anwendung muss auf den Anwendertyp angepasst werden. Die Nutzergruppe Anforderungsingenieur benötigt andere Funktionen als ein Endnutzer.
- Herausforderungen an die Nutzerfreundlichkeit ergeben sich aus der geringen Bildschirmgröße und die Touch-Bedienung der mobilen Endgeräte. Durch Scrolling erreichbare Informationen werden weniger beachtet. Funktionen, die nur über eine Reihe von Klick-Vorgängen aufrufbar sind, werden zusätzlich weniger genutzt. Dies kann zur Nichtentdeckung wichtiger Anforderungen führen.
- Für den Einsatz bestehen zusätzliche technische Anforderungen an die Stromversorgung, die Sicherung des Internetzugangs oder die Möglichkeit der offline-Verfügbarkeit.

3 Potentiale des Requirements Engineerings auf mobilen Endgeräten

In den genannten Forschungsarbeiten werden wichtige Grundannahmen des *Requirements Engineerings* auf mobilen Endgeräten offengelegt und diverse Potentiale aufgezeigt. An diese Erkenntnisse wird angeknüpft und bisher unentdeckte und ungenutzte Potentiale werden erschlossen. Dabei wird neben dem Teilbereich der Aufgabenklärung auch das Anforderungsmanagement auf mobilen Endgeräten untersucht.

3.1 Prozessmodell des Requirements Engineerings

Die Grundlage zur Identifizierung von Potentialen liegt in dem vollständigen Verständnis des *Requirements Engineering*-Prozesses. Dafür wurde basierend auf den Ausführungen von Baumgart (2016) ein Prozessmodell erstellt, in dem die Prozesse der Aufgabenklärung und des Anforderungsmanagements (gestrichelte Umrandung) miteinander verknüpft werden. Das Modell ist in Bild 1 dargestellt und beschreibt den iterativen Prozess von Beginn des *Requirements Engineerings* bis zur vollständigen Anforderungsspezifikation.

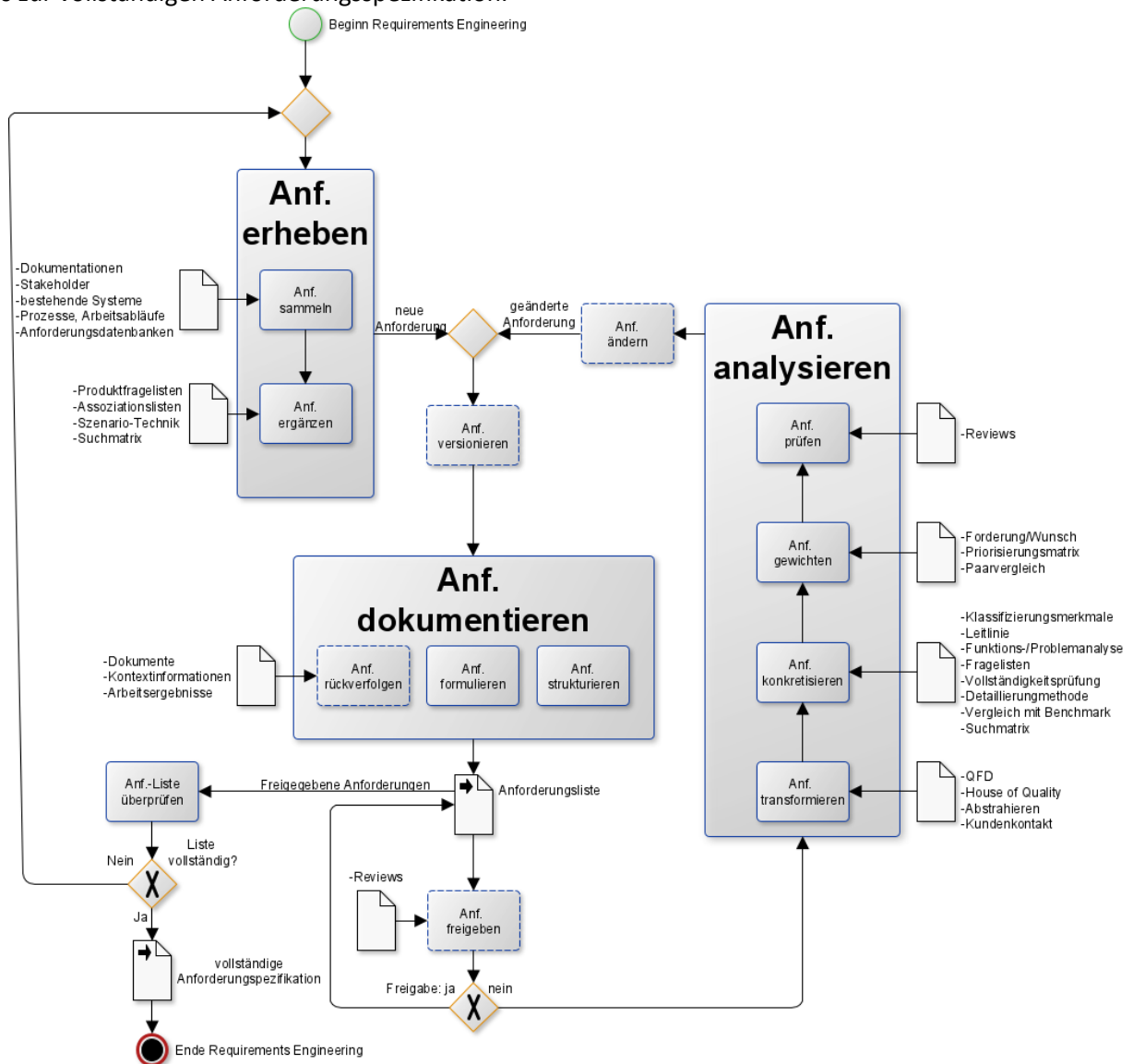


Bild1: Prozessmodell des Requirements Engineerings

Zusätzlich wurden den Unterprozessen diverse Methoden und Techniken des *Requirements Engineerings* und des Qualitätsmanagements (Ahrens 2000, Feldhusen und Grote 2013) zugeordnet. Diese Methoden finden in den jeweiligen Unterprozessen Anwendung. Ausnahme bildet der

Initialprozess der Anforderungssammlung. Diesem wurden die unterschiedlichen Anforderungsquellen zugeordnet. Das Prozessmodell deckt die wichtigsten Aspekte des *Requirements Engineerings* ab und hebt die Vernetzung zwischen der Aufgabenklärung und dem Anforderungsmanagement hervor. Zusätzlich bietet es eine übersichtliche Darstellung über die verschiedenen Prozesse, die einsetzbaren Methoden und die zu untersuchenden Anforderungsquellen. Damit lässt sich das Modell zur Identifikation potentieller Anforderungsquellen und Methoden für das mobile *Requirements Engineering* nutzen.

3.2 Potentiell nutzbare Anforderungsquellen für das Requirements Engineerings auf mobilen Endgeräten

Wie Maiden et al. (2007) schon erkannt haben, ist der Einsatz mobiler Endgeräte zur Anforderungserhebung besonders an den Stellen sinnvoll, an denen die Anforderungen entstehen. Jedoch lässt sich der Nutzen mobiler Endgeräte nicht auf jede Anforderungsquelle übertragen. Daher müssen die Stärken und Schwächen mobiler Endgeräten für die Auswahl der geeigneten Anforderungsquellen betrachtet werden. So ist es aufgrund der geringen Bildschirmgröße beispielsweise wenig sinnvoll, eine Dokumentenanalyse auf einem Smartphone durchzuführen. Für ein strukturiertes Interview mit einem Kunden hingegen lässt sich das Smartphone aufgrund der Möglichkeit der Sprachaufnahme optimal nutzen. Die Antworten werden dabei direkt mit den Fragen und den dazugehörigen Anforderungen verknüpft. Das wichtigste Kriterium ist, dass die Anforderungsquelle nicht vom Büroarbeitsplatz des Anforderungsingenieurs aus erreicht werden kann. In den folgenden Anforderungsquellen wurden Potentiale für den Einsatz mobiler Endgeräte erkannt:

- **Stakeholder:** Insbesondere Kunden und Endnutzer sind als primäre Stakeholder eine der wichtigsten Anforderungsquellen. Mittels mobiler Endgeräte können Informationen, die während des direkten Kundenkontakts entstehen, ohne zusätzliche Hilfsmittel und ohne Unterbrechung erfasst und abgespeichert werden. Weiterhin lassen sich mobile Endgeräte auch zur agilen, asynchronen Kommunikation mit den Stakeholdern nutzen.
- **Bestehende Systeme:** Über eine Untersuchung von Vorgänger- und Konkurrenzprodukten, Prototypen sowie der Einsatzumgebung lassen sich häufig Anforderungen ermitteln, die dem Kunden nicht bekannt sind. Während dieser Untersuchung werden Daten gesammelt, die mittels einer RE-Anwendung für mobile Endgeräten direkt mit Anforderungen verknüpft werden können. Die Erfassung dieser Informationen ist direkt über das mobile Endgerät denkbar oder über die Verbindung des Endgeräten mit einem speziellen Sensorsystem oder dem Produkt selber. Eine weitere Möglichkeit der Anforderungserhebung an bestehenden Systemen ist die Methode der *Story Cards*. Zacharias et al. (2019) haben diese Methode erfolgreich von der Softwareentwicklung auf die Entwicklung physischer Produkten übertragen. Dabei nehmen Probanden die Rolle des Endnutzers ein und verwenden einen Prototyp des zu entwickelnden Produkts. Ihre Erfahrungen halten sie auf den *Story Cards* fest. Der unterstützende Einsatz mobiler Endgeräte wird nicht erwähnt. Diese würden dem Endnutzer die Möglichkeit bieten, den Erfahrungsbericht mit weiteren Informationen wie Bildern und Videos anzureichern.
- **Prozesse:** Neben dem eigentlichen Produkt an sich bergen auch die Prozesse, in denen das Produkt ein Bestandteil ist, Anforderungen an das Produkt. Beispielhaft für diese Prozesse sind der Einsatz, die Fertigung und Montage des Produkts oder Wartungsarbeiten daran zu nennen. Um diese Prozesse so akkurat wie möglich zu erfassen, ist eine möglichst nicht invasive und nicht unterbrechende Analyse erforderlich.

Das Wissen über die potentiell nutzbaren Anforderungsquellen bildet die Grundlage für ein mobiles *Requirements Engineering*. Darauf aufbauend können Methoden und Werkzeuge entwickelt werden.

3.3 Systemarchitektur

Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wurde eine mögliche Systemarchitektur für eine Anwendung für *Requirements Engineering* auf mobilen Endgeräten (*ReqMoD*) entwickelt. Das Architekturmodell ist in Bild 2 dargestellt.

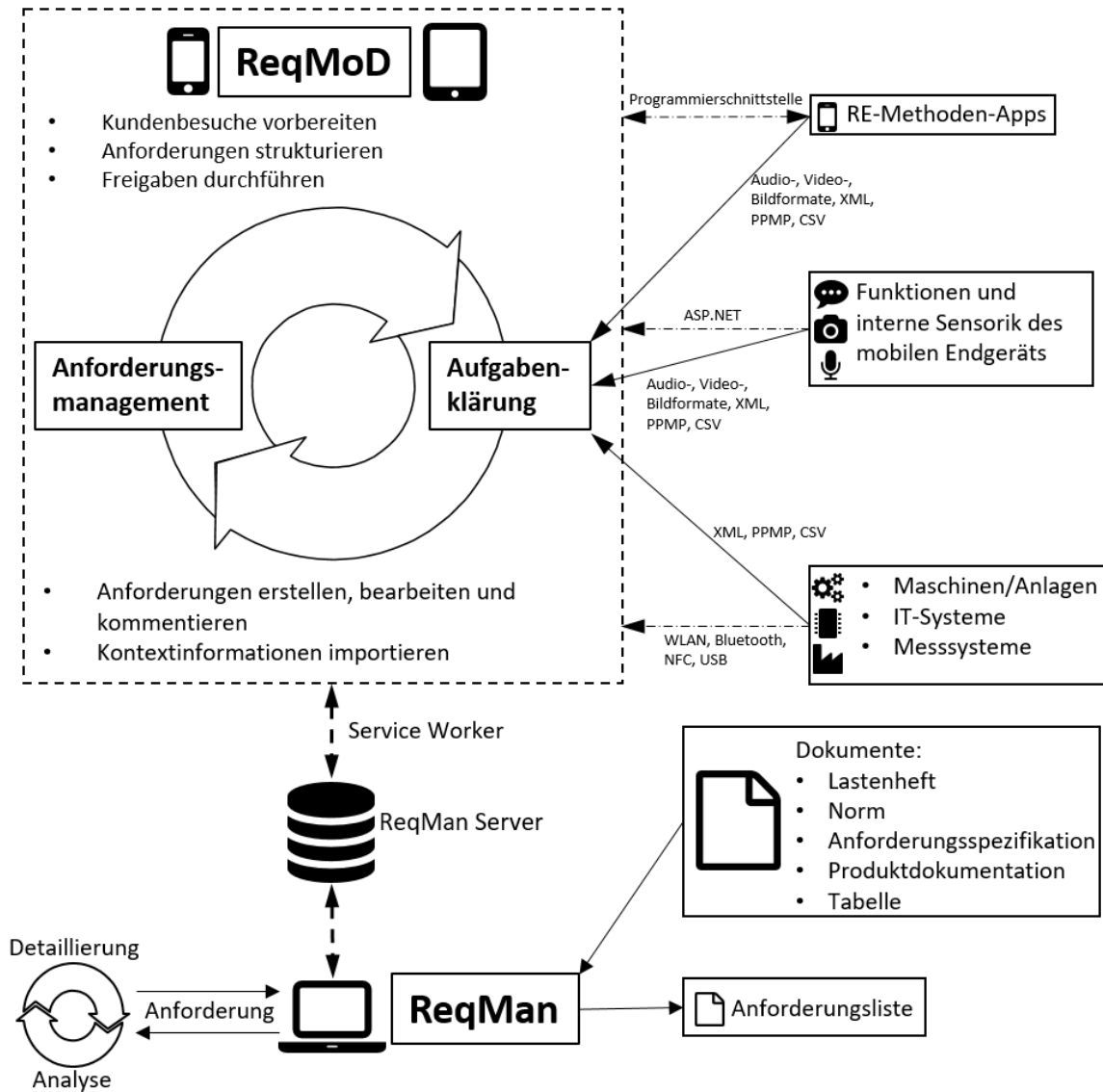


Bild 2: mögliche Systemarchitektur für eine RE-Anwendung auf mobilen Endgeräten

ReqMoD ist ein mobiler Ableger des Desktopsystems *ReqMan* und greift auf den gleichen Server zu. Die Anwendung ist als progressive Web App gestaltet, die mittels eines *Service Workers* offlinefähig ist. Damit ist der Einsatz auch in Bereichen, in denen keine oder schlechte Internetverbindung möglich wie beispielsweise Maschinenhallen. Aufgrund der engen Vernetzung von Aufgabenklärung und Anforderungsmanagement unterstützt *ReqMoD* Funktionen beider Prozesse. Dadurch lassen sich Synergieeffekte erzielen. So ist es denkbar, Anforderungen zu erstellen und mit Kontextinformationen zu versehen, die mithilfe des mobilen Endgeräts erfasst wurden. Bestehende Inhalte des Anforderungsmanagementsystems können zur Vorbereitung von Kundenbesuchen genutzt werden. Auch die Strukturierung und Freigabe von Anforderungen lässt sich effizient auf mobilen Endgeräten durchführen. Für das Erfassen von Anforderungen sind die folgenden Möglichkeiten vorgesehen:

- In *ReqMoD* integrierte Methoden der Anforderungserfassung oder spezielle Apps, die die Anwendung solcher Methoden unterstützen und deren Ergebnisse über eine Programmierschnittstelle direkt mit Anforderungen in *ReqMoD* verknüpft werden können.
- Nutzung vorhandener Funktionen und interner Sensorik des mobilen Endgeräts und Import der Daten in *ReqMoD* mittels eines ASP.NET Frameworks.
- Daten von Maschinen, Anlagen, IT-Systemen oder einem speziellen Messsystem, die über die Kommunikationsschnittstellen des mobilen Endgeräts importiert werden können.

Keine Aufgabe der mobilen Anwendung ist hingegen die Detaillierung von Anforderungen. Desktopbasierte Spezialsoftware ist für die Analyse der aufgenommenen Daten besser geeignet. Auch das Einlesen, Transformieren und Exportieren von Dokumenten und ist dem Desktopprogramm vorbehalten.

Das vorgestellte Architekturmodell beschreibt die Hauptfunktionen des mobilen RE-Tools. Es zeigt potentielle Inputquellen auf und legt die Verbindung zur Desktopanwendung dar. Damit bildet es die Grundlage für die Entwicklung eines solchen Tools.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des *Requirements Engineerings* ist die Erstellung einer vollständigen, konsistenten und präzisen Anforderungsliste. Erfolgskritisch ist dabei die Kombination aus nachvollziehbarer Anforderungsermittlung und effizientem Anforderungsmanagement. Bestehende technische Unterstützung beschränkt sich auf computerbasierte Systeme, die nicht für einen Einsatz in Nähe der Anforderungsquellen geeignet sind. Jedoch entstehen genau dort die Anforderungen, weshalb der Einsatz mobiler Endgeräte vorgeschlagen wird. Diese sind aufgrund ihrer Eigenschaften und der technischen Entwicklungen der letzten Jahre dafür geeignet. Der Hauptnutzen des in situ Einsatzes mobiler Geräte liegt in der Aufgabenklärung. Zusätzlich ermöglicht ein mobiler Ableger des Anforderungsmanagementsystems die direkte Verknüpfung von gesammelten Daten ohne Informationsverlust, was dem Anforderungsingenieur bei der Anforderungsanalyse unterstützt. Somit ist er besser in der Lage, die Ziele Vollständigkeit, Konsistenz und Präzision zu erreichen.

Dieser Beitrag leistet einen bedeutenden Beitrag zur Wiederaufnahme der Forschung des *Requirements Engineerings* auf mobilen Endgeräten. Die Haupteckdaten sind:

- Die bisherige Forschung auf dem Bereich des mobilen *Requirements Engineerings* wird diskutiert und die wichtigsten Ergebnisse werden zusammengefasst.
- In einem Prozessmodell für das *Requirements Engineering* werden die Teilprozesse der Aufgabenklärung und des Anforderungsmanagements verknüpft und Zusammenhänge dargestellt.
- Anhand dieses Modells werden Potentiale des mobilen *Requirements Engineerings* in Form von relevanten Anforderungsquellen identifiziert.
- Aus den gesammelten Erkenntnissen wird eine mögliche Systemarchitektur für ein mobiles RE-Tool abgeleitet.
- Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Anforderungsmanagement und Aufgaben lassen sich durch eine Vereinigung beider Teilprozesse des *Requirements Engineerings* auf mobilen Endgeräten Synergieeffekte erzielen.

Nach der Feststellung der für das mobile *Requirements Engineering* relevanten Anforderungsquellen besteht der nächste Schritt in der Entwicklung einer geeigneten methodischen Unterstützung bei der Anforderungserhebung. Dafür soll zunächst eine Analyse bestehender des *Requirements Engineering* unterstützender Methoden vorgenommen werden. Nach einer Auswahl geeigneter Methoden wird deren Adaption auf mobile Endgeräte vorgenommen.

Danksagung

Wir danken dem Land Hessen für die Förderung des Projekts.



Dieses Projekt (HA-Projekt-Nr.: 830/19-150) wird im Rahmen der Innovationsförderung Hessen aus Mitteln der LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben gefördert.

Literatur

- AHRENS 2000 AHRENS, G.: *Das Erfassen und Handhaben von Produkthanforderungen*. Technische Universität Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Dissertation, 2000.
- Aston 2020 ASTON, B.: Die besten Anforderungsmanagement Tools 2020. URL <https://thedigitalprojectmanager.com/de/anforderungsmanagement-tools/>. – Aktualisierungsdatum: 16.01.2020 – Überprüfungsdatum 26.08.2020
- Baumgart 2016 BAUMGART, I.: Requirements Engineering. In: LINDEMANN, U. (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*. München: Hanser, 2016, S. 425–453
- Beyer und Holtzblatt 2009 BEYER, H.; HOLTZBLATT, K.: *Contextual design: Defining customer-centered systems*. San Francisco, Calif.: Morgan Kaufmann, 2009
- Blomberg et al. 2003 BLOMBERG, J.; BURREL, M.; GUEST G.: An Ethnographic Approach to Design. In: JACKO, J.A; SEARS, A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals: Mahawah: Lawrence Erlbaum Associates, 2003 (Evolving Technologies and Emerging Applications)*, S. 964–986
- Daft und Lengel 1983 DAFT, R. L.; LENGEL, R. H.: Information Richness. A New Approach to Managerial Behavior and Organization Design. In: *Research in Organizational Behaviour (1983)*, Nr. 6, S. 191–233
- Fahmi et al. 2007 FAHMI, S. A.; IBRAHIM, A.; CHOI, H.-J.: Enhancing Requirements Engineering Activities through the Use of Mobile Technology Devices and Tools. In: *Future Generation Communication and Networking (FGCN 2007): IEEE, 2007, S. 578–581*
- Feldhusen und Grote 2013 FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- Holtzblatt 2003 HOLTZBLATT, K.: Contextual Design. In: JACKO, J.A; SEARS, A. (Hrsg.): *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals: Mahawah: Lawrence Erlbaum Associates, 2003 (Evolving Technologies and Emerging Applications)*, S. 942–963
- Lutz et al. 2012 LUTZ, R.; SCHÄFER, S.; DIEHL, S.: Using mobile devices for collaborative requirements engineering. In: GOEDICKE, Michael; MENZIES, Tim; SAEKI, Motoshi (Hrsg.): *Proceedings of the 27th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering - ASE 2012*. New York, New York, USA: ACM Press, 2012, S. 298
- Maiden 2004 MAIDEN, N.: Systematic Scenario Walkthroughs with ART-SCENE. In: ALEXANDER, I.; MAIDEN, N. (Hrsg.): *Scenarios, Stories, Use Cases: Through the Systems Development Life-Cycle*: John Wiley & Sons, 2004, S. 161–178

- Maiden et al. 2004 MAIDEN, N.; SEYFF, N.; GRUNBACHER, P.: The Mobile Scenario Presenter: integrating contextual inquiry and structured walkthroughs. In: 13th IEEE International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises: IEEE Comput. Soc, 2004, S. 115–120
- Maiden et al. 2006 MAIDEN, N.; SEYFF, N.; GRUNBACHER, P.; OTOJARE, O.; MITTEREGGER, K.: Making Mobile Requirements Engineering Tools Usable and Useful. In: 14th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE'06): IEEE, 2006 - 2006, S. 29–38
- Maiden et al. 2007 MAIDEN, N.; SEYFF, N.; GRUNBACHER, P.; OTOJARE, O. O.; MITTEREGGER, K.: Determining Stakeholder Needs in the Workplace: How Mobile Technologies Can Help. In: IEEE Software 24 (2007), Nr. 2, S. 46–52
- Palamalai et al. 2008 PALAMALAI, M.; AHMAD, R.; NIZAM, M. H.: Story Based Mobile Application for Requirements Engineering Process. In: 2008 International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering: IEEE, 2008 - 2008, S. 303–307
- Schmidt et al. 2017 SCHMIDT, T. S.; WALLISCH, A.; BOHMER, A. I.; PAETZOLD, K.; LINDEMANN, U.: Media richness theory in agile development choosing appropriate kinds of prototypes to obtain reliable feedback. In: 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC): IEEE, 2017 - 2017, S. 521–530
- Seyff 2004 SEYFF, N.: Collaborative tools for mobile requirements acquisition. In: Proceedings. 19th International Conference on Automated Software Engineering, 2004: IEEE, 2004, S. 426–429
- Seyff et al. 2004 SEYFF, N.; GRUNBACHER, P.; MAIDEN, N.; TOSAR, A.: Requirements engineering tools go mobile. In: Proceedings. 26th International Conference on Software Engineering: IEEE Comput. Soc, 2004, S. 713–714
- Seyff et al. 2007 SEYFF, N.; GRA, F.; GRUNBACHER, P.; MAIDEN, N.: The Mobile Scenario Presenter: A Tool for in situ Requirements Discovery with Scenarios. In: 15th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2007): IEEE, 2007 - 2007, S. 365–366
- Seyff et al. 2010a SEYFF, N.; GRAF, F.; MAIDEN, N.: Using Mobile RE Tools to Give End-Users Their Own Voice. In: 2010 18th IEEE International Requirements Engineering Conference: IEEE, 2010 - 2010, S. 37–46
- Seyff et al. 2010b SEYFF, N.; GRAF, F.; GRUNBACHER, P.: Using Contextual Information to Guide on-site Analysts. In: 2010 18th IEEE International Requirements Engineering Conference: IEEE, 2010 - 2010, S. 397–398
- Zacharias et al. 2019 ZACHARIAS, I. C. S.; CAMPESE, C.; DOS SANTOS, T. B.; DA CUNHA, L. P.; COSTA, J. M. H.: *User Stories Method and Assistive Technology Product Development: A New Approach to Requirements Elicitation*. In: *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1* (2019), Nr. 1, S. 3781–3790

Unterstützung bei der interdisziplinären Zusammenarbeit – Personenneutrale Wissenslandkarten

Supporting Interdisciplinary Teamwork – Person-unspecific Knowledge Maps

Michael P. Voigt, Sinan Idrizi, Daniel Roth, Hansgeorg Binz

Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Stuttgart
Michael.Voigt@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Adaptive Bauwerke bieten die Möglichkeit, den steigenden Anforderungen hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zu begegnen, bedingen jedoch die enge Zusammenarbeit eines stark interdisziplinären Teams. Dieser Beitrag zeigt, wie das Verständnis über die Disziplinen verbessert und somit die Zusammenarbeit unterstützt werden kann. Der Ansatz ist dabei eine personen-neutrale, bildungsbasierte Wissenslandkarte, in der die Fertigkeiten und die Kenntnisse, die in unterschiedlichen Studiengängen erworben werden, dargestellt wird. Die Wissenslandkarten dienen als Ansatzpunkt für den interdisziplinären Exkurs und zeigen Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede zwischen den Stuttgarter Studiengängen der Disziplinen Architektur und Stadtplanung, Tragwerksplanung, Bauphysik, Maschinenbau, Systemdynamik und Umweltschutztechnik. Zusätzlich zu den Ergebnissen wird innerhalb des Beitrags auch auf das Vorgehen zur Erstellung bildungsbasierter Wissenslandkarten und die dabei auftretenden Herausforderungen eingegangen.

Keywords:

Wissenslandkarte, adaptive Bauwerke, interdisziplinäre Zusammenarbeit, Bildung

Abstract: Adaptive buildings allow to meet the increasing requirements regarding the consumption of resources in the building industry but require a strong interdisciplinary teamwork. This paper shows how the understanding about the disciplines can be improved and thus the teamwork can be supported. The approach is a concept of a person-neutral, education-based knowledge map, in which the skills and knowledge that was learned during the studies are presented. The knowledge maps serve as a basis for the interdisciplinary exchange. They show the similarities and differences between the studies of Stuttgart regarding the disciplines of architecture and urban planning, structural design, building physics, mechanical engineering, system dynamics and environmental engineering. In addition to the results, the article also describes the procedure for the development of education-based knowledge maps and the challenges that arise from it.

Keywords:

Knowledge map, adaptive buildings, interdisciplinary teamwork, education

1 Einleitung, Problemstellung und Forschungsansatz

Entsprechend den Angaben der Europäischen Kommission (EU 2021) entfallen aktuell etwa 50 % des gesamten Ressourcenverbrauchs auf das Bauwesen. Unter Berücksichtigung der weiterhin wachsenden Bevölkerung und der Tatsache, dass bereits heute zentrale Bauressourcen, wie Flusssand und Wasser (Hauptbestandteile von Beton), über das Maß der natürlichen Erneuerung hinweg verbraucht werden (Weidner et al. 2018), muss sich die Bauindustrie enormen Herausforderungen stellen, um den steigenden Bedarf an Wohn- und Infrastruktur ressourcengerecht zu bedienen. Adaptive Bauwerke stellen hierbei einen Ansatz dar, um den genannten Herausforderungen zu begegnen. Durch den Einbau von Sensoren und Aktoren in das Tragwerk und die Fassade, kann das Bauwerk auf die Umgebungseinflüsse reagieren und beispielsweise Windlasten homogen im Tragwerk verteilen (Honold et al. 2019). Erste Forschungsergebnisse zeigen eine Gewichtsreduktion und damit einen verringerten Ressourcenverbrauch adaptiver Tragwerke, im Vergleich zu herkömmlichen Tragwerken, von über 50 % (Sobek 2007), bei gleichzeitiger Verlängerung der Lebensdauer um den Faktor zwei (Ostertag et al. 2020).

Aufgrund der stark steigenden Komplexität eines adaptiven Bauwerks, im Vergleich zu herkömmlichen Bauwerken (Honold et al. 2016), ist ein interdisziplinäres Team der Disziplinen Architektur, Tragwerksplanung, Bauphysik, Maschinenbau, Systemdynamik und Ökologie nötig (Leistner et al. 2020), um sich gemeinsam den neuen Herausforderungen zu stellen (Honold et al. 2017). Diese neuen Herausforderungen müssen den jeweiligen Verantwortlichen klar zugeordnet werden (Honold et al. 2019), was erleichtert werden kann, wenn das Wissen der einzelnen Disziplinen aufeinander abgestimmt und miteinander geteilt wird (Honold et al. 2016). Zudem erfordert die interdisziplinäre Zusammenarbeit ein gemeinsames Verständnis über die Disziplinen selbst (Gantner et al. 2018). Dies ermöglicht eine Steigerung der Produktivität, da durch das disziplinübergreifende Denken Herausforderungen gemeinschaftlich gelöst werden und nicht monodisziplinär (Schmid 2015).

Um das Verständnis für die beteiligten Disziplinen bei der Planung adaptiver Bauwerke zu verbessern, werden in diesem Beitrag die Bildungswege der bei der Planung adaptiver Bauwerke beteiligten Disziplinen betrachtet. Bereits Gericke und Blessing (Gericke und Blessing 2011) beschreiben, dass eine Beleuchtung der disziplinspezifischen Kulturen wie z. B. der Bildung nötig ist, um die interdisziplinäre Entwicklung und Planung von Produkten oder Bauwerken zu verstehen und zu unterstützen. Zudem beeinflusst die Bildung maßgeblich das vorhandene Wissen, die Fähigkeiten und die Arbeitsweise der Disziplinangehörigen (Ng und Feldman 2009). Ein Vergleich der Bildungswege zwischen den zuvor genannten Disziplinen, insbesondere hinsichtlich der späteren, interdisziplinären Zusammenarbeit, ist aufgrund der Neuheit adaptiver Bauwerke aktuell nicht in der Literatur zu finden. Ein bestehender Vergleich der Bildungswege zwischen dem Ingenieurwesen und der Architektur betrachtet jedoch beispielsweise die historische Entwicklung der Digitalisierung (Gerber et al. 2015; Bayhan und Karaca 2020). Weitere allgemeinere und meist oberflächliche Vergleiche zu Bildungswegen (z. B. Studiengänge) finden sich in Studienführern für Schulabsolvent*innen oder lassen sich aus den Beschreibungen der Universitäten herauslesen. Die Forschungsfrage des Beitrags lautet dementsprechend, *wie das Verständnis über die, bei der Planung adaptiver Bauwerke beteiligten Disziplinen durch eine Analyse der jeweiligen Bildungswege verbessert werden kann*. Der dabei verfolgte Ansatz entspricht der Hypothese, *dass die Bereitstellung und Gruppierung der Ergebnisse in Wissenslandkarten eine geeignete Grundlage ermöglicht und die Verwendung dieser das Verständnis über die Disziplinen verbessert*.

2 Aufbau des folgenden Beitrags

Beginnend mit einer Übersicht über die Grundlagen zu Wissenslandkarten werden in Abschnitt 3 gängige Typen von Wissenslandkarten und das allgemeine Vorgehen zur Erstellung solcher vorgestellt. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 4 Anforderungen an die zu entwickelnde Wissenslandkarte im Kontext der Untersuchung definiert und anhand dieser eine Auswahl eines geeigneten Kartentyps getroffen. In Abschnitt 6 wird das spezifizierte Vorgehen beschrieben, mit dem eine Wissenslandkarte

entsprechend der Anforderungen erstellt werden kann. Dabei wird das in Abschnitt 5 vorgestellte Vorgehen aufgegriffen und für den Anwendungsfall präzisiert. Zudem findet eine formale Auseinandersetzung mit der Darstellung der Wissenslandkarte statt. In Abschnitt 6 wird das Ergebnis des Vorgehens präsentiert und durch eine inhaltliche Auseinandersetzung mit der Wissenslandkarte ergänzt. Abschnitt 7 umfasst eine Zusammenfassung, eine erste Evaluation hinsichtlich der Verbesserung des Verständnisses über die Disziplinen und eine kritische Diskussion der Ergebnisse.

3 Grundlagen zu Wissenslandkarten

Wissenslandkarten sind eine verbreitete Methode des Wissensmanagements (Eppler 2001; Kraemer 2005; Drews et al. 2012; Schwerdtner et al. 2020), um vorhandene Wissensbestände (z. B. erlerntes Wissen aus dem Studium) grafisch aufzubereiten und dadurch die Effektivität der Kommunikation, Prozesse und Arbeitsabläufe zu steigern (Schwerdtner et al. 2020). Der Aufbau besteht meist aus einer Kontextebene und individuellen Wissens-elementen, die vor der Kontextebene derart positioniert werden, dass die Beziehungen zwischen den Elementen erkennbar werden (Eppler 2001). Dabei wird je nach Zielsetzung zwischen verschiedenen Typen von Wissenslandkarten unterschieden. Die Darstellungen sind dabei vielfältig. Beispiele sind in (Kraemer 2005; Ott 2015) zu finden. Eppler (2001) unterscheidet zwischen folgenden Typen:

- **Wissensträgerkarten** sind personenbezogen aufgebaut und verweisen bei der Wissenssuche auf entsprechende Personen (Wissensträger). Sie beantworten Fragen wie: „Wer kann/weiß das?“.
- **Wissensbestandskarten** verweisen zusätzlich auf das bereits kodifizierte/aufgezeichnete Wissen eines Teams oder Unternehmens mit Verlinkung zu den zugehörigen Speicherorten. Sie beantworten Fragen wie: „Wo finde ich das?“ oder „Wie viele Experten haben wir in diesem Bereich?“.
- **Wissensanwendungskarten** stellen das Wissen in Abhängigkeit von Prozessschritten und Unternehmenssituationen dar und zeigen damit auf, wann welches Wissen benötigt wird und bei wem oder wo es zu finden ist. Sie beantworten Fragen wie: „Wer hat Erfahrung beim Übergang vom Prototyp zur Massenfertigung?“.
- **Wissensstrukturkarten** verdeutlichen die Beziehungen zwischen dem Wissen einer Domäne. Ziel ist es, die Zusammenhänge, Abhängigkeiten und Unterschiede hervorzuheben. Sie beantworten Fragen wie: „Welche Fähigkeiten sind für die Durchführung eines Projekts erforderlich und in welchem Verhältnis stehen sie zueinander?“.
- **Wissensentwicklungskarten** zeigen das bestehende und das zu erwerbende Wissen auf und ermöglichen eine Form der Lernplanung zur Kompetenzerwerbung. Sie beantworten Fragen wie: „Wie erreichen wir den Status „exzellent“ für unsere Einheit?“.

Das Vorgehen zur Erstellung einer Wissenslandkarte ist stets ähnlich und kann in fünf Schritte gegliedert werden (Eppler 2001; Probst et al. 2012):

1. Identifizieren von wissensintensiven Prozessen
2. Ableiten der relevanten Wissensbestände, -träger und -quellen
3. Kodifizieren der Wissensbestände, -träger und -quellen
4. Auswahl einer geeigneten Visualisierung und Integration des kodifizierten Wissens
5. Berücksichtigen von Aktualisierungsmöglichkeiten

4 Anforderungen an die Wissenslandkarte und Auswahl des Kartentyps

In diesem Abschnitt werden Anforderungen an eine bildungsbezogene Wissenslandkarte für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Planung adaptiver Bauwerke definiert. Anhand der Anforderungen soll geprüft werden, welcher Kartentyp sich eignet, ob eine Kombination bisheriger Ansätze oder eine Neuentwicklung der Wissenslandkarte zielführend ist. Der Fokus liegt auf den Anforderungen, die in Tabelle 4.1 zusammengefasst wurden:

Tabelle 4.1: Spezifische Anforderungen an eine Wissenslandkarte im Kontext der Planung adaptiver Bauwerke

Nr.	Anforderung	Beschreibung/Erklärung
1	Personenneutral	Bei komplexen Aufgaben wechseln die Interessengruppen mit hoher Wahrscheinlichkeit (Schill-Fendl 2004), was zu einer stetigen Neuaufsetzung der Wissenslandkarte führen würde.
2	Beziehung zwischen den Wissenselementen darstellen (Eppler 2001, S. 2)	Wissenselemente sollen so positioniert/dargestellt werden, dass die Beziehungen zueinander und zu den Disziplinen hervorgehoben werden (gemeinsames Wissen, disziplinspezifisches Wissen)
3	Komplexitätsreduktion (Keller und Binz 2009)	Die Komplexität durch die Vielzahl der möglichen Bildungswege zur Erreichung der gewünschten Zieldisziplin ist zu reduzieren.
4	Unterscheidung von Kenntnissen und Fertigkeiten	Es wird zwischen erworbenen (Fach-) Kenntnissen und erlernten Fertigkeiten unterschieden (Ng und Feldman 2009).
5	Wiederholbarkeit (Keller und Binz 2009)	Die Wissenselemente sind eindeutig zu beschreiben bzw. zu definieren, um die Wiederholbarkeit zu gewährleisten.
6	Nachvollziehbarkeit (Keller und Binz 2009)	Um die mögliche Unschärfe der Untersuchung zu reduzieren, sind hinter den aufbereiteten Daten auch auf die Rohdaten zu hinterlegen.

Auf Grundlage der gesammelten Anforderungen lassen sich die verschiedenen Typen an Wissenslandkarten filtern. Entsprechend Anforderung 4 wird unter dem Begriff des Wissens zwischen erworbenen Fertigkeiten und erworbenen Kenntnissen unterschieden. Dabei setzt sich der Begriff des Wissens aus den Fertigkeiten und Kenntnissen zusammen, die Individuen zur Lösung von Problemen anwenden (Probst et al. 2012). Erworbene Fertigkeiten stellen dabei die Geschicklichkeit bei der Ausführung bestimmter Tätigkeiten dar (Bibliographisches Institut GmbH 2020). Erworbene Kenntnisse beziehen sich auf das (Er-)kennen einer (Tat-)Sache oder eines Sachverhalts (Bibliographisches Institut GmbH 2020). Um durch eine Analyse der Studiengänge das Verständnis über die Disziplinen zu verbessern, soll in einem ersten Schritt dargestellt werden, welche Fertigkeiten in welchem Umfang erworben wurden und dies anschließend durch die vermittelten Kenntnisse präzisiert werden.

Erster Aspekt ist demnach der Vergleich der Fertigkeiten der einzelnen Disziplinen. Hier eignet sich eine Wissensträgerkarte, da die Frage gestellt wird: „Wer hat welche Fertigkeiten“.

Der zweite Aspekt adressiert den Vergleich der erworbenen Kenntnisse zwischen den Disziplinen. Für diesen Aspekt eignen sich entsprechend der Beschreibungen in Abschnitt 3 am besten eine Kombination der Typen einer Wissensstruktur- und Wissensträgerkarte, da sowohl die Beziehungen zwischen dem Wissen dargestellt werden, wie auch auf die entsprechende Disziplin verwiesen werden soll. Es wird die Frage gestellt: „Wer lernt welche Kenntnisse und inwieweit überschneiden sich diese mit den Kenntnissen der anderen Disziplinen?“. Für beide Aspekte wird eine personen neutrale Perspektive eingenommen (Anforderung 1). Auf die weiteren Anforderungen (2, 3, 5 und 6) wird im folgenden Vorgehen zurückgegriffen.

5 Vorgehen zur Erstellung der personenneutralen Wissenslandkarte auf Grundlage der Bildungswege

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Erstellung der Wissenslandkarte beschrieben. Hierbei wird auch auf die Herausforderungen und Lösungsansätze sowie die getroffenen Annahmen eingegangen. Eine Übersicht über das folgend beschriebene Vorgehen ist in Bild 5.1 dargestellt. Es orientiert sich dabei an dem in Abschnitt 3 vorgestellten, allgemeinen Vorgehen und wird durch weitere Schritte detailliert. Das bereits bestehende Vorgehen aus der Literatur ist in grau auf der rechten Seite zugeordnet. Auf der linken Seite findet sich eine inhaltliche Zuordnung zu den folgenden Unterabschnitten des Beitrags, in denen das Vorgehen am Beispiel der zu entwickelnden Wissenslandkarte vorgestellt wird.

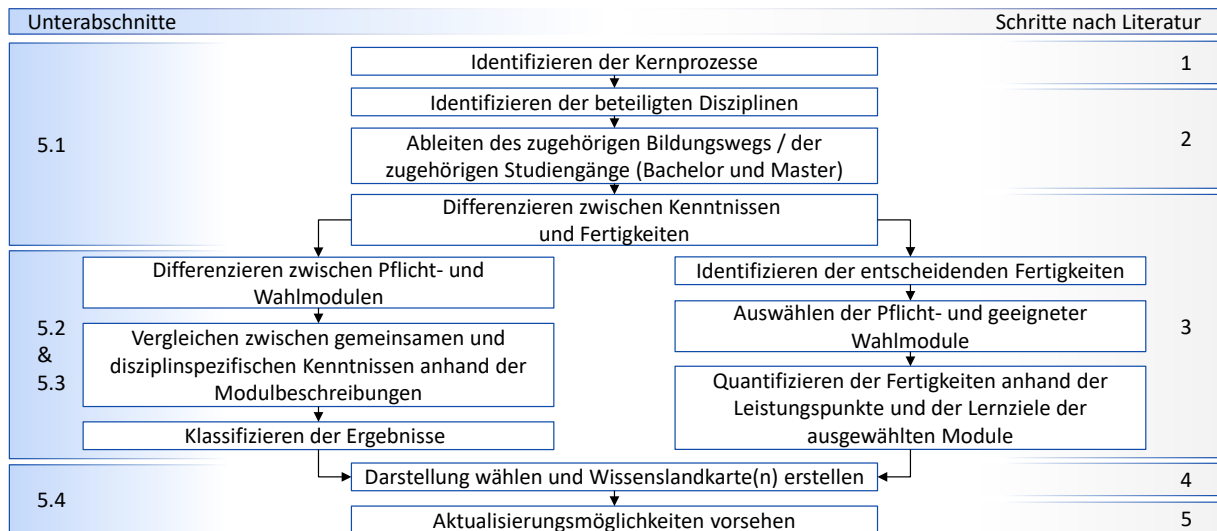


Bild 5.1: Vorgehen zur Erstellung der Wissenslandkarte mit Referenz auf das allgemeine Vorgehen

5.1 Identifizieren der Kernprozesse und ableiten der relevanten Wissensträger/-quellen

Der erste Schritt umfasst die Identifizierung der relevanten Kernprozesse, Tätigkeiten und Disziplinen. Diese Aspekte wurden bereits in vorangegangenen Untersuchungen veröffentlicht (Honold et al. 2017; Leistner et al. 2020). Die zentralen Disziplinen sind Architektur, Tragwerksplanung, Bauphysik, Maschinenbau, Systemdynamik und die Ökologie. Um die jeweilige Zieldisziplin zu erreichen, ergeben sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Studiengänge und ihre zugehörigen Module, flexibel zu wählen und zu kombinieren. Um die Vielfalt der Möglichkeiten zu reduzieren und einen geeigneten Bildungsweg auszuwählen (Anforderung 3), werden für das folgende Vorgehen drei Randbedingungen angenommen:

1. Da innerhalb des Sonderforschungsbereichs ein adaptives Bauwerk errichtet wird (Weidner et al. 2018) und sich der SFB 1244 maßgeblich aus Stuttgarter Instituten zusammensetzt, wird das Vorgehen anhand des Lehrangebots der Universität Stuttgart durchgeführt.
2. Für die zuvor genannten Zieldisziplinen werden die Bachelor Studiengänge ausgewählt, welche die meisten Absolventen aus dem Bereich der Zieldisziplin gewählt haben. (Universität Stuttgart 2019)
3. Ausgehend von den gewählten Bachelorstudiengängen wird konsequent in die Richtung der zuvor vorgestellten Zieldisziplinen spezialisiert. Dies betrifft sowohl auftretende Wahlmodule wie auch die Wahl des darauf aufbauenden Masterstudiengangs.

Mithilfe der getroffenen Annahmen lassen sich in Tabelle 6.1 den Disziplinen entsprechende Bachelor und Masterstudiengänge zuordnen. Datengrundlage für die nachfolgende Untersuchung sind die Modulhandbücher der Studiengänge, da diese detaillierte Auskunft über die Lerninhalte der Studiengänge vermitteln.

Tabelle 5.1: Zuordnung geeigneter Studiengänge der Universität Stuttgart zu den Disziplinen

(Ziel-)Disziplin	Bachelor of Science	Master of Science
Systemdynamik	Technische Kybernetik	Technische Kybernetik
Maschinenbau	Maschinenbau	Maschinenbau – PEKT
Ökologie	Umweltschutztechnik	Umweltschutztechnik
Tragwerksplanung	Bauingenieurwesen	Bauingenieurwesen – Modellierung und Simulation
Bauphysik	Bauingenieurwesen	Bauingenieurwesen – Konstruktiver Ingenieurbau*
Architektur	Architektur und Stadtplanung	Architektur und Stadtplanung

* kann auch für Tragwerksplanung gewählt werden

5.2 Kodifizieren der erlernten Fertigkeiten

Um die Fertigkeiten der Disziplinen zu kodifizieren, werden auf Grundlage der disziplinzugehörigen Berufsbeschreibungen der Bundesagentur für Arbeit typische Fertigkeitsbeschreibungen der Disziplinen identifiziert, verglichen, zusammengefasst und eindeutig definiert (Anforderung 5). Entsprechende Berufe sind Architekt/in, Ingenieur/in – Maschinenbau, Ingenieur/in – Bau, Ingenieur/in – Technische Kybernetik und Ingenieur/in – Umweltschutztechnik. In Tabelle 6.2 sind die jeweiligen Fertigkeiten und ihre Beschreibungen dargestellt.

Tabelle 5.2: Fertigkeiten und ihre Definitionen auf Grundlage der Beschreibungen der Bundesagentur für Arbeit

Fertigkeit	Fertigkeitsbeschreibung
Rechnerisches Denken	Befähigung zum Durchführen von Berechnungen
Technisches Verständnis	Verstehen und Handhaben von technischen Geräten und Systemen
Abstrakt-logisches Denken	Abstrakte Methoden- und Modellbildung zur Analyse und Synthese komplexer Zusammenhänge
Beobachtungsgenauigkeit	(Visuelle) Analyse von Abläufen, Zuständen, Sachverhalten und Messergebnissen sowie Kontrolle von Qualitätsabweichungen
Sinn und Gespür für Ästhetik	Erkennen, Verstehen und Anwenden ästhetischer Regeln
Planen und Organisieren	Planung/Organisation von Maßnahmen, Aktivitäten und Prozessen
Räumliches Vorstellungsvermögen und zeichnerische Befähigung	Lesen, Verstehen und Anfertigen diverser Zeichnungen (Detail-, Konstruktions- und Entwurfszeichnungen) sowie Handhaben von CAD.

Auf Grundlage der Fertigkeitsbeschreibungen können die Module den Fertigkeiten zugeordnet werden. Die Zuordnung erfolgt dabei mithilfe der Leistungspunkte der Module. Wird innerhalb eines Moduls mehr als eine Fertigkeit adressiert, wird die Anzahl der Leistungspunkte gleichmäßig auf die Anzahl der vermittelten Fertigkeiten verteilt. Als Datengrundlage werden die Bachelorstudiengänge ausgewählt, da sie aufgrund des hohen Anteils an Pflichtmodulen einen weitestgehend eindeutigen Studienverlauf darstellen. Bachelorarbeiten, fachübergreifende Schlüsselqualifikationen und die Masterstudiengänge werden hier aufgrund ihres sehr vielfältig wählbaren und somit unklar allgemein bestimmbar Inhalts nicht berücksichtigt. Weiterhin wird zwischen Fertigkeiten, die in den Modulen neu erlernt werden, und Fertigkeiten, die als Voraussetzung für das jeweilige Modul gelten und somit in diesem nur angewendet werden, unterschieden. Im Zuge der Untersuchung werden dabei jeweils nur die neu zu erlernenden Fertigkeiten berücksichtigt. Die Zuordnung erfolgt dabei auf Grundlage der Modulbeschreibungen und wurde mithilfe von sieben Absolventen der Studiengänge verifiziert.

5.3 Kodifizieren der erlernten Kenntnisse

Ausgehend davon, dass in jedem Modul zugehörige Kenntnisse vermittelt werden, werden die Fächer der Modulhandbücher nachstehend kodifiziert. Hierbei wird an erster Stelle zwischen Pflichtmodulen und Wahlmodulen unterschieden. Pflichtmodule sind von jedem Studierenden des Studiengangs zu besuchen, Wahlmodule nicht zwingend. Zudem können durch die hohe Anzahl an Wahlmodulen eine Vielzahl an Spezialisierungen und Kenntnissen erworben werden, was im Kontext des Vorhabens zu einer enormen Komplexität führt (zusammen über 1100 Wahlmodule). Um die Komplexität zu reduzieren, werden die folgenden Schritte angewendet. Ziel ist es dabei möglichst viele der angebotenen Module für die Wissenslandkarte zu berücksichtigen, um weiterhin aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen:

1. Pflichtmodule werden zuerst auf Gemeinsamkeiten zwischen den Studiengängen untersucht. Finden sich gemeinsame Fachgebiete, werden diese zusammengefasst. Pflichtmodule, die nur in genau einer Disziplin vorkommen, werden disziplinspezifisch berücksichtigt. Thematisch gleiche bzw.

aufeinander aufbauende Module werden dabei jeweils in Modulgruppen zusammengefasst. (Z. B. Höhere Mathematik 1 bis 4 zu der Gruppe Höhere Mathematik)

2. Die Vielzahl der Wahlmodule wird in einem zweiten Schritt mehrstufig strukturiert.
 - a. Hierzu werden an erster Stelle Wahlmodule gewählt, die mit der Spezialisierung der gewählten Masterstudiengänge und der bauwerksnahen Anwendung in Einklang gebracht werden können. Dabei werden auch Module mit aufgenommen, deren Inhalte anwendungsneutral sind (z. B. Tribologie, Steuerungstechnik, Werkstoffkunde) und somit breit anwendbar. Module mit bauwerksfremder Anwendung (z. B. Kraftfahrzeuge, Luftfahrt) werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die Auswahl kann dabei eindeutig anhand von anwendungsspezifischen Schlagworten getroffen (Stadt*, *bau*, Fahrzeug* etc.) werden.
 - b. Im zweiten Schritt wird überprüft, ob in den ausgewählten Wahlmodulen die gleichen Kenntnisse vermittelt (bzw. vertieft) werden, wie in den bereits aufgenommenen Pflichtmodulen aus Schritt 1. Ist eine thematische Übereinstimmung vorhanden, werden die Wahlmodule den bestehenden Modulen bzw. -gruppen zugeordnet. Wahlmodule, die sich diesen Gruppen nicht zuordnen lassen, werden weiter zwischen den Disziplinen verglichen und zwischen disziplinspezifischen und disziplinübergreifenden Spezialisierungen unterschieden. Disziplinübergreifende Spezialisierungen werden entsprechend gekennzeichnet.
3. Abschlussarbeiten, externe Praktika und fachfremde Schlüsselqualifikationen werden in der Untersuchung aufgrund ihrer unklar bestimmbaren vermittelten Kenntnisse nicht berücksichtigt.

5.4 Darstellung wählen und Aktualisierungsmöglichkeiten vorsehen

Aufgrund der hohen Menge an zu berücksichtigendem Wissen werden für die Kenntnisse und die Fertigkeiten zwei getrennte Darstellungen gewählt. Um die Interdisziplinarität und das gemeinsame Arbeiten zu unterstreichen, wird ein kreisförmiger Aufbau gewählt. Für die Darstellung der erlernten Fertigkeiten wird dementsprechend ein Kreisdiagramm gewählt. Für die Darstellung der Kenntnisse wird der kreisförmige Aufbau entsprechend der Anzahl der Disziplinen gleichmäßig aufgeteilt. Um die Lesbarkeit der Einträge zu gewährleisten, wird ein Polygon anstelle eines Kreises ausgewählt (vgl. Bild 6.2). Gemeinsame Grundlagen, wie die disziplinübergreifenden Pflichtmodule, werden in der Mitte positioniert. Darauf aufbauend werden von innen nach außen hin erst verpflichtende, disziplinspezifische Module ergänzt und anschließend mögliche Spezialisierungen aufgezeigt. Die Trennung zwischen Pflichtinhalten und Spezialisierungen (Wahlmodule) wird durch eine durchgezogene und eine gestrichelte Linie bekräftigt. Die Spezialisierungen sind dabei sowohl aus dem Bachelor als auch aus dem Master entnommen. Spezialisierungen, die in mehreren Studiengängen zur Wahl stehen, werden durch einen entsprechenden Querverweis hervorgehoben. Eine Möglichkeit zur Aktualisierung ist insbesondere dadurch gegeben, dass die Grundlage der Wissenslandkarten Tabellen sind, in denen entsprechende Änderungen vorgenommen werden können. Durch die thematische Gruppierung der Module werden Änderungen primär von den Rohdaten (vgl. Bild 6.3) abgefangen. Größere Änderungen lassen sich durch Verschieben, Entfernen oder Hinzufügen von Elementen in den Karten einpflegen. Die Ergebnisse der Auswertung werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

6 Personenneutrale, bildungsbezogene Wissenslandkarte für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Planung adaptiver Bauwerke

Als Ergebnis des zuvor beschriebenen Vorgehens werden im Folgenden die beiden Wissenslandkarten unter Berücksichtigung der Anforderungen aus Abschnitt 4 vorgestellt. Da die Fertigkeiten einen zentralen Bestandteil des Wissens ausmachen, jedoch in der Darstellung verhältnismäßig abstrakt sind, stellt die fertigkeitsbasierte Wissenslandkarte eine erste Übersicht dar, die durch die nachfolgende Kenntnislandkarte vertieft wird.

6.1 Fertigkeitsbasierte Wissenslandkarte

In Bild 6.1 ist der Vergleich der in den Studiengängen vermittelten Fertigkeiten dargestellt. Erkennbar ist, dass die Ingenieursstudiengänge, allen voran die Technische Kybernetik, stark durch abstrakt-logisches Denken (3) und technisches Verständnis (2) geprägt sind, während Aspekte der Ästhetik (5) am geringsten vertreten sind. Die Architektur zeigt im Gegensatz dazu ein breit verteiltes Fertigungsprofil. Während hier Gespür für Ästhetik (5) beinahe ein Alleinstellungsmerkmal ist, fallen rechnerische Fertigkeiten (1) im Vergleich am geringsten aus. Diese sind bei den Ingenieuren gleichmäßig vertreten.

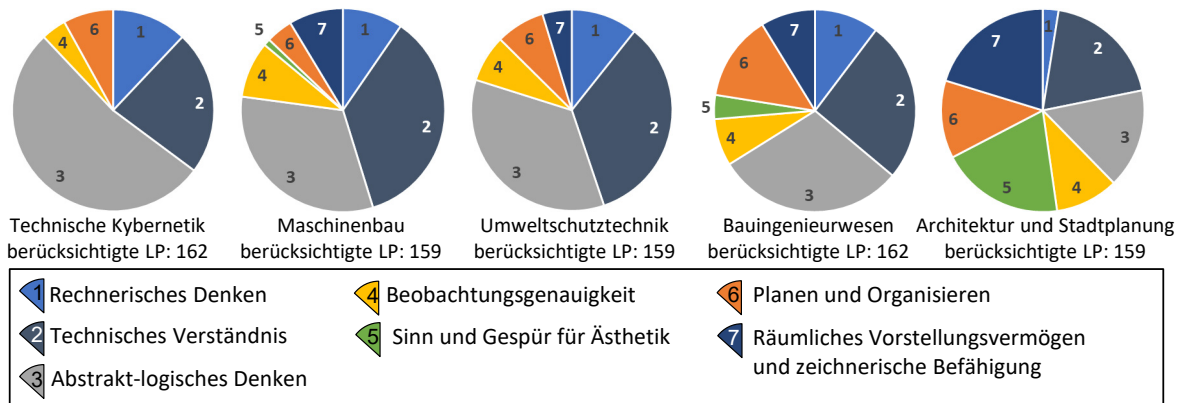


Bild 6.1: Vergleich der Fertigkeitsverteilung nach den Bachelorstudiengängen der Universität Stuttgart

Die Befähigung zum Planen und Organisieren (6) ist insbesondere bei der Architektur und Stadtplanung und dem Bauingenieurwesen vertreten. Die Fertigkeit der Beobachtungsgenauigkeit (4, maßgeblich geprägt durch Praktika) wird in allen Studienrichtungen gleichmäßig adressiert, mit Ausnahme der Kybernetik, der aufgrund des stark theoretischen Hintergrunds nur etwa die Hälfte der Punkte zugeordnet werden konnten. Räumliches Vorstellungsvermögen und zeichnerische Befähigungen (7) werden in der Architektur und Stadtplanung im Bachelor vergleichsweise am stärksten vermittelt, da neben dem technischen Zeichnen ebenso verstärkt gestalterische Zeichenfertigkeiten vermittelt werden. Weitere Vergleiche sind der Karte zu entnehmen.

Ein reiner Vergleich der Disziplinen über Bild 6.1 ist für die spätere Zusammenarbeit jedoch nur bedingt nützlich. So kann aus der Grafik entnommen werden, dass beispielsweise ein*e Bauingenieur*in und ein*e Maschinenbauingenieur*in nach dem Bachelor ein ähnlich ausgeprägtes technisches Verständnis aufweisen, jedoch ist nicht nachvollziehbar, hinsichtlich welcher Sachverhalte das Wissen einzuordnen ist. Hierzu wird im Folgenden der detailliertere Vergleich der erlernten Kenntnisse vorgestellt.

6.2 Kenntnisbasierte Wissenslandkarte

Die entwickelte Wissenslandkarte in Bild 6.2 zeigt entsprechend der Ausführungen in Unterabschnitt 5.4 die vermittelten Kenntnisse (Modulgruppen) der Studiengänge der beteiligten Disziplinen und vergleicht hierbei gemeinsame und disziplinspezifische Kenntnisse (Anforderung 2). Die einzelnen Felder sind dabei derart zu lesen, dass die enthaltenen Module und Modulgruppen in allen Studiengängen vorkommen, innerhalb deren Sechstel das Feld reicht.

Beginnend in der Mitte der Karte ist erkennbar, dass alle Studiengänge Inhalte der Technischen Mechanik (als Pflichtmodul) vermitteln. Kenntnisse aus der Informatik und der Mathematik sind bei allen Disziplinen, außer der Architektur, als eigenständige Module vertreten. In allen Studienrichtungen, außer der Technischen Kybernetik, werden zudem Kenntnisse der Werkstoffkunde erlangt. Die Disziplinen des Bauingenieurwesens, des Maschinenbaus und der Architektur setzen sich zudem inhaltlich mit Konstruktion (auch CAD) und Betriebslehre auseinander. Während Maschinenbau und Technische Kybernetik Pflichtmodule der Thermodynamik und der Messtechnik aufweisen, wird im Bauingenieurwesen Richtung Wasserwesen vertieft, wobei Umweltschutztechnik alle drei Inhalte pflichtmäßig be-

Technische Mechanik

Studiengänge (Spezialisierung)	Pflichtmodule	Wahlmodule/Spezialisierung	
Maschinenbau (PEKT)	Technische Mechanik 1-4		
Technische Kybernetik	Technische Mechanik 1-3		
Bauingenieur (Modellierung und Simulation)	Technische Mechanik 1-2 Mechanik & Baustatik	Technische Mechanik IV für Mathematiker Experimentelle Modalanalyse Dynamik mechanischer Systeme Ausgewählte Probleme der Mechanik	Nonlin Comput Modellre
Bauingenieur (Konstruktiver Ingenieurbau)	Technische Mechanik 1-2 Mechanik & Baustatik	Höhere Mechanik I: Einführung in die Kontinuumsmechanik und in die Materialtheorie Höhere Mechanik II: Numerische Methoden der Mechanik	Schlanke Stabilität
Architektur und Stadtplanung	Tragkonstruktionen	Leichte Flächentragwerke	Methode und Expe
Umweltschutztechnik	Technische Mechanik 1-3	Tragkonstruktionen 3	Sondere

Bild 6.3: Beispielausschnitt für die Gruppierung der Pflicht- und Wahlmodule in der Wissenslandkarte

7 Zusammenfassung, Evaluation und Diskussion

Der vorliegende Beitrag untersucht, welche Fertigkeiten und Kenntnisse Studierende der Fachrichtungen Architektur und Stadtplanung, Tragwerksplanung, Bauphysik, Maschinenbau, Systemdynamik und Umweltschutztechnik während ihres Studiums erlernen. Dabei wird ausgehend von bestehenden Typen an Wissenslandkarten gezeigt, wie ein mögliches Vorgehen aufgebaut werden kann, um bildungs-basierte und personen-neutrale Wissenslandkarten zu erstellen. Das Ergebnis zeigt die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Fachrichtungen auf und kann im Folgenden für die Planung adaptiver Bauwerke verwendet werden. Zentraler Aspekt bei der Planung ist die interdisziplinäre Teamzusammensetzung und Teamarbeit (Honold et al. 2018), welche ein Verständnis über die Disziplinen selbst erfordert (Gantner et al. 2018). Die Evaluation mit sieben Absolventen der hier aufgegriffenen Studiengänge ergab, dass die Anwendung der Wissenslandkarten sowohl das Verständnis über fremde, wie auch die eigene Disziplin verbessert (7/7). Durch die Analyse der erstellten Wissenslandkarten wird klar, welches Wissen von den jeweiligen Disziplinangehörigen nach Studienabschluss vorausgesetzt werden kann (Pflichtmodule), welches Wissen möglicherweise vorhanden ist (Spezialisierung) und an welchen Stellen sich im interdisziplinären Vergleich Überschneidungen ergeben. Beispielsweise wurde nicht erwartet, dass Technische Mechanik (vgl. Bild 6.3) die einzige Schnittmenge ist, die ausnahmslos in den Studiengängen jeder Disziplin vermittelt wird (6/7). Zusätzlich überraschend aufgefasst wurde, wie ähnlich die „Ingenieurs-Fertigkeitsprofile“ sind, obwohl die tatsächlichen Kenntnisse doch entscheidend voneinander abweichen (5/7).

Die in Abschnitt 1 aufgestellte Hypothese, dass durch die Bereitstellung der Analyseergebnisse der jeweiligen Bildungswege in Form von Wissenslandkarten ein Verständnissgewinn erzielt wird, kann dementsprechend auf Grundlage der ersten Evaluation bestätigt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch Praktika und Abschlussarbeiten (hier nicht berücksichtigt) die tatsächlichen Fertigkeiten und Kenntnisse der Disziplinangehörigen im Einzelfall variieren. Die hier dargestellten Ergebnisse sind jedoch bewusst personenneutral und stellen die abbildbare Schnittmenge zwischen den Disziplinangehörigen dar. Durch das generierte Verständnis über die beteiligten Disziplinen können anhand der Wissenslandkarten insbesondere die im Bauwesen neuen Disziplinen (z. B. Maschinenbau) leichter in die Teamzusammensetzung mit aufgenommen werden. So ist Bild 6.2 zu entnehmen, dass bei konstruktiven Herausforderungen neben der Architektur und dem Bauingenieurwesen beispielsweise auch Vertreter des Maschinenbaus zu Rate gezogen werden können. Insbesondere im Kontext adaptiver Bauwerke stellt dies eine erforderliche Erweiterung dar, da bisherig typisch statische Auslegungen

in einem dynamischen, adaptiven Bauwerk um geeignete dynamische Auslegungsmethoden erweitert werden müssen. Im weiteren Vorgehen ist geplant, die Wissenslandkarten in interdisziplinären, studentischen Entwurfsstudios anzuwenden und gegebenenfalls weiterzuentwickeln.

Danksagung

Die Ergebnisse dieses Beitrags wurden im Rahmen des SFB 1244 "Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen" durch das Teilprojekt A01 erforscht. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Gründung und Unterstützung des SFB 1244.

Literatur

- Bayhan und Karaca 2020 BAYHAN, Hasan Gokberk; KARACA, Ece: *Technological innovation in architecture and engineering education - an investigation on three generations from Turkey*. In: *International Journal of Education Technology in Higher Education* 17 (2020), Nr. 1.
- Bibliographisches Institut GmbH 2020 BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH: Duden - Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft. URL <https://www.duden.de/> – Überprüft: 01.09.2020
- Drews et al. 2012 DREWS, Paul; SAGAWA, Arno; ROLF, Arno; KAYA, Ervin: DialogueMaps: Ein interaktives Dialogwerkzeug für softwaregestützte Wissenslandkarten. In: *Communities in New Media: Virtual Enterprises, Research Communities & Social Media Networks*. TU Dresden: TUDPress, 2012, S. 217–227.
- Eppler 2001 EPLER, Martin: Making Knowledge Visible Through Intranet Knowledge Maps: Concepts, Elements, Cases. In: SPRAGUE, Ralph H. (Hrsg.): *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences: Abstracts and CD-ROM of full papers: January 3-6, 2001, Maui, Hawaii*. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society Press, 2001.
- EU 2021 EUROPEAN COMMISSION: *Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs: Buildings and construction*. URL https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/built-environment_en. – Überprüft 16.03.2021
- Gantner et al. 2018 GANTER, Johannes; BOTH, Petra von; REXROTH, Karsten; EBERHÄUSER, Sebastian; HORN, Rafael; JORGJI, Olivia; SCHMID, Christian; FISCHER, Matthias: *Ökobilanz - Integration in den Entwurfsprozess*. In: *Bauphysik* 40 (2018), Nr. 5, S. 286–297.
- Gerber et al. 2015 GERBER, David J.; KHASHE, Saba; SMITH, Ian F. C.: *Surveying the Evolution of Computing in Architecture, Engineering, and Construction Education*. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 29 (2015), Nr. 5.
- Gericke et al. 2011 GERICKE, Kilian; BLESSING, Luciënne: Comparisons of design methodologies and process models across domains: a literature review. In: Culley, Steve J.; Hicks, Ben; McAloone, Tim (Hrsg.): *Proceedings of International Conference on Engineering Design (ICED11)*: Vol. 1: Design processes. Glasgow, 2011 (DS, 68), S. 393–404.
- Honold et al. 2016 HONOLD, Clemens; BINZ, Hansgeorg; ROTH, Daniel: Planning and developing Adaptive Buildings require methodical support. In: Boks, Casper; Sigurjonsson, Johannes; Steinert, Martin; Vis, Carlijn; Wulvik, Andreas (Hrsg.): *Proceedings of NordDesign*. Trondheim, 2016.
- Honold et al. 2018 HONOLD, Clemens; BINZ, Hansgeorg; ROTH, Daniel: Technical planning tasks and participants involved in planning Adaptive Buildings. In: Maier, Anja; Kim, Harrison; Oehmen, Josef; Salustri, Filippo; Škec, Stanko; Kokkolaras, Michael (Hrsg.): *Proceedings*

- of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17):* Vol. 1: Resource-Sensitive Design. Vancouver, 2017, S. 131–140.
- Honold et al. 2019 HONOLD, Clemens; LEISTNER, Sophia; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg; SOBEK, Werner: Anforderungen in der Entwurfsphase des integralen Planungsprozesses adaptiver Gebäude. In: Binz, Hansgeorg; Bertsche, Bernd; Bauer, Wilhelm; Riedel, Oliver; Roth, Daniel (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung*. Stuttgart, 2019, S. 203–212.
- Keller et al. 2009 KELLER, Alexander; BINZ, Hansgeorg: Requirements on engineering design methodologies. In: Norell Bergendahl, Margareta (Hrsg.): *Proceedings of International Conference on Engineering Design (ICED09): Design theory and research methodology*. Glasgow: Design Society, 2009, S. 203–214.
- Kraemer 2005 KRAEMER, Susanne: *Wissenslandkarten im Wissensmanagement*. URL <https://wissensmanagement.infowiss.net/docs/wissenslandkarten.pdf> – Überprüft 15.07.2020
- Leistner et al. 2020 LEISTNER, Sophia; HONOLD, Clemens; MAIERHOFER, Mathias; HAASE, Walter; BLANDINI, Lucio; SOBEK, Werner; ROTH, Daniel; BINZ, Hansgeorg; MENGES, Achim: *Basic Research on integral design and planning processes for adaptive buildings*. In: *International Journal of Architectural Engineering and Design Management* (2020).
- Ng et al. 2009 NG, Thomas; FELDMANN, Daniel: How broadly does education contribute to job performance? In: *Personnel Psychology* 62 (2009), Nr. 1, S. 89–134. URL <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.2008.01130.x> – Überprüft 11.08.2020.
- Ostertag et al. 2020 OSTERTAG, Andreas; DAZER, Martin; BERTSCHE, Bernd; SCHLEGL, Friederike; ALBRECHT, Stefan; LEISTNER, Philip; GIENGER, Andreas; WAGNER, Julia; TARIN, Christina; SAWODNY, Oliver: Reliable design of adaptive load-bearing structures with focus on sustainability. In: *Proceedings of the 30th European Safety Conference*, 2020.
- Probst et al. 2012 PROBST, Gilbert J. B.; RAUB, Steffen P.; ROMHARDT, Kai: *Wissen managen - Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012.
- Schill-Fendl 2004 SCHILL-FENDL, Monika: *Planungsmethoden in der Architektur - Grundlagen von Planungs- und Entwurfsmethoden für Architekten komplexer Aufgabenstellungen in interdisziplinären Gruppen, dargestellt am Bereich Sozial- und Gesundheitsbauten*. Norderstedt: Books on Demand, 2004.
- Schmid 2015 SCHMID, Fabian: *Methodisches Gestalten und systematisches Entwickeln am Beispiel zukünftiger Fassadenlösungen*, 2015.
- Schwerdtner et al. 2020 SCHWERDTNER, Patrick; KESSEL, Tanja; ROTH, Carsten; ASHRAFZADEH KIAN, Shayan; Bucherer, Michael; SCHIPPMANN, Felix; UHLENDORF, Tino; WAHNES, Sönke: *Handlungsleitfaden Initiierung - Anwendungsorientierter Handlungsleitfaden zur Durchführung der Initiierung komplexer (Hoch-) Bauvorhaben*. Stuttgart, 2020.
- Sobek 2007 SOBEK, Werner *Themenheft Forschung - Entwerfen im Leichtbau*. 2007.
- Universität Stuttgart 2019 UNIVERSITÄT STUTTGART: *Zahlenspiegel 2019*. URL <https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/profil/dokumente/zahlen-archiv/ZS2019.pdf> – Überprüft 09.08.2020
- Weidner et al. 2018 WEIDNER, Stefanie; KELLETER, Christian; STERNBERG, Paula; HAASE, Walter; GEIGER, Florian; BURGHARDT, Timon; HONOLD, Clemens; WAGNER, Julia; BÖHM, Michael; BISCHOFF, Manfred; SAWODNY, Oliver; BINZ, Hansgeorg: *The implementation of adaptive elements into an experimental high-rise building*. In: Ernst & Sohn (Hrsg.): *Steel construction - design and research*. Volume 11. Berlin: Ernst & Sohn, 2018 (11).

Zielextrapolation bei Zielunsicherheit in der Produktentwicklung

Extrapolation of Objectives in Product Development under Uncertainty

Lukas Block¹, Hansgeorg Binz², Daniel Roth²

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) und Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering (GSaME), Stuttgart
lukas.block@iat.uni-stuttgart.de

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD), Stuttgart
hansgeorg.binz@iktd.uni-stuttgart.de
daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Ziele und Anforderungen eines Entwicklungsprozesses sind inhärent dynamisch. Auf Seiten des Entwicklers resultiert daraus Unsicherheit. Er könnte versucht sein, zukünftige Anforderungsänderungen zu antizipieren und individuell ein erwartetes Zielsystem zu extrapolieren. Es wird untersucht, ob eine solche individuelle Zielextrapolation unter Unsicherheit in der Praxis existiert und welche Informationen der Entwickler zur Extrapolation verwendet.

Hierzu werden eine Literaturrecherche sowie ergänzend eine empirische Studie durchgeführt. Die Existenz der unsicherheitsbedingten Zielextrapolation kann bestätigt werden. Die extrapolierten Ziele basieren auf dem Wissen des Entwicklers und auf weiteren, externen Informationen. Dementsprechend wird über die Zielextrapolation schnell und aufwandsarm neues Wissen und neue Informationen in den Entwicklungsprozess integriert. Da die Integration allerdings organisatorisch nicht geregelt ist, erfolgt sie ohne externe Kontrolle der Informationsqualität. Es werden drei Maßnahmen abgeleitet, um einer Aushöhlung der organisatorischen Anforderungen entgegenzuwirken. Eine gezielte Kontrolle der Zielextrapolation weist nur geringe Erfolgchancen auf.

Keywords:

Ziele, Anforderungen, Unsicherheit, Wissen, Extrapolation

Abstract: Objectives and requirements are inherently dynamic. This leads to uncertainty on the part of the executing engineer. Thus, he might forecast future changes and extrapolate the requirements towards his individual, expected system of objectives. Within the paper, we investigate whether such an individual extrapolation of objectives under uncertainty exists and what information the developer uses to extrapolate. A literature review and a supplementary empirical study is conducted. The existence of individual extrapolation of objectives can be confirmed. Furthermore, we find that the extrapolated objectives are based upon the developer's knowledge and outside information. As such, extrapolation of objectives subliminally and quickly integrates new knowledge and information in the development process. Yet, integration happens without external control of information quality. We suggest three measures to counteract an erosion of organizational requirements. However, extrapolation of objectives is inherently interweaved with dynamic requirements in a development process. Extrapolation can only be controlled to a limited extent.

Keywords:

Objectives, Requirements, Uncertainty, Knowledge, Extrapolation

1 Introduction

An ideal development project follows a goal and thus maintains a set of objectives. These objectives are usually communicated towards the engineer as requirements. They form the foundation for his design decisions and influence the attributes and appearance of the final product. Thus, the selection of objectives is important for the result of a development process: A wrong selection directly causes wrong decisions on the developer's part. A suboptimal or irrelevant solution to the design problem follows (Nagel 1979, p. 67).

However, objectives constantly change. They are defined within and derived from constraints, which describe the product's environment. This environment is not static in time but highly dynamic (Muschik 2011, p. 5 f.). This dynamic and thus the changes in objectives occur especially in two phases of the product life cycle:

- During product development, objectives are adapted or added due to changing constraints and increasing knowledge of the design problem. For example, customer requirements might change, the field of the product's application is extended, or relevant requirements were initially not specified (Albers et al. 2010; Feldhusen et al. 2013, p. 338).
- During product usage, additional product properties can become favorable. The expectations of the customer towards the product may be altered by using it or quality requirements are weighted differently (Feldhusen et al. 2013, p. 338). Mechatronic systems allow the adaptation to such changes by software updates or retrofit solutions, if these are supported by the remaining system components.

Consequently, objectives and requirements are adapted constantly - even after the end of development. While this supports the development of a successful product, it might lead to uncertainty on the part of the executing engineer: He faces missing information about the future state of the requirements (Muschik 2011, p. 34; Albers et al. 2012). This uncertainty has of course no influence on the development process, if the developer is not aware of it or decides to ignore it. However, if he takes it into account, he must compensate the lack of information to make rational design decisions: He forecasts future changes and extrapolates the requirements towards his individual, expected system of objectives. Yet, these objectives might differ fundamentally from the organization's overall objectives.

The problem is that the existence of such an individual extrapolation of objectives has so far not been investigated scientifically. Thus, it is unknown, which effects it has on the product development process. The information used for the extrapolation cannot originate from the organization's objectives, since they cause the uncertainty. Therefore, the extrapolation of objectives could affect the result of the product development negatively or positively, depending on the information content incorporated into the extrapolation. Thus, we address the following two research questions:

1. Does the individual extrapolation of objectives in product development under uncertainty exist?
2. What are the effects of an individual extrapolation of objectives on the development process?

2 Method

We follow the research design methodology by Schnell et al. (2008, p. 8) to answer the research questions. After defining the problem statement (see section 1), a literature review (section 3) is carried out to formulate a theory and state hypotheses about the existence and the effects of individual extrapolation of objectives (section 4). Subsequently, an empirical study is conducted to examine the stated hypotheses (section 5) and finally answer the research questions (section 6 and 7). A social research approach – as proposed by Schnell et al. (2008, p. 8) – is expedient because the existence of individual extrapolation of objectives cannot be observed directly. Yet, it is indirectly observable via the developer's activities and thoughts. Empirical social research offers a collection of techniques and methods for the scientific investigation of them.

The empirical social study itself is designed as a semi-structured interview, in which developers are asked to reflect on their own proceeding when facing uncertain requirements. Observation of the developer's activities is infeasible, since reference measures for the execution of activities without extrapolation of objectives are missing. Interviews are however suitable for gaining insights into decision-making and problem-solving structures (Liebold and Trinczek 2009, p. 35).

3 Literature Review

The generation, subsequent enforcement and alternation of objectives is influenced by the procedure models, processes and methods used in the development process. Basic engineering literature therefore provides a well-founded overview of the definition, emergence and alternations of objectives within the product development process.

3.1 Different Definitions of Objectives and Requirements

Task clarification – and thus definition of requirements – is the first step in almost all procedure models for product development (e.g. VDI 2221; Pahl et al. 2007, p. 120; Lindemann 2009, p. 50 f.). However, it becomes apparent, that the definition of the terms 'objective' and 'requirement' vary in terms of equivalence and the point of reference. Objectives and requirements are for example defined as demands and wishes which represent the development task (Pahl et al. 2007, p. 120, 215), as desired functions and properties of the product (Baumgart 2016, p. 425 f.; Lindemann 2009, p. 11), or as the desired final state of the product or service (VDI 2221 Blatt 1). Kickermann (Juli 1995) as well as Feldhusen et al. (2013, p. 322) differentiate the term requirement from the superordinate term objective, which is to be reached by fulfilling the requirements. Pohl (2008, p. 101) defines objectives as solution-independent future product features; requirements are solution-specific.

The term 'objective' itself is mainly employed in the systems engineering perspective of product development: Objectives motivate the employment of certain development processes and/or action schemes. They form the basis to evaluate the product system under development (Pahl et al. 2007, p. 18; Ehrlenspiel and Meerkamm 2017, p. 33; Ropohl 1975, p. 66). Objectives are defined within and derived from constraints, which describe the product's environment (Muschik 2011, p. 5 f.). A so-called system of objectives represents a structured set of objectives and constraints (Ehrlenspiel and Meerkamm 2017, p. 33; Muschik 2011). Albers et al. (2010) describe the system of objectives as abstract and artificial. Objectives must be made accessible through some form of linguistic formulation - for example through stated requirements.

Our definition follows the commonalities among VDI 3780 (VDI 3780), Pohl (2008, p. 91), Albers et al. (2010) and Muschik (2011): Objectives form an artificial and abstract system describing the product's ideal state. An objective is a characteristic of the product under development, which is deemed possible and whose realization is aimed at by some agent. As such, objectives are bound to an agent's view of the ideal product. Different systems of objectives can coexist within the same development project (Muschik 2011, p. 132). Requirements are the subset of individual objectives, which are communicated for example through speech or requirement documents.

3.2 Dynamic Objectives under Uncertainty

Almost all reviewed works (e.g. Lindemann 2009; Baumgart 2016, p. 425 ff.; Pahl et al. 2007, p. 2; Muschik 2011; Feldhusen et al. 2013, p. 321) mention the inherent dynamics of objectives and requirements during product development and usage. According to Muschik (2011, p. 128 f.), this is due to epistemic (reducible) and aleatory (irreducible) uncertainty. Aleatory uncertainty stems from the inherent variability of the constraints, from and within which the objectives are defined. In contrast, epistemic uncertainty arises due to missing or updated information that is not incorporated into the system of objectives. Subsequent revelations of these uncertainties then necessitate an

adaption of the system of objectives. Nidumolu (1996) classifies requirements uncertainty into requirements instability, diversity and analyzability. The generation process of objectives incorporates relevant information about the final product's state into the development process. Thus, it delivers valuable information about possible sources of uncertainty.

Objectives and requirements result from the development task through a clarification and specification process (Pahl et al. 2007, p. 18; Baumgart 2016, p. 425; VDI 2221 Blatt 1). The development task itself might be externally given by a client, or result from market analyses, trend studies and strategic considerations of the developing organization (Pahl et al. 2007, p. 18). Feldhusen et al. (2013, p. 328) mention as information sources marketing information, competitor's products, predecessor products, the customer himself and market trends. They classify requirement sources in terms of source location (company internal / external) and type of source (document, product, person). New findings during the development phase lead to changes within the requirements and system of objectives (Pahl et al. 2007, p. 2; Baumgart 2016, p. 425 ff.; Feldhusen et al. 2013, p. 321). Thus, Roth (2020) describes an approach to identify and gather necessary information as well as relevant knowledge for the different phases of product development. Still, the intensity of change might vary depending on the product's life cycle phase (Baumgart 2016, p. 425 f.).

3.3 Human Processing of Objectives and Requirements

The interpretation of communicated objectives – i.e. requirements – depends on the perspective of the individual. For example, Ehrlenspiel and Meerkamm (2017, p. 398) state that developers incorporate their motivation and their individual objectives into their interpretation of requirements. Jetter (2005, p. 48 f.), Albayrak et al. (2009) and Chari and Agrawal (2018) find that the information in the requirement documents is supplemented by individual knowledge to understand the communicated objectives. Ebert and Man (2005) find out, that product managers tend to guess actual needs to react to uncertain requirements. Furthermore, Badke-Schaub et al. (2007) discovered, that human beings redefine and reinterpret development tasks based on so-called mental models. A mental model of the development task is a mental representation, which describes the knowledge of a person about the respective task. Thereby, knowledge is networked information that enables an individual to act in a specific context. It can be used to make comparisons, establish links and derive decisions (North and Guldenberg 2008, p. 25). Correspondingly, mental models are individual, cognitive representations of the real world (Badke-Schaub et al. 2007). These representations enable developers to easily integrate new information and make predictions with little effort (Tergan 1986, p. 167).

As such, the system of objectives is a mental model. However, it is also influenced by coexisting mental models, which describe other knowledge areas. They overlap and interact (Tergan 1986, p. 167). Consequently, Albayrak et al. (2009) find that software developers make implicit assumptions when they identify incomplete requirements. Thereby, the number of explicitly formulated assumptions is positively correlated with years of work experience (Albayrak et al. 2009). Furthermore, Chari and Agrawal (2018) show that software developers can use their domain knowledge to estimate incomplete requirements. Jetter (2005, p. 48 f.) emphasizes the importance of mental models alongside the objectives' model for the analysis and selection of relevant information: Specification documents only provide partial information for development. Further information is derived from the documents and other knowledge sources (Muschik 2011, p. 39; Jetter 2005, p. 39 ff.). Albers (2010) and Muschik (2011, p. 91) state that the system of objectives describes the planned and mentally expected state of the product and its objectives. Based on a survey, Muschik (2011, p. 91 ff.) finds out that the future state for the system of objectives is based on individual knowledge. Furthermore, she (Muschik 2011, p. 132) postulates, that the system of objectives may exist explicitly in documents and software or implicitly in the mind of the developers or even both. As such, the organizational system of objectives, describing the organizations goals, must be differentiated from the individual system of objectives, in the developer's mind.

Accordingly, a development task and its associated requirements and objectives are reinterpreted by the developers based on other, already existing mental models and individual knowledge. As such,

extrapolation of objectives is suggested to exist by logically linking the findings from previous scientific work. Especially the derivation of missing information from the knowledge structure of further mental models is a strong indicator for the existence of extrapolated objectives (Jetter 2005, p. 39 ff.). However, the existence and thus the effects of such an extrapolation are still to be investigated empirically: Ropohl (1975, p. 58 f.) for example, points out that arbitrarily and uncontrolled designed objectives do not meet the requirements of rational decision-making processes in product development. Contrarily, Pahl et al. (2007, p. 234) reason that responsible extensions or modifications by the developers yield future-prove solutions.

4 Formulation of Theory and Hypotheses

All 17 reviewed works mention the inherent dynamics of requirements during product development and usage. Furthermore, extrapolation of objectives is suggested to exist by logically linking the findings. Thus, we state the following research hypothesis regarding research question 1:

Hypothesis 1: Individual extrapolation of objectives exists, if the future state of the system of objectives is perceived as uncertain by the developing engineer.

Research question 2 investigates the effect of the extrapolation of objectives on the development process. In the following, we will understand the effect as targeting two different dimensions: Towards the development process and towards the product. According to Lohmeyer (2013, p. 13), the fundamental dilemma for incomplete systems of objectives is, that definition gaps cannot be closed, since the required knowledge would have to be defined by the incomplete system of objectives itself. As such, the extrapolation of objectives – if existent – must be based on outside information. This outside information is incorporated through the extrapolation process into the development process. Furthermore, the developing engineer must have some motivation to incorporate hypothetical future changes. Ultimately, this effects the product.

Consequently, we break research question 2 down into three subsequent research questions:

Research question 2.1: Based on which information does individual extrapolation of objectives happen?

Research question 2.2: What type is this information of?

Research question 2.3: What is the intention of the developing engineer when extrapolating objectives?

Results present in literature (e.g. Ehrlenspiel and Meerkamm 2017; Albayrak et al. 2009; Badke-Schaub et al. 2007) suggest, that extrapolation of objectives happens based on individual knowledge. Muschik (2011, p. 106) for example, finds out, that generation of objectives happens based on three different knowledge types: Heuristic knowledge, expertise and company specific knowledge. Roth et al. (2010) introduce five generic structural parameters to organize knowledge in product development. They state that diverse types of knowledge are relevant for the different development phases. As such, research hypothesis 2.1 and 2.2 regarding research question 2.1 and 2.2 are formulated. Hypothesis 2.3 follows from Chalupnik et al.'s (2009) strategies to manage uncertainty.

Hypothesis 2.1: Extrapolation of objectives happens based on individual knowledge.

Hypothesis 2.2: Extrapolation of objectives incorporates different types of knowledge into the development process.

Hypothesis 2.3: The developer's intention behind extrapolation of objectives is to reduce subsequent adaptation effort and generate change-resistant products.

To summarize, our theory and explanatory approach is in line with the previously mentioned theories of mental models and knowledge structures (see section 3.3). The generation of a system of objectives can be investigated through them (see Muschik 2011, p. 120; Albayrak et al. 2009). Thus, we extend these theories to the extrapolation of objectives under uncertainty.

5 Empirical Study

Due to the novelty of the topic, a partially explorative approach was taken. Semi-structured expert interviews are conducted with experienced developers. An interview guide with pre-formulated questions is used to make the developers reflect their own proceeding under uncertainty

5.1 Development of the Interview Guide

The interview guide is derived from the four hypotheses in section 4. In the first part, it covers the preconditions for and existence of extrapolated objectives. The second part examines the knowledge structure of the individual design processes to derive effects on the development process. The interview guide itself is developed by operationalization i.e. the definition of observable and/or measurable indicators (Schnell et al. 2008, p. 11). Questions are then derived from the indicators.

Hypothesis 1 states, that extrapolation of objectives exists, if the future state of requirements is perceived as uncertain. As such, the developer's awareness of uncertainty is evaluated using two fictitious situations, which the developers extend with self-experienced situations of uncertainty.

The existence of the uncertainty-based extrapolation of objectives is investigated through the existence of three indicators: The existence of private, mental requirements; a change in developer's behavior; or anticipatory alternations of the organization's requirements. However, the negation of the above indicators cannot be interpreted as a non-existence of extrapolated objectives. Therefore, the interviewee is additionally asked, whether he can make any statement regarding potential, future changes in requirements.

Hypothesis 2.1 and 2.2 state that extrapolation of objectives is based on the developer's knowledge and different knowledge types. The source of knowledge and the process of extrapolation serve as indicators. The questions are formulated as open questions to derive the different types of knowledge from indicators within the answers. To verify the knowledge types, the answers are repeated as questions and the indicator is exchanged with the definition of the knowledge type. Thereby the knowledge types from Roth et al. (2010) were used. Hypothesis 2.3 postulates the intended effect of objective extrapolation on the product's side. It is covered by asking the developer why he takes possible changes of objectives into account during his design activities and decisions.

The interview guide was tested in a pre-test with one developer. Thereupon, some formulations were adjusted to achieve a better comprehensibility.

5.2 Data Collection

Data collection took place in spring and summer 2019 at a German car manufacturer. In total, eight developers were asked to reflect on their own proceeding when facing uncertain requirements. Four of them were from the field of software/electronics development and four from the field of mechanical component design. Four of the developers work in pre-series development and four in series development; with two people each from the software/electronics department and two from mechanical development.

Due to legal and non-disclosure reasons, only few participants were available for the study. Furthermore, only developers with at least four years of experience or who have completely accompanied at least one development project were interviewed. As such the study serves as a first indication for the existence of extrapolated objectives. However, it has only limited validity due to the relatively few participants.

Overall, the interviewees had between four and 38 years of professional experience. The interviews lasted between 45 minutes and one hour. Six of them were recorded and transcribed. Two interviews had to be directly documented by hand due to legal reasons and/or at the request of the interviewees.

6 Results

The existence of extrapolated objectives in practice is confirmed by the interview results: Six out of eight interview partners confirm the generation of extrapolated objectives. Furthermore, the interview series identifies three main effects of extrapolated objectives: Firstly, the extrapolated objectives build upon the developer's knowledge. Secondly, the extrapolation of objectives is additionally based on outside information. Thirdly, the intended effect of the developers is a change-resistant product design.

6.1 Preconditions and Hypothesis 1

Seven out of eight developers agree that they experience requirement changes in the development and/or in the usage phase. Furthermore, they confirm that this leads to uncertainty on their part. Thereby, the expected, uncertainty-inducing changes range from global, external scope (e.g., changes in legislation) to internal, minor changes (e.g., parameter changes at the interface level) and are projected into the engineer's area of responsibility. The developer neglecting the precondition states that the initial requirements are already based on good knowledge and information. Thus, they won't change.

Five out of these seven interviewees confirm the application of extrapolated objectives in their daily work, when facing uncertain requirements. Additionally, one developer generates an extrapolation of objectives, but does not apply it. Company-standardized tolerances would cover them. Thus, they do not influence his development activities and decisions. Therefore, the existence of individual, extrapolated objectives in practice is confirmed for six out of eight interviewees. However, objective extrapolation cannot be generalized to all cases, in which the requirements are perceived as uncertain. One developer states that extrapolation of objectives is not possible for him, due to the expenditure of time for information procurement and availability of information.

6.2 Hypothesis 2.1 and Hypothesis 2.2

The interview series identifies two main areas of information, the extrapolated objectives are based on. Firstly, the extrapolated objectives build upon the developer's knowledge. Thereby a variety of knowledge types is used. All interviewees named factual, experience, and market/customer related knowledge (see Figure 1). Secondly, the extrapolation of objectives is additionally based on outside information sources like from suppliers, other divisions or technical literature. As such, Hypothesis 2.1 is only partially supported, as individual knowledge is not the only information source for extrapolation of objectives. Yet, the results are in accordance with Hypothesis 2.2 as different types of knowledge are incorporated.

The results regarding the knowledge types need to be understood with respect to the often-mentioned types in Figure 1. The sample size is quite small and thus, the list is not exclusive. Additionally, the verification of the knowledge types, which were not mentioned by the interviewee, was not possible in all interview situations due to time restrictions. Still, the common mention of experience knowledge is logical: Experience knowledge supports preventive actions to avoid negative effects through early detection (Roth et al. 2010). Accordingly, three developers say that the number of years of professional experience is decisive for the quality of extrapolated objectives. With respect to market and customer related knowledge all developers point out that knowledge of the upstream markets in the value chain is relevant to estimate requirement changes. Four developers also take customer utility into account. Three of the respondents estimate changes in objectives based on their knowledge about competitors. Expert and product knowledge are used by the interviewees primarily to connect the extrapolated objectives with the current state of product development. One developer describes for example how development status information from other departments is essential to estimate possible future changes in the component architecture. Another developer perceives the discussion among experts as necessary to correct expected but unrealistic changes in objectives.

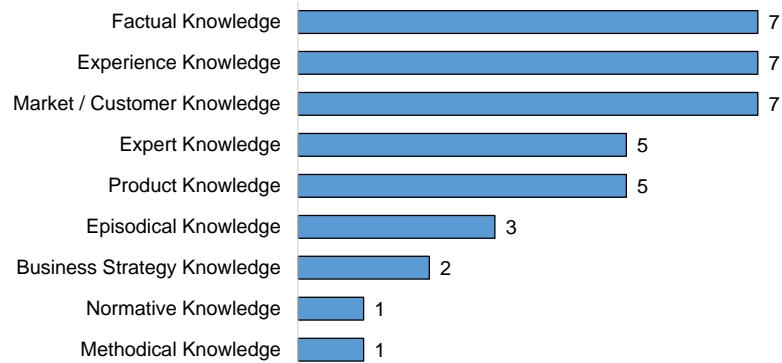


Figure 1: Number of developers (n = 7) who indicate to use the knowledge types when extrapolating objectives (knowledge types are defined in Roth et al. (2010))

Besides individual knowledge, the interviewees often name outside information which they incorporate when extrapolating objectives. Information from suppliers, from scientific literature and trade fairs, as well as information from the company's own innovation department, from sales or from a department that monitors changes in standards and legislation were named by the interviewees. This is consistent with the previous findings (Figure 1) in that developers utilize factual knowledge to extrapolate objectives. Interestingly, episodical knowledge is named by three developers.

6.3 Hypothesis 2.3

In five out of six cases the intended effect is a change-resistant product design. One developer does not confirm the application of extrapolated objectives in his daily work. As such, his extrapolation cannot influence the product. Thus, the intended effect of all developers is a change-resistant product design, if the extrapolated objectives are employed in the design activities and decisions.

Yet, an immediate implementation of this intention is not always possible due to the restrictions of the explicitly stated requirements from the organization. Four of the developers name costs and/or time as restrictions for a change-resistant product design. One of the interviewees criticizes the restrictions caused by costs: Change-robust solutions, which – from his experience – are necessary in later phases of product development, would be excluded for cost reasons, since persons with less technical understanding and limited development experience are responsible for costing decisions. Another interviewee describes a necessity to work out the probability of occurrence and the costs of a change in order to be able to advocate anticipatory designs argumentatively.

7 Discussion

The results of the empirical study are consistent with the reviewed literature and generally support the stated hypotheses. Yet, some aspects of the hypotheses must be adapted in order to reflect the results correctly.

With respect to Hypothesis 1, developers might extrapolate objectives, if the future state of the requirements is perceived as uncertain. However, the results show, that some developers do not extrapolate the objectives even if they perceive the requirements as uncertain. Furthermore, not every system of objectives is subject to temporal change and not every developer is aware of the dynamics. Parallels can be drawn to the methodology of Muschik (2011, p. 131): The development and observed dynamic of organizational systems of objectives is subject to the scoping of the individuals involved in its creation.

Regarding Hypothesis 2.1 the individual knowledge is supplemented by a range of outside information sources. Yet, most of these information sources describe changes in the constraints of the organizational system of objectives. It can be followed, that the developers perceive the adaption of

the organizational system of objectives to new information as being too slow. Extrapolation of objectives enables them to subliminally and quickly integrate this information in the development process. One of the respondents formulates this as follows: "Often it is us developers who actually see these [future] requirements". This is supported by one developer, who names episodic knowledge in connection with recurrently unrealistic requirements. It points to deficits in the generation of the organizational system of objectives. The finding is consistent with Albayrak et al. (2009): They state that implicit assumptions regarding the requirements exist, since not all requirement changes can be formulated explicitly. Yet, integration of new information happens without external control of information quality, due to the individualistic characteristic of extrapolated objectives.

Overall, different types of knowledge are used for extrapolation (Hypothesis 2.2). Thereby, the quality of the extrapolated objectives depends on the individual choice of information sources and the knowledge of the individual himself. Hypothesis 2.3 is fully supported by the results: Developers intend to reduce later adaptation effort and generate change-resistant products. However, an immediate implementation of this intention is not always possible. Accordingly, the extrapolated objectives are not necessarily considered in all development activities. Thus, the influence of extrapolated objectives on the final product might differ, depending on the development context.

In general, our hypotheses are based on a more traditional understanding of the engineer's role, with responsibilities for the technical design, rather than for its requirements. Yet, this is in line with the hierarchical structure of the company under investigation and the regulatory requirements towards the product. Future research might extend this perspective to more agile organizations for example.

To summarize, multiple different systems of objectives with different foresights and forecasts might exist within one development project. The intended effect is positive. Yet, implementation impact is unknown and the difference in extrapolated objectives might create conflicts and misunderstandings in the development process (Badke-Schaub et al. 2007). Thus, we suggest three counter measures to foster communication about uncertain requirements, to employ methods and tools for change-resistant product design and to support the generation of extrapolated objectives methodically. Communication about uncertain requirements synchronizes the local knowledge and information contained in the individual system of objectives. As such, it is an enabler for the implementation of extrapolated objectives in the organizational system of objectives. Moreover, methods and tools for change-resistant products (e.g., Suh et al. 2007; Engelhardt et al. 2009) support developers in understanding the overall impact of anticipatory design. Combined with a common understanding of the uncertainty, an overall change-resistant product can be created instead of multiple, local resilience concepts. Finally, the generation process of extrapolated objectives should be supported by a methodical approach to leverage and control information quality. Scenario planning (see e.g. Bishop et al. 2007) is one approach which can be considered. However, the found unsystematic and chaotic procedure to extrapolate and individually adapt objectives is flexible, easy and low effort. It is in line with the inherent characteristics of the uncertain requirements. Thus, the advantage of fast, subtle integration of new information could vanish, if bounded by the systematics in methods. As such, acceptance and success of purely methodical approaches might be questionable.

8 Conclusion and Future Work

The present work investigates the existence and effect of individual extrapolation of objectives due to uncertainty. The term 'extrapolation of objectives' is defined and put into context with already existing design research. Subsequently, two research questions and their respective hypotheses were derived. They are investigated through an empirical study, in which eight developers at a German car manufacturer were interviewed. The hypotheses with respect to existence and effects of extrapolated objectives are supported.

To the best of our knowledge, it is the first research addressing this issue. A variety of literature is concerned with the generation and management of objectives and requirements (e.g. Pohl 2008; Baumgart 2016). Some of the works deal with incomplete requirements (e.g. Ebert and Man 2005;

Albayrak et al. 2009) or uncertainty (e.g. Jetter 2005; Muschik 2011). However, their focus lays upon the organizational level. No literature has been found which specifically investigates how uncertain future requirements affect the individual developer and his system of objectives. As such, the results of this paper are complementary but consistent with previous research. The individual extrapolation of objectives exists. It is based on individual knowledge and outside information, which is not incorporated into the organizational requirements so far. The intended effect of the developers is the generation of a change-resistant product design. However, real implementation impact is subject to the development context. Thus, we advise to support the developers through better communication as well as tools and methods. This should align the different systems of objectives, synchronize the forecasts of their future states, and leverage the positive effect on the product.

However, the results and practical implications should be understood as valid only to a limited extent. The sample size of the empirical study is sufficient to proof the existence of individual extrapolation of objectives. However, further research is necessary to generalize the findings, with a larger sample size and further companies of different sizes, structures, and industry branches. Yet, the research methodology and interview guide are already present. Besides that, supplementing empirical studies are advisable to draw more profound conclusions and derive new methodical findings for product development. Investigation of different characters of knowledge (see Roth et al. 2010) might reveal insights about whether the effects are individually or collectively driven. New methods can then be developed. Furthermore, future research might focus on similarities and dependencies of generation and extrapolation of objectives, to overcome possible shortcomings in the generation part.

Overall, the extrapolation of objectives under uncertainty exists and first effects were uncovered. More research is necessary to investigate the stated hypotheses in more detail and develop new methods to cope with uncertainty on the individual level. However, it is to be expected that the individual extrapolation of objectives cannot be eliminated completely. Product development is always confronted with uncertainty and a good developer is expected to have a far-sighted and questioning attitude (Pahl et al. 2007, p. 232 f.). As such, he might also always question the current state of requirements.

Literature

- Albayrak et al. 2009 ALBAYRAK, Ozlem; KURTOGLU, Hulya; BIVAKCR, Mert: Incomplete Software Requirements and Assumptions Made by Software Engineers. In: SULAIMAN, Shahida; NOOR, Maizura Mohamad (Hrsg.): *16th Asia-Pacific Software Engineering Conference: APSEC 2009*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2009, p. 334–339.
- Albers 2010 ALBERS, Albert: Five hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: HORVÁTH, I.; MANDORLI, F.; RUSÁK, Z. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering: TMCE 2010*. Delft: Faculty of Industrial Design Engineering, University of Technology, 2010.
- Albers et al. 2010 ALBERS, A.; MUSCHIK, S.; EBEL, B.: Einflüsse auf Entscheidungsprozesse in frühen Aktivitäten der Produktentstehung, Bd. 276. In: GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): *6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung: Berlin, 28. und 29. Oktober 2010*: Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, 2010 (276).
- Albers et al. 2012 ALBERS, Albert; EBEL, Björn; LOHMEYER, Quentin: Systems of objectives in complex product development. In: HORVÁTH, I. (Hrsg.): *Proceedings of the Ninth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering: TMCE 2012*. Delft: Faculty of Industrial Design Engineering, Delft University of Technology, 2012, p. 12.

- Badke-Schaub et al. 2007 BADKE-SCHAUB, Petra; NEUMANN, Andre; LAUCHE, Kristina; MOHAMMED, Susan: *Mental models in design teams: A valid approach to performance in design collaboration?* In: *CoDesign* 3 (2007), Nr. 1, p. 5–20.
- Baumgart 2016 BAUMGART, Inka: Requirements Engineering. In: LINDEMANN, Udo (Hrsg.): *Handbuch Produktentwicklung*: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, p. 425-453.
- Bishop et al. 2007 BISHOP, Peter; HINES, Andy; COLLINS, Terry: *The current state of scenario development: an overview of techniques*. In: *Foresight* 9 (2007), Nr. 1, p. 5-25.
- Chalupnik et al. 2009 CHALUPNIK, Marek J.; WYNN, David C.; CLARKSON, P. John: Approaches to mitigate the impact of uncertainty in development processes. In: NORELL BERGENDAHL, M.; GRIMHEDEN, M.; LEIFER, L.; SKOGSTAD, P.; LINDEMANN, U. (Hrsg.): *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED 09): Design Processes*: Design Society, 2009 (1), p. 459–470.
- Chari and Agrawal 2018 CHARI, Kaushal; AGRAWAL, Manish: *Impact of incorrect and new requirements on waterfall software project outcomes*. In: *Empirical Software Engineering* 23 (2018), Nr. 1, p. 165–185.
- Ebert and Man 2005 EBERT, C.; MAN, J. de: Requirements uncertainty: influencing factors and concrete improvements. In: *Proceedings of the 27th International Conference on Software Engineering (ICSE 05)*. New York, NY: Association for Computing Machinery, 2005, p. 553–560.
- Ehrlenspiel and Meerkamm 2017 EHRENSPIEL, Klaus; MEERKAMM, Harald: *Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2017.
- Engelhardt et al. 2009 ENGELHARDT, Roland; BIRKHOFER, Herbert; KLOBERDANZ, Hermann; MATHIAS, Johannes: *Uncertainty-Mode- and Effects-Analysis: An Approach to Analyze and Estimate Uncertainty in the Product Life Cycle*. In: *International Conference on Engineering Design, ICED09* (2009), Nr. 2, p. 191–202.
- Feldhusen et al. 2013 FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich; NAGARAJAH, Arun; PAHL, Gerhard; BEITZ†, Wolfgang; WARTZACK, Sandro: Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses, Bd. 42. In: FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013, p. 291–409.
- Jetter 2005 JETTER, Antonie: *Produktplanung im Fuzzy Front End: Handlungsunterstützungssystem auf der Basis von Fuzzy Cognitive Maps*. Wiesbaden, RWTH Aachen, Dissertation, 2005.
- Kickermann Juli 1995 KICKERMANN, Heiner: *Rechnerunterstützte Verarbeitung von Anforderungen im methodischen Konstruktionsprozeß*. Braunschweig, Technische Universität, Institut für Konstruktionslehre, Dissertation, Juli 1995.
- Liebold and Trinczek 2009 LIEBOLD, Renate; TRINCZEK, Rainer: Experteninterview, Bd. 27. In: KÜHL, Stefan; STRODT HOLZ, Petra; TAFFERTSHOFER, Andreas (Hrsg.): *Handbuch Methoden der Organisationsforschung: Quantitative und Qualitative Methoden*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009, p. 32–56.
- Lindemann 2009 LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009 (VDI-Buch).

- Lohmeyer 2013 LOHMEYER, Quentin: *Menschzentrierte Modellierung von Produktentstehungssystemen unter besonderer Berücksichtigung der Synthese und Analyse dynamischer Zielsysteme*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Produktentwicklung, Dissertation, 2013.
- Muschik 2011 MUSCHIK, Sabine: *Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering*. Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2011.
- Nagel 1979 NAGEL, P.: Zielformulierung. In: DAENZER, Walter F.; BÜCHEL, Alfred (Hrsg.): *Systems engineering: Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben*. 2. Aufl. Köln: Hanstein, 1979, p. 67–85.
- Nidumolu 1996 NIDUMOLU, Sarma R.: *Standardization, requirements uncertainty and software project performance*. In: *Information & Management* 31 (1996), Nr. 3, p. 135-150.
- North and GüldenberG 2008 NORTH, Klaus; GÜLDENBERG, Stefan: *Produktive Wissensarbeit(er): Antworten auf die Management-Herausforderung des 21. Jahrhunderts*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2008.
- Pahl et al. 2007 PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- Pohl 2008 POHL, Klaus: *Requirements engineering: Grundlagen, Prinzipien, Techniken*. 2. Aufl. Heidelberg: dpunkt-Verlag, 2008.
- Ropohl 1975 ROPOHL, Günter: Einleitung in die Systemtechnik. In: ROPOHL, Günter (Hrsg.): *Systemtechnik: Grundlagen und Anwendung*. München: Hanser, 1975, p. 1–78.
- Roth 2020 ROTH, Daniel Jörg: *Analyse und Bewertung von Wissen in der Produktentwicklung*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2020.
- Roth et al. 2010 ROTH, D.; BINZ, H.; WATTY, R.: Generic structure of knowledge within the product development process. In: MARIANOVIĆ, Dorian; Storga M.; Pavkovic N.; Bojcetic N. (Hrsg.): *Proceedings of DESIGN 2010: the 11th International Design Conference*. Zagreb, 2010 (DESIGN), p. 1681–1690.
- Schnell et al. 2008 SCHNELL, Rainer; HILL, Paul B.; ESSER, Elke: *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 8. Aufl. Oldenbourg: Wissenschaftsverlag, 2008.
- Suh et al. 2007 SUH, Eun Suk; DE WECK, Olivier L.; CHANG, David: *Flexible product platforms: framework and case study*. In: *Research in Engineering Design* 18 (2007), Nr. 2, p. 67–89.
- Tergan 1986 TERGAN, Sigmar-Olaf: *Modelle der Wissensrepräsentation als Grundlage qualitativer Wissensdiagnostik*. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften, 1986 (Beiträge zur psychologischen Forschung 7).
- VDI 2221 Blatt 1 Verein Deutscher Ingenieure März 2018. VDI 2221 Blatt 1. März 2018. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*.
- VDI 2221 Verein Deutscher Ingenieure Mai 1993. VDI 2221. Mai 1993. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*.
- VDI 3780 Verein Deutscher Ingenieure September 2000. VDI 3780. September 2000. *Technikbewertung - Begriffe und Grundlagen*.

Go-To-Market Canvas – Ein Marktzugangskonzept für Inventionen in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung

Go-To-Market Canvas – Market access concept for invention in the early phase of product generation development

Manuel Niever¹, Felix Schulz¹, Jonas Heimicke², Carsten H. Hahn¹, Albert Albers²

¹Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Karlsruhe
{Manuel.Niever, scfe1047, carsten.hahn}@hs-karlsruhe.de

²Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe
{Jonas.Heimicke, Albert.Albers}@kit.edu

Abstract: Kürzere Technologie- und Produktlebenszyklen erfordern häufigere und schnellere Markteinführungen. Für die Entwicklung von neuen Produkten mit hohem Innovationspotential bietet die Diffusionstheorie einen analytischen Ansatz zur Untersuchung von Erfolgs- und Einflussfaktoren der Markteinführung. Anhand dieser Kriterien können Methoden- und Marktzugangskonzepte entwickelt werden, um die Markteinführung bereits in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung zu berücksichtigen. Im Rahmen einer präskriptiven Studie wird ein Marktzugangskonzept für die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung entwickelt, das eine methodische Unterstützung bietet und wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung von technischen Produkten nimmt. Die empirische Validierung des Konzeptes in einem realitätsnahen Entwicklungsprojekt mit fünf studentischen Entwicklungsteams zeigt die praktische Anwendbarkeit und den wahrgenommenen Mehrwert auf. Das Marktzugangskonzept in Form eines Go-To-Market Canvas beinhaltet die Planung von Markteinführungsstrategien sowie Kommunikations- und Vertriebskanälen und fokussiert das Wertangebot aus dem Geschäftsmodell.

Keywords:

Diffusionstheorie, Markteinführung, Frühe Phase der Produktentwicklung, Marktzugang, Marktzugangskonzept

Abstract: Shorter technology and product life cycles require more and faster product launches. To develop new products with high innovation potential, the diffusion theory offers an analytical approach to investigate success and to influence factors of a product launch. Based on these criteria, methods and a concept to access markets can be developed to consider the product launch already in the early phase of product generation development. Within a prescriptive study, a concept to access markets for the early phase of product generation development is developed. The concept to access markets provides methodological support and is significant for the development of technical products. The empirical validation of the concept in a real development project with five student development teams shows the practical applicability and the perceived added value. The concept to access markets is realized in form of the Go-To-Market Canvas which contains the planning of product launch strategies as well as communication and sales channels and focuses the value proposition from the business model.

Keywords:

Diffusion of Innovations, product launch, early phase of product development, market access, concept to access markets

1 Einleitung und Motivation

Innovationen sind der Grundstein für unternehmerischen Erfolg, da sie die wirtschaftliche Nutzung von neuen Produkten beinhalten (Voigt 2008; Schumpeter 1997). Mithilfe von Innovationen bleiben Unternehmen langfristig wettbewerbsfähig und binden Kunden an sich (Disselkamp 2012). Durch gesättigte Märkte, hohen Wettbewerbsdruck, dynamische Kundenanforderungen und komplexere Produktentwicklungen steigt das Risiko, die Anwender-, Kunden- oder Marktanforderungen zu verfehlen. In diesem Fall wird auch eine nachgelagerte Markteinführung, die als Schnittstelle zwischen potenziellen Kunden, Wettbewerbern und Unternehmen agiert, nicht gelingen (Bauer et al. 2006). Daher ist ein strukturiertes Innovationsmanagement unerlässlich, welches Innovationsvorhaben ganzheitlich unterstützt und frühzeitig die Markteinführung eines Produktes im Innovationsprozess vorbereitet (Schuh et al. 2012).

Die drei Elemente einer Innovation, *Produktprofil*, *Invention* und *Markteinführung* (Albers et al. 2018), werden häufig als zeitlich voneinander abgetrennte Prozessschritte dargestellt (Cooper et al. 1990). Gerade bei der Markteinführung treten Probleme auf, wenn diese zu spät berücksichtigt wird. Deshalb werden bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung Modelle benötigt, welche die Markteinführung im späteren Verlauf berücksichtigen (Albers et al. 2017b). Die Markteinführung von Produkten kann nur erfolgreich gestaltet werden, wenn bereits während der Produktentwicklung kontinuierlich die Anforderungen des Marktes berücksichtigt werden. Je nachdem, ob die Bedürfnisse der Anwender und Kunden richtig erfasst worden sind, oder die Ideen bzw. technische Lösungen tatsächlich den Vorstellungen entsprechen, wird eine schnelle Präsenz am Markt erreicht - oder auch nicht (Hofbauer et al. 2015). Aus diesem Grund ist es unerlässlich, die Produkteinführung bereits während der Produktentwicklung anzusetzen.

Insbesondere die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung ist von hohen Unsicherheiten und einem niedrigen Wissensstand gekennzeichnet (Hofbauer et al. 2015; Albers et al. 2017b). Entscheidungen, die in dieser Phase getroffen werden, betreffen die nachfolgenden Entwicklungsschritte und sind deshalb von großer Bedeutung (Albers et al. 2017b). Da sie ein hohes Maß an Unschärfe aufweisen, werden häufig Entscheidungen auf falscher Grundlage getroffen (Stevens 2014). Ein Ansatz, Unsicherheiten in der frühen Phase der Produktentwicklung zu reduzieren und ein Modell zu entwickeln, das die Diffusion von Innovationen bereits in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung berücksichtigt, liefert die Diffusionstheorie.

Das Ziel dieses Beitrags besteht darin, Erfolgsfaktoren und Einflussfaktoren der Diffusionstheorie zu identifizieren und anhand dieser Faktoren, eine Methodik zu entwickeln, mit denen die Anforderungen des Marktes an die Markteinführung bereits früh und kontinuierlich erfasst werden können. Damit werden Konzepte zur Einführung entwickelter Produkte in die Märkte integriert, mitentwickelt und fortlaufend validiert. Die Forschung beantwortet daher die Frage, wie die Markteinführung bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung methodisch vorbereitet und die Diffusionskriterien berücksichtigt werden können. Dabei wird ein Methoden- und Marktzugangskonzept erarbeitet, das die Entwicklungsarbeit an Produktprofilen und Inventionen unterstützt. Durch das Marktzugangskonzept werden Strategieplanung, Kommunikationsmöglichkeiten und die Bedürfnisse der Kunden in der Produkteinführung frühzeitig beachtet.

2 Stand der Forschung

2.1 Innovation

Der Innovationsbegriff lässt sich im Wesentlichen auf die Definition von Schumpeter (1935) zurückführen. Beschrieben wird eine Innovation als die „[...] Durchsetzung neuer Kombinationen [...]“ (Schumpeter 1997, S. 100) deren Charakteristik in einer „[...] schöpferischen Zerstörung [...]“ (Schumpeter et al. 1972, S. 138) liegt. Innovationen entstehen durch neue Kombinationen von

Produktionsfaktoren, die sich durchsetzen und alte Kombinationen ablösen. Dabei bestehen sie aus den drei wesentlichen Elementen Produktprofil, Invention und Markteinführung (Albers et al. 2018). Die Grundlage ist ein Bedürfnis, welches „[...] ein Mangelgefühl und das Verlangen, dieses zu beseitigen“ (Erlhoff 2008, S. 47) beschreibt. Daraus entsteht ein Bedarf, dieses Bedürfnis durch den Erwerb von Produkten und Dienstleistungen zu befriedigen. Die Kombination aus dem Bedürfnis und Bedarf von Kunden ergeben Produktprofile, die den Nutzen für Kunden ersichtlich macht (Albers et al. 2018). Anhand eines Produktprofils werden anschließend Ideen und Lösungen für die Bedürfnissituation gesucht. Diese Lösungen stellen die Invention, „[...] also die erstmalige technische Realisierung einer neuen Problemlösung“ (Strebel 2007, S. 6), dar. Eine Invention bezeichnet daher eine neue Idee, die sich ebenfalls „[...] qualitativ deutlich vom existierenden Zustand unterscheidet“ (Schuh et al. 2012, S. 2). Damit aus der Invention eine Innovation wird, muss sie in den Markt eingeführt und angewandt werden sowie wirtschaftlich nutzbar sein. Denn erst die Einführung der Invention in den Markt ermöglicht wirtschaftliche Anwendung, Umsetzung und Verwertung der Invention und führt zur Innovation (Strebel 2007; Schumpeter 1997).

2.2 Innovationsprozesse

Die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung beschreibt den Prozess von der Projektinitiierung bis zur bewerteten technischen Lösung (Albers et al. 2017b). Charakterisierend für die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung sind Unsicherheiten, die durch Informationsunschärfe über Kunden und Wettbewerber entstehen (Stevens 2014). Mit dem Ziel, erfolgreiche Inventionen auf dem Markt zu etablieren, werden im Innovationsmanagement unterschiedlichste Aktivitäten ausgeführt. Diese werden in Innovationsprozessen modelliert und fokussieren die gezielte Entwicklung von Innovationen anhand mehrerer Prozessschritte. Die Innovationsprozesse enden in den meisten Fällen mit der Markteinführung in der letzten Phase. Zum Beispiel endet der Stage-Gate-Prozess (Cooper et al. 1990) in der fünften Phase mit der Kommerzialisierung. Die Kommerzialisierung beinhaltet die Planung, Implementierung und Ausführung des Markteinführungsplans. Auch andere Prozesse wie zum Beispiel das drei Phasen Modell (Thom 1980) enden mit der Ideenrealisierung und der konkreten Absetzung der Idee an den Adressat. Allerdings findet die Planung und Realisierung der Markteinführung oftmals erst in der letzten Phase der Innovationsprozesse statt, wenn die Entwicklung des Produktprofils und der Invention bereits abgeschlossen ist (Voigt 2008).

Häufige Bestandteile der Innovationsprozesse sind die Phasen der Analyse, Potentialfindung, Konzeption, Spezifikation und Realisierung (Albers et al. 2017a). Die Entwicklung technischer Lösungen und Dienstleistungen auf Basis eines Produktprofils wird begleitet durch die Entwicklung von Geschäftsmodellen (Albers et al. 2020a). Ein Geschäftsmodell beschreibt das Grundprinzip, nach dem ein Unternehmen Werte für Anwender und Kunden schafft, vermittelt und erfasst (Osterwalder et al. 2011; Göcke 2015). Die Kernidee des erzeugten Mehrwerts für den Anwender und Kunden durch die Invention sowie dessen Wirtschaftlichkeit wird bei der Entwicklung von Geschäftsmodellen erweitert. Dabei wird auch beschrieben, wie das Wertangebot an die Kunden kommuniziert werden kann (Bieger et al. 2011). Bei der Erarbeitung von Geschäftsmodellen dient das Business Model Canvas von Osterwalder et al. (2011) als ein Konzept für die strukturierte Beschreibung, Visualisierung und Bewertung anhand von neun grundlegenden Bausteinen. Die Methode dient dem Entwicklungsteam somit als Werkzeug zur Erarbeitung, Kommunikation und Analyse des Geschäftsmodells (Osterwalder et al. 2011).

2.3 Diffusionstheorie

Das Wort *Diffusion* entspringt ursprünglich dem lateinischen Wort *diffundere* und bedeutet ausbreiten (Langenscheidt). Die von Everett M. Rogers entwickelte und konkretisierte Diffusionstheorie bezieht die Diffusion auf Innovationen und definiert die Diffusion von Innovationen als der „[...] process by which an innovation is communicated through certain channels over time among the members of a

social system“ (Rogers 1983, S. 5). Das Ausbreiten bezieht sich auf die Verbreitung einer Innovation in einem sozialen System, welche im Wesentlichen durch die Kommunikation mithilfe unterschiedlicher Kommunikationskanäle beeinflusst werden kann.

Ziel der Markteinführung neuer Produkte ist es, eine möglichst hohe und schnelle Integration des Produktes auf dem bestehenden Markt zu erreichen. Damit sich das Produkt auf dem Markt etabliert und erfolgreich den Markt durchdringt, muss sich das Produkt auf dem Markt verbreiten und diffundieren. Hierzu weist die Diffusionstheorie vier Einflussfaktoren auf die Adoptionsrate aus, damit die Diffusion des Produktes schnell und erfolgreich verläuft. Die Adoptionsrate beschreibt dabei „die relative Geschwindigkeit, mit der eine Innovation von den Mitgliedern eines Sozialsystems angenommen wird“ (Rogers 1983, S. 232). Adoptiert ein Mitglied des sozialen Systems die Innovation, wird die Innovation angewandt und in den Kontext des Mitglieds implementiert (Rogers 1983). Beeinflusst wird die Adoptionsrate durch die vier Einflussfaktoren *Eigenschaften der Innovation, Kommunikation, soziales System* und *Zeit* (Rogers 1983, S. 232).

Die *Eigenschaften einer Innovation* üben einen großen Einfluss auf die positive oder negative Haltung gegenüber einer Innovation aus (Rogers 1983). Ist beispielsweise die technische Komplexität der Innovation sehr hoch, wird das Produkt als schwer nutzbar oder schwer verständlich wahrgenommen. Die meisten potenziellen Kunden nehmen aufgrund der technischen Komplexität eine negative Haltung gegenüber der Innovation ein. Die Eigenschaften der Innovation sind in Tabelle 1 definiert.

Tabelle 1: Produkteigenschaften einer Innovation (Rogers 1983, S. 213–232)

Produkteigenschaften	Definition
Relativer Vorteil	Grad, um den ein Produkt gegenüber den bisherigen anderen Produktalternativen als überlegen wahrgenommen wird oder dieses ersetzt.
Kompatibilität	Grad, um den ein Produkt gegenüber den bestehenden Grundeinstellungen (= vorhandene Werte und Erfahrungen) der potenziellen Adoptern übereinstimmt.
Komplexität	Grad, um den ein Produkt relativ als schwer nutzbar oder schwer verständlich wahrgenommen wird.
Prüfbarkeit	Grad, um den ein Produkt erprobt und erkundet werden kann.
Beobachtbarkeit	Grad, um den ein Produkt bezüglich seiner Ergebnisse oder Nutzen für potenzielle Kunden sichtbar oder zugänglich sind.

Die *Kommunikation* der Innovation stellt einen zentralen Bestandteil der Diffusion und damit der Adoptionsrate dar. Kommunikationskanäle können massenmedial, interpersonal, lokal oder kosmopolitisch sein. Die Kommunikation von Produktinformationen dient als Vermittlung zwischen Anbieter und Nachfrager. Dadurch lassen sich Schwerpunkte der Produktplatzierung festlegen und beeinflussen.

Ein *soziales System* besteht aus einer Reihe von Mitgliedern, die gemeinsam Probleme lösen oder Ziele erreichen. Mitglieder können dabei Personen, Gruppen, Unternehmen oder Märkte sein (Rogers 1983). Einfluss auf das soziale System und damit auf die Markteinführung einer Innovation innerhalb eines sozialen Systems können Meinungsführer und sog. Change Agents nehmen.

Die *Zeit der Innovation* spiegelt den Einfluss durch den Adoptionsprozess, den jeder potenzielle Kunde durchläuft, und den Diffusionsverlauf im gesamten sozialen System wider. Der Adoptionsprozess ist ein fünfphasiges Prozessmodell, der mit der Wissensphase startet und mit der Bestätigung einer Adoption endet. Ein potenzieller Kunde sammelt Informationen, entwickelt eine positive oder negative Einstellung, entscheidet sich vorläufig für oder gegen die Adoption, implementiert ggf. die Innovation in seinen Alltag und bestätigt die Adoption oder lehnt sie nachträglich ab (Rogers 1983).

Im sozialen System entspricht die Diffusion einer typischen S-Kurve, gemessen an der kumulierten Adoption einer Innovation. Zu Beginn der Markteinführung ist die Verbreitung im sozialen System gering und das Produkt befindet sich im Nischenmarkt. Erst mit Erreichen der kritischen Masse verbreitet und etabliert sich das Produkt im Massenmarkt. Die kritische Masse ist erfolgsrelevant, denn mit ihrem Erreichen wird die Kluft überwunden, die zwischen dem Nischenmarkt und Massenmarkt entsteht. Die Innovation ist im Markt vollständig verbreitet, wenn jedes Mitglied des sozialen Systems die Innovation adoptiert hat (vgl. Bild 1).

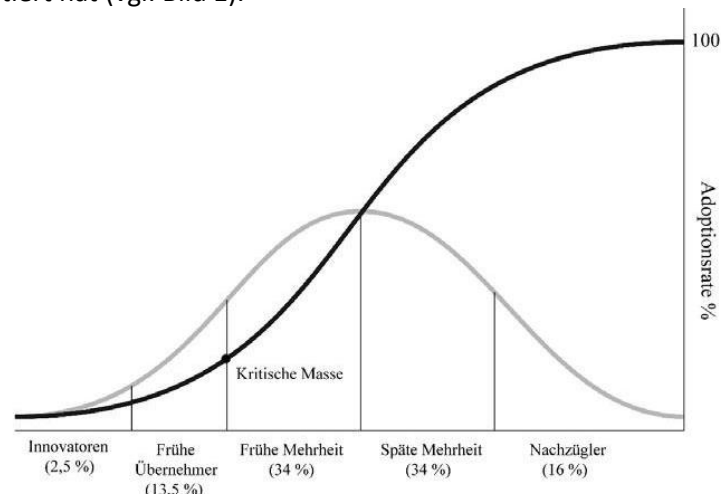


Bild 1: Diffusionsverlauf (Karnowski et al. 2016, S. 102)

Rogers typologisiert bei der Betrachtung des nicht-kumulierten Diffusionsverlaufs (Glockenkurve) fünf unterschiedliche Adopterkategorien (Rogers 1983), die sich in ihrem Zeitpunkt der Übernahme sowie in ihren persönlichen Merkmalen stark unterscheiden. Innovatoren sind zum Beispiel potenzielle Kunden, die als erster neue Innovationen und Technologien erproben. Frühe Adopter folgen Innovatoren. Frühe Adopter sind für Unternehmen, die Produkte in den Markt einführen, von zentraler Bedeutung. Da sie stark lokal vernetzt sind und den höchsten Grad an Meinungsführerschaft besitzen, sind sie eine erfolgskritische Gruppe für die Markteinführung. Erreicht die Diffusion die kritische Masse adoptiert die frühe Mehrheit die Innovation. Die frühe Mehrheit erhofft sich messbare, vorhersehbare und ohne Risiken verbundene Verbesserungen (Moore 2006). Durchschnittlich nach der Mehrheit aller Mitglieder im sozialen System adoptiert die späte Mehrheit Innovationen. Innovationen übernehmen sie zögerlich, erst mit steigenden Netzwerkeffekten und wirtschaftlicher Notwendigkeit. Die letzten, die eine Innovation übernehmen, sind Nachzügler. Die sozialen Eigenschaften ermöglichen die Planung von Maßnahmen und Strategien zur erfolgreichen Produkteinführung.

3 Forschungsbedarf und -methodik

Die Problemstellung lässt sich aus dem Stand der Forschung ableiten. Die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung ist wesentlich von Unsicherheiten (Hofbauer et al. 2015; Albers et al. 2017b) und Informationsmangel (Stevens 2014) gekennzeichnet. Gleichzeitig werden aber in der frühen Phase grundlegende Entscheidungen getroffen (Stevens 2014), die die Markteinführung beeinflussen. Eine erfolgreiche Markteinführung ist zugleich durch die initiale Idee und den Produkteigenschaften der Innovation abhängig. Die Diffusionstheorie zeigt, dass die vier Einflussfaktoren nicht erst im letzten Schritt der Markteinführung in Innovationsprozessen berücksichtigt werden dürfen, sondern bereits in die Phase der Ideengenerierung zu integrieren sind. Mit dem Ziel, die Markteinführung in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung methodisch vorzubereiten und die Diffusionskriterien zu berücksichtigen, wird eine empirische Forschungsstudie aufgebaut. Entsprechend der Design Research Methodologie (Blessing et al. 2009) wurde in einer initialen deskriptiven Studie die Notwendigkeit nach einem einheitlichen

Marktzugangskonzept untersucht. Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass Markteinführungen im Unternehmensalltag sehr unterschiedlich und häufig zu spät berücksichtigt werden. Im Zuge der präskriptiven Studie wird daher ein Marktzugangskonzept in Form des Go-To-Market-Canvas entwickelt. Das Go-To-Market Canvas wird iterativ in mehreren wissenschaftlichen Gesprächen und Workshops entwickelt und anhand einer ausgewählten Zielgruppe (n=20) getestet. In einer anschließenden deskriptiven Studie wird das Go-To-Market Canvas durch praktische Anwendung im Live-Lab *ProVIL – Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor* (Walter et al. 2017) validiert. Anhand der begleitenden Studie wird das Go-To-Market Canvas angepasst und optimiert.

4 Ergebnis

Ein Marktzugangskonzept befasst sich mit der Planung von Strategien zur Markteinführung von Innovationen. Ziel des Marktzugangskonzeptes besteht darin, durch die Berücksichtigung der Erfolgskriterien der Diffusionstheorie, Markteinführungen erfolgsversprechend zu gestalten und somit Innovationen zu befördern. Die Entwicklung eines Marktzugangskonzeptes erfolgt durch das Go-To-Market Canvas (4.1) und den ergänzenden Methoden (4.2).

4.1 Go-To-Market Canvas

Das Go-To-Market Canvas entwickelt das beschriebene Marktzugangskonzept und beantwortet, in Kombination mit den entwickelten Methoden (vgl. Kapitel 4.2), die Forschungsfrage nach der methodischen Unterstützung der Markteinführung in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung. Das Go-To-Market Canvas realisiert eine umfangreiche, aber dennoch übersichtlichen Planung der Markteinführung. Dafür ermöglicht das Go-To-Market Canvas die Planung von Markteinführungsstrategien, greift das Wertversprechen des Geschäftsmodells erneut auf und stellt den Kunden in Form der Persona-Beschreibung in den Mittelpunkt. Zentrale Bestandteile des Go-To-Market Canvas sind die Planung der Kommunikations- und Vertriebskanäle sowie die Beschreibung der Kundenwünsche, -bedürfnisse, -hindernisse und Kundenerwartungen. Das Go-To-Market Canvas greift das Wertversprechen aus dem Business Model Canvas auf. Zusätzlich beinhaltet die Planung des Marktzuganges konkrete Meilensteinplanungen in Form von Aktionsplänen. Da auch interne Partner und externe Stakeholder an der Markteinführung beteiligt sind, werden Maßnahmen zur Überzeugung dieser Partner geplant.

Das Go-To-Market Canvas besteht aus sieben Feldern (siehe Bild 2). Die Inhalte der Felder werden durch Fragestellungen vorgegeben. Eine Beantwortung der Fragen ist zur Vollständigkeit des Go-To-Market Canvas zwingend erforderlich und geben gleichzeitig Hilfestellungen zur Erarbeitung des Marktzugangskonzeptes. Da die Kommunikation einer der wichtigsten Faktoren bei der Markteinführung darstellt, steht dieses Feld im Zentrum des Go-To-Market Canvas. Die Kommunikation bietet den größtmöglichen Einfluss auf den Markt und auf den Kunden. Besonders beim Innovations-Entscheidungs-Prozess nimmt die Kommunikation eine besondere Rolle ein und wird deshalb zentral dargestellt.

Das Go-To-Market Canvas kann bereits in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung angewendet werden. Voraussetzungen für das Go-To-Market Canvas sind initial aufbereitete und validierte Produktprofile. Die konkrete Konzipierung der Idee in Hard- und Softwarelösungen ist nicht erforderlich und ausdrücklich nicht erwünscht, denn das Go-To-Market Canvas und insbesondere die Methoden in Kapitel 4.2 können Einfluss auf die Spezifikationen und Eigenschaften der zu konstruierenden Lösung nehmen. Die Ausführung des Go-To-Market Canvas und dem Methodenkonzept obliegt dem Entwicklungsteam das am Beispiel einer agilen Arbeitsweise von Agile Coaches, Innovation Coaches oder Scrum Mastern unterstützt und beraten werden kann.









<p>Product Description: </p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktualisierte initiale Produktbeschreibung ▪ Ideenbeschreibung mit dem höchsten Nutzwert ▪ Value Propositions aus Business Model Canvas 	<p>Persona: </p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Name/Alter/Beruf ▪ Interessen/Ziele ▪ Ängste ▪ Adopterkategorie ▪ Persönlichkeit 	<p>Stakeholder Engagement: </p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wie werden Sponsoren gewonnen, um unser Projekt zu finanzieren? ▪ Wie können wir die eigenen Teammitglieder von unserem Produkt begeistern? ▪ Durch welche Maßnahmen können externe Partner überzeugt werden, Teil des Produktes zu werden?
<p>Marktzugang: </p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Welche Marktzugangsstrategie soll verfolgt werden (Sprinkler vs. Wasserfall)? ▪ Welche Märkte werden bedient (Länder, Industrie)? ▪ Welche Preisstrategie soll verfolgt werden? ▪ Welcher Umsatz ist geplant? ▪ Welcher Service wird angeboten (z.B. After-Sales, Applikationspakete, Pay-per-Use)? 	<p>Kanäle zur Produktkommunikation: </p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Durch welche Kommunikationskanäle sollen die Kunden erreicht werden (z.B. Facebook-Werbung)? 	<p>4K's </p> <p>Kundenerwartung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Welche Erwartung stellt der Kunde an das Produkt? ▪ Kategorisierung: Basis-, Leistungs- und Begeisterungserwartung <p>Kundenbedürfnis:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Welche Mangelsituation hat der Kunde? ▪ Kategorisierung: Basis-, Leistungs- und Begeisterungsbedürfnis
<p>Actionplan: </p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionsstart: ▪ Prototypbau: ▪ Prototyp Validierung: ▪ Budgetplan: ▪ Verkaufsstart: ▪ Marketingkampagnen: <p>▪ → Produktroadmap erstellen</p>	<p>Vertriebskanäle: </p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wie erhalten die Kunden Zugang zum Produkt? (z.B. in einer Filiale oder im Online-Shop)? 	<p>Kundenwunsch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Welche Verbesserungen wünscht sich der Kunde? ▪ Kategorisierung: Basis-, Leistungs- und Begeisterungswunsch <p>Kundenhindernis:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Was hindert den Kunden daran, unser Produkt zu kaufen? ▪ Kategorisierung: Basis-, Leistungs- und Begeisterungshindernis

Bild 2: Go-To-Market Canvas

Die sieben Felder im Go-To-Market Canvas dienen der strukturierten und angeleiteten Entwicklung der Markteinführung und werden daher nachfolgend im Detail beschrieben.

Product Description: In diesem Feld wird das in den Markt einzuführende Produkt mit einer aktuellen Beschreibung dargestellt. Der Nutzwert, der sich aus der Diffusionsnutzwertanalyse (vgl. Kapitel 4.2) ergibt, ist mit in die Produktbeschreibung einzufügen. Damit eindeutig ist, welches Wertversprechen dem Kunden gemacht wird, wird das Wertangebot aus dem Business Model Canvas (Osterwalder et al. 2011) übernommen und über die Kanäle der Produktkommunikation dem Kunden übermittelt.

Persona: Das Canvas wird um die Beschreibung der potenziellen Abnehmer und Anwender ergänzt. Die Markteinführung kann nur erfolgreich verlaufen, wenn bewusst ist, an wen sich die Markteinführung richtet. Beschrieben wird ein realitätsnahes Bild der Kunden und Anwender. Name, Alter und Beruf ergeben die sog. Persona. Erweitert um die Interessen, Ziele und Ängste ergibt sich ein realistischeres Bild des Kunden und Anwenders. Aus der Adopterkategorien-Methode (vgl. Kapitel 4.2) kann das Ergebnis der Adopterkategorie übernommen werden. Persönliche Einstellungen und soziale Eigenschaften ergänzen dieses Bild.

Stakeholder Engagement: Die Unterstützung durch externe Partner ist ein wichtiger Bestandteil bei Neuentwicklungen. Daher plant das Stakeholder Engagement, wie interne und externe Stakeholder davon überzeugt werden können, Investitionen in die Invention zu tätigen oder als Partner zu unterstützen.

Marktzugang: In diesem Feld wird die Strategie zur Einführung des Produktes in den Markt geplant. Unterschieden wird zwischen der Sprinkler- und Wasserfallstrategie. Bei der Sprinklerstrategie wird der Zeitpunkt der Markteinführung so geplant, dass die Markteinführung in allen Ländern parallel und zeitgleich verläuft. Bei der Wasserfallstrategie wird die Markteinführung zuerst im eigenen Land durchgeführt und anschließend in den naheliegenden Märkten. Zusätzlich werden die Länder für den Marktzugang selektiert sowie Preismodelle und Preisstrategien erarbeitet. Um sich von der Konkurrenz zu differenzieren, kann der Marktzugang mit unterschiedlichen Serviceangeboten ausgestaltet werden.

Actionplan: Damit die Planung des Marktzugangs nicht nur in der Theorie stattfindet, wird ein Actionplan erstellt. Der Actionplan beinhaltet wesentliche Projektmanagementaufgaben. Meilensteine wie Produktionsstart, Verkaufsstart und der Budgetplan werden zeitlich festgelegt. Eine Produktroadmap hilft dabei, den Überblick über die Maßnahmen zu behalten, die mit dem Produkt in Verbindung stehen.

4K's: Das vorletzte Feld wird automatisch durch die Übertragung der Daten aus der 4K-Kanoanalyse Methode (vgl. Kapitel 4.2) befüllt. Durch die 4K-Kanoanalyse werden die Kundenerwartung, das Kundenbedürfnis, der Kundenwunsch und das Kundenhindernis erarbeitet und grafisch dem Kano-Modell zugeordnet. Das 4K Feld kann auch ohne die 4K-Kanoanalyse durch die dazugehörigen Fragen beschrieben werden. Die Kategorisierung muss anhand einer manuellen Auswertung mit der Auswertungstabelle nach Kano erfolgen (Berger et al. 1993).

Die *Kommunikations- und Vertriebskanäle*, die das Zentrum des Go-To-Market Canvas bilden, konzentrieren sich darauf, das Wertversprechen aus der Business Model Canvas Methode sowie der 4K-Kanoanalyse dem Kunden verständlich zu übermitteln. Die Kanäle werden nach einer erfolgreichen Selektierung mit der MarCom-Methode (vgl. Kapitel 4.2) automatisch in das Go-To-Market Canvas übernommen. Anschließend erfolgt eine Verifikation der Kanäle bezüglich des Wertversprechens und der 4K's. Die identifizierten Kanäle werden geprüft, ob sie für das Produkt und den Kunden geeignet sind. Es besteht die Möglichkeit, Ideen für Marketingkampagnen direkt in das Canvas zu integrieren.

Das Go-To-Market Canvas integriert die Einflussfaktoren einer erfolgreichen Diffusion in den Innovationsprozess durch die in Kapitel 4.2 beschriebenen Methoden und ermöglicht eine hohe Adoptionsrate. Durch den ermittelten Diffusionsnutzwert wird in der Product Description die Eigenschaften einer Innovation bewertet. Da die Kommunikation ein zentraler Bestandteil des Go-To-Market Canvas darstellt, wird auf den Innovations-Entscheidungs-Prozess von potenziellen Kunden und Anwendern Einfluss genommen. Durch die Beschreibung der Persona wird die Produktentwicklung und Markteinführung auf den Kunden ausgerichtet. Identifizierte Meinungsführer können im Go-To-Market Canvas explizit herausgearbeitet werden und sind Teil des sozialen Systems. Hindernisse und Herausforderungen bei der Diffusion der Innovation werden durch die Methoden und das Go-To-Market Canvas frühzeitig erkannt und mithilfe Präventionsmaßnahmen vorgebeugt.

4.2 Begleitende Methoden im Go-To-Market Canvas

Um die Konzeptionierung der Markteinführung in die frühe Phase der Produktgenerationsentwicklung zu integrieren und damit die Einfluss- und Erfolgsfaktoren der Diffusionstheorie zu berücksichtigen, sind im Zuge der Forschungsarbeit vier Methoden entwickelt worden, die das Go-To-Market Canvas ergänzen und unterstützen. Im Folgenden werden die vier Methoden kurz dargestellt. Eine Zusammenfassung der Methoden ist in Bild 3 dargestellt.





Methodeninput	Methode	Methodenoutput	Methodenmehrwert
Produktprofile, Ideen Geschäftsmodelle	 Diffusionsnutzwertanalyse	Diffusionsnutzwert Verbesserungspotenziale	Entscheidungsgrundlage Verbesserte Ideen
Kundenanalyse Kundenverständnis	 4K-Kanoanalyse	4K's Basis-, Leistungs-, Begeisterungsmerkmal	Differenzierungspotenziale Priorisierung von Features
Persona	 Adopterkategorien- Methode	Adopterkategorie je Persona Handlungsempfehlung je Persona	Kundenverständnis Produktentwicklungseinfluss
Adopterkategorie	 MarCom	Kommunikationskanäle Vertriebswege	Verbesserte Kundeninteraktion Effektivere Kommunikation

Bild 3: Methodenübersicht

Die *Diffusionsnutzwertanalyse* ermöglicht die frühzeitige Bewertung von Produktprofilen und Ideen auf Basis der Eigenschaften einer Innovation (vgl. Tabelle 1). Damit kann die positive oder negative Einstellung eines potenziellen Adopters im Innovations-Entscheidungs-Prozess prognostiziert und die schnelle Diffusion am Markt beeinflusst werden. Durch die Möglichkeit, Verbesserungsvorschläge direkt in die Diffusionsnutzwertanalyse zu integrieren, können Ideen weiterentwickelt und verbessert

werden. Anhand des Diffusionsnutzwertes kann objektiver entschieden werden, welche Idee in die Konzeptionsphase der Entwicklung geleitet wird.

Die *4K-Kanoanalyse* berücksichtigt die Kundenwünsche, -bedürfnisse, -hindernisse und Kundenerwartungen (4K's) an eine Innovation. Mithilfe von funktionalen und dysfunktionalen Fragen werden die 4K's in das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit gegliedert. Damit kann der Einfluss unterschiedlicher Kundenanforderungen auf die Kundenzufriedenheit prognostiziert werden. Kann das Begeisterungsbedürfnis durch das Entwicklungsteam erfüllt werden, differenziert sich das Unternehmen vom Wettbewerb. Wird hingegen die Basiserwartung nicht erfüllt, sinkt die Kundenzufriedenheit. Die 4K-Kanoanalyse identifiziert deshalb nicht nur notwendige, sondern auch wünschenswerte Merkmale einer Innovation, welche die Markteinführung günstig beeinflussen und in der Entwicklung umgesetzt werden.

Die *Adopter kategorien-Methode* wurde entwickelt, um potenzielle Kunden in die fünf Adopterkategorien der Diffusionstheorie einzugliedern (vgl. Bild 1). Anhand unterschiedlicher sozialer Eigenschaften der Kunden können diese den entsprechenden Adopterkategorien zugeordnet werden. Um die sozialen Eigenschaften der Kunden analysieren zu können, wurden 16 Aussagen erarbeitet. Auf Basis von Literaturrecherchen, stehen je Adopterkategorie Handlungsempfehlungen für die Entwicklung der Innovation zur Verfügung. Innovatoren sind zum Beispiel Technologieenthusiasten, die sich mehr für die Technologie und Innovation als für die daraus resultierenden Vorteile interessieren. Unternehmen können Innovatoren nutzen, um Innovationen zu testen und weiterzuentwickeln. Fehler im Produkt, schlechte Dokumentationen oder auch Qualitätsmerkmale werden aufgedeckt, ohne die Innovatoren als Kunden zu verlieren (Moore 2006).

Die externe Kunden- und Marktkommunikation ist ein wesentlicher Bestandteil der Markteinführung. Deshalb wurde die *MarCom-Methode* entwickelt. In dieser Methode werden geeignete Kommunikationskanäle anhand unterschiedlicher Kriterien selektiert. Zusätzlich werden geeignete Vertriebswege ermittelt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Adopter kategorien-Methode bereitet die MarCom-Methode in der frühen Phase der Produktentwicklung bereits Kommunikations- und Vertriebskanäle vor, die später umgesetzt und realisiert werden können. Je nach Adopterkategorie muss die Kommunikation unterschiedlich gestaltet werden.

Ein früher Adopter setzt sich beispielsweise gerne mit technischen Eigenschaften einer Innovation auseinander und wünscht sich starke Veränderungen und einen enormen Vorteil durch die Innovation.

Das Go-To-Market Canvas und die Methoden helfen dabei, die Markteinführung zu planen und erfolgreich zu gestalten. Zusätzlich lassen sich das Go-To-Market Canvas und die Methoden bereits in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung anwenden und durch die Handlungsempfehlungen, die Kategorisierung der Leistungsmerkmale (4K) und die Sensibilisierung der sozialen Eigenschaften der Adopter kategorien auch Einfluss auf die Produktgestaltung nehmen.

4.3 Validierung und kritische Betrachtung

Die Validierung der Go-To-Market Canvas und der begleitenden Methoden hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit sowie dessen erzeugter Mehrwert wurde im Live-Lab ProVIL durchgeführt. ProVIL ist ein reales Entwicklungsprojekt in dem Masterstudierende der Hochschule Karlsruhe in Kooperation mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) einen Entwicklungsprozess durchlaufen bis hin zu Konzipierungsphase. Die fünf interdisziplinär aufgestellten Entwicklungsteams wurden dabei theoretisch in der Anwendung des Go-To-Market Canvas ausgebildet und führten anschließend die Methoden für ihre initialen Inventionen aus und erstellten die Go-To-Market Canvas. In den Entwicklungsprojekten wurden dabei zwölf Marktzugangskonzepte durch das Go-To-Market Canvas entwickelt. Der Studienzeitraum erstreckte sich über sechs Wochen und endete mit einer Befragung der Anwender sowie retrospektiven Analyse der Ergebnisse.

Die Validierung zeigt, dass das Go-To-Market Canvas über dem Durchschnitt als hilfreich und nützlich angesehen wird. Mit einer durchschnittlichen Bewertung des wahrgenommenen Mehrwerts von 6,2 auf einer Skala von 1-10 zeigt sich der Nutzen der Go-To-Market Canvas deutlich. Die systematische Aufbereitung der Inhalte förderte die Ausarbeitung relevanter Aspekte der Markteinführung schon in der frühen Phase und sorgte durch die visuelle Darstellung im Canvas als Diskussions- und Verständnisgrundlage im Team und deren Stakeholder. Dies konnte auch in der retrospektiven Analyse der einzelnen Go-To-Market Canvas sowie der übergreifenden Ergebnisse der Teams bestätigt werden. Die praktische Anwendbarkeit wurde initial bestätigt durch die 14 erarbeiteten Marktzugangskonzepte und einer durchschnittlichen Bewertung der Anwendbarkeit mit 6,4 Punkten. Diese Ergebnisse zeigen das große Potential des Go-To-Market Canvas auf und bilden die Basis für die weitere Entwicklungsarbeit.

Die Validierung ist jedoch auch kritisch zu betrachten, denn die qualitative Studie in ProVIL ist mit einem Stichprobenumfang von fünf Entwicklungsteams bei der Anwendung der Methoden zu gering, um die Qualität der Aussagen zu gewährleisten. Um die Ergebnisse aus der qualitativen Studie zu verifizieren und aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten, ist eine quantitative Studie sowie die Befragung von Experten aus der Praxis erforderlich, damit das Go-To-Market Canvas auch in realen Innovationsprojekten und entsprechenden Strukturen evaluiert wird.

Zusätzlich entsteht durch die Anwendung des Go-To-Market Canvas ein erhöhter Arbeitsaufwand für die Entwicklungsteams. Damit die Methoden in den Unternehmensalltag integriert werden können, muss der Nutzen und Mehrwert der Methoden expliziter erarbeitet werden. Als herausfordernd stellt sich die Sensibilisierung der Entwicklungsteams für die Marktdiffusion einer Invention dar. Ein bisher ungelöstes Problem in dem Go-To-Market Canvas ist das Treffen von Annahmen. Annahmen werden von Entwicklungsteams aufgrund fehlender Markteinführungskennnisse oder durch zu wenige Informationen über Kundenbedürfnisse getroffen. Die Informationsknappheit kompensieren könnte die direkte Befragung und Einbindung von Kunden in die Produktentwicklung und in das Methodenkonzept.

5 Erkenntnisse und Ausblick

Der Markterfolg eines neuen Produktes wird bereits in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung vorbereitet und beeinflusst. Der Bedarf nach einer Lösung, die Markteinführung durch die Diffusionskriterien schon in der frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung zu berücksichtigen, stellt die Forschungsthematik dieses Beitrags dar. Diese Problemstellung wird durch die Erstellung des Methodenkonzeptes mit dem abschließenden Marktzugangskonzept in Form des Go-To-Market Canvas gelöst. Jede Methode ist für sich einzeln anwendbar und berücksichtigt spezifische Einflussfaktoren der Diffusion. Die *Eigenschaften einer Innovation* werden durch die Diffusionsnutzwertanalyse berücksichtigt, die *Kommunikation* wird durch die MarCom-Methode vorbereitet und der *Einfluss der Zeit* sowie das *soziale System* werden in der 4K-Kanoanalyse und der Adopterkategorien-Methode beachtet. Damit umfasst das Methodenkonzept alle Diffusionskriterien für eine erfolgreiche Marktdiffusion. Die Methoden können in Kombination mit dem Go-To-Market Canvas in der frühen Phase der Produktentwicklung angewandt werden und bieten neben wichtigen Erkenntnissen auch Handlungsempfehlungen, die direkt auf die Entwicklung und Konstruktion der Invention einwirken.

Für zukünftige Betrachtungen ist es relevant, die Integration der entwickelten Methoden und des Go-To-Market Canvas in den Unternehmensalltag zu analysieren. Die benötigte Unterstützung der Entwicklungsteams zur Implementierung der Methoden und dem Go-To-Market Canvas sind zu ermitteln. Eine erfolgreiche Anwendung der entwickelten Forschungsergebnisse Bedarf personelle Unterstützung durch einen im Innovationsprozess beteiligten Akteur. Die Entwicklungsteams müssen für die neuen Methoden geschult und sensibilisiert werden. Die Schulung und Sensibilisierung der Entwicklungsteams können zum Beispiel durch einen Innovation Coach nach Albers et al. (2020b)

erfolgen, der die Teams prozessorientiert unterstützt. Hier besteht das Potenzial, dass Entwicklungsteams durch das Coaching dazu befähigt werden, die Markteinführung in der frühen Phase zu berücksichtigen und somit das Innovationspotential zu steigern.

Literaturverzeichnis

- ALBERS ET AL. 2020A ALBERS, Albert; BASEDOW, Gustav N.; HEIMICKE, Jonas; MARTHALER, Florian; SPADINGER, Markus; RAPP, Simon: *Developing a common understanding of business models from the product development perspective*. In: *Procedia CIRP* 91 (2020a), S. 875–882
- ALBERS ET AL. 2017A ALBERS, Albert; BURSAC, Nikola; HEIMICKE, Jonas; WALTER, Benjamin; REISS, Nicolas: 20 years of co-creation using case based learning: An integrated approach for teaching innovation and research in Product Generation Engineering. In: *International Conference on Interactive Collaborative Learning, 2017a*
- ALBERS ET AL. 2020B ALBERS, Albert; HAHN, Carsten; NIEVER, Manuel; HEIMICKE, Jonas; MARTHALER, Florian; SPADINGER, Markus: Forcing Creativity in Agile Innovation Processes through ASD-Innovation Coaching. In: *The Sixth International Conference on Design Creativity, 2020b*
- ALBERS ET AL. 2018 ALBERS, Albert; HEIMICKE, Jonas; WALTER, Benjamin; BASEDOW, Gustav Nils; REIß, Nicolas; HEITGER, Nicolas; OTT, Sascha; BURSAC, Nikola: Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations, Bd. 70. In: *CIRP Design Conference, 2018*, S. 253–258
- ALBERS ET AL. 2017B ALBERS, Albert; RAPP, Simon; BIRK, Clemens; BURSAC, Nikola: Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, 2017b*
- BAUER ET AL. 2006 BAUER, Hans H.; ALBRECHT, Carmen-Maria; KÜHNEL, Christina: *Aspekte der Einführungsstrategien als Erfolgsfaktoren von Produktinnovationen: Eine qualitative Studie*. Universität Mannheim, Institut für Marktorientierte Unternehmensführung, Wissenschaftliche Arbeitspapiere, 2006
- BERGER ET AL. 1993 BERGER, Charles; BLAUTH, Robert; BORGER, David: *Kano's Methods for Understanding Customer-defined Quality*. In: *Center for quality of management journal* 2 (1993), Nr. 4, S. 3–36
- BIEGER ET AL. 2011 BIEGER, Thomas; REINHOLD, Stephan: Das wertbasierte Geschäftsmodell: Ein aktualisierter Strukturierungsansatz. In: BIEGER, Thomas; KNYPHAUSEN-AUFSEß, Dodo zu; KRYS, Christian (Hrsg.): *Innovative Geschäftsmodelle*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 13–70
- BLESSING ET AL. 2009 BLESSING, Lucienne T. M.; CHAKRABARTI, Amaresh: *DRM, a Design Research Methodology*: Springer London, 2009
- COOPER ET AL. 1990 COOPER, Robert G.; KLEINSCHMIDT, Elko J.: *New products: The key factors in success.: The key factors in success*. Chicago, Ill.: American Marketing Association, 1990
- DISSELKAMP 2012 DISSELKAMP, Marcus: *Innovationsmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012
- ERLHOFF 2008 ERLHOFF, Michael (Hrsg.): *Wörterbuch Design: Begriffliche Perspektiven des Design*. Basel [u.a.]: Birkhäuser, 2008 (Board of international research in design, BIRD)

- GÖCKE 2015 GÖCKE, Lutz: *Geschäftsmodellentwicklung im Spannungsfeld multinationaler Unternehmen*. Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2015
- HOFBAUER ET AL. 2015 HOFBAUER, Günter; WILHELM, Alexander: *Innovationsprozesse erfolgreich managen: Ein Praxisabgleich für die frühe Phase des Innovationsmanagement*. Technische Hochschule Ingolstadt, Working Paper, 2015
- KARNOWSKI ET AL. 2016 KARNOWSKI, Veronika; KÜMPEL, Anna Sophie: Diffusion of Innovations, Bd. 21. In: POTTHOFF, Matthias (Hrsg.): *Schlüsselwerke der Medienwirkungsforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 97–107
- LANGENSCHIEDT LANGENSCHIEDT: *Diffundere*. URL <https://de.langenscheidt.com/latein-deutsch/diffundere> – Überprüfungsdatum 24.03.2021
- MOORE 2006 MOORE, Geoffrey A.: *Crossing the chasm: Marketing and selling disruptive products to mainstream customers*. Rev. ed. New York, NY: Collins Business Essentials, 2006
- OSTERWALDER ET AL. 2011 OSTERWALDER, A.; PIGNEUR, Y.; WEGBERG, J.T.A.: *Business Model Generation: Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer*: Campus Verlag, 2011
- ROGERS 1983 ROGERS, Everett M.: *Diffusion of innovations*. 3. ed. New York, NY: Free Press, 1983
- SCHUH ET AL. 2012 SCHUH, Günther; BENDER, Dennis: Grundlagen des Innovationsmanagements. In: SCHUH, Günther (Hrsg.): *Innovationsmanagement: Handbuch Produktion und Management* 3. 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012 (VDI-Buch), S. 1–16
- SCHUMPETER ET AL. 1972 SCHUMPETER, Joseph Alois; SALIN, Edgar: *Kapitalismus, sozialismus und demokratie*. Dritte Auflage. München: Francke Verlag, 1972 (Uni-Taschenbücher 172)
- SCHUMPETER 1997 SCHUMPETER, Joseph: *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung: Eine Untersuchung über Unternehmergewinn, Kapital, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus*. 9. Aufl. Berlin: Duncker et Humblot, 1997
- STEVENS 2014 STEVENS, Eric: *Fuzzy front-end learning strategies: Exploration of a high-tech company*. In: *Technovation* 34 (2014), Nr. 8, S. 431–440
- STREBEL 2007 STREBEL, Heinz: *Innovations- und Technologiemanagement*. 2. Aufl. Wien: Facultas.wuv, 2007 (UTB für Wissenschaft Wirtschaftswissenschaften, Betriebswirtschaftslehre 2455)
- THOM 1980 THOM, Norbert: *Grundlage des betrieblichen Innovationsmanagement*. Köln: Hanstein, 1980
- VOIGT 2008 VOIGT, Kai-Ingo: *Industrielles Management: Industriebetriebslehre aus prozessorientierter Sicht*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008 (Springer-Lehrbuch)
- WALTER ET AL. 2017 WALTER, B.; ALBERS, A.; BENESCH, G.; BURSAC, B.: ProVIL: Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor: Anwendungs- und Implementierungsmodell eines Live-Labs. In: *4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP)*: Fraunhofer, Stuttgart, 2017

Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle im Business-to-Business

Development and evaluation of IoT-based platform business models in business-to-business

Fabio Wortmann¹, Sina Kämmerling², Kai Ellermann¹, Arno Kühn¹, Christoph Plass², Roman Dumitrescu¹

¹Fraunhofer Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM), Produktentstehung, 33102 Paderborn
Fabio.wortmann@iem.fraunhofer.de

²UNITY AG, 33142 Büren
sina.kaemmerling@unity.de

Abstract (deutsch): Digitale Plattformen haben die Mechanismen vieler Märkte im Consumer Bereich grundlegend verändert. Durch die fortschreitende Digitalisierung, steht auch die Industrie nun an der Schwelle zur Plattformökonomie. Der Einstieg ins Plattformgeschäft ist jedoch für viele Unternehmen mit großen Herausforderungen verbunden. Digitale Plattformen folgen einer völlig anderen Geschäftslogik als klassische, lineare Geschäftsmodelle. In vielen Unternehmen mangelt es daher an Know-how und Erfahrung im Plattformgeschäft. Insbesondere die Entwicklung eines schlüssigen Geschäftsmodells ist ein Erfolgsfaktor in der frühen Phase der Geschäftsplanung. In diesem Beitrag stellen wir eine Methode zur Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle vor. Ausgehend von einer Plattformidee gilt es, in einem ersten Schritt ein Geschäftsmodell-Konzept zu entwickeln. Im zweiten Schritt werden zur Detail-Entwicklung drei Partialmodelle erarbeitet. Im dritten Schritt erfolgt schließlich die wirtschaftliche und die Risikobewertung des Geschäftsmodells. Die Ergebnisse werden in einer Management Summary zusammengefasst und dienen als Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung des Vorhabens.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Digitale Plattform, Geschäftsmodell, IoT, Plattformökonomie, Wirtschaftlichkeit

Abstract (english): Digital platforms have fundamentally changed the mechanisms of many consumer markets. Due to the advancing digitization, the industry is now on the threshold of the platform economy. However, entering the platform business is associated with major challenges for many companies. Digital platforms follow a completely different business logic than classic, linear business models. In many companies there is a lack of know-how and experience in the platform business. In particular, the development of a coherent business model is a success factor in the early phase of business planning. In this article, we present a method for developing and evaluating IoT-based platform business models. Based on a platform idea, the first step is to develop a business model concept. In the second step, three partial models are developed for detailed development. The third step is the economic and risk assessment of the business model. The results are summarized in a management summary and serve as a decision-making basis for the implementation of the project.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Digital Platform, Business Model, IoT, Platform economy, profitability

1 Digitale Plattformen auf dem Vormarsch

Die Digitalisierung ist der Treiber für digitale Marktleistungen und Geschäftsmodelle. Digitale Plattformen sind im Consumer Bereich ein mittlerweile etabliertes digitales Geschäftsmodell und haben die Mechanismen vieler Märkte vollständig verändert (Bitkom 2018). Beispielsweise werden Urlaube nicht mehr in Reisebüros, sondern über Apps wie Booking.com und Airbnb gebucht. Auch viele Produkte werden nicht mehr im lokalen Geschäft gekauft, sondern auf Amazon. Ohne Innovationen, wie dem Internet oder dem Smartphone, wäre diese Entwicklung kaum möglich gewesen. Auch in der Industrie ist eine zunehmende Vernetzung von Maschinen und Anlagen oder sogar ganzen Produktionsstätten zu beobachten, so dass die Plattformökonomie auch für die Industrie immer relevanter wird (Lerch et al. 2019). Industrieunternehmen sind daran interessiert, den Anteil am digitalen Geschäft zu steigern bzw. überhaupt erst aufzubauen (Bild 1).

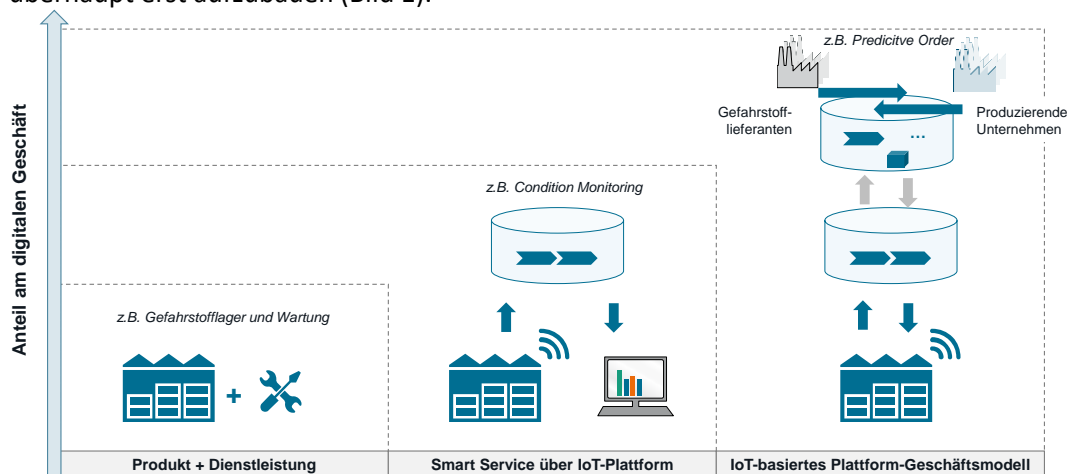


Bild 1: Plattformen ermöglichen Unternehmen den Anteil am digitalen Geschäft zu erhöhen

Das Unternehmen DENIOS z.B. betreibt aktuell reines Produktgeschäft, ergänzt um rudimentäre Dienstleistungen wie z.B. Wartungsverträge. DENIOS ist zudem daran interessiert, zusätzlich sogenannte Smart Services wie z.B. Condition Monitoring zu den Produkten über eine IoT-Plattform anzubieten (Rabe et al. 2018; Wortmann et al. 2019 a). DENIOS kann diese Plattformen auch für externe Anbieter zu einem IoT-basierten Plattform-Geschäftsmodell öffnen und z.B. Gefahrstofflieferanten und Produzierende Unternehmen auf einem Marktplatz zusammenbringen. Damit entwickeln sie sich zu Plattformanbietern im Sinne eines mehrseitigen Geschäftsmodells, wie sie bereits aus dem Consumer Bereich bekannt sind. Diese Plattformen bieten enorme Potenziale für Industrieunternehmen (Wortmann et al. 2019 b; Lerch et al. 2019). Beispielsweise können Unternehmen skalierbare, digitale Erlöse generieren, die Kundenschnittstelle sichern und auch Aufschluss über das Kundenverhalten erhalten. Die Entwicklung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle stellt Unternehmen vor neue Herausforderungen, da Plattformen einer völlig anderen Geschäftslogik folgen als klassische, lineare Geschäftsmodelle. Das Geschäftsmodell-Technologie-Portfolio nach acatech zeigt, dass Unternehmen sich in zwei Dimensionen wandeln müssen: Auf der einen Seite von IT/OT hin zu IoT und auf der anderen Seite vom Produkt zum Serviceanbieter (Engels et al. 2018). Darüber hinaus sind Plattformmärkte in der Regel stark umkämpft und weisen Monopolisierungstendenzen auf, sodass ein grundsätzlich hohes Investitionsrisiko besteht.

Gegenstand dieses Beitrags ist daher eine Methode zur *Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle* mit dem Ziel, eine Management-gerechte Entscheidungsgrundlage zu liefern. In Kapitel 2 werden Herausforderungen und Erfolgsfaktoren bei der Entwicklung und Bewertung von IoT-basierten Plattform-Geschäftsmodellen erläutert. In Kapitel 3 werden existierende Ansätze auf ihre Eignung untersucht. In Kapitel 4 wird die entwickelte Methode anhand eines Anwendungsbeispiels aus dem Spitzencluster it's OWL vorgestellt. In Kapitel 5 werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Herausforderungen bei der Entwicklung und Bewertung von IoT-basierten Plattform-Geschäftsmodellen

In diesem Kapitel werden Herausforderungen herausgearbeitet, die es bei der Geschäftsmodellentwicklung und -bewertung zu berücksichtigen gilt. Dabei werden die drei Gestaltungsbereiche eines Plattform-Geschäftsmodells **Value Creation** (Wodurch entsteht der Nutzen?), **Value Delivery** (Wie wird der Wert für die Akteure erzeugt?) und **Value Capture** (Wie wird der Wert in Erlöse umgewandelt?) nach Täuscher und Laudien zur Strukturierung verwendet (Täuscher und Laudien 2017). Bild 2 zeigt eine Auflistung von Herausforderungen, die in den Abschnitten 2.1 bis 2.3 erläutert werden.

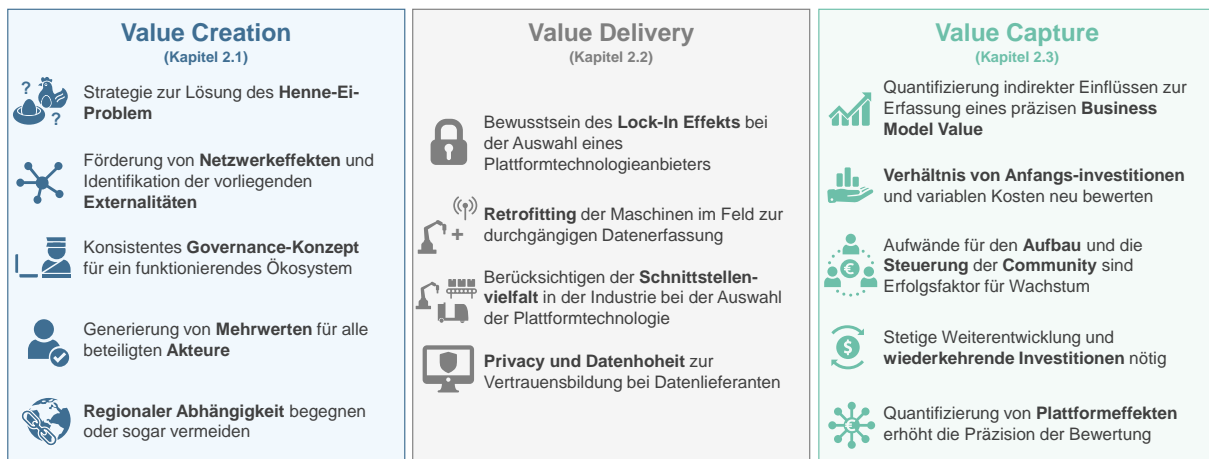


Bild 2: Herausforderungen bei der Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle

2.1 Value Creation – Herausforderungen durch Eigenschaften und Effekte digitaler Plattformen

Wie eingangs erwähnt, folgen digitale Plattformen einer anderen *Geschäftslogik* als lineare Geschäftsmodelle (GM). Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass lineare GM genau einen Kunden in den Fokus setzen, während bei Plattform-GM zwei Kunden betrachtet werden müssen: Produzent und Konsument. Dieser Umstand führt zusätzlich dazu, dass ein Unternehmen als Plattformanbieter Probleme in der Interaktion zwischen zwei externen Akteursgruppen lösen muss. Als Plattformanbieter besitzen Unternehmen somit die Aufgabe, Transaktionen zu managen und ein gesamtes Ökosystem mit einer Vielzahl von Akteuren zu steuern (Reillier und Reillier 2017).

Auf einer Plattform sind neben den *Produzenten* und *Konsumenten* noch weitere *Rollen* zu betrachten (Parker et al. 2017). Zum einen existiert ein wirtschaftlicher Betreiber des Geschäftsmodells, der in der Regel auch *Eigentümer* der Plattform ist. Häufig wird die Rolle des *technischen Betreibers* jedoch durch externe Akteure realisiert, da die wenigsten Unternehmen eine eigene Plattformarchitektur für ihr Geschäftsmodell entwickeln. Zusätzlich werden häufig *Partner* bei der Umsetzung des Geschäftsmodells benötigt. Ein Beispiel sind hier Zahlungsdienste. Für die Realisierung von IoT-Geschäftsmodellen werden insbesondere im industriellen Bereich häufig *IoT-Befähiger* benötigt, die Lösungen zur Vernetzung von Maschinen anbieten. Damit das Geschäftsmodell funktionieren kann, müssen Mehrwerte für alle beteiligten Akteure entstehen.

Digitale Plattformen sind Geschäftsmodelle, die mit verschiedenen *Effekten* einhergehen. Eine Herausforderung, mit der grundsätzlich jede Plattform zu Beginn konfrontiert wird, ist das sogenannte *Henne-Ei-Problem*. Das Henne-Ei-Problem beruht auf der Tatsache, dass der Nutzen einer Plattform durch die teilnehmenden Akteure erzeugt wird (Engelhardt et al. 2017). Zum Start einer Plattform existieren diese Akteure jedoch noch nicht. Produzenten haben keinen Anreiz die Plattform zu nutzen, da keine Konsumenten vorhanden sind und vice versa. Auch wenn das Henne-Ei-Problem gelöst ist, muss eine sogenannte *kritische Masse* an Nutzern erreicht werden, sodass für beide Seiten (Produzenten und Konsumenten) ein ausreichender Anreiz besteht, die Plattform zu nutzen.

Erst wenn die kritische Masse erreicht wurde, können sogenannte *Netzwerkeffekte* entstehen. Der Netzwerkeffekt entsteht, wenn die zunehmende Anzahl von Nutzern die Plattform attraktiver für weitere Nutzer macht (Engelhardt et al. 2017). Hier muss zunächst analysiert werden, ob eine reine quantitative Zunahme an Teilnehmern den Nutzen der Plattform erhöht oder verringert.

Ein weiterer entscheidender Effekt für das Wachstum der Plattform ist die sogenannte *regionale Abhängigkeit*. Damit ist gemeint, dass einige Plattform-GM darauf angewiesen sind, dass Produzenten und Konsumenten örtlich sehr nah beieinander sind (z.B. Fahrer und Fahrgäste bei Uber). Das bedeutet, dass die kritische Masse für jede Region immer wieder neu erreicht werden muss. Hier gilt es bereits bei der Geschäftsmodellentwicklung darauf zu achten, inwieweit eine regionale Abhängigkeit gelöst oder sogar vermieden werden kann. Ein konsistentes *Governance*-Konzept ist ein weiterer zentraler Erfolgsfaktor für das Wachstum einer Plattform (Engels et al. 2018). Dabei sind mehrere Aspekte relevant. Der *Vertrauensaufbau* bei Plattformteilnehmern ist eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Plattform. Sobald Ängste z.B. hinsichtlich der Datenhoheit entstehen, werden Plattformteilnehmer abwandern und das Wachstum der Plattform stark beeinträchtigen. Häufig nutzen Plattformen auch *Dienste externer Systeme* via sogenannter APIs. Hier gilt es, klare Vereinbarungen mit den entsprechenden Anbietern zu treffen (Engels et al. 2018).

2.2 Value Delivery – Herausforderungen bei der Einführung von IoT-Plattformen

Neben den in Abschnitt 2.1 beschriebenen, marktseitigen Herausforderungen von Plattform-Geschäftsmodellen existieren auch Herausforderungen durch die Einführung einer IoT-Plattform, die es bereits bei der Geschäftsmodellentwicklung zu berücksichtigen gilt.

Insbesondere im verarbeitenden Gewerbe sind in den Produktionsstätten Maschinen unterschiedlichsten *Alters* zu finden. Nicht jede Maschine besitzt die Fähigkeit, Daten zu erfassen oder sogar an eine Plattform zu senden. Die flächendeckende Einführung von IoT-Plattformen erfordert einen Ausbau der Infrastruktur sowie Retrofitting von älteren Maschinen und Anlagen (Engels et al. 2018). Auch muss analysiert werden, welchen Einfluss *heterogene Maschinenparks* auf das Geschäftsmodell haben.

Die Wahl eines externen Anbieters für eine IoT-Plattformtechnologie ist einerseits vielversprechend, kann jedoch auch zu einem *Lock-in-Effekt* führen. Stützt ein Unternehmen sich auf die Technologie und Infrastruktur eines Anbieters, so ist ein Wechsel in der Regel mit hohem Aufwand verbunden. Das Unternehmen bindet sich also an den Plattformtechnologieanbieter (Engels et al. 2018).

Ein zusätzlicher Aspekt, der insbesondere im B2B Bereich für Skepsis bei der Nutzung von IoT-basierten Geschäftsmodellen sorgt, ist das Thema *Privacy & IoT Datenhoheit*. Hier müssen klare Regeln definiert werden, die den Umgang mit Daten von Plattformteilnehmern regeln. Modelle, wie zum Beispiel eine Anonymisierung aller Anwenderdaten können helfen, Vertrauen der Nutzer zu gewinnen. Häufig sind Vorbehalte auch sehr branchenspezifisch ausgeprägt. In einer stark umkämpften Branche werden Unternehmen nur ungern ihre Daten miteinander teilen, unabhängig davon, wie ausgereift das Datensicherheitskonzept einer Plattform ist.

2.3 Value Capture – Herausforderungen bei der Bewertung IoT-basierter Plattform-GM

Die neuartigen Eigenschaften IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle bergen, wenn sie einmal konzipiert sind, zusätzliche Schwierigkeiten bei der Ermittlung des Geschäftsmodellwerts, *Business Model Value*, und der Bewertung ihrer *Profitabilität*.

Ein Grund liegt in der Vereinbarkeit der Erwartungen an den Erfolg. Im Consumer Bereich definiert sich dieser über *Kennzahlen* wie die *Rate abgeschlossener Interaktionen* oder das *Wachstum der Nutzerzahlen* (Parker et al. 2017). Diese Bemessungsgrundlage trifft aber wenig Aussage über den tatsächlichen Cash Flow, der wiederum für Industrieunternehmen maßgeblich ist, um als Produktionsstätte und Arbeitgeber weiterhin bestehen zu können. Zusätzliche Herausforderungen bei der Bewertung IoT-basierter Plattformen gehen aus deren speziellen Geschäftsmodell-Charakteristika hervor. Zum einen gelten bei der Etablierung digitaler Geschäftsmodelle andere Kostenstrukturen als bei Analogem.

Variable Herstellungskosten weichen Kosten für die Plattform-Architektur und -Governance. Im industriellen IoT-Umfeld ist neben den *Kosten zum Launch* dieser zusätzlich mit hohen Kosten für Schnittstellenarbeiten und einer nutzerzahlen- und datenmengenabhängigen Entwicklung der *Betriebskosten (Value Delivery Kosten)* zu rechnen (VDMA 2018). Abhängig von der Nutzer- und Transaktionsanzahl entwickeln sich auch die *Value Creation Kosten*, d.h. die Kosten für das Onboarding und die, im B2B-Kontext häufig sehr individuelle, Betreuung der Nutzerebene.

Letztlich ist über Make-or-Buy-Entscheidungen zu definieren, ob der Plattformbetreiber *interne Kosten* im Unternehmen entstehen lässt oder als *externe Kosten* gegenüber Partnern zahlt. Dabei spielen z.B. verfügbare IoT-Kompetenzen oder strategische Entscheidungen eine Rolle (Reillier und Reillier 2017). Value Creation Kosten sollten dabei aber vor allem intern angesetzt werden, um die erfolgskritische Nutzerbetreuung beim Plattformbetreiber selbst zu halten.

Den Überlegungen auf Kostenseite stehen solche zum *erwartbaren Nutzen* gegenüber. Diese gelten zum einen den *plattformspezifischen Erlösmodellen*. Der *direkte Nutzen* ergibt sich hierbei nicht mehr aus Umsätzen mit dem Produktverkauf, sondern mit der Vermittlung von Nutzern. Der Betreiber einer IoT-basierten Plattform steht vor der Frage, ob er z.B. *Zugangsgebühren* für den Plattformbeitritt erhebt oder *Transaktionsgebühren*, die z.B. an den Preis eines Smart Services gekoppelt sind (Parker et al. 2017). Die Schwierigkeit besteht dabei darin, dass die Zahlungsbeträge für Smart Services im Vergleich zu Verkaufssummen im Neumaschinen- oder Service-Geschäft deutlich geringer ausfallen.

Dieses Ungleichgewicht zwischen den vermeintlich hohen Kosten und dem noch zurückhaltenden Zahlungsverhalten für IoT-basierte Services führt bei isolierter Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bislang zu negativen Ergebnissen. Die zweite Besonderheit bei der Nutzenbetrachtung liegt daher in der Ausweitung auch auf den *indirekten, nicht sofort monetär messbaren Nutzen*. So kann z.B. die Errichtung einer digitalen Plattform Cross-Selling-Potenziale für das Kerngeschäft heben. Auch *Kosteneinsparungen* stellen regelmäßig einen Nutzen bei der Einführung von Plattformen dar, indem Unternehmen bisherige Insellösungen integrieren und Ineffizienzen ausräumen (VDMA 2018). Der Hebel solcher indirekten Effekte kann dabei deutlich höher ausfallen als die tatsächlichen Umsätze über die Plattform, sofern sie erkannt und in die Bewertung eines neuen Plattform-Geschäftsmodells einbezogen werden. Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass auch die dynamische Entwicklung digitaler Plattformen und ihre *Externalitäten wie Netzwerkeffekte* Unsicherheiten bei der Bewertung bergen. Ein Versuch ihrer *Internalisierung* ist daher ähnlich notwendig wie vage. Erst das Treffen quantitativer Annahmen über die Entwicklung von Nutzerzahlen, abhängig von direkten und indirekten Netzwerkeffekten, macht die Bestimmung von Kosten- und Nutzengrößen machbar (Parker et al. 2017).

3 Analyse bestehender Ansätze des Stands der Forschung

In der Literatur existiert bereits eine Vielzahl an Ansätzen zur Geschäftsmodellentwicklung digitaler Plattformen. Viele widmen sich hierzu der Entwicklung eines neuen Canvases, d.h. einer Vorlage Geschäftsmodelldefinition im Workshop. Der aktuelle Stand der Forschung wird nachfolgend untersucht. **Geschäftsmodell-Frameworks:** Einer der bekanntesten Ansätze ist hier das *Plattform Innovation Kit* nach Walter und Lohse (Walter und Lohse 2017). Der hier vorgeschlagene Plattform Business Model Canvas adressiert die Aspekte der Value Creation. Industrie- und IoT-spezifische Effekte und Herausforderungen werden jedoch nicht aufgegriffen. Das *Plattform Design Toolkit* nach Peneva ist ähnlich ausgerichtet (Engelhardt und Petzold 2019). Der Fokus liegt jedoch mehr auf dem Design der Plattform. Finanzielle Aspekte werden hier kaum adressiert. Der *Digital Platform Canvas* nach Engelhardt und Petzold ist für ein Grobkonzept geeignet und beschreibt mehr eine Plattformidee (Engelhardt und Petzold 2019). Klassische Geschäftsmodellaspekte, wie z.B. die Wertschöpfungsstruktur, werden nicht adressiert. Auch IoT-spezifische Elemente wurden nicht aufgegriffen.

Partialmodelle: Viele Autoren greifen bei der Entwicklung von Plattform-Geschäftsmodellen auf Partialmodelle (Teilmodelle) zurück, da ein monolithischer Canvas der Komplexität von Plattform-Geschäftsmodellen nicht gerecht wird. Das *Plattform Innovation Kit* und das *Plattform Design Toolkit* verfolgen denselben Ansatz (Engelhardt und Petzold 2019). Die Hilfsmittel sind ebenfalls Canvas-basiert

und greifen IoT-Aspekte sowie die Bewertung nur in Teilen auf. Das *IoT-Value Network* nach Brandt und Kordel fokussiert die Wertschöpfungssicht und nicht das vollständige Geschäftsmodell (Engelhardt und Petzold 2019). Die *Platform Ecosystem Modeling Language (PEML)* nach Pauli et al. ist ein sehr detaillierter und formaler Ansatz zur Modellierung von Plattform-Ökosystemen. Der Ansatz ist jedoch nicht intuitiv einsetzbar und adressiert lediglich die Wertschöpfungssicht.

Geschäftsmodell-Bewertung: Existierende Ansätze zur Geschäftsmodell-Bewertung finden sich zum Teil als integrierte Bestandteile eines Canvas wieder. Mit dem *Platform Monetization Canvas* aus dem *Platform Innovation Kit* nach Walter und Lohse (Engelhardt und Petzold 2019) lassen sich z.B. Umsatzquellen einer Plattform je Nutzergruppe herleiten, allerdings keine monetäre Bewertung durchführen. Schallmo greift mit dem *Business Model Value Ansatz* diesen Mangel auf und schlägt vor, konzipierte Geschäftsmodelle auf ihren Kapitalwert (Net Present Value) hin zu bewerten. Er bedient sich damit einer zentralen Kennzahl der Investitionstheorie, die jedoch noch anzupassen ist, auf das konkrete Geschäftsmodell einer digitalen Plattform (Schallmo 2013). Rochet und Tirole sowie Armstrong leiten solche dedizierten mathematischen Formeln zur Berechnung des *Plattformprofits* her, treffen hierzu allerdings eine Reihe praxisfremder Annahmen (Rochet und Tirole 2006; Armstrong 2006). Chu und Manchanda widmen sich darüber hinaus der *Quantifizierung* der bisher nur schwer messbaren *Netzwerkeffekte* von Plattformen (Chu und Manchanda 2016). Auch ihre Formeln funktionieren nur auf Basis zahlreicher Annahmen und sind zur Nutzung um weitere Anwendungshilfen zu ergänzen. Insgesamt ist der Stand der Forschung zur Geschäftsmodellentwicklung mit anschließender -bewertung somit als lückenhaft und inkonsistent zu bewerten. Der Bedarf an einem integrierten Vorgehensmodell von der Grobkonzipierung bis zur monetären Bewertung ist bislang nicht gedeckt.

4 Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle

4.1 Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel dient das im Juni 2020 durch den it's OWL Makeathon #horizonteOWL als Siegeridee ernannte Projekt „ServiceNavigator“. Der ServiceNavigator fungiert als digitale Plattform für Smart Services im Maschinen- und Anlagenbau. Er begegnet der anhaltenden Fachkräfteproblematik und dem durch die Corona-Pandemie im Jahr 2020 zusätzlich verstärkten Mangel an physischen Einsätzen ausgebildeter Service-Techniker. Hierzu stellen Maschinenhersteller den Service einer KI-basierten Fehleranalyse zur Verfügung, die den Maschinenbetreiber zur Vor-Klassifizierung bis hin zur eigenen Behebung von Maschinenfehlern befähigt. Der ServiceNavigator lässt außerdem die Anbindung weiterer Smart Services Dritter zu, wie Condition Monitoring Lösungen oder AR-unterstützte Remote-Services. In einer Ausbaustufe ist auch die Vermittlung an einen Pool herstellerunabhängiger Service-Techniker angedacht.

Unter Anbindung an die Maschinen und ihre Produkt- wie Betriebsdaten gilt der ServiceNavigator als IoT-basiertes Plattform-Geschäftsmodell und zur Anwendung der vorgestellten Methode geeignet.

4.2 Vorgehen und verwendete Hilfsmittel

In diesem Abschnitt werden das Vorgehen der Methode sowie die verwendeten Hilfsmittel anhand des Anwendungsbeispiels vorgestellt. In Abschnitt 4.2.1 wird zunächst das **Vorgehensmodell** vorgestellt. In den Abschnitten 4.2.2 bis 4.2.4 werden die einzelnen **Schritte des Vorgehensmodells** sowie die **verwendeten Hilfsmittel** beschrieben.

4.2.1 Vorgehensmodell

Das Vorgehensmodell zur Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle ist in Bild 3 in Form eines Phasen-Meilenstein-Diagramms dargestellt und gliedert sich in drei Schritte.

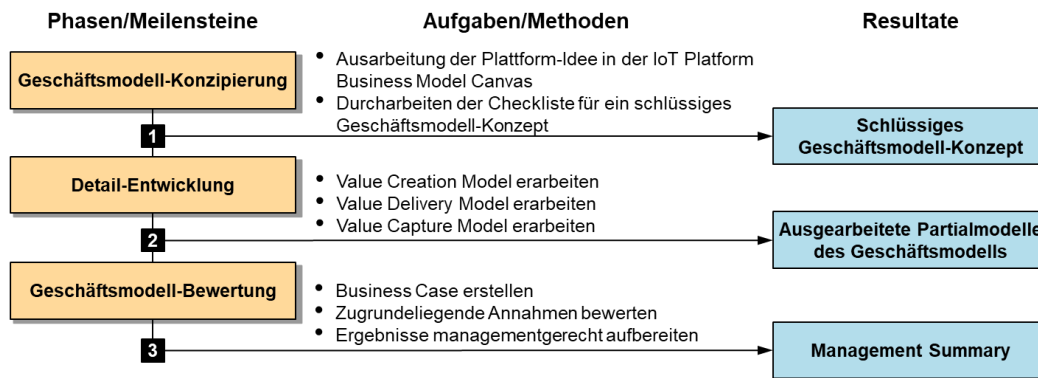


Bild 3: Vorgehensmodell zur Entwicklung und Bewertung IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle

Im **ersten Schritt** wird ein schlüssiges Geschäftsmodellkonzept erarbeitet. Als Ausgangspunkt dient dazu eine zuvor entwickelte Plattform-Geschäftsidee. Für das Konzept wird der IoT Plattform Business Model Canvas sowie eine Checkliste verwendet. Im **zweiten Schritt** erfolgt die Detail-Entwicklung. Hier werden die drei Partialmodelle Value Creation Model, Value Delivery Model und Value Capture Model erarbeitet. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen im **dritten Schritt** in die Geschäftsmodell-Bewertung ein. Hier erfolgt die Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos. Die gesamten Ergebnisse werden abschließend Management-gerecht in einer Management Summary aufbereitet.

4.2.2 Schritt 1 – Geschäftsmodell-Konzipierung

Der IoT Plattform Business Model Canvas dient zur initialen Konzipierung des Geschäftsmodells (Bild 4). Ausgangspunkt für die Konzipierung ist eine zuvor entwickelte Geschäftsmodellidee (Wortmann et al. 2020). Der Canvas gliedert sich in insgesamt vier Abschnitte: Die drei auszufüllenden Bereiche **Value Delivery**, **Value Creation** und **Value Capture** sowie eine **Checkliste**. Die vier Bereiche unterliegen einer Ausfüllreihenfolge, die bei der Verwendung des Canvas eingehalten werden sollte.

1. Value Creation: In diesem Bereich wird spezifiziert, wie durch die Plattform Werte geschaffen werden und welche Akteure dabei beteiligt sind. Im ersten Schritt wird dazu die Kerninteraktion beschrieben. Die Kerninteraktion findet zwischen *Produzent* und *Konsument* statt. Für beide Akteursgruppen ist zusätzlich das Nutzenversprechen zu formulieren. Die Einschätzung der kritischen Masse an Akteuren hilft dabei, ein Gefühl für die Struktur und Größe des Ökosystems zu bekommen. Im zweiten Schritt werden insgesamt vier weitere Rollen betrachtet. Der *wirtschaftliche Betreiber* ist der Eigentümer der Plattform und trägt die Verantwortung sowie das wirtschaftliche Risiko. *Partner & Komplementäre* sind Akteure, die zusätzliche Funktionen im Geschäftsmodell übernehmen, die der wirtschaftliche Betreiber selbst nicht aufbringen möchte oder kann. Der *Anbieter IoT-Device* ist das Unternehmen, das die Produkte herstellt, die die technische Basis der Plattform darstellen. Der *IoT-Befähiger* hat die Aufgabe, alle benötigten Devices durch z.B. Retrofitting „IoT-fähig“ zu machen.

Im dritten Schritt wird ein *Governance-Konzept* für die Plattform entwickelt. Da auf einer Plattform eine Vielzahl an Akteuren miteinander interagieren, müssen klare Regeln und Rahmenbedingungen geschaffen werden, um die Nutzer dauerhaft zufrieden zu stellen. In der *Governance-Struktur* wird definiert, welche Akteure welche (Entscheidungs-)Rechte und Pflichten haben. Im Feld *Zugang und Kontrolle* wird beschrieben, wie offen der Zugang zur Plattform gestaltet werden soll und welche Mechanismen zur (Qualitäts-)Kontrolle nötig sind. *Externe Beziehungen* zu z.B. anderen Plattformen über APIs gilt es ebenfalls zu beschreiben. Der *Vertrauensaufbau* ist insbesondere in Märkten wichtig, in denen ein hoher Wettbewerbsdruck und Misstrauen gegenüber Marktbegleitern herrscht.

2. Value Capture (für Value Creation): Dieser Bereich ist in die Felder *Erlöse* und *Value Creation Kosten* unterteilt. Erlöse setzen sich aus drei Bereiche zusammen. *Direkte Umsätze* werden unmittelbar durch die Plattform erzeugt (z.B. durch Transaktions- oder Teilnahmegebühren). *Indirekte Umsätze* ergeben sich durch Cross-Selling Effekte und weitere, monetär nachweisbare Einflüsse auf andere Geschäftsfelder des Unternehmens. *Kosteneinsparungen* können ebenfalls mit der Einführung einer Plattform

verbunden sein, wenn dadurch z.B. Prozesse verschlankt werden. Value Creation Kosten sind Kosten, die durch den Aufbau der Community durch z.B. Monetäre Incentivierung der Kernakteure entstehen. Diese werden in Launch- und Betriebskosten unterschieden. Launchkosten fallen einmalig beim initialen Start der Plattform an. Betriebskosten sind hingegen wiederkehrend.

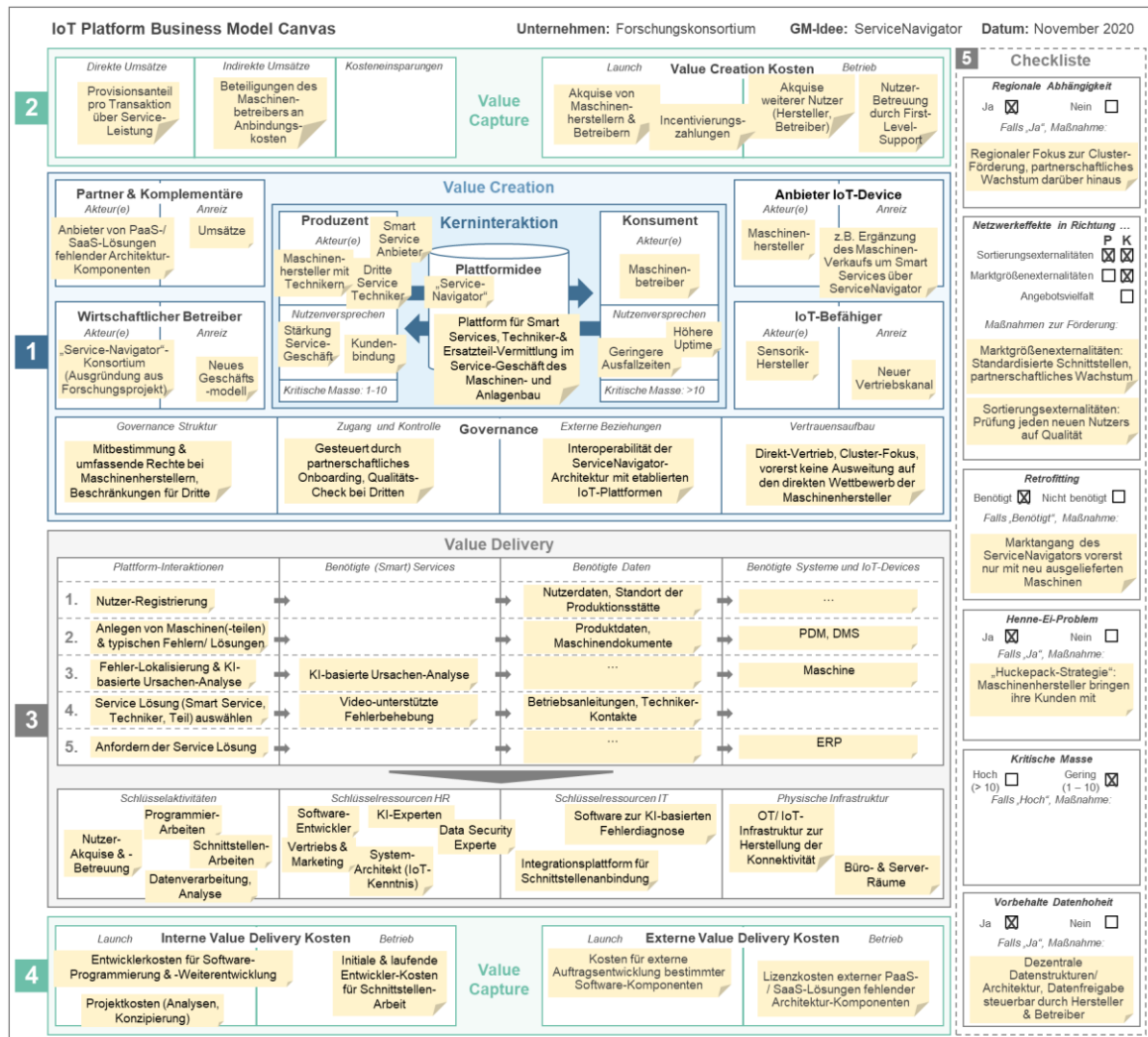


Bild 4: IoT Platform Business Model Canvas am Beispiel „ServiceNavigator“

3. Value Delivery: Im Bereich Value Delivery wird spezifiziert, was die Plattform bzw. der Betreiber leisten muss, um das zuvor beschriebene Ökosystem und die Nutzenversprechen bzw. Anreize für die Akteure zu realisieren. Ein zentraler Aspekt sind dabei die *Plattform-Interaktionen*, die angeboten werden. Eine Plattform-Interaktion beschreibt dabei ein nutzenbringendes Zusammenfinden von Produzent und Konsument auf der Plattform. Neben dem Titel der Interaktion werden *benötigte (Smart) Services* identifiziert. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie auf Daten des IoT-Device aufbauen und sind häufig die Basis für Transaktionen in IoT-basierten Plattform-Geschäftsmodellen. Zusätzlich werden die *benötigten Daten* sowie die *benötigten Systeme und IoT-Devices* beschrieben, die diese Daten erzeugen bzw. zur Verfügung stellen. Aus den Interaktionen werden anschließend *Schlüsselaktivitäten*, *Schlüsselressourcen (HR & IT)* und benötigte *physische Infrastruktur* abgeleitet.

4. Value Capture (für Value Delivery): In diesem Bereich wird zusammengefasst, welche internen und externen Kosten für den Aufbau und Betrieb der Plattform entstehen. *Interne Value Delivery Kosten* entstehen durch eigene Wertschöpfung im Unternehmen. *Externe Value Delivery Kosten* werden für die Beauftragung von Dritten aufgewendet. Auch hier wird zwischen *Launch- und Betriebskosten* unterschieden.

5. Checkliste: Mit Hilfe der Checkliste werden weitere in Kapitel 2 aufgearbeiteten Herausforderungen aufgegriffen. Die Checkliste soll im letzten Schritt dazu genutzt werden, das erarbeitete Geschäftsmodell hinsichtlich der Herausforderungen zu hinterfragen. Lassen sich Gestaltungsentscheidungen nur schwer ändern, braucht es Maßnahmen zur Stärkung positiver und Abschwächung negativer Effekte.

4.2.3 Schritt 2 – Detail-Entwicklung

Das **Value Creation Model** dient zur detaillierten Spezifikation der Wechselwirkungen zwischen den beteiligten Akteuren und der Plattform. Ziel ist die Modellierung eines konsistenten Ökosystems. Dabei werden insbesondere die transferierten Leistungen, der Nutzen für die Akteure sowie die Kosten für die Plattform beschrieben. Bild 5 zeigt den Auszug eines Value Creation Models sowie das Value Delivery Model am Beispiel des ServiceNavigators, einer Plattform für Smart Services zur Stärkung des Service-Geschäfts im Maschinen- und Anlagenbau. Im Modell wird zwischen Kernakteuren (Produzenten und Konsumenten) und Partnern unterschieden. Die Kernakteure gilt es in jedem Fall zu spezifizieren. Im gezeigten Beispiel werden sie repräsentiert durch die Maschinenhersteller und dritte Anbieter von Service-Leistungen (z.B. Service-Techniker) als Produzenten, sowie die Maschinenbetreiber als Konsumenten. Beim Nutzen für die Akteure wird zwischen direktem und indirektem Nutzen unterschieden. Mit „direktem Nutzen“ ist ein unmittelbarer monetärer Nutzen für die Plattform gemeint, der sich im Fall des Service-Navigators aus dem Einbehalten von Provisionsanteilen pro abgewickelter Service-Transaktion ergibt. „Indirekter Nutzen“ ist nicht unmittelbar monetär messbar, kann aber dennoch einen hohen Anreiz für den Akteur bedeuten und quantifiziert werden. Kosten werden in einmalige und laufende Kosten für die Plattform unterschieden. Einmalige Kosten entstehen in der Investitionsphase, wenn bspw. Software-Entwicklung für die Plattform selbst oder den hierauf laufenden KI-basierten Service zur Fehlerdiagnose getätigt werden muss. Die laufenden Kosten entstehen bei Inbetriebnahme des Plattform-Geschäftsmodells z.B. durch Weiterentwicklung- und Wartungsaufwände für die Software oder aufwendige Nutzerakquise- und -betreuungstätigkeiten.

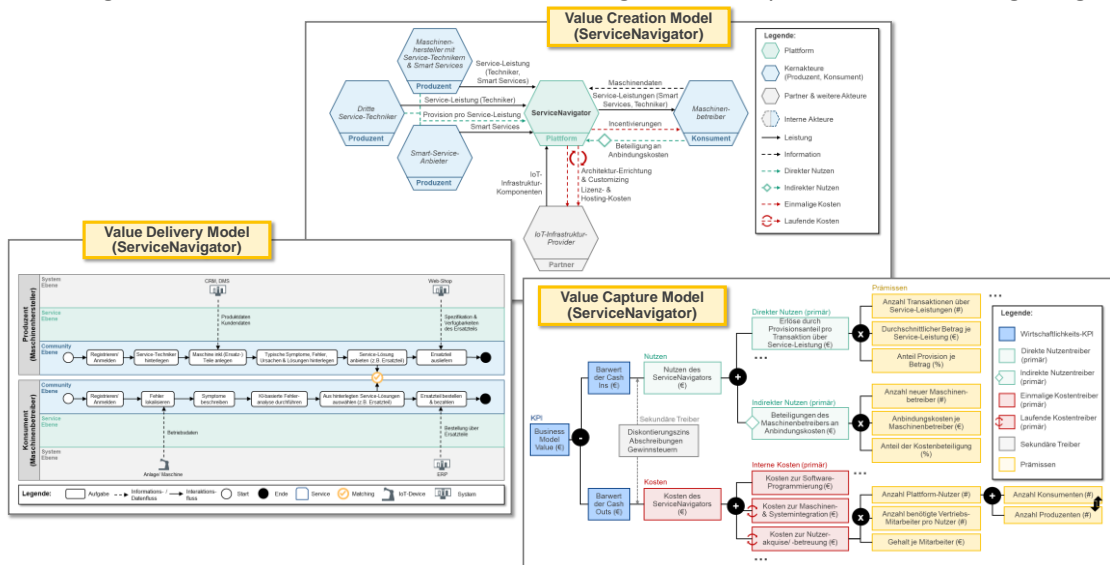


Bild 5: Value Creation Model, Value Delivery Model und Value Capture Model

Das **Value Delivery Model** hat das Ziel, die geplanten Interaktionen, die über die Plattform realisiert werden sollen, zu detaillieren. Dadurch können Anforderungen an die Infrastruktur und die benötigten Ressourcen, wie z.B. Services, für die folgende Bewertung besser abgeschätzt werden. Der Aufbau ist an einen Service Blueprint angelehnt und gliedert sich in zwei Blöcke (Produzenten und Konsumenten) sowie innerhalb der Blöcke in drei Swimlanes. Auf Ebene der Swimlanes wird zwischen *Community*-, *Service*- und *Systemebene* unterschieden. Auf der Communityebene werden die Aufgaben bzw. Schritte von Produzenten und Konsumenten erfasst sowie die Interaktionen zwischen den beiden Akteuren. Die Produzenten und Konsumenten der Service-Leistungen auf der ServiceNavigator-Plattform

starten bspw. mit einer Registrierung des Nutzers sowie hinterlegter Kunden-, Maschinen- und Moduldaten. Während die Produzenten ferner Daten hinterlegen, wie typischerweise auftretende Fehler und hierzu passende Lösungen, durchlaufen die Konsumenten auf dieser Basis die KI-basierte Fehlerdiagnose. Mit der Interaktion der beiden zum Matching und Bereitstellung der für den Fehlerfall passenden Service-Leistung sowie einer Dokumentation des Service-Einsatzes endet der letzte Schritt auf der Plattform. Auf der Serviceebene werden Services gesammelt, die für die Realisierung der Aufgaben erforderlich sind). Auf Systemebene werden schließlich IT-Systeme oder Devices aufgeführt, die die benötigten Daten für die Services erzeugen oder zur Verfügung stellen.

Das **Value Capture Model** überträgt die im Value Creation und Value Delivery Model ausgearbeiteten Geschäftsmodell-Elemente in ein Treibermodell aus Nutzen- und Kostentreibern, *primäre Wirtschaftlichkeitstreiber*. In einem ersten Schritt erfolgt hierzu die strukturierte Listung dieser Treiber. Die Kostentreiber werden nach einmaligen und laufenden sowie internen und externen Kosten unterschieden. Als Interne Kosten des ServiceNavigators gelten damit die Kosten zur eigenen Software-Entwicklung, externe Kosten stellen die Kosten für zugekaufte Software-Komponenten dar. Die Nutzentreiber strukturieren sich in direkte und indirekte Nutzentreiber sowie Kosteneinsparungen (siehe IoT Plattform Business Model Canvas). Nach der Listung der Treiber erfolgt eine Modellierung derer *Berechnungslogik* (nach rechts im Treibermodell). Es wird systematisch hergeleitet, welche Annahmen über Werte zu Anzahlen, Beträgen oder Anteilen zu treffen sind. Zur Berechnung der Provisionsgebühren sind bspw. Schätzungen zur Anzahl der Transaktionen pro Jahr, der Höhe der Transaktionssumme und dem Provisionsanteil vorzunehmen, den die ServiceNavigator-Plattform plant für sich einzubehalten. Verbunden werden diese Annahmen multiplikativ. Auf der tiefsten Detaillierungsebene ganz rechts im Modell finden sich damit Prämissen über die Anzahl von Produzenten und Konsumenten (inklusive Annahmen zur Stärke der Netzwerkeffekte zwischen ihnen), die Anzahl der angebotenen IoT-Devices (Maschinen) sowie transferierte Datenmengen pro Jahr wieder. Auf diesen Werten fußen die Berechnungen von Kosten- wie auch Nutzentreibern.

Ganz links wiederum ist das Ergebnis des Treibermodells zu finden, eine zuvor festgelegte *Wirtschaftlichkeits-KPI*, wie dem Business Model Value. Die Kosten- und Nutzentreiber werden gemäß der zugrundeliegenden Investitionsrechnung der KPI kumuliert. Hierzu erhalten *sekundäre Wirtschaftlichkeitstreiber* Einzug ins Modell. Diese umfassen z.B. Abschreibungen, Diskontierungszinsen oder Gewinnsteuern. Deren Berücksichtigung bei der Verrechnung der Nutzen- und Kostentreiber in Richtung Links des Treibermodells sind die notwendige Vorbereitung für eine anschließende konforme Wirtschaftlichkeitsbewertung.

4.2.4 Schritt 3 – Geschäftsmodell-Bewertung

Im dritten Schritt erfolgt schließlich die Bewertung des Geschäftsmodells, nach *Wirtschaftlichkeit* und *Risiko*. Die Ergebnisse der Bewertung sowie die zuvor erarbeiteten Ergebnisse werden in einer *Management Summary* zusammengefasst (Bild 6). Zur *Bewertung des Risikos* werden zunächst Annahmen aus dem Geschäftsmodell abgeleitet. Diese Annahmen werden anschließend in einem Portfolio hinsichtlich ihrer *Evidenz* und ihrer *Auswirkung* bewertet. Annahmen mit einer niedrigen Evidenz und einer hohen Auswirkung sind dabei besonders erfolgskritisch und sollten im nächsten Schritt validiert werden. So erfordern die erwarteten Komplikationen bei der technischen Integration der ServiceNavigator-Plattform in die Maschinen- und Systemlandschaft der Nutzer ein frühes Gegensteuern. Annahmen mit niedriger Auswirkung sind unkritisch. Die *wirtschaftliche Bewertung* ist letzter Schritt der Geschäftsmodellentwicklung und weitere Grundlage zur Entscheidung für oder gegen die Investition und tatsächliche Umsetzung. Die gelisteten Nutzen- und Kostentreiber werden dabei als *Zeilen*, die modellierten Berechnungslogiken als *Formeln* in eine Kalkulationsvorlage überführt. An dieser Stelle wird noch einmal geprüft, ob den identifizierten Treibern ausreichend fundierte *Prämissen* (z.B. Netzwerkeffekte) zugrunde liegen, die eine Quantifizierung tatsächlich möglich machen. Auch ist hier die Konformität mit etablierten *Investitionsverfahren* herzustellen und auf bereits etablierte *Kalkulationsvorlagen und- verfahren* zurückzugreifen. Im Falle der Bewertung nach dem Business Model Value liegt z.B. die Kapitalwertmethode zugrunde, nach der die Nutzen- und Kostentreiber (primäre Treiber) als

erwartete *CashFlows* pro Jahr aufzunehmen und u.a. mittels Diskontierungszins (sekundärer Treiber) auf den Investitionszeitpunkt abzuzinsen sind.

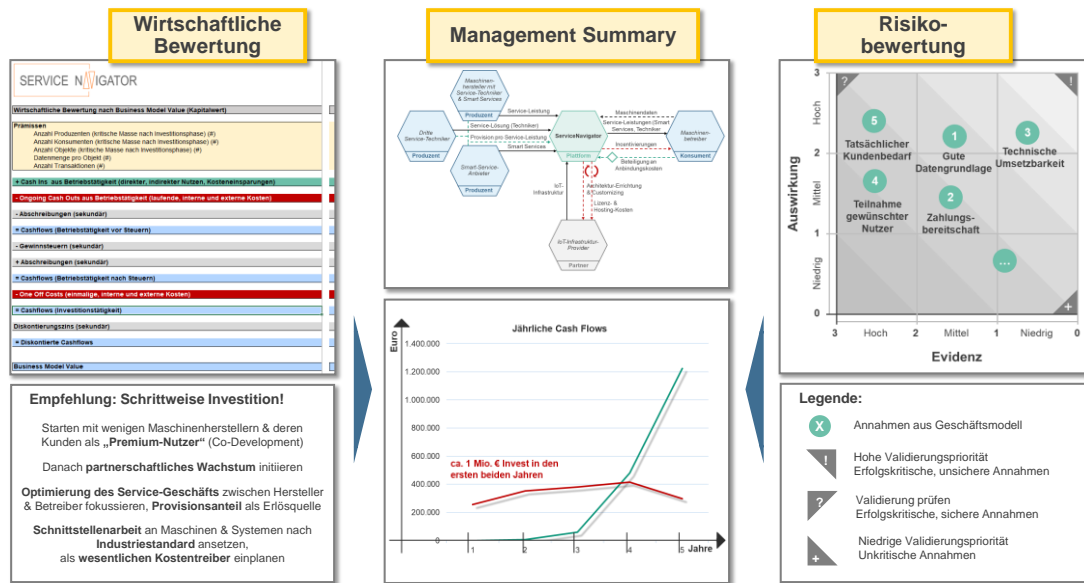


Bild 6: Wirtschaftliche Bewertung, Risikobewertung und Management Summary

Aussage über die Vorteilhaftigkeit des ServiceNavigators, stellvertretend für generell neue IoT-basierte Plattform-Geschäftsmodelle lässt sich dann anhand der Höhe des Kapitalwerts treffen, der, fällt er positiv aus, die Profitabilität mit nur einer Kennzahl indiziert. Abschließend ist eine *Management Summary* zu erstellen, in der neben einer grafischen Aufbereitung der Zahlungsentwicklung auch Ergebnisse der Konzipierungsphase sowie das Risikoportfolio übersichtlich aufzubereiten sind.

5 Resümee

Die veränderte Geschäftslogik und Industrie-spezifischen Herausforderungen IoT-basierter Plattform-Geschäftsmodelle gestalten ihre Bewertung herausfordernd. Der Mangel ausreichend differenzierter Methoden äußert sich schließlich in einem bislang zögerlichen Investitionsverhalten der Industrie. Der hier vorgestellte Ansatz überwindet die genannten Herausforderungen und ermöglicht ein durchgängiges Vorgehen von der groben Skizzierung der Geschäftsidee bis hin zu ihrer monetären Bewertung. Durch den IoT Plattform Business Model Canvas werden alle zuvor identifizierten, erfolgskritischen Aspekte berücksichtigt. Die Detaillierung in den drei Partialmodellen Value Creation, Value Delivery und Value Capture hilft ein besseres Verständnis für das Geschäftsmodell zu erlangen. Außerdem kann aufgrund des im Detail spezifizierten Geschäftsmodells eine Quantifizierung von Nutzen und Aufwand initiiert und damit eine wirtschaftliche Bewertung durchgeführt werden. Die reflektierte Bewertung zugrundeliegender Annahmen ermöglicht schließlich die Einschätzung des Risikos.

Mit der Validierung des Ansatzes konnte mehrfach bestätigt werden, dass Plattformvorhaben erst vollständig in ihrer Vorteilhaftigkeit bewertet sind, wenn alle, auch mittelbaren Faktoren betrachtet werden (direkter und indirekter Nutzen). Außerdem haben die Hilfsmittel in den Workshops dazu beigetragen, das Verständnis über das Zielbild des Plattformvorhabens zu stärken, was sich als Treiber einer positiven Investitionsentscheidung erweisen konnte.

Danksagung

Die vorgestellten Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des it's OWL Projekts DigiBus erarbeitet. Das Projekt wird durch das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- Armstrong 2006 Armstrong, M.: Competition in Two-Sided Markets, in: RAND Journal of Economics, Volume 37, Issue 3, 2006, pp. 668 – 691.
- Chu und Manchanda 2016 Chu, J.; Manchanda, P.: Quantifying Cross and Direct Network Effects in Online C2C Platforms, Ross School of Business Paper No. 1248, 2016
- Engelhardt et al. 2017 Engelhardt, S.; Wangler, L.; Wischmann, S.: Eigenschaften und Erfolgsfaktoren digitaler Plattformen. Begleitforschung AUTONOMIK für Industrie 4.0., 2017.
- Engelhardt und Petzolt 2019 Engelhardt, S.; Petzolt, S.: Das Geschäftsmodell-Toolbook für digitale Ökosysteme. Campus Verlag, Frankfurt am Main, 2019
- Lerch et al. 2019 Lerch, C.; Meyer, N.; Horvat, D.; Jackwerth-Rice, T.; Jäger, A.; Lobsinger, M.; Weidner, N.: Die volkswirtschaftliche Bedeutung von digitalen B2B-Plattformen im Verarbeitenden Gewerbe, BMWi, 2019
- Bitkom 2018 Bitkom: IoT-Plattformen - aktuelle Trends und Herausforderungen Handlungsempfehlungen auf Basis der Bitkom Umfrage 2018. Bundesverband Informationswirtschaft, Berlin, 2018
- Engels et al. 2018 Engels, G.; Plass, C.; Rammig, F.-J.: IT-Plattformen für die Smart Service Welt. Verständnis und Handlungsfelder. Acatech DISKUSSION. 2018
- Parker et al. 2017 Parker, G.; Van Alstyne, M.; Choudary, S.: Plattform Revolution – Von Airbnb, Uber, PayPal und Co. lernen: Wie neue Plattform-Geschäftsmodelle die Wirtschaft verändern, Frechen: mitp Verlag, 2017.
- Rabe et al. 2018 Mittag, T., Rabe, M., Gradert, T., Kühn, A., Dumitrescu, R.: Building blocks for planning and implementation of smart services based on existing products Procedia CIRP, 2018, 73, pp. 102-107
- Reillier und Reillier 2017 Reillier, L.; Reillier, B.: Platform Strategy – How to Unlock the Power of Communities and Networks to Grow Your Business, Oxon: Routledge, 2017.
- Rochet und Tirole 2006: Rochet, J.C.; Tirole, J.: Two-Sided Markets: A Progress Report, in: RAND Journal of Economics, Volume 37, Issue 3, 2006, pp. 645 – 667.
- Schallmo 2013 Schallmo, D.: Geschäftsmodell-Innovation – Grundlagen, bestehende Ansätze, methodisches Vorgehen und B2B-Geschäftsmodelle, Wiesbaden, 2013.
- Täuscher und Laudien 2017 Täuscher, K.; Laudien, S. M.: Understanding Platform Business Models: A Mixed Methods Study of Marketplaces. European Management Journal. 2017
- Tiwana 2014 Tiwana, A.: Platform Ecosystems – Aligning Architecture, Governance, and Strategy, Waltham, Massachusetts: Elsevier, 2014.
- VDMA 2018 VDMA: Studie „Plattformökonomie im Maschinenbau - Herausforderungen, Chancen, Handlungsoptionen“
- Walter und Lohse 2017 Walter, M.; Lohse, M.: Platform Innovation Kit „Platform Business Model Canvas“, <http://platforminnovationkit.com/kit/#downloadkit>, 8.12.2019.
- Wortmann et al. 2019 a Wortmann, F.; Drewel, R.; Joppen, R.; Kühn, A.; Dumitrescu, R.: Developing and evaluation concepts for a digital platform. IAMOT. Mumbai 2019
- Wortmann et al. 2019 b Wortmann, F.; Ellermann, K.; Kühn, A.; Dumitrescu, R.: Typisierung und Strukturierung digitaler Plattformen im Kontext Business-to-Business, 15. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Berlin, 2019
- Wortmann et al. 2020 Wortmann, F.; Ellermann, F.; Kühn, A.; Dumitrescu, R.: Ideation for digital platforms based on a companies' ecosystem. In: Proceedia of the 30th CIRP Design Conference. May 6 - 8 2020, Elsevier, Amsterdam, 2020

Gefährdungsanalyse zum Einsatz optischer Verfahren in der Produktpiraterie

Risk Assessment of Optical Technologies in Product Piracy

Franziska Kern¹, Lukas Schlamp¹, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design,
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Stuttgart, Deutschland

franziska.kern@iktd.uni-stuttgart.de

lukas.schlamp@gmx.de

thomas.maier@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Produktpiraterie verursacht alleine in Deutschland jedes Jahr Schäden in Milliardenhöhe. In diesem Paper wird die Gefährdung von Produkten durch optische Verfahren simuliert und analysiert. In drei Reverse-Engineering-Ansätzen, die realen Bedrohungsszenarien nachempfunden sind, nähern sich die Autoren aus Sicht potenzieller Plagiatoren. Hierbei werden Produktfotografien, eine Photogrammetrie-App für das Smartphone und ein professioneller 3D-Scanner verwendet, um physische und digitale Modelle eines Testproduktes nachzubilden. Die Plagiate werden anschließend qualitativ und quantitativ evaluiert. Aus den Erkenntnissen des Arbeitsprozesses und der Bewertung der erzeugten Plagiate erfolgt eine Gefährdungsanalyse. Es zeigt sich, dass jedes Verfahren ein individuelles Plagiatsprofil besitzt und an unterschiedlichen Stellen des Produktentwicklungsprozesses ein Risiko darstellen kann.

Keywords (deutsch):

Designplagiat, Produktpiraterie, Reverse-Engineering

Abstract (english): Product piracy causes billions of euros in damage every year in Germany alone. In this paper, the risk to products induced by optical technologies is simulated and analyzed. In three reverse engineering approaches, which are modeled on real threat scenarios, the authors imitate the perspective of potential plagiarists. Product photographs, a photogrammetry app for smartphones and a professional 3D scanner are used to recreate physical and digital models of a test product. The plagiarism is then evaluated qualitatively and quantitatively. A risk analysis is carried out from the knowledge of the work process and the assessment of the plagiarism generated. It turns out that every approach has an individual plagiarism profile and can pose a risk at different points in the product development process.

Keywords (english):

Plagiarism, product piracy, reverse engineering

1 Einführung

Für die Produktentwicklung stellen die sich stetig weiterentwickelnden technischen Möglichkeiten ein enormes Innovationspotenzial dar. Miteinander gehen jedoch auch unerwünschte Anwendungen und Risiken für die Hersteller. Dieser Beitrag geht der Frage nach, was passieren kann, wenn Reverse-Engineering im bösen Willen eingesetzt wird. Dazu wird zunächst die Zielsetzung, die Auswirkungen von Produktpiraterie in Deutschland und die Bedeutung von Reverse-Engineering in der Produktpiraterie vorgestellt.

1.1 Zielsetzung

Übergeordnetes Ziel der Arbeit ist eine Gefährdungsanalyse zum Einsatz optischer Verfahren in der Produktpiraterie. Darunter werden solche Systeme verstanden, die visuelle bzw. geometrische Informationen über die äußere Gestalt eines Produktes berührungslos erfassen und auswerten können. An einem Beispielprodukt sollen ausgewählte Verfahren angewendet und zur Erstellung von Plagiaten genutzt werden. Die Auswahl der Methoden orientiert sich dabei an realen Bedrohungsszenarien, in denen Produktdaten durch Dritte abgegriffen und missbraucht werden könnten. Die erstellten Kopien werden mit dem Original als auch untereinander verglichen. Anhand von definierten Kriterien wie der Maßhaltigkeit, den finanziellen, zeitlichen und technischen Anforderungen für die Umsetzung erfolgt schließlich eine Bewertung des Fälschungsergebnisses, sowie eine Abschätzung zur tatsächlichen Gefährdung durch das jeweilige Verfahren.

1.2 Produktpiraterie in Deutschland

Laut VDMA erlitt im Umsatzjahr 2019 die deutsche Industrie einen Schaden von schätzungsweise 7,6 Milliarden Euro auf Grund von Produktpiraterie. Dabei wurden in 64 % der Fälle einzelne Komponenten plagiiert, bei 60 % lag außerdem ein Designplagiat vor. Zwar existieren rechtliche Mechanismen um geistiges Eigentum zu schützen, wie das Urheberrecht und der gewerbliche Rechtsschutz in Form von Marken-, Patent-, Design- und Gebrauchsmusterrecht, dennoch blieben 49 % der entdeckten Plagiate folgenlos für die Nachahmer. Aufgrund fehlender Ressourcen, der schwierigen Durchsetzbarkeit rechtlicher Ansprüche und Resignation lag der Anteil bei klein- und mittelständischen Betrieben, die keine Maßnahmen ergriffen, sogar bei 64 %. (VDMA 2020) Diese Zahlen verdeutlichen, dass nicht allein Rechtsschutz, sondern auch Überlegungen zum Designschutz zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit innovativer Unternehmen unerlässlich sind.

1.3 Reverse-Engineering

Die vielseitigen Methoden des Reverse-Engineering bieten Fremdfirmen einen wachsenden Raum an Möglichkeiten, technisches als auch ästhetisches Produktdesign abzugreifen.

„In vielen Fällen ist hierbei die Beschaffung der notwendigen Originale einfach möglich, da sie auf dem freien Markt erworben werden können. Gelegentlich wird aber auch nicht vor bewaffneten Raubüberfällen zur Beschaffung besonders lohnenswerter Vorlagen zurückgeschreckt¹⁴. (14 vgl. BRAUN 1993)“ (Filipovic et al. 2013, S. 9)

Die stetige Weiterentwicklung des methodischen und technologischen Leistungsvermögens von Reverse-Engineering wird in den nächsten Jahrzehnten neue Schutzstrategien seitens produzierender Unternehmen erfordern. Um allerdings zielführende Maßnahmen in den Produktentwicklungs- und Fertigungsprozess implementieren zu können, ist ein Perspektivwechsel unabdingbar. Mit dieser Motivation nähert sich die vorliegende Arbeit der Problemstellung daher aus der Sicht eines potenziellen Produktplagiators, um nachfolgend das Risiko einschätzen zu können.

2 Grundlagen

2.1 Diebstahl geistigen Eigentums

Der Diebstahl geistigen Eigentums im Produktdesign umfasst eine Reihe unterschiedlicher Tatbestände. Umgangssprachlich werden dabei häufig die Begriffe Fälschung, Kopie, Plagiat und Imitat synonymisch verwendet. Das Imitat beschreibt die teilweise oder vollständige Kopie von Produkteigenschaften und dient damit als allgemeiner Überbegriff (Jahnke et al. 2013, S. 1024-1025). Innerhalb der Produktimitation werden Piraterie und die Verletzung von Lizenzvereinbarungen unterschieden. Während letzteres durch eine Überproduktion (*factory overrun*) oder den Verkauf auf dem grauen Markt (*grey market*) ausgelöst wird, spricht man innerhalb der Produktpiraterie entweder von einer Fälschung, oder einem Plagiat (siehe Bild 1) (Jahnke et al. 2013, S. 1024-1025).

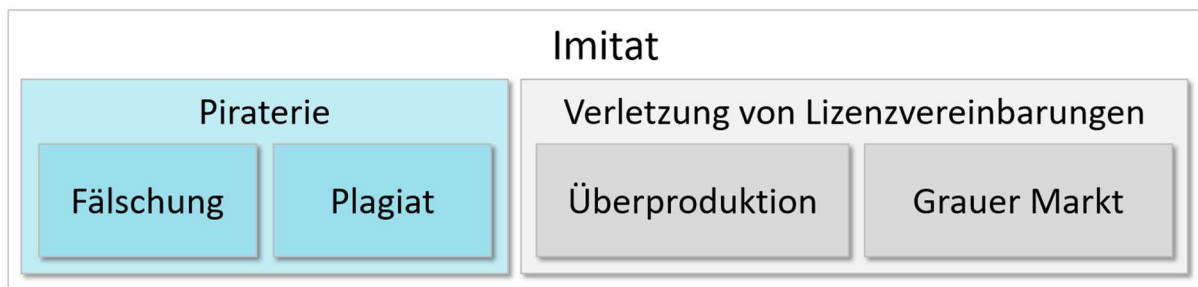


Bild 1: Differenzierung Produktimitation nach Jahnke et al. (2013)

Da sich die vorliegende Arbeit im Kern mit den Ausprägungen der Produktpiraterie beschäftigt, sollen diese im Folgenden genauer erklärt und voneinander abgegrenzt werden.

Die Fälschung kennzeichnet sich durch den mehr oder weniger erfolgreichen Versuch ein Original vollständig nachzuahmen. Eine Fälschung kopiert also nicht nur die wesentlichen Produktmerkmale, sondern auch Produkt- und Herstellernamen. Eine klassische Produktfälschung lässt sich trotzdem vom Original unterscheiden, denn Produktfälschungen als auch Plagiate sind in den meisten Fällen sehr viel günstiger im Verkaufspreis. Dies lässt sich zum einen auf das Umgehen von Entwicklungs- und Marketingausgaben zurückführen, die der Fälscher (in der Natur der Sache) dem Urheber überlässt. Andererseits wird der niedrigere Preis häufig über minderwertige Materialien erkaufte, was dem Produkt in vielen Fällen anzusehen ist. (Erlhoff und Marshall 2007, S. 136)

Im Gegensatz zur Fälschung wird ein Plagiat unter einem anderen, vom Urheber abweichenden Namen vertrieben. Häufig werden jedoch Verpackungsdesigns und Logos an die des Originalherstellers angeglichen, sodass für den Verbraucher ein erhöhtes Verwechslungsrisiko besteht (Erlhoff und Marshall 2007, S. 312-313).

2.2 Optische Verfahren zur Gestalterfassung

Optische Messverfahren vereinen eine Reihe von Vorteilen, u. a. Flexibilität, hohe Messgeschwindigkeiten und zerstörungsfreies Prüfen. Die heute verfügbare Rechenleistung erlaubt es auch, verfahrensbedingte Messunsicherheiten im Vergleich zu taktilen Messungen mit einer Vielzahl an Datenpunkten zu kompensieren.

In der Industrie werden optische Verfahren vor allem in der Qualitätssicherung eingesetzt, u. a. auch in Kombination mit Machine-Learning (Heimel und Finus 2020). Ein weiteres wenn auch kleineres Anwendungsgebiet ist das Reverse-Engineering. Die Überführung von physischen Modellen in CAD-Daten ist z. B. ein fester Bestandteil von hybriden Designprozessen und verbindet das handwerkliche Gestalten am Prototyp mit den technischen Möglichkeiten moderner CAx-Anwendungen. Es sind ebendiese Methoden, die schnelle Iterationsschleifen und innovative Produktentwicklung ermöglichen, wie in schadhafter Weise fremdes Produktwissen akkumulieren. In Tabelle 1 werden die wichtigsten optischen Verfahren aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht optischer (Mess-) Verfahren nach Tutsch (2006)

Verfahren	Physikalische Grundlage	Industrielle Anwendung
Fotografie	Linsenprojektion auf lichtempfindliche Schicht, CCD: innerer photoelektrischer Effekt	Videokameras in Verbindung mit Bilderkennung in Sortieranlagen
Photogrammetrie	Berechnung von Forminformationen aus perspektivischen Einzelbildern	Werkstoffprüfung, Crashtests
Lichtschnittverfahren	Triangulation von Laserprojektion	Qualitätsprüfung Endlosmaterial
Strukturierte Beleuchtung	Projektion von Gittermustern auf Probenkörper	Digitalisierung von handgefertigten Designmodellen, Prüfung von Serienteilen
3D-Laserscannen	Messung von Lichtlaufzeiten reflektierender Objekt-Strahlung	Digitalisierung von Fertigungsanlagen
Röntgentomografie	Röntgenstrahlung auf bewegtem Objekt	Medizintechnik, Qualitätssicherung bei Elektronikbauteilen

3 Methodisches Vorgehen

Von der Studie werden zunächst alle Verfahren ausgeschlossen, die Zugang zu geschützten Bereichen wie z. B. der Firmen-Infrastruktur benötigen oder gewaltsame Handlungen beinhalten. Der Fokus liegt vielmehr auf dem unbedachten Teilen von Produktinformationen, welche dann in Reverse-Engineering-Ansätzen für die Produktpiraterie missbraucht werden könnten.

Im praktischen Teil der Arbeit werden Plagiate auf Grundlage realistischer Szenarien und den damit einhergehenden Verfahren und technischen Möglichkeiten erstellt. Die Szenarien bergen eine unterschiedliche Exposition des Plagiators und damit verbunden die Gefahr der Entdeckung, sowie wechselnde Ansprüche an persönliche und technische Fähigkeiten. Mittels Variation der Original-Oberflächen (Farbe, Grafik) sollen zudem Grenzen der optischen Verfahren identifiziert werden.

3.1 Untersuchungsgegenstand

Als Untersuchungsgegenstand und Plagiatsopfer wurde der *Tangle Teezer Compact Styler* des gleichnamigen Herstellers ausgewählt. Er weist trotz seiner Kompaktheit eine nicht zu unterschätzende Freiformgeometrie auf und besitzt eine einem Geschmacksmuster angemessene Schöpfungshöhe. Gleichzeitig bietet er einen überschaubaren Kostenrahmen und ist in variierenden farblichen Ausführungen erhältlich. Dies ermöglicht eine dezidierte Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Farben und Grafiken auf das Endergebnis.

**Bild 2:** Ansichten des *Tangle Teezers*

Der *Tangle Teezer* ist als Reiseprodukt konzipiert und daher zweiteilig aufgebaut. Der obere Teil beinhaltet die Bürste und den als Handschmeichler ausgeformten Griffbereich. Der untere Teil kann mittels einer Steckverbindung den Bürstenbereich des *Tangle Teezers* abdecken und so vor Transportschäden bewahren. Die folgenden Untersuchungen werden sich auf den geschlossenen Zustand konzentrieren, da dieser zur Gewinnung aussagekräftiger Erkenntnisse ausreichend ist.

3.2 Bedrohungsszenarien

Für die Produktimitation werden verschiedene Szenarien entwickelt, die auch in der Realität eine Gefährdung darstellen könnten.

Das erste Szenario orientiert sich an der Verbreitung von illegitimem Bildmaterial. Dieser Fall kann auftreten, wenn Prototypen im realen Umfeld getestet werden (vgl. Erlkönige) oder Mitarbeiter fahrlässig handeln (Fotos in sozialen Medien). Das Produkt befindet sich zu diesem Zeitpunkt noch im Entwicklungsprozess und mögliche Mitbewerber erhalten erstmals Informationen zur Existenz und möglichen Formgebung des Konkurrenzproduktes.

Auf Basis eines solchen Fotosatzes wird mit Industrieplastilin, sogenanntem Clay, das Testprodukt nachmodelliert. Der Plagiator hatte im Vorfeld keinen Kontakt zum physischen Produkt, verfügt aber aufgrund einer Ausbildung zum Modellbauer über entsprechende Vorkenntnisse. Aus den vorliegenden Bilddaten werden die räumlichen Abmessungen extrahiert und Hilfsgeometrien entwickelt (siehe Bild 3). Da es sich um eine komplexe Freiformgeometrie handelt, werden Kreise respektive Radien als Grundlage verwendet. Die abgeleiteten Kurven werden später genutzt, um Konturschablonen für unterschiedliche Schnittebenen zu fertigen.

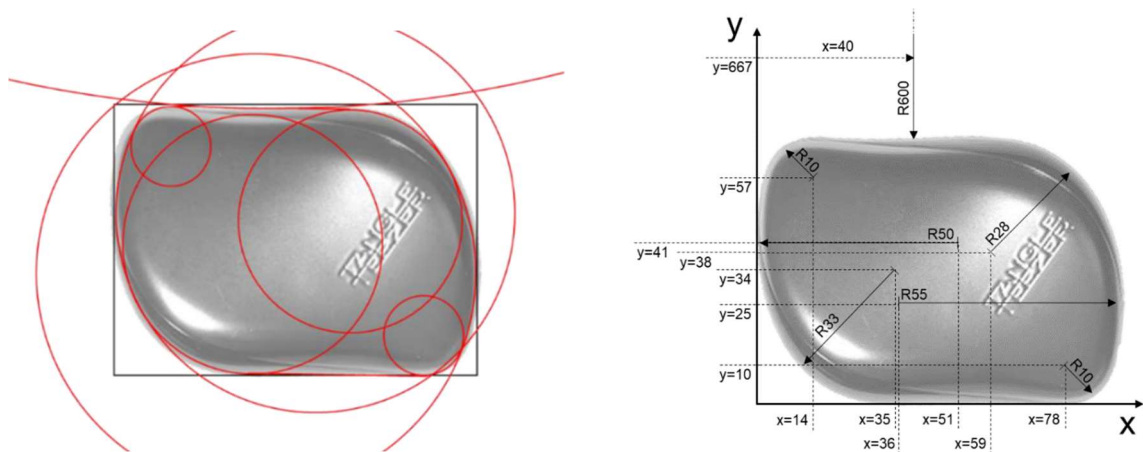


Bild 3: Analyse des Bildmaterials aus der Draufsicht mit Hilfsgeometrien

Für den Modellaufbau wird eine Grundplatte aus Acrylglas mit einem Hilfsvolumen hergestellt (Bild 4). Dieses verringert zum einen die benötigte Materialmenge und bietet dem Clay einen guten Halt auf der Grundplatte. Der Modellrohling erhält zunächst ein Übermaß an Clay, der später mithilfe der Schablonen abgetragen wird (Bild 5).

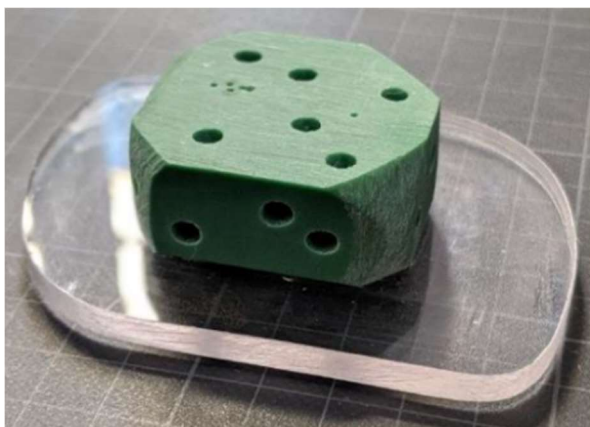


Bild 4 und 5: Grundplatte für Rohling und Clayaufbau mit Übermaß

Die Schwierigkeit, ein Clay-Modell nur auf Basis von Produktfotos nachzubauen, zeigt sich bei der nach innen gewölbten Oberseite des Tangle Teezers. Zwar können die absoluten Abmaße der Kontur mittels Schablonen abgebildet werden, doch die Vertiefung erfordert die Antizipation des möglichen Flächenverlaufes. Hier ist das Erfahrungswissen und die korrekte Interpretation der Formgebung aufgrund von Lichteinfall und Flächenreflexionen unabdingbar. Das Ergebnis des ersten Piraterieszenarios ist in Bild 6 zu sehen.



Bild 6: Plagiatprodukt aus Szenario „Produktfotografie“

Das zweite Szenario spielt in einer Messe-Situation. Das Produkt ist zu diesem Zeitpunkt auskonstruiert und wird meist mehrere Monate vor dem eigentlichen Verkaufsstart auf einer Fachmesse den potenziellen Käufern präsentiert. In dieser Situation soll mithilfe eines Smartphones ein 3D-Modell erbeutet werden. Möglich wird dies durch Photogrammetrie-Software, die mit perspektivischen Bildern oder Filmsequenzen eines Objektes dessen räumliche Abmessungen berechnen kann. Für die Untersuchung soll die Android-App SCANN3D am Originalprodukt verwendet werden. Der Faktor Zeit ist ebenfalls zu berücksichtigen, da im gewählten Szenario eine intensive Vermessung verwunderlich, wenn nicht gar verdächtig erscheinen würde.

Eine weitere Einflussgröße ist die Präsentation des Testproduktes. Auf einer Messe ist mit guter Ausleuchtung und dem eventuellen Einsatz von Spotlichtern zu rechnen. Dies wird mit dem Einsatz einer textilen Lightbox und Flächen-LED-Strahlern nachempfunden (Bild 7).



Bild 7: Originalprodukt im Versuchssetting für Szenario „Messe“

Die photogrammetrische Erfassung wird mit verschiedenen Originalen des Tangle Teezers erprobt. Die Varianten unterscheiden sich in ihrer Farbgebung, Musterung und Reflexivität der Oberfläche. Aus den vorliegenden Originalprodukten werden mithilfe der Photogrammetrie-App CAD-Daten erstellt (Bild 8).

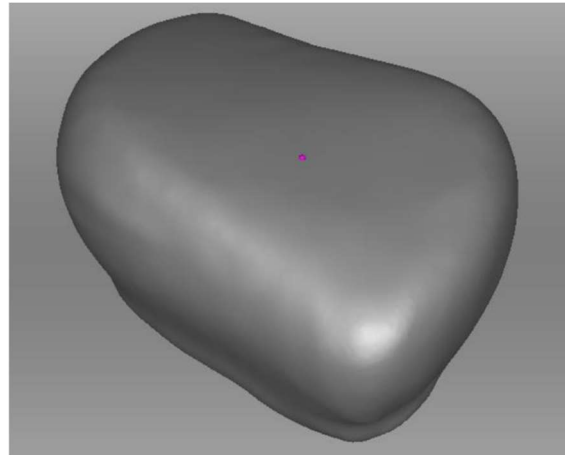


Bild 8: Entwendete CAD-Daten aus Szenario „Messe“

Das dritte Szenario stellt einen Konkurrenzkauf dar. Das zu plagierende Produkt ist bereits auf dem Markt und frei erwerblich. Nach dem Kauf kann das Produkt auseinandergenommen und untersucht oder im Fall dieser Arbeit mit einem professionellen 3D-Scanner in ein hochauflösendes CAD-Modell überführt werden (Bild 9). Dazu wird der „Artec EVA 3D-Scanner“ verwendet sowie die zugehörige Software Artec Studio. Der handgeführte Scanner nimmt bis zu 18 Millionen Datenpunkte pro Sekunde auf und erreicht eine Punktgenauigkeit von 0,1 mm (Artec3D 2020, S. 6).

Auch in diesem Szenario werden die unterschiedlichen Produktvarianten des *Tangle Teezers* einbezogen, um im Anschluss Aussagen zum Einfluss von Farbe und Grafik machen zu können.

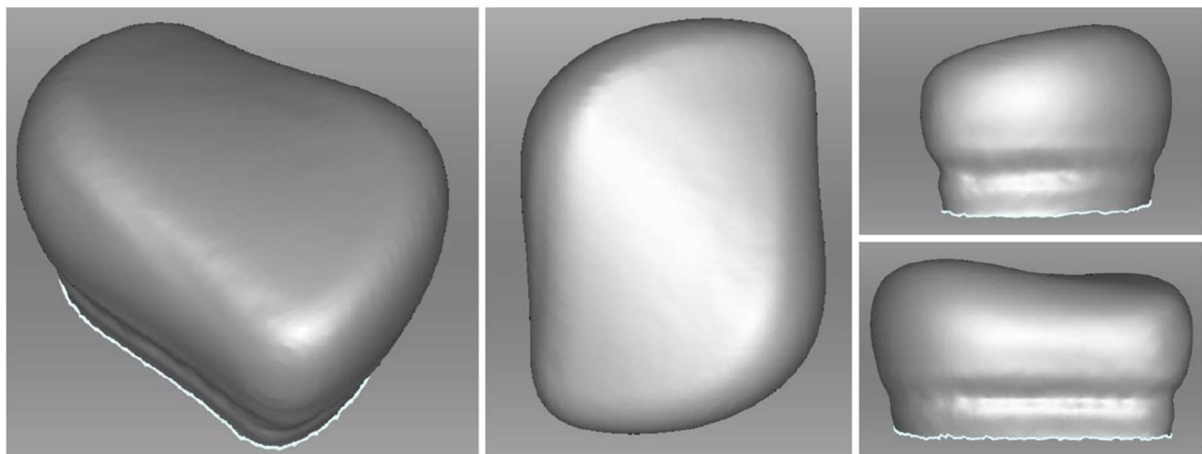


Bild 9: Entwendete CAD-Daten aus Szenario „Konkurrenzkauf“

3.3 Evaluation der Plagiate

In einer abschließenden Evaluation werden alle Plagiate mit dem Original digital und physisch real verglichen und in geeigneten Kategorien bewertet. Dazu werden die 3D-Datensätze aus dem zweiten und dritten Szenario mithilfe additiver Fertigungsverfahren in physische Modelle umgesetzt. Das Clay-Modell aus Szenario Eins wird mithilfe des 3D-Scanners digitalisiert. Auf Basis dieser Evaluation erfolgt die Gefährdungsanalyse der angewendeten Verfahren.

4 Ergebnisse

4.1 Physische Auswertung

In Bild 10 sind von links nach rechts das Originalprodukt, der professionell 3D-Scan, der Smartphone-Scan und die händische Nachmodellierung dargestellt.

Auf den ersten Blick weisen alle Nachbildungen eine hohe bis sehr hohe Ähnlichkeit zum Original auf und besitzen eine vergleichbare ästhetische Qualität. Die Wölbung nach innen auf der Oberseite, die charakteristischen Radien sowie das übergewölbte Profil an der Mantelfläche sind an allen Modellen wiederzuerkennen. Bei genauerer Betrachtung werden jedoch kleinere Unebenheiten und unstetige Übergänge in den Freiformflächen deutlich. Besonders gut erkennen kann man diese Abweichungen an der rechten oberen Ecke des *Tangle Teezers*. Eine gelungene Zusammenführung mehrere Freiformflächen verlangt hohe gestalterische Kompetenzen, was in allen drei Szenarien zu Schwierigkeiten bei den Nachbildungen führte. Bei den Produktplagiaten aus den Raubscans ist zudem die Fertigungstoleranz des 3D-Druckers zu berücksichtigen, aus der weitere Abweichungen resultieren können. Nichtsdestotrotz schneiden die Produktskans im qualitativen Vergleich besser als das Plastilinmodell ab. Der Scan mit dem Profigerät scheidet dabei noch einmal besser ab, als die Scan-App für das Smartphone.



Bild 10: Gegenüberstellung des Originals, des 3D-Scans, des Smartphone-Scans und des Claymodells (v.l.n.r.)

4.2 Digitale Auswertung

Die digitale Auswertung wird als zweite, quantitative Evaluationsstufe herangezogen. Dazu wurde das Plastilinmodell ebenfalls mit dem 3D-Scanner EVA digitalisiert. Da keine CAD-Daten des Originalproduktes vorliegen, werden die CAD-Daten aus dem dritten Szenario, dem professionellen 3D-Scan, als Referenzmodell festgelegt. Die physische Evaluation hat hier bereits die größte Nähe zum Originalprodukt nachgewiesen.

Die Modelle aus den Szenarien Eins und Zwei werden im Folgenden am Referenzmodell ausgerichtet und in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. In der CAD-Umgebung können die Abstände der übereinanderliegenden Modelle vermessen und grafisch dargestellt werden.

Mit dieser Flächendiagnose ist es möglich, auch quantitative Aussagen zu den Plagiatsversuchen zu treffen. In Bild 11 sind die Drauf- und Seitenansichten des Plastilinscans im Abgleich zum Referenzmodell dargestellt. Dieses ist als äußeres graues Mesh, vor allem in der Draufsicht erkennbar. Die Farbskala auf der linken Seite gibt den Abstand der beiden Modelle zueinander in Millimetern an. Eine Tendenz ins Rote deutet auf eine negative Differenz hin, d. h. die Plastilinflächen liegen im Vergleich zum Referenzmodell zu weit innen. Blaue Bereiche zeigen an, dass zu viel Material vorhanden ist und das Mesh durchbrechen. Für die Klassifizierung der Flächen wurde eine Spanne von ± 3 mm gewählt. Bei einer kleineren Betrachtungsspanne würde eine nicht unerhebliche Fläche aus der Auswertung ausscheiden. Noch zu berücksichtigen ist die Messtoleranz des 3D-Scanners, welche

sich durch die doppelte Anwendung beim Referenzmodell als auch beim Plastilinmodell auf $\pm 0,2$ mm summieren kann.

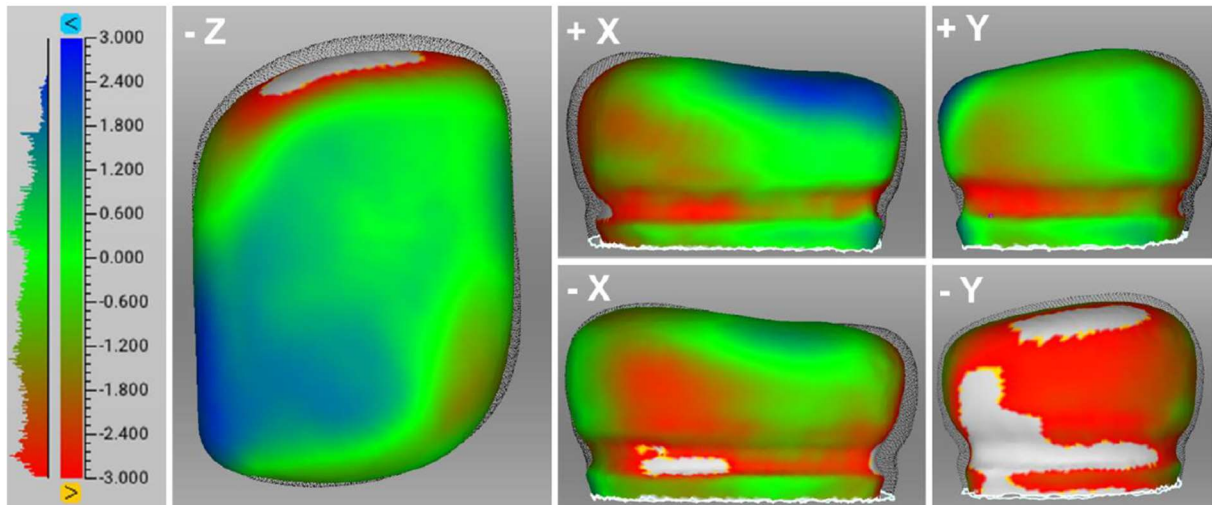


Bild 11: Flächendiagnose zwischen Referenzmodell und Plastilinscan

Es ist deutlich zu erkennen, dass das Plastilinmodell in der Längsrichtung und in der X-Z-Ebene zu klein ausfällt. Hier ist das Referenz-Mesh nicht ausgefüllt und es finden sich auch die größten negativen Abweichungen ($-3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$). Die Deckfläche des Plagiates ist hingegen, nach den Grünanteilen ($\pm 1 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$) zu urteilen, erstaunlich nah am Original, wenngleich auch der konkave Bereich nicht weit genug einschneidet ($+2,4 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$).

Im Bild 12 ist die grafische Flächendiagnose zwischen Referenzmodell und Smartphone-Modell abgebildet. Im Vergleich zum Plastilinscan fallen die Abweichungen wesentlich geringer aus und bewegen sich zu 95 % in einem Bereich von $\pm 1 \text{ mm}$. Da die Scanner-App keine Genauigkeiten ausweist, ist nur die Messabweichung des Referenzmodells bekannt ($\pm 0,1 \text{ mm}$). In Anbetracht der eingesetzten Technologie kann jedoch von einem ähnlichen, wenn nicht leicht erhöhtem Wert ausgegangen werden.

Die größten Unterschiede der Modelle finden sich im unteren Sockelbereich am seitlichen Flächenübergang. Hier fehlt Material ebenso wie an einzelnen Stellen der Deckfläche. Im Vergleich zum Plastilinmodell gibt es allerdings kaum Abweichungen von den Grundabmessungen. Die Schwierigkeiten finden sich vielmehr in den komplexen Freiformflächen und Überwölbungen.

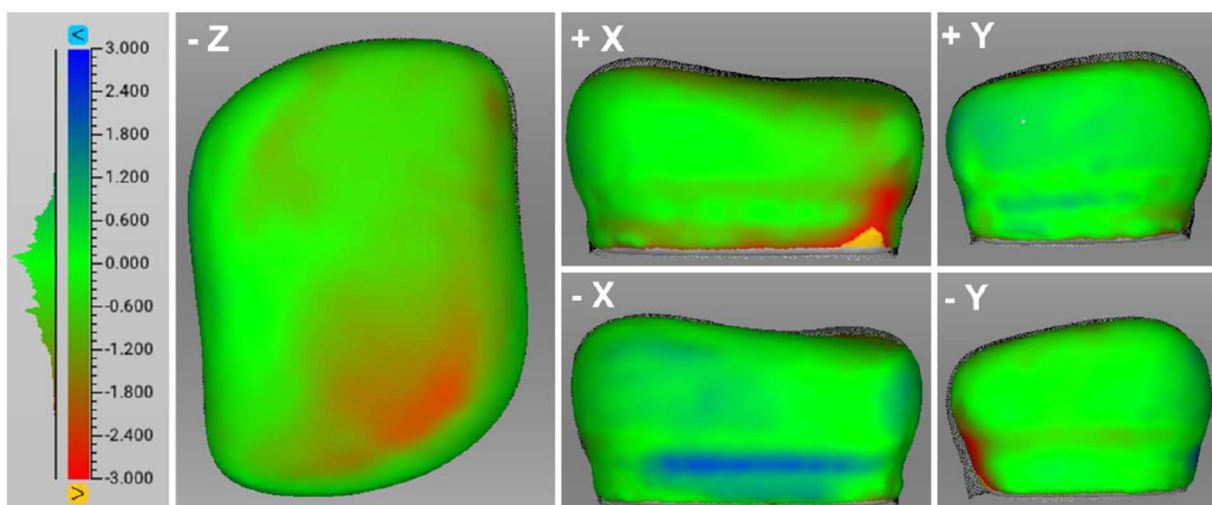


Bild 12: Flächendiagnose zwischen Referenz- und Smartphone-Modell

4.3 Gefährdungsanalyse

Die Untersuchungen haben dargelegt, welche Qualität von Produktplagiaten aus welchem optischen Verfahren hervorgehen kann. Um die Gefährdung realistisch einschätzen zu können, ist die alleinige Betrachtung der Endergebnisse unzureichend. Für ein detaillierteres Bild wurden daher sechs sinnfällige Bewertungskriterien ausgewählt. Anhand dieser werden alle Szenarien beurteilt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Bewertung der optischen Verfahren

Kriterium	Fotografie-Rekonstruktion	Photogrammetrie (SCAN3D)	3D-Laserscan (Artec EVA)
Genauigkeit	± 3,2 mm ⁽¹⁾	± 1,2 mm ⁽¹⁾	± 0,1 mm
Kosten	50 € - 100 €	0 € - 10 €	13.700 € ⁽²⁾
Umsetzungsdauer	ca. 14 Stunden	< 1 Stunde	< 1 Stunde
Anwender Know-How	Fachkenntnisse Modellbau (min. mehrere Monate)	sehr geringe Einarbeitungszeit (ca. 1 Stunde)	geringe Einarbeitungszeit (< 1 Tag)
Anwender Exposition	nicht vorhanden - niedrig	hoch - sehr hoch	nicht vorhanden - niedrig
Zeitpunkt der Anwendung	Produktentwicklungsprozess	Prototypen-Stadium	Markteinführung

(1) Vergleichswert aus zu Grunde liegender Untersuchung

(2) Exklusive Kosten für den Konkurrenzkauf

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass jede Methode gewisse Stärken hat. In Bild 13 ist dieser Umstand basierend auf den Bewertungskriterien aus Tabelle 2 noch einmal grafisch aufgearbeitet. Im Netzdiagramm wird die Vorteilhaftigkeit der Verfahren auf einer Skala von Eins bis Sechs dargestellt. Eine Eins bedeutet hierbei, dass in diesem Kriterium unvorteilhafte Bedingungen für die Produktpiraterie herrschen. So ist z. B. der 3D-Laserscan mit deutlich höheren Kosten verbunden, als die Photogrammetrie-App, was in einer geringeren Bewertung resultiert. Eine Sechs weist auf sehr vorteilhafte Bedingungen hin. Bei gelecktem Bildmaterial oder dem legalen Erwerb eines Konkurrenzproduktes ist die Exposition des Anwenders gering bis nicht vorhanden. Dadurch muss dieser sich wenig Gedanken um eine mögliche Enttarnung oder direkte Konsequenzen machen.

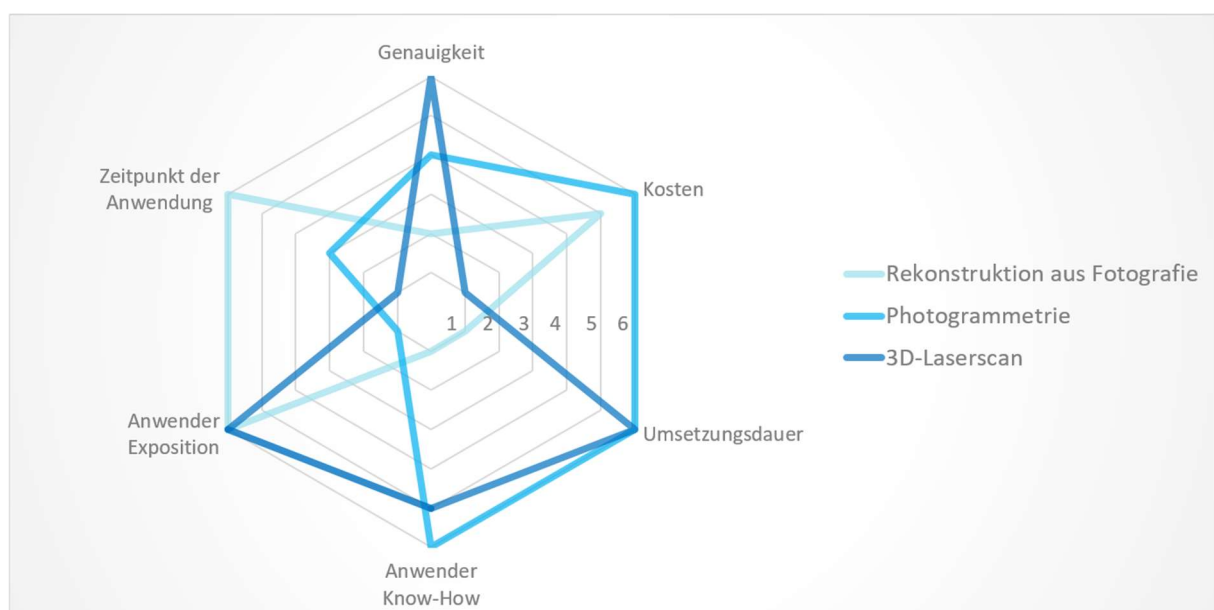


Bild 13: Verfahrensvorteile in der Produktpiraterie

5 Diskussion

5.1 Bewertung der Gefährdung

Aus der Gefährdungsanalyse gehen drei differenzierte Piraterie-Profile für die Verfahren hervor. Fotografien sind jederzeit, zu geringen Kosten und Exposition eine Gefahr, transportieren aber wenig Informationen und verlangen Zeit und Anwender-Knowhow. Die Scanner-App verringert die Anforderungen an Knowhow und Dauer deutlich und greift mehr Informationen ab, doch sie kann erst zu einem späteren Zeitpunkt in einer sehr spezifischen Situation eingesetzt werden, welche die Gefahr der Entdeckung und legaler Konsequenzen birgt. Der Laserscan garantiert die besten Plagiats-ergebnisse mit dem höchsten Detailgrad. Dafür unterliegt er in den Kosten und dem Einsatzzeitpunkt den anderen beiden Verfahren.

Die Piraterie-Profile sollten jedoch nicht in Konkurrenz zueinander, sondern als Gruppe betrachtet werden. Die parallele Erprobung der Methoden im Rahmen der Studie bildet nicht die Realität ab, in der eine zeitliche Kopplung an den Entwicklungsprozess gegeben ist. Natürlich liefert ein professioneller 3D-Scan bessere Daten zur Formgebung als eine Fotografie. Ein geleaktes Foto kann allerdings schon Jahre vor dem potentiellen Einsatz des Scanners die Mitbewerber auf interne Entwicklungsprozesse aufmerksam machen. Die Gefährdung besteht dann nicht in einem Designplagiat, sondern der früheren Vermarktung eines ähnlichen Produktes.

Bei der Gefährdungseinschätzung ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass sich von der Eignung eines Verfahrens nur schwer ableiten lässt, wie oft dieses tatsächlich in der Produktpiraterie zum Einsatz kommt. So mag der 3D-Scan aufgrund der schiereren Menge an extrahierbaren Informationen gefährlich erscheinen. In der Praxis muss der Produktpiraterie mit diesem Verfahren jedoch ein Kauf vorhergehen, der bei Investitionsgütern mit nicht unerheblichen Kosten verbunden sein kann.

5.2 Gescheiterte Plagiatsversuche

In der Erprobung der optischen Verfahren haben sich einige Produktvarianten als widerstandsfähiger als andere erwiesen. Diese Unterschiede konnten direkt auf die Farbgebung und die Grafik zurückgeführt werden. So ist die Photogrammetrie-App an den Hochglanzflächen gescheitert. Weil die Reflexionen die Umgebung widergespiegelten und somit die eigene Formgebung verzerrten, konnte die Software keine Flächen ableiten (Bild 14). Dahingegen stellten wahllose Muster, die dem Dazzle-Design nachempfunden waren, kein Problem dar. Um diese Erkenntnis zu verifizieren, wäre es interessant zu untersuchen, ob die Erbkönig-Folierung womöglich nur das menschliche Auge irritiert, nicht aber bildverarbeitende Algorithmen.



Bild 14: Gescheiterte Photogrammetrie beim glänzenden *Tangle Teezer*

Der Laserscanner wurde durch die Lichteffekte in einem geringeren Maß beeinflusst (Bild 15). Zwar misslang der Scan der hochglänzenden Produktvariante ebenfalls, im Szenario eines Konkurrenzkaufes wäre es jedoch kein Problem, das Produkt in einer matten Farbe zu lackieren bevor die Form abgegriffen wird. Im direkten Vergleich von 3D-Scanner zur Scanner-App weist daher ersterer die

höhere Robustheit auf. Der verwendete Scanner von Artec3D hat allerdings auch seine Grenzen und würde bei durchsichtigen Materialien wie Glas vollständig versagen.



Bild 15: 3D-Scan-Ergebnis in Abhängigkeit vom Glanzgrad

6 Ausblick

Reverse-Engineering wird sich in den nächsten Jahrzehnten mit dem wachsenden technologischen Potenzial weiterentwickeln und neue Anwendungsgebiete finden. Unsere Untersuchung stellt in diesem Sinne nur einen kleinen Teil einer Momentaufnahme des derzeit Möglichen dar. Die auferlegten Restriktionen und Einschränkungen erfolgten außerdem, um im legalen Bereich die ausgewählten Verfahren zu testen. Für weitere Forschungsarbeiten wäre es denkbar, in Kooperation mit Firmen und in Absprache mit den Rechteinhabern aggressivere Methoden zu evaluieren.

Eine zusätzliche Option wäre eine Erhöhung der externen Validität, indem der Designdiebstahl in einem realen Anwendungskontext verortet wird. Dafür würde sich zum Beispiel die Messesituation empfehlen, in der auch von Seiten des Social-Engineering die Sensibilisierung und Reaktion von Mitarbeiterinnen erforscht werden könnte.

Nicht zuletzt müssen wir uns in einer digitalisierten und globalen Welt an den Gedanken gewöhnen, dass geistiges Eigentum nicht nur rechtlich, sondern auch mit gestalterischen Maßnahmen geschützt werden muss. Gelegenheit macht Diebe, und es werden in Zukunft nicht weniger.

Literatur

- | | |
|---------------------------|---|
| Artec3D 2020 | ARTEC3D: <i>Artec3D EVA – Tragbarer 3D-Scanner für schnelles und genaues Scannen</i> . Luxembourg, 2020. |
| Erlhoff und Marshall 2007 | ERLHOFF, Michael; MARSHALL, Tim: <i>Wörterbuch Design</i> . Köln/New York: Birkhäuser, 2007. |
| Filipovic et al. 2013 | FILIPOVIC, Bartol; SCHULZ, Alexandra; SCHOLZE, Benno; LIESE, Harald; MEIWALD, Thomas; MNICH, Peter et al.: <i>Leitfaden zum Produkt- und Know-how-Schutz. Generisches Prozessmodell zur Einführung von Schutzmaßnahmen gegen Produktpiraterie und Know-how-Abfluss</i> . 1. Aufl. Frankfurt am Main, 2013. |
| Heimel und Finus 2020 | HEIMEL, Damian; FINUS, Frauke: KI eröffnet neue Möglichkeiten in der Qualitätskontrolle. In: <i>blechnet</i> [online]. https://www.blechnet.com/ki-eroeffnet-neue-moeglichkeiten-in-der-qualitaetskontrolle-a-913119/ [17.11.2020] |
| Jahnke et al. 2013 | JAHNKE, Ulrich; LINDEMANN, Christian; MOI, Matthias; KOCH, Rainer: <i>Potentials of Additive Manufacturing to Prevent Product Piracy</i> . Austin, Texas, USA: Solid Freeform Fabrication Symposium, 2013. |
| Tutsch 2006 | TUTSCH, Rainer: <i>Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion</i> . Braunschweig: Springer, 2006. |
| VDMA 2020 | VDMA: <i>VDMA Studie Produktpiraterie 2020</i> . Frankfurt am Main, 2020. |

Nutzergetriebene Fahrzeugkonzepte: Ein neuartiger Ansatz zur Identifikation von Produktanforderungen

User-driven vehicle concepts: A novel approach to identify product requirements

Maximilian Werner¹, Sebastian Stegmüller²

¹University of Stuttgart, Institute of Human Factors and Technology Management (IAT), Stuttgart
maximilian-jakob.werner@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer IAO, Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO, Stuttgart
sebastian.stegmueller@iao.fraunhofer.de

Abstract: Die Adressierung der richtigen Nutzerbedürfnisse ist eine bekannte Herausforderung in der Produktentwicklung und -konzeption. Speziell radikale Innovationen, die mit technologischen und marktseitigen Veränderungen einhergehen, sind entsprechend schwer zu planen. Nutzern sind diese Produkte grundsätzlich unbekannt und folglich können sie diesbezüglich keine Anforderungen kommunizieren. Radikale Innovationen sind jedoch erfolgsentscheidend und sollten daher aktiv entwickelt werden. Dieser Beitrag stellt einen neuartigen Ansatz vor, um Nutzer in der frühen Innovationsphase einzubinden und mögliche Bedürfnisse zu antizipieren. Mithilfe von Storytelling und einer speziellen Befragung, basierend auf Expertenwissen, wird ein gewisser Lösungsraum vorgegeben und gleichzeitig die Kreativität der Befragten angeregt. Der Anwendungsfall eines autonomen, abrufbereiten Fahrzeugs dient zur Evaluation der Methode im Zuge einer umfassenden, internationalen Umfrage in China, Deutschland und den USA. Das Ergebnis der Fallstudie zeigt, wie mithilfe des neuartigen Ansatzes Nutzerbedürfnisse und Hauptmerkmale zukünftiger Produkte identifiziert werden können, die eine potenziell radikale Innovation sind.

Keywords:

Frühe Innovationsphasen, radikale Innovation, Nutzerintegration, Storytelling, Produktkonzeption

Abstract: Meeting the right user needs for successful innovations is a well-known challenge in product design and development. Especially radical innovations that come along with both, technological change and new market conditions are difficult to plan. By nature, this type of innovation is completely unknown to future users. Consequently, they are unable to communicate possible requirements for a product they do not know. Yet, radical innovations are key to corporate success and thus should be actively initialized. In this paper, we present a novel approach to involve users in the early stage innovation process in order to anticipate possible future needs. We apply a storytelling methodology and a special questionnaire design, primed with expert-knowledge, to set a certain framework and enhance respondents' creativity at the same time. The use case of a future autonomous vehicle on-demand is employed to evaluate our methodology in the course of a large-scale international survey in China, Germany and the USA. The case study results show how our approach can help to anticipate future users' needs and to identify key features of a future product that can become a potentially radical innovation.

Keywords:

Early innovation phases, radical innovation, user integration, storytelling, product design

1 Introduction

Dealing with high complexity and uncertainty in new development projects is a fundamental challenge for automotive manufacturers as current digital transformation goes along with various innovations to handle. For instance, putting together the two major trends of autonomous driving and shared mobility creates a so far non-existent concept of autonomous vehicles on-demand (AVOD). The result is a radical innovation which blurs the line between private and public transportation as it combines the advantages of private vehicle ownership, sharing economy and ride hailing (e.g., Wachenfeld et al. 2015). For this kind of mobility solution to be accepted by users, new product requirements resulting from a combination of these different means of transportation need to be met. Fundamentally understanding the user needs to be addressed by this new product is crucial for success. However, identifying latent needs that users are not aware of themselves is difficult (e.g., Carlgren 2013).

Thus, our research question addresses the suitability of our novel approach to include direct user feedback into the ideation phase during early innovation process. To this end, we conduct a case study and apply our methodology to early ideation and design of an AVOD in order to anticipate future users' needs towards a product which is an unknown, potentially radical innovation (Herstatt et al. 2007). This contrasts with established methodologies of human-centered design that are mostly suitable for incremental innovations and not radical ones (Norman and Verganti 2014).

The remainder of this paper proceeds as follows: First, we describe the theoretical background of our study by reviewing the literature in the area of product development in early innovation phases and potential methodologies to actively involve users into the development process in the sense of open innovation. Afterwards, we outline the development of our methodology based on selected research insights considered previously. Next, we describe our case study conducted with a total of 2,360 respondents in China, Germany and the USA. Finally, we discuss the results of our methodology and case study and conclude with potential limitations of our approach and possible further research.

2 Theoretical background

New product development (NDP) is a long process from finding initial ideas and principal solutions, over designing concepts and prototyping, to testing and finally production much addressed in standard literature (e.g., Bender and Gericke 2021). Especially the early phases, the front end of NDP is of particular importance for the success of a development project and product. This includes all activities from the advent of an idea to deciding whether to pursue this concept further (Florén et al. 2018).

Over the years, a lot of research has been done on procedure models to turn new ideas into commercialize products but in practice, actively following these recommendations to develop innovations is difficult and requires a dedicated innovation management (Meissner and Kotsemir 2016; Du Preez and Louw 2008). More recent research in the important field of sustainable innovations also puts an emphasis on the early phases, underlining the continuing importance of these so-called 'front end' stages (e.g., Stock et al. 2017; Dewulf 2013).

Here, Dewulf (2013) stresses the particular relevance of front end decisions to go beyond incremental innovations. In contrast to these, really new or radical innovations are characterized by a discontinuity on a technology and/or market level (Garcia and Calantone 2002). In fact, most radical innovations actually need to be actively shaped by future users as they initially appear rather imprecise by nature (Abernathy and Utterback 1978). Due to their high degree of uncertainty and difficult implementation, McDermott and O'Connor (2002) note that radical innovations require appropriate and dedicated managerial support to be successful. In this sense, Robbins and O'Gorman (2015) find informal management and leadership as well as external knowledge for ideation in the sense of 'open innovation' to be particularly expedient for radical innovation projects. Yet, user integration should be chosen carefully due to their limited understanding of new technologies (Robbins and O'Gorman 2015).

However, Lettl (2007) argues that users are not cognitively and motivationally limited per se but must be diligently identified and involved in a proper way. Therefore, a company must be capable of both, tapping external knowledge gained from open innovation as well as exploiting it internally in order to increase its radical innovation activity (e.g., Flor et al. 2018).

According to Reichwald and Piller (2009), the very early ideation phase is particularly well suited for user integration in open innovation projects in order to generate new ideas but also to evaluate already given ideas. Established instruments to collect primary data are qualitative interviews with single users or groups to understand unknown phenomena as well as quantitative surveys or observations to detect standardized patterns. In this light, Bosch-Sijtsema and Bosch (2015) find that early phase activities are best complemented with collaborative approaches and conscious users that are aware of their task and actively help shape new functionalities and features. Creativity enhancing techniques can also be helpful during the early ideation phase, such as gamification approaches that go beyond mental models and intangible products (e.g., Patrício et al. 2018).

Notwithstanding, active user integration is very challenging when users are unable to express their requirements for a product that they do not know yet. Thus, it is essential to develop new approaches and methodologies in order to identify and understand users' latent needs, respectively (e.g., Carlgren 2013). For instance, Zhou et al. (2015) develop a model to gather this information from online reviews and Raviselvam et al. (2019) show an approach to select special user groups able to communicate needs others cannot. As shown by Kauppinen et al. (2016), gamification approaches are also suitable to detect tacit user knowledge in open innovation activities. Another important aspect to consider is addressed by Abrell et al. (2016) who differentiate between customers and users when evaluating tacit knowledge in the course of open innovation. For B2B markets, they find that radical innovations are better triggered by users than by customers who do not operate the product themselves (Abrell et al. 2016). This is also applicable for the present use case of an AVOD that will likely be operated in fleets and offered as a service to end-users. In all respects, companies must weigh up carefully the right amount of control and openness in order to keep creativity upright and set a certain direction at the same time (e.g., Lauritzen and Karafyllia 2019).

In the area of user experience design, Michailidou et al. (2013) follow a storytelling approach and show how the development of narratives can help developers and designers to better analyze and communicate non-tangible features. In a similar way, Körber et al. (2013) show how this can be applied to increase creativity of online survey respondents by creating different stories in order to generate a certain atmosphere for automotive user experience evaluation. Recent research in different other areas also indicates that the combination of storytelling and gamification approaches to create an interactive experience for respondents can enhance the quality of survey results (e.g., Dincelli and Chengalur-Smith 2020; Burova et al. 2018)

3 Application and methodical approach

In order to discover implicit user needs, brainstorming with fictitious personae and expert-workshops are used to pre-empt certain domains of user requirements and to preselect technically feasible implementations which real users might not be aware of yet. The resulting hypotheses are subsequently clustered by component function and assigned to a specific subdivision of the vehicle architecture. A list with design characteristics is created which users might find relevant when configuring a new vehicle (e.g. number of seats, way of entry, comfort functions, etc.). Afterwards, a questionnaire translates the technical product features into a user-oriented formulation to confront real customers with more tangible ideas that are easier for them to evaluate. Following a storytelling approach (e.g., Michailidou et al. 2013), questions and layout of the survey simulate an imaginary trip with a future AVOD for better immersion and to trigger latent user needs. The result is a description of the whole vehicle concept in accordance with the respondents' requirements. Following the example of Lindemann (2009), Fig. 1 gives an overview of the corresponding process steps which run sequentially but allow iterations whenever necessary. Hereafter, this approach is described in detail.

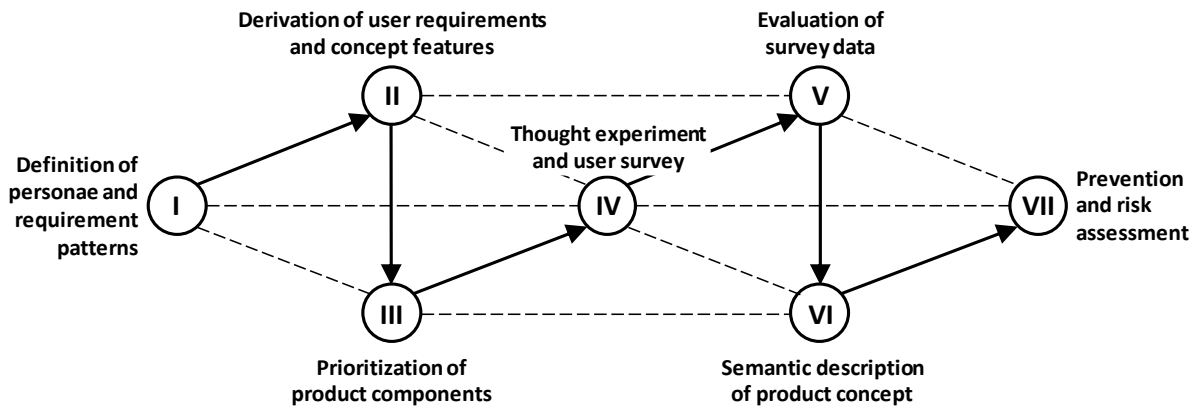


Fig. 1: Methodological approach, following the example of Lindemann (2009)

As initial step of our approach we created several personae which represent specific user groups and support the subsequent deduction of hypotheses regarding potential user requirements for the future product under consideration (e.g., Long 2009), for instance an AVOD. Here it is important to take differences in the various user groups' specific mobility behaviour into account. As such, personae not only characterize sociodemographic user attributes, but also typical distances travelled or preferred means of transportation. Taking the personae's respective financial situation, interests, and personalities into consideration, then enables to formulate a precise requirements pattern with regard to the users' mobility needs. Following the determination of potential user groups, an interdisciplinary workshop with industry experts is held to formulate hypotheses of several user requirements for future AVODs (e.g., Bender and Gericke 2021; Lindemann 2009).

After bringing together all hypotheses, they are thematically clustered and assigned to specific functionalities of the vehicle in order to deduct their respective components. Subsequently, we recommend reducing the scope and setting a focal point on selected product elements that are assessable for users. Therefore, only those components most relevant for the product's overall functionality or innovativeness were initially selected to characterize the future AVOD concept. The later one is evaluated based on a component's ability to influence user adoption of this product according to Rogers' diffusion of innovations theory (Rogers 2003).

Based upon the previous results, potential future users are actively involved in the product design process using an online survey. However, it is not expedient to directly ask users on possibly latent needs that they might not be aware of (e.g., Zhou et al. 2015; Carlgren 2013). Instead, they are confronted with the requirement hypotheses previously developed based on personae and expert knowledge in order to only verify or falsify these. To this end, a special questionnaire was designed similar to Kano's methodology from a user perspective (e.g., Kano et al. 1984; Lee and Newcomb 1997). Respondents' immersion and creativity is enhanced using a very narrative language in style of an imaginary AVOD trip as hypothetical thought experiment to support them drafting their own vision of the future (Michailidou et al. 2013; Körber et al. 2013). Arranging all questions in a respective manner forms an analogously coherent user story that initially is solution-neutrally formulated. Similar to game rules and with a defined solution space, respondents then are introduced to different technical implementation alternatives step-by-step and asked to pick their personal favorite (Kauppinen et al. 2016; Lauritzen and Karafyllia 2019).

With this approach, we aim to draft an undetermined conceptual framework of the future product based on personae and expert knowledge that users themselves can complement by concretizing characteristics of various vehicle features with their answers. Product features and components queried in this way are clustered in the areas of vehicle exterior, vehicle interior, user interface, and driving characteristics. In the end, the sociodemographic data of all respondents can be used to define specific target user groups and to formulate a semantic description of their specific vision of the future AVOD. As in all development projects, a critical review as well as continuous tracking of potential error sources is important and also implemented in our approach (Lindemann 2009).

4 Case study execution and description of results

Following the recommendation of representative sample sizes according to Krejcie and Morgan (1970), we asked an amount of 2,360 respondents from China, Germany, and the United States about their personal preferences regarding specific features and functions of a future AVOD in order to investigate their user acceptance. All participants were recruited via online panel and financially incentivised to complete the questionnaire. For better significance, it was taken heed of a sociodemographically accurate sample in terms of representative age distribution, gender, or settlement structure (see Fig. 2). This needs to be considered when evaluating the data set, as nation-specific preferences, for instance, can either depend on age, cultural habits, or multiple factors.

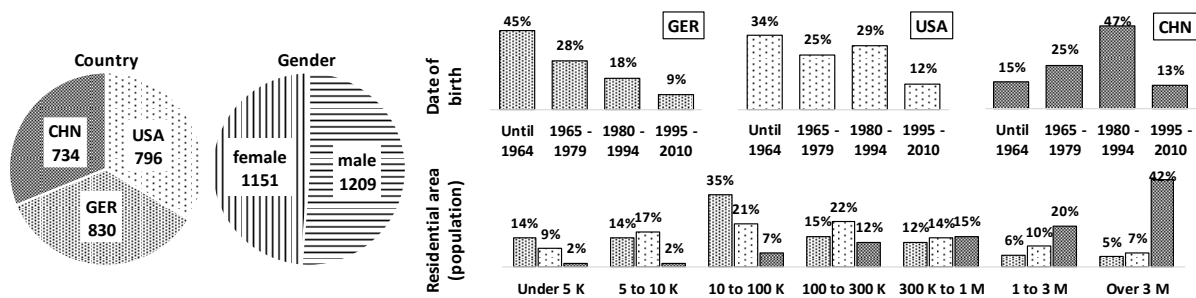


Fig. 2: Sociodemographic characteristics of survey respondents

The distribution of the respondents' sociodemographic characteristics in Fig. 2 shows a rather old German sample compared to the high share of young people in the Chinese sample. This is in line with the respective countries real age distribution. Further country-specific differences can be seen in the settlement structure. Over 60 % of the Chinese respondents live in large metropolises while the German and US sample is more evenly distributed among cities of different sizes. Our evaluation considers these differences as correlations between the respondents' place of residence or age and their mobility behaviour with regard to public transit use is expected. For instance, people in rural areas might be more dependant on their private vehicles compared to those living in large cities.

To identify interesting target users, a comparison of the respondents' monthly net income indicates further differences in the earning segments. In Germany, more than half are within a medium income segment of EUR 1,000 to 2,999 net income per month. The samples of China and USA are relatively even distributed over all wage groups. However, the share of users with very high income and in consequence also the potential for early adopters or innovators is highest in the US (Rogers 2003). Moreover, the share of respondents without valid driver's license, both for legal and health reasons, is about 10 % across all countries. It is assumed that these target groups mentioned are particularly interesting users of future AVODs who might get a new chance for more private and convenient mobility by this (Wachenfeld et al. 2015).

Nevertheless, private vehicles are the most preferred means of transportation in all samples. With three out of four respondents picking their car for most trips, China has the lowest usage. In the US, even 86 % regularly take their private car. Also critically seen for the acceptance of AVOD is the low car sharing usage of only 4 % in Germany as the concept of an AVOD is quite similar to this. In China and the US there are at least more than 25 % respondents using car sharing.

In the following, the resulting data is used to refine the future AVOD concept. We point out potential user groups and their motives or preferred features at a very early stage of the innovation process. Insights regarding technical requirements and preferred ways of implementation are distinguished. Subsequently, we aggregate the results into an overall assessment of the user acceptance of an AVOD.

4.1 Vehicle Concept

In accordance with the study design, the vehicle concept is clustered into four main feature categories the respondents were successively confronted with: vehicle exterior, vehicle interior, user interface, and driving characteristics. To this end, the imaginary trip with an AVOD described in course of the questionnaire, addresses different questions regarding the overall appearance and entry situation, the atmosphere within and interaction with the vehicle, as well as the user experience. Answers regarding technical requirements and features show that the majority of all respondents prefers the AVOD to be a medium-sized vehicle with capacity for three to four passengers and rather high roof edges. Easy access is important, via automatically opening doors for instance. Interestingly, German users rate functional surfaces and materials most important whereas Chinese respondents prefer a particularly stylish interior of the vehicle. Also, preferences in driving characteristics appear to be nationally influenced as only German respondents prefer rather high cruising speeds over gentle speed levels. In the following, selected survey results concerning the vehicle concept are presented.

Concerning the vehicle exterior, the selected results shown in Fig. 3 indicate that users expect future AVODs to be quite similar in size compared to taxi cabs of today. Only Chinese respondents show a slight preference towards large vehicles which might stem from cars being important status symbols in this market. Interestingly, windows are assumed to be rather large in all samples, implying that future AVODs should feel more spacious while maintaining the footprint of today's vehicles. At the same time, comfortable access appears to become more important as automatic doors are predominantly rated (rather) important, in China even to 83 %. Additionally, about 65 % of the younger generations Y and Z prefer opening these doors remotely, for instance via smartphone.

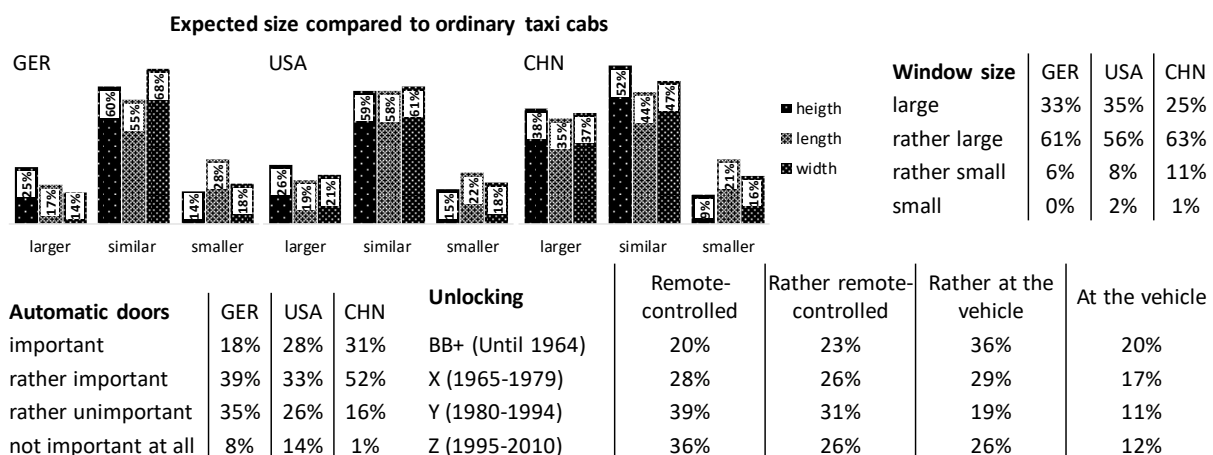


Fig. 3: Selected survey results on the vehicle exterior

Answers regarding the interior of future AVODs suggest a vehicle concept that allows comfortable transportation of several passengers as 75 % of all respondents expect comfortable seating, realized with three to four seats in the opinion of 62 %. Moreover, it is noticeable that about half of the people asked find seat belts compulsory at all times or for 26 % at least depending on the route. Even though materials and surfaces should be rather functional and robust for a majority, the AVOD needs to be more than a simple means of public transportation. Results also show that most Chinese and US-Americans require luggage space for two medium-size items, Germans even for three to four. Moreover, a flexible interior is seen necessary by 77 % of the user asked. For instance, 51 % would like to use a stable working surface and even 79 % wish for a chair with reclining function.

With regard to the user interface, the results displayed in Fig. 4 show that most respondents still prefer some sort of on-board control panel over their smart device to change vehicle settings. However, an increasing acceptance of the smartphone as interface can be observed for Chinese and younger respondents. This is interesting as most of the booking and payment processes of the AVOD ride will likely to be made via these devices. Yet, a hardware-based user interface remains important for most

users. This finding is confirmed by the potential users' choice of input and output device. Overall, manual command entry, for instance via switch or touch panel, show much higher acceptance than gesture control or mobile device. Somewhat contradictory, voice control is rated considerably high. Reversely, common screens are the most preferred output device but closely followed by a voice assistant. Again, the Chinese sample proves most open for other innovative solutions.

Interface	GER	USA	CHN	Interface			Mobile device			Rather mobile device			Rather control panel			Control panel		
				BB+ (Until 1964)	X (1965-1979)	Y (1980-1994)	Z (1995-2010)											
Mobile device	3%	7%	5%					3%				9%						49%
Rather mobile device	9%	10%	22%					4%				13%						43%
Rather control panel	39%	30%	46%					6%				15%						40%
Control panel	48%	53%	27%					10%				23%						37%

Input	Gesture control			Voice control			Mobile device			Touch panel			Switches		
	GER	USA	CHN	GER	USA	CHN	GER	USA	CHN	GER	USA	CHN	GER	USA	CHN
Important	7%	24%	26%	25%	37%	40%	16%	31%	37%	32%	44%	47%	30%	45%	43%
Rather important	23%	26%	43%	40%	33%	43%	35%	35%	49%	46%	38%	44%	45%	38%	47%
Rather unimportant	46%	30%	28%	24%	21%	16%	33%	19%	13%	16%	12%	8%	20%	14%	9%
Unimportant	24%	19%	4%	11%	9%	1%	15%	15%	2%	6%	6%	1%	6%	4%	1%

Output	Voice assistant			Screens			Mobile device			Projection		
	GER	USA	CHN	GER	USA	CHN	GER	USA	CHN	GER	USA	CHN
Important	30%	36%	37%	34%	47%	45%	15%	31%	36%	14%	27%	28%
Rather important	39%	31%	44%	46%	38%	49%	36%	33%	50%	40%	38%	47%
Rather unimportant	22%	22%	17%	16%	10%	6%	34%	22%	13%	33%	23%	23%
Unimportant	9%	11%	2%	4%	5%	1%	15%	14%	2%	13%	12%	2%

Fig. 4: Selected survey results on the user interface

Another interesting outcome are cultural differences in terms of preferred driving characteristics. On the one hand side, all samples show a significant preference of smooth acceleration over a rather sporty style of driving. On the other side, there is a distinct difference between German and other respondents in terms of expected driving speed. While 87 % of Chinese and 70 % of the US-American participants expect (rather) slow cruising speeds, German answers vote for rather fast to fast by 76 %.

4.2 Utilization Concept

As typical product-service system, a comprehensive understanding of the AVOD usage is as important as the vehicle concept itself. To this end, the analysis of respective survey data shows that a vast majority among all participants can imagine using AVODs in future, surprisingly, even more than half of the oldest generations asked. However, the concept of AVOD ride sharing does not correspond to all participants' imagination. Acceptance is lowest in the US, where only 41 % of the respondents would share a ride with strangers. More open show Germans with 52 % and Chinese with 60 % willing to ride with people they do not know. In line with this observation, 71 % of Chinese would trust an AVOD to transport their children alone, in comparison to 27 % in the US. The purpose of using an AVOD also shows interesting differences between samples. For instance, 57 % of German respondents and 50 % from generations BB+ and X see the no longer necessary search for parking spaces as most convincing reason to use AVODs. The new technology itself and more comfort are most rated adoption reasons for 53 % of the Chinese sample as well as for 51 % and 46 % respectively of generations Y and Z. As presented in Fig. 5, especially non-regular occasions such as errands and leisure time are picked mostly for typical trips. Only in China, commuting also shows a high value. Transnationally, results indicate that most respondents expect an AVOD suitable for longer distances as well. More than half in all country samples require a range of more than 100 kilometers. However, more than a third are also satisfied with a range between 25 and 100 kilometers.

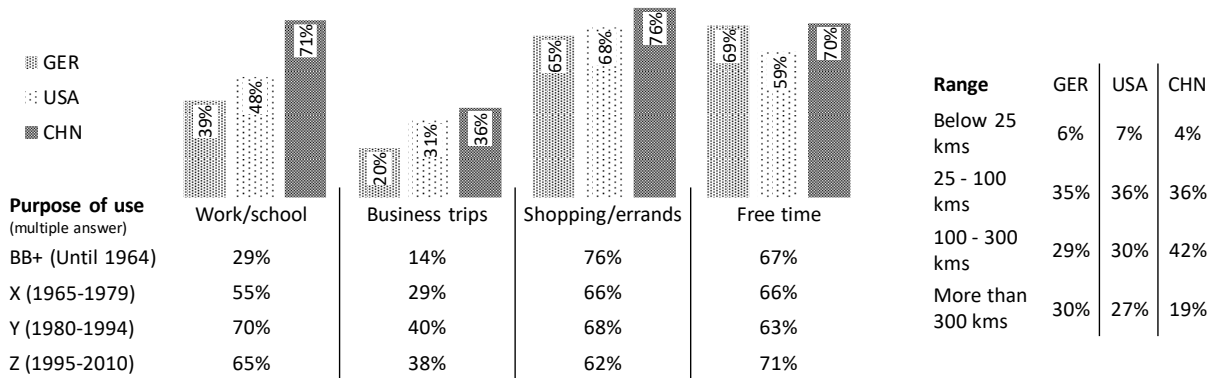


Fig. 5: Selected survey results on the type of trips

Considering possible business models for AVODs, the results shown in Fig. 6 indicate that 67 % of German users would only use it additionally while 73 % of Chinese users can actually imagine substituting their current means of transportation. Notwithstanding the above, the majority of all respondents expects the price to be similar to ride sharing, or even public transit for the oldest generation born before 1964. In total, a vast majority would not pay more than EUR 100 per month for AVOD usage, of which older respondents tend to have a lower willingness to pay (WTP). All have in common that they want to pay per distance travelled in the AVOD.

Substitution	GER	USA	CHN	Monthly WTP				
				Under EUR 50	EUR 50 to 100	EUR 100 to 250	Over EUR 250	
				BB+ (Until 1964)	39%	35%	12%	0%
instead	12%	23%	25%	X (1965-1979)	40%	39%	19%	3%
rather				Y (1980-1994)	23%	45%	27%	5%
instead	22%	26%	48%	Z (1995-2010)	37%	45%	16%	2%
				Payment type				
rather				BB+ (Vor 1964)	Per distance	Per duration	Per ride	Flat rate
additionally	47%	28%	22%	X (1965-1979)	34%	11%	25%	30%
additionally	20%	23%	5%	Y (1980-1994)	37%	15%	25%	23%
				Z (1995-2010)	49%	18%	15%	18%
					40%	15%	20%	26%

Fig. 6: Selected survey results on the usage

5 Discussion and Conclusion

In principle, it can be stated that the precise description of user preferences gained by our approach is proof for a high proficiency of the applied methodology. In conclusion, it is not surprising that there is no ideal vehicle concept which is in line with all requirements expressed by the respondents. Rather, we propose four different types of concepts which can address specific target user segments. In the following, we discuss the results with regard to the overall user acceptance of future AVODs.

As depicted in Fig. 7, current urban mobility systems consist of various solutions for different user mobility needs. When clustering these systems according to the type of ownership from private to public and the type of special equipment from functional to luxury, we see private cars and public transit as the two boundary points. In between, other hybrid means of transportation such as rather private car rental and car sharing offerings or rather public ride sharing and taxi cabs can be allocated along these dimensions. However, we do not allocate the future AVOD on a fixed spot within this system but propose different mobility concepts with corresponding business models: Fully equipped driverless cars as luxury concepts for private ownership, high-quality comfort shuttles for private usage or exclusive ride sharing, basic micro vehicles for public sharing purposes, and very functional people mover for public transit. However, this is a suggestion based on our study results and there might be other concepts in between that are likewise feasible.

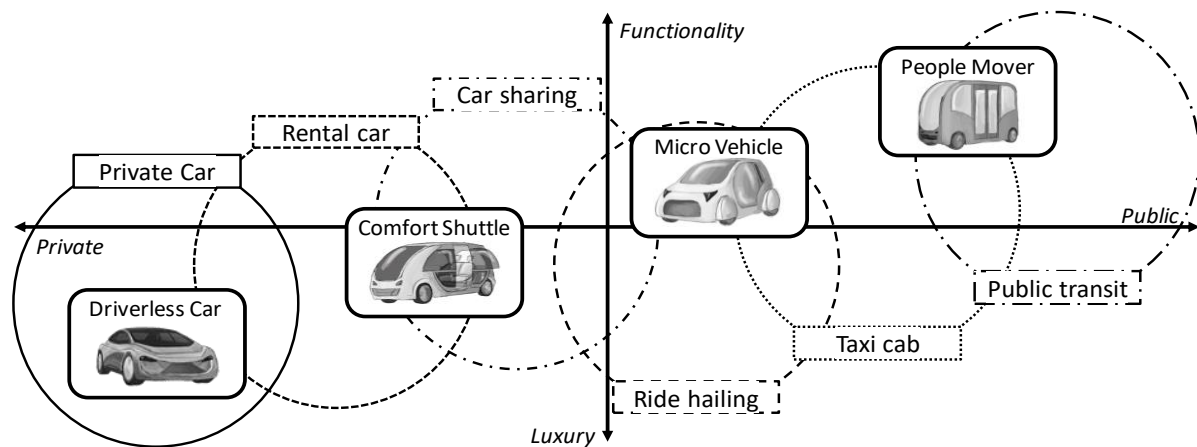


Fig. 7: Strategic positioning of AVOD concepts within the mobility system

The decisive factor in this context is costs. It will depend on the price development whether AVODs will be a high-priced mobility solution for exceptional cases, similar to current taxi cabs, or an affordable means of transportation for everyday use that might become a threat to public transit. Due to their high comfort and flexibility, it is expected that AVODs have the potential to both, push back public transit as well as encourage users to abandon their private cars.

In conclusion, the applied case study and the evaluation carried out are proof for the basic suitability of our approach to conceptualize potentially radical innovations. However, some critical aspects that result from the application of the methodology shall be reflected in the following.

Regarding the methodology's preparatory steps it needs to be taken into account that the personae used to develop hypotheses already influence the resulting concept. Thus, a careful selection is advised. In case of this study for instance, the utilization of European personae to ideate AVOD product requirements did not show a significant influence on the Chinese and US-American survey results. Yet, for other products a limited cultural validity can be possible. This ought to be considered when initially developing personae. Another important interim result is the evaluated data set of the user survey. In our case study, most answers show clear tendencies and allow for qualitative recommendations for the AVOD product concept. Moreover, distinctive features for certain cultural areas or age groups are proof for the informative value of our data, such as the great relevance of speed or safety belts for the German sample or a pronounced affinity for connectivity and smartphone usage among young respondents. However, a selection of more specific user groups leads to a substantial decrease in exploitable answers. Depending on the target group, a more extensive data collection is necessary.

Further, it must be noted that there are less controllable factors, such as the respondents' creativity that affect the quality and especially innovativeness of the product concept. Taking this restriction into account, our questionnaire contains preset answer options derived from the preceding expert workshop. Conversely, this limits the variety of possible answers. Therefore, a mixed method study design is advised to safeguard the results (see e.g., Greene et al. 1989; Östlund et al. 2011). In the present case study, a mixed method triangulation is applied to collect additional, qualitative data on the background to the user requirements. Yet, the validity for the Chinese and US-American data sample is limited as personal interviews were conducted in Germany only.

It is also notable that the online survey showed an unusually high proportion of respondents providing their feedback with additional ideas for the product concept in the optional text fields. The majority of all comments is in line with our hypotheses from the expert workshop which is another proof for the practicability of our approach in terms of active user integration. Besides, a concluding workshop with industry and academia experts demonstrated the general interest and usability of our study results.

Altogether, the primary goal of using our approach to develop early stage product concepts by enriching initial product ideas with qualitative user feedback can be considered achieved. The semantic product description gained from the cumulated survey results is comparatively easy to apply and to implement into the early stage innovation process. The product concept resulting from our

methodology enables to sketch out essential, characteristic features of the future product and to set a direction for subsequent design steps. For instance, our results indicate the largest customer group for a comfort shuttle similar type of AVOD concept that tends to be spacious and highly equipped with comfort and entertainment features.

One of the main challenges for the successful introduction of novel approaches in an industrial environment is to demonstrate the methodological value added, e.g. in terms of improved innovativeness. In this sense, we provide a procedural strategy for early stage product design with this contribution. Following on this, we see a further need for research to address the weak points mentioned above, to extend the methodology to the entire product development process, and to implement this into practice. To this end, it can be useful to enhance the explanatory power of the semantic product description with illustrations (see e.g., Elsen et al. 2012; Bao et al. 2018). Furthermore, the survey results do not always show clear preferences as answer options provided in the questionnaire were in most cases limited to two different technical implementations of a function. Thus, a formulation of more extensive selection options might be appropriate.

Acknowledgements

The research for this contribution was conducted in the course of the *Akzeptanzstudie ROBOCAB* funded by the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure within the Research Programme on Automation and Connectivity in Road Transport (funding no. 16AVF2023). Further, we want to thank our partners at ISOE – Institute for Social-Ecological Research for their support and conducting the qualitative interviews. The authors are responsible for the content of this publication.

References

- Abernathy and Utterback 1978 ABERNATHY, William; UTTERBACK, James: *Patterns of Industrial Innovation*. In: *Technology Review* 80 (1978), Nr. 7, p. 40–47
- Abrell et al. 2016 ABRELL, Thomas; PIHLAJAMAA, Matti; KANTO, Laura; VOM BROCKE, Jan; UEBERNICKEL, Falk: *The role of users and customers in digital innovation*. In: *Information & Management* 53 (2016), Nr. 3, p. 324–335
- Bao et al. 2018 BAO, Qifang; FAAS, Daniela; YANG, Maria: *Interplay of sketching & prototyping in early stage product design*. In: *International Journal of Design Creativity and Innovation* 6 (2018), 3-4, p. 146–168
- Bender and Gericke 2021 BENDER, Beate; GERICKE, Kilian: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2021
- Bosch-Sijtsema and Bosch 2015 BOSCH-SIJTSEMA, Petra; BOSCH, Jan: *User Involvement throughout the Innovation Process in High-Tech Industries*. In: *Journal of Product Innovation Management* 32 (2015), Nr. 5, p. 793–807
- Burova et al. 2018 BUROVA, Alisa; KELLING, Chelsea; HAKULINEN, Jaakko; KALLIONIEMI, Pekka; KESKINEN, Tuuli; TURUNEN, Markku; VÄÄTÄJÄ, Heli: *The Finnish You*. In: *Proceedings of the 22nd International Academic Mindtrek Conference*. New York : ACM, 2018, p. 182–191
- Carlgren 2013 CARLGRÉN, Lisa: *Identifying latent needs: towards a competence perspective on attractive quality creation*. In: *Total Quality Management & Business Excellence* 24 (2013), 11-12, p. 1347–1363
- Dewulf 2013 DEWULF, Kristel: *Sustainable Product Innovation: The Importance of the Front- End Stage in the Innovation Process*. In: COELHO, Denis (Hrsg.): *Advances in Industrial Design Engineering* : InTech, 2013

- Dincelli and Chengalur-Smith 2020 DINCELLI, Ersin; CHENGALUR-SMITH, InduShobha: *Choose your own training adventure*. In: *European Journal of Information Systems* (2020), p. 1–19
- Du Preez and Louw 2008 DU PREEZ, Niek; LOUW, Louis: A framework for managing the innovation process. In: KOCAOGLU, Dundar F. (Hrsg.): *Portland International Conference on Management of Engineering & Technology, 2008*. Piscataway : IEEE, 2008, p. 546–558
- Elsen et al. 2012 ELSÉN, Catherine; HÄGGMAN, Anders; HONDA, Tomonori; YANG, Maria: Representation in Early Stage Design. In: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences 2012*. New York : ASME, 2012, p. 737–747
- Flor et al. 2018 FLOR, M.; COOPER, Sarah; OLTRA, María: *External knowledge search, absorptive capacity and radical innovation in high-technology firms*. In: *European Management Journal* 36 (2018), Nr. 2, p. 183–194
- Florén et al. 2018 FLORÉN, Henrik; FRISHAMMAR, Johan; PARIDA, Vinit; WINCENT, Joakim: *Critical success factors in early new product development*. In: *International Entrepreneurship and Management Journal* 14 (2018), Nr. 2, p. 411–427
- Garcia and Calantone 2002 GARCIA, Rosanna; CALANTONE, Roger: *A critical look at technological innovation typology and innovativeness terminology: a literature review*. In: *Journal of Product Innovation Management* 19 (2002), Nr. 2, p. 110–132
- Greene et al. 1989 GREENE, Jennifer; CARACELLI, Valerie; GRAHAM, Wendy: *Toward a Conceptual Framework for Mixed-Method Evaluation Designs*. In: *Educational Evaluation and Policy Analysis* 11 (1989), Nr. 3, p. 255–274
- Herstatt et al. 2007 HERSTATT, Cornelius; LÜTHJE, Christian; LETTL, Christopher: Fortschrittliche Kunden zu Breakthrough-Innovationen stimulieren. In: HERSTATT, Cornelius; VERWORN, Birgit (Hrsg.): *Management der frühen Innovationsphasen*. Wiesbaden : Gabler, 2007, p. 61–75
- Kano et al. 1984 KANO, Noriaki; SERAKU, Nobuhiko; TAKAHASHI, Fumio; TSUJI; SHIN-ICHI: *Attractive Quality and Must-Be Quality*. In: *Journal of The Japanese Society for Quality Control* 14 (1984), Nr. 2, p. 147–156
- Kauppinen et al. 2016 KAUPPINEN, Sami; LUOJUS, Satu; LAHTI, Janne: Involving Citizens in Open Innovation Process by Means of Gamification. In: BJÖRK, Staffan; ERIKSSON, Eva (Hrsg.): *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*. New York : ACM, 2016, p. 1–4
- Körber et al. 2013 KÖRBER, Moritz; EICHINGER, Armin; BENGLER, Klaus; OLAVERRI-MONREAL, Cristina: User experience evaluation in an automotive context. In: *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium workshops*. Piscataway : IEEE, 2013, p. 13–18
- Krejcie and Morgan 1970 KREJCIE, Robert; MORGAN, Daryle: *Determining Sample Size for Research Activities*. In: *Educational and Psychological Measurement* 30 (1970), Nr. 3, p. 607–610
- Lauritzen and Karafyllia 2019 LAURITZEN, Ghita; KARAFYLLIA, Maria: *Perspective: Leveraging Open Innovation through Paradox*. In: *Journal of Product Innovation Management* 36 (2019), Nr. 1, p. 107–121
- Lee and Newcomb 1997 LEE, Mark; NEWCOMB, John: *Applying the Kano Methodology to Meet Customer Requirements: NASA's Microgravity Science Program*. In: *Quality Management Journal* 4 (1997), Nr. 3, p. 95–106

- Lettl 2007 LETTL, Christopher: *User involvement competence for radical innovation*. In: *Journal of Engineering and Technology Management* 24 (2007), 1-2, p. 53-75
- Lindemann 2009 LINDEMANN, Udo: *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009
- Long 2009 LONG, Frank: Real or Imaginary: The effectiveness of using personas in product design. In: *Irish Ergonomics Review*, 2009, p. 1–10
- McDermott and O'Connor 2002 MCDERMOTT, Christopher; O'CONNOR, Gina: *Managing radical innovation: an overview of emergent strategy issues*. In: *The Journal of Product Innovation Management* 19 (2002), Nr. 6, p. 424–438
- Meissner and Kotsemir 2016 MEISSNER, Dirk; KOTSEMI, Maxim: *Conceptualizing the innovation process towards the 'active innovation paradigm'—trends and outlook*. In: *Journal of Innovation and Entrepreneurship* 5 (2016), Nr. 1
- Michailidou et al. 2013 MICHAILIDOU, Ioanna; SAUCKEN, Constantin von; LINDEMANN, Udo: How to Create a User Experience Story, Bd. 8012. In: MARCUS, Aaron (Hrsg.): *Design, User Experience, and Usability. Design Philosophy, Methods, and Tools*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013, p. 554–563
- Norman and Verganti 2014 NORMAN, Donald; VERGANTI, Roberto: *Incremental and Radical Innovation: Design Research vs. Technology and Meaning Change*. In: *Design Issues* 30 (2014), Nr. 1, p. 78–96
- Östlund et al. 2011 ÖSTLUND, Ulrika; KIDD, Lisa; WENGSTRÖM, Yvonne; ROWA-DEWAR, Neneh: *Combining qualitative and quantitative research within mixed method research designs: a methodological review*. In: *International journal of nursing studies* 48 (2011), Nr. 3, p. 369–383
- Patrício et al. 2018 PATRÍCIO, Rui; MOREIRA, António; ZURLO, Francesco: *Gamification approaches to the early stage of innovation*. In: *Creativity and Innovation Management* 27 (2018), Nr. 4, p. 499–511
- Raviselvam et al. 2019 RAVISELVAM, Sujithra; SUBBURAJ, Karupppasamy; WOOD, Kristin; HÖLTTÄ-OTTO, Katja: *An Extreme User Approach to Identify Latent Needs*. In: *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences 2019*. New York : American Society of Mechanical Engineers, 2019
- Reichwald and Piller 2009 REICHWALD, Ralf; PILLER, Frank: *Interaktive Wertschöpfung*. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009
- Robbins and O'Gorman 2015 ROBBINS, Peter; O'GORMAN, Colm: *Innovating the innovation process: an organisational experiment in global pharma pursuing radical innovation*. In: *R&D Management* 45 (2015), Nr. 1, p. 76–93
- Rogers 2003 ROGERS, Everett: *Diffusion of innovations*. 5th ed. New York : Free Press, 2003
- Stock et al. 2017 STOCK, Tim; OBENAU, Michael; SLAYMAKER, Amara; SELIGER, Günther: *A Model for the Development of Sustainable Innovations for the Early Phase of the Innovation Process*. In: *Procedia Manufacturing* 8 (2017), p. 215–222
- Wachenfeld et al. 2015 WACHENFELD, Walther; WINNER, Hermann; GERDES, Chris; LENZ, Barbara; MAURER, M.; BEIKER, S.; FRAEDRICH, E.; WINKLE, T.: *Use-Cases des autonomen Fahrens*. In: MAURER, Markus; GERDES, Chris; LENZ, Barbara; WINNER, Hermann (Hrsg.): *Autonomes Fahren*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2015, p. 9–37
- Zhou et al. 2015 ZHOU, Feng; JIANXIN JIAO, Roger; LINSEY, Julie: *Latent Customer Needs Elicitation by Use Case Analogical Reasoning From Sentiment Analysis of Online Product Reviews*. In: *Journal of Mechanical Design* 137 (2015), Nr. 7

Methodische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven für eine belastungsgerechte Produktauslegung

Methodical Determination of Representative Load Spectra for a Load-Appropriate Product Design

Kevin Lucan¹, Bernd Bertsche¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart
kevin.lucan@ima.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch):

Die Forderung nach Leichtbau und der zunehmende Kostendruck bei der Entwicklung technischer Produkte betrifft auch sicherheitskritische Systeme, bei denen die Zuverlässigkeit eine essentielle Anforderung für die Produktentwicklung darstellt. Um zuverlässige und gleichzeitig ressourceneffiziente Produkte zu entwickeln, werden repräsentative Lastkollektive benötigt, die das Kundenverhalten und damit die Belastung im Feld repräsentieren. In der Praxis fehlen repräsentative Lastkollektive häufig, weshalb nach wie vor hohe Sicherheitsfaktoren in der Dimensionierung von Produkten Anwendung finden. In diesem Beitrag eine Methodik vorgestellt, die eine systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektive ermöglicht. Die entwickelte Methodik wurde für die Nutzfahrzeugsbremse angewendet, woraus ein Laststandard resultierte, der neben repräsentativen Lastkollektiven auch Leitfäden für die Zuverlässigkeitserprobung beschreibt. Das erfolgreiche Anwendungsbeispiel demonstriert, dass die Methodik eine systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven ermöglicht, die für die belastungsgerechte und damit ressourceneffiziente Auslegung von Produkten benötigt wird.

Keywords (deutsch):

Lastkollektive, Repräsentativ, Methodik

Abstract (English):

The demand for lightweight construction and the increasing cost pressure in the development of technical systems also affects safety-critical systems, where reliability is an essential requirement for product development. In order to develop reliable and at the same time resource-efficient products, representative load spectra are required that represent customer behavior and thus the load in the field. In practice, representative load spectra are often missing, therefore high safety factors are still used in the dimensioning of products. For this reason, a methodology is presented in this paper that enables a systematic determination of representative load spectra. The developed methodology was applied to the commercial vehicle brake, resulting in a load standard, describing representative load spectra and a guideline for reliability demonstration testing. This successful application demonstrates that the methodology enables a systematic determination of representative load spectra, which are required for the load-appropriate and thus resource-efficient design of products.

Keywords (English):

Load Spectra, Representative, Methodology

1 Motivation

Zum zunehmenden Zeit- und Kostendruck bei der Entwicklung technischer Produkte steht häufig die Forderung nach Leichtbauweise entgegen. Diesem Spannungsfeld sind auch sicherheitskritische Systeme mit ihren hohen Anforderungen an die Produktzuverlässigkeit ausgesetzt. Zur Entschärfung dieses Spannungsfeldes ist die Lastannahme für die Bauteildimensionierung entscheidend. Bei dieser ist darauf zu achten, dass die Belastbarkeit höher als die Belastung ist und sich deren Verteilungen nur so überlagern, dass die Zuverlässigkeitsanforderung erfüllt ist. In Bild 1 ist dies als geplante Dimensionierung dargestellt. Ist die tatsächlich im Feld auftretende Belastung allerdings höher als angenommen, führt die größere Überlagerung der beiden Verteilungen zu Ausfällen im Feld, was ebenfalls in Bild 1 dargestellt ist. Umgekehrt führt eine zu hohe Lastannahme zur Überdimensionierung und damit zu Ressourcenverschwendung. Um zuverlässige und gleichzeitig ressourceneffiziente Produkte zu entwickeln, müssen die angenommene und die tatsächliche Belastung möglichst übereinstimmen. Für eine belastungsgerechte Auslegung werden daher repräsentative Lastkollektive benötigt, die das Kundenverhalten und damit die Belastung im Feld repräsentieren.

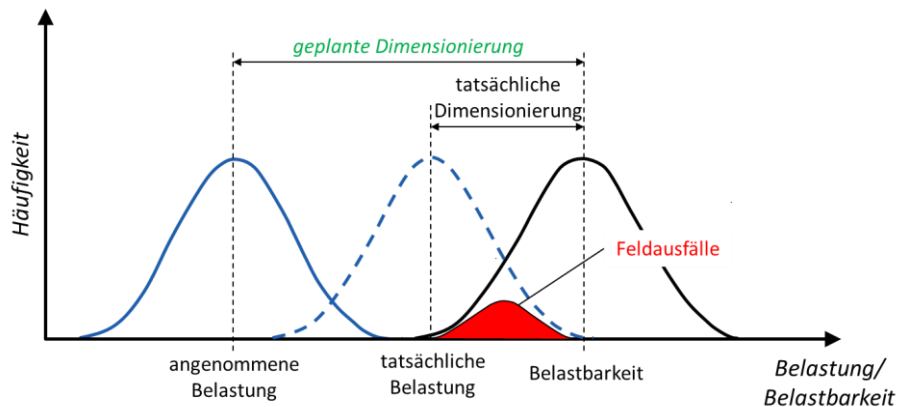


Bild 1: Feldausfälle aufgrund falscher Lastannahme

In der Praxis fehlen repräsentative Lastkollektive häufig, weshalb nach wie vor hohe Sicherheitsfaktoren in der Dimensionierung von Produkten Anwendung finden (Heuler und Frost 2011). Dieselbe Problemstellung bestand auch für die Nutzfahrzeugsbremse, die einer sehr großen Einsatzvielfalt unterliegt. So wird dasselbe Bremsendesign für Fern-, Verteiler-, Baustellen-, Bus- und Kommunalverkehr eingesetzt. Dabei kommen sowohl Fahrzeuge mit und ohne Trailer zum Einsatz, genauso wie mit und ohne Dauerbremsanlage. Außerdem beeinflussen z. B. der Fahrer oder auch die Umgebungsbedingungen die Lasten an der Radbremse. Durch diese Einsatzvariabilität wird deutlich, welche Komplexität für die Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven allein aus der Einsatzvariabilität resultiert. Hinzu kommt, dass die relevanten Lasten zu ermitteln, geeignete Klassier- und Klassifikationsverfahren festzulegen und Ausreißer bzw. Missbrauchsfälle zu identifizieren sind. Die am Beispiel der Nutzfahrzeugsbremse aufgezeigte Komplexität ist durch eine systematische Vorgehensweise zur Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven zu reduzieren, um die Verfügbarkeit von repräsentativen Lastkollektiven in der Praxis für eine belastungsgerechte Produktauslegung zu erhöhen.

2 Entwicklung der Methodik

Die Entwicklung der Methodik zur systematischen Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven orientierte sich an der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti (2009). Dabei wurde zunächst anhand einer Literaturrecherche das Forschungsziel und die übergeordnete For-

schungsfrage definiert. In der Deskriptiven Studie I wurde der Stand der Forschung analysiert und daraus Anforderungen an die Methodik definiert. Anhand dieser Anforderungen wurde die Methodik entwickelt und abschließend anhand des Anwendungsbeispiels Nutzfahrzeugbremse validiert. Nachfolgend wird eine kurze Übersicht über die Entwicklung der Methodik gegeben, bevor diese in Kapitel 3 detailliert vorgestellt wird.

Für die Definition der übergeordneten Forschungsfrage wurde eine Literaturrecherche im Bereich der Lastannahme und Zuverlässigkeitstechnik durchgeführt. Dabei wurden insbesondere Konzepte zur Lastkollektivermittlung, die Definition von repräsentativen Lastkollektiven und die notwendige Datengrundlage im Stand der Forschung betrachtet. Ergebnis der Recherche ist, dass es keine durchgängige und ganzheitliche Methodik zur Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven gibt, obwohl für Einzelaspekte der Lastkollektivermittlung Methoden und Verfahren in Lastannahme und Zuverlässigkeitstechnik existieren. Daher wurde nachfolgende übergeordnete Forschungsfrage formuliert:

„Wie müssen Methoden der Zuverlässigkeitstechnik und der Lastannahme verknüpft und in einer Methodik strukturiert werden, um die systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven zu ermöglichen?“

Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wurde der Stand der Forschung analysiert und auf Grundlage von dieser Analyse wurden funktionale und allgemeine Anforderungen an die Methodik definiert. Dafür wurden insbesondere auch Konzepte zur Lastkollektivermittlung, wie die 3-F-Methode (Küçükay 1990, Wagner 2017) oder der U Sim-Prozess (Streit et al. 2007, Eckstein 2017), analysiert. Des Weiteren wurde anhand der bestehenden Definitionen für repräsentative Lastkollektive herausgearbeitet, dass es in Abhängigkeit von Produkt- und Unternehmensstrategie verschiedene Zielsetzung hinsichtlich repräsentativer Lastkollektive in einer Methodik zu berücksichtigen gilt. Zusammengefasst wurden aufgrund der Analyse vom Stand der Forschung, die in Tabelle 1 dargelegten, funktionalen und allgemeinen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik definiert.

Tabelle 1: Funktionale und allgemeine Anforderung an Methodik

Funktionale Anforderungen	Allgemeine Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Zieldefinition für die Ermittlung repräsentativer Lastkollektive • Anwendbarkeit auf Gesamtsystem-, Subsystem- und Komponentenebene • Ermittlung der relevanten Lasten • Ermittlung der relevanten Einsatzarten • Messgrößen-Spezifikation • Auswahl des erforderlichen Klassierverfahren • Lastkollektivermittlung für Mess- und Betriebsdaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendbarkeit • Durchgängigkeit und Transparenz • Eindeutigkeit und Wiederholbarkeit • Ressourceneffizienz

Abgeleitet aus diesen Anforderungen und dem bestehenden Stand der Forschung sind die nachfolgenden Inhalte für die Methodik erforderlich:

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Systemanalyse • Lastanalyse an Systemgrenze • Ermittlung der relevanten Lasten • Einsatzartensammlung • Vorgehensweise für Umgang mit Missbrauch • Ermittlung der relevanten Einsatzarten | <ul style="list-style-type: none"> • Zieldefinition der Lastkollektivermittlung • Auswahl der Datengrundlage • Spezifikation der notwendigen Daten • Datenaufbereitung • Einsatz-Klassifikation • Lastkollektivermittlung |
|--|---|

Um Eindeutigkeit, Durchgängigkeit und Transparenz der Methodik sicherzustellen, werden diese Inhalte auf die vier in Tabelle 2 dargestellten Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase "System- und Lastanalyse" wird die Systemabgrenzung und die Lastermittlung durchgeführt. Hauptziel dabei ist die

Bestimmung der relevanten Lasten, wofür Produktinformationen sowie Vor- und Expertenwissen benötigt werden. In Phase 2 "Nutzraumanalyse" werden die Einsatzarten gesammelt und der relevante Nutzraum bestimmt, wofür aus Phase 1 die relevanten Lasten benötigt werden. In der dritten Phase "Zielsetzung und Datenspezifikation" wird das Ziel der Lastkollektivermittlung definiert. In Abhängigkeit von dieser Zielsetzung und des relevanten Nutzraumes wird die erforderliche Datengrundlage für die Lastkollektivermittlung abgeleitet. Außerdem sind die erforderlichen Messgrößen für die Erfassung der relevanten Lasten zu definieren. In der Phase 4 "Repräsentative Lastkollektivermittlung" werden die repräsentativen Lastkollektive aus den Mess- und Betriebsdaten ermittelt.

Tabelle 2: Aufbau der Methodik

1. Phase: System- und Lastanalyse	<u>Ziel:</u> Ermittlung Systemgrenze und relevante Lasten <u>Input:</u> Produktinformationen, Vor- und Expertenwissen <u>Output:</u> Systemgrenze und relevante Lasten
2. Phase: Nutzraumanalyse	<u>Ziel:</u> Ermittlung des relevanten Nutzraumes <u>Input:</u> Relevante Lasten, Vor- und Expertenwissen <u>Output:</u> Relevanter Nutzraum
3. Phase: Zielsetzung und Datenspezifikation	<u>Ziel:</u> Definition der notwendigen Daten <u>Input:</u> Systemgrenze, Relevante Lasten, Nutzraum <u>Output:</u> Notwendige Daten und Messgrößen
4. Phase: Repräsentative Lastkollektivermittlung	<u>Ziel:</u> Lastkollektivermittlung <u>Input:</u> Mess- und Betriebsdaten <u>Output:</u> Repräsentative(s) Lastkollektiv(e)

3 Methodik zur Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven

Die entwickelte Methodik ist wie zuvor beschrieben in vier sequentielle Phasen aufgeteilt, die nachfolgend in den Unterkapiteln 3.1 bis 3.4 im Detail erläutert werden.

3.1 Phase 1: System und Lastanalyse

Das Ziel der ersten Phase der Methodik ist die Festlegung der Systemgrenze für die angreifenden Lasten und die Ermittlung der relevanten Lasten an dieser Grenze. Hierfür sind die drei in Bild 2 dargestellten Schritte durchzuführen.

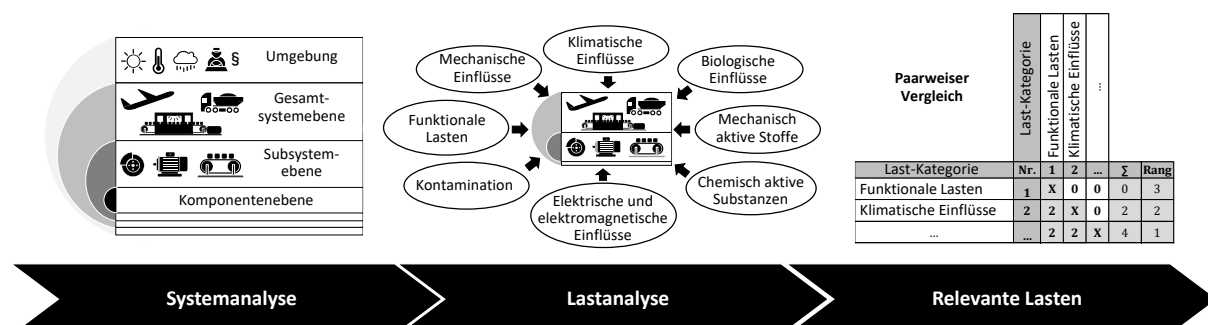


Bild 2: Phase 1 – System und Lastanalyse

Zunächst ist in der Systemanalyse festzulegen welcher Systemebene das zu betrachtenden Produkt zuzuordnen ist. Dabei ist zwischen Komponenten-, Subsystem- und Gesamtsystemebenen zu unterscheiden. Für die Betrachtung umgebungsbedingter Lasten auf das Produkt ist die Umgebung als übergeordnete Ebene ebenfalls zu berücksichtigen. Aus der Umgebung resultieren nicht nur klimatische Einflussgrößen, die die Lebensdauer von Produkten beeinflussen, sondern auch der Einfluss durch den Gesetzgeber und den Kunden auf die Nutzung des Produkts. Um im zweiten Schritt dieser Phase alle potentiell relevanten Lasten zu sammeln, muss außerdem eine exakte Systemgrenze des Produkts festgelegt werden, an der die Lastanalyse durchgeführt wird. Dafür wird ein Blockdiagramm erstellt, anhand dessen die exakte Systemgrenze auf Komponentenebene festgelegt wird. Dabei werden auch Schnittstellen zwischen den Komponenten oder Subsystemen ersichtlich, die für die Lastanalyse zu berücksichtigen sind. Im zweiten Schritt der Phase ist an der Systemgrenze zu analysieren welche Lasten auf das Produkt einwirken. Dabei kann auf das vorhandene Expertenwissen aus Vorgängerprodukten sowie die bereits ermittelten Schnittstellen aus der Blockdiagrammerstellung zurückgegriffen werden. Zum anderen ist es erforderlich bestehende Standards zu berücksichtigen, wie bspw. die DIN EN 60721-1 „Klassifikation von Umweltbedingungen“ (1997). Diese Norm umfasst eine umfangreiche Sammlung an umweltbedingte Einflussgrößen, die anhand von Lastkategorien gruppiert sind. So sind neben klimatischen Größen u. a. auch biologische, elektrische und elektromagnetische Einflussgrößen aufgeführt. Für jede der aufgeführten Größen ist zu prüfen, ob sie an der Systemgrenze des Produktes auftritt und damit einen Einfluss auf die Lebensdauer des Produktes bestehen könnte. Da die Anzahl an Lasten insbesondere unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen sehr groß werden kann, nimmt auch der Aufwand für die Ermittlung der repräsentativen Lastkollektive zu. Auf der anderen Seite bestimmen zumeist nur einige kritische Ausfallmechanismen und die dazugehörigen Lasten die Produktzuverlässigkeit maßgeblich. Daher können die potentiell relevanten Lasten auf die tatsächlich relevanten Lasten für die Zuverlässigkeit reduziert werden. Hierfür wird die Methode des paarweisen Vergleiches gewählt um ein Ranking der gesammelten Lasten auf Grundlage von Expertenwissen zu bestimmen. Anhand der Bedeutung der Lasten erfolgt die Festlegung der relevanten Lasten, die im weiteren Verlauf der Methodik berücksichtigt werden.

3.2 Phase 2: Nutzraumanalyse

In Phase 2 werden alle relevanten Einsatzarten und damit der relevante Nutzraum für die Lastkollektivermittlung bestimmt. Hierfür werden neben dem Expertenwissen die relevanten Lasten aus Phase 1 benötigt. Diese Phase teilt sich, wie in Bild 3 dargestellt, in drei Schritte auf. Dabei müssen zunächst alle Einsatzarten gesammelt werden, bevor auf Grundlage einer Verknüpfung der relevanten Lasten mit den Einsatzarten der relevante Parameterraum ermittelt werden kann. Außerdem ist hierfür der Umgang mit Missbrauchsfällen zu definieren.

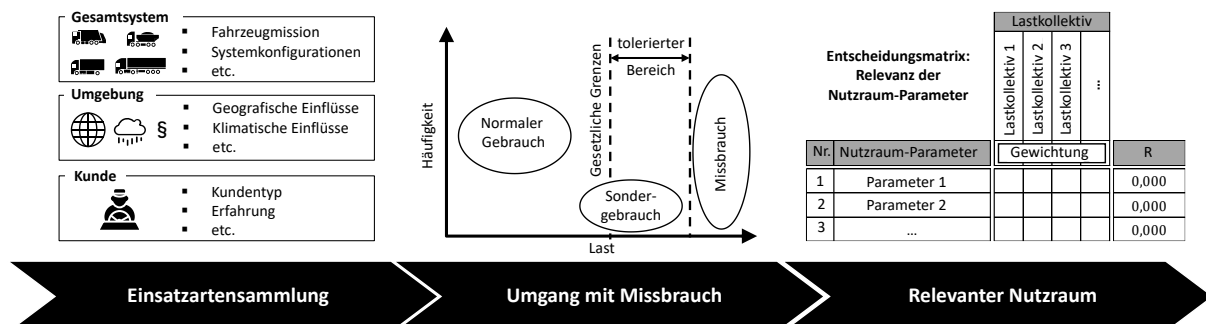


Bild 3: Phase 2 – Nutzraumanalyse

Die Sammlung der Einsatzarten ist ein essentieller Schritt bei der Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven, denn hier wird festgelegt welche Einsatzarten von den Lastkollektiven beschrieben werden müssen. Daher ist eine vollständige Sammlung aller Einsatzarten sicherzustellen. Hierfür wird in dieser

Methodik die 3F-Methode nach Küçükay (1990) verallgemeinert angewendet. In der 3F-Methode werden die Einsatzarten von Fahrzeugen systematisch anhand der Nutzraum-Parameter: Fahrzeug, Fahrumgebung und Fahrer beschrieben. Durch die Kombination der fahrzeug-, fahrumgebungs- und fahrerabhängigen Parameter wird ein mehrdimensionaler Parameterraum aufgespannt, der alle Einsatzarten beinhaltet. Diese systematische Ermittlung der Einsatzarten wird für diese Methodik verallgemeinert, um neben Fahrzeugen auch andere Produktkategorien zu adressieren. Daher werden allen Nutzraum-Parameter, die das Gesamtsystem, die Umgebung und den Kunden beschreiben in diesem Schritt gesammelt. Dafür kann bspw. auf Expertenwissen, Kundenbefragungen oder bestehenden Richtlinien zurückgegriffen werden.

Produkte werden von den Kunden jedoch nicht immer entsprechend des bestimmungsgemäßen Gebrauchs betrieben, was größere und häufigere Lasten aber auch gänzlich andere Lasten zur Folge haben kann. Generell ist hier zwischen normalem Gebrauch, Sondergebrauch und Missbrauch zu unterscheiden. Normaler Gebrauch entspricht dabei dem bestimmungsgemäßen Gebrauch und ist dadurch gekennzeichnet, dass die Lasthöhen im normalen Bereich bei gleichzeitig großer Häufigkeit liegen. Sondergebrauch hingegen bewegt sich an der Grenze des bestimmungsgemäßen Gebrauchs und überschreitet diese auch. Allerdings wird ein solcher Gebrauch von Herstellern häufig toleriert, weshalb sich ein tolerierter Bereich ergibt, siehe Bild 3. Missbrauch hingegen übersteigt sowohl gesetzliche Grenzen als auch den Toleranzbereich vom Hersteller. Missbrauchsfälle müssen daher im zweiten Schritt der Methodik identifiziert und aus dem Nutzraum ausgeschlossen werden.

Der um den Missbrauch reduzierten Nutzraum wird im letzten Schritt von Phase 2 weiter reduziert indem bewertet wird, wie stark sich die Nutzraum-Parameter auf relevanten Lasten auswirken. Für die Lastkollektivermittlung sind nur die Parameter des Nutzraumes relevant, die sich auf die Lastkollektive auswirken. Wirkt sich ein Parameter nicht auf ein Lastkollektiv aus kann er vernachlässigt werden. Für die Bewertung des Effektes eines Nutzraum-Parameters auf die zu ermittelnden Lastkollektive wird die Bewertungsmethode der Entscheidungsmatrix in diesem Schritt angewendet. Dabei wird der Effekt der Nutzraum-Parameter auf die Lastkollektive unter Anwendung von Expertenwissen mit einer Skala von „1=sehr geringer Effekt“ bis „5=sehr großer Effekt“ bewertet. Dabei muss neben der Höhe auch die Häufigkeit der Lastamplitude in der Bewertung berücksichtigt werden. Ergebnis der Entscheidungsmatrixmethode ist ein Ranking der Nutzraumparameter anhand dessen der Nutzraum auf die relevanten Parameter reduziert werden kann.

3.3 Phase 3: Zielsetzung und Datenspezifikation

In Phase 3 wird die Zielsetzung der Lastkollektivermittlung, die dafür notwendige Datengrundlage und Messgrößen definiert. Dafür muss in Abhängigkeit von der Zielsetzung festgelegt werden ob Mess- oder Betriebsdaten für die Lastkollektivermittlung benötigt werden. Außerdem müssen die notwendigen Datensätze in Abhängigkeit des relevanten Nutzraumes und die notwendigen Messgrößen festgelegt werden.

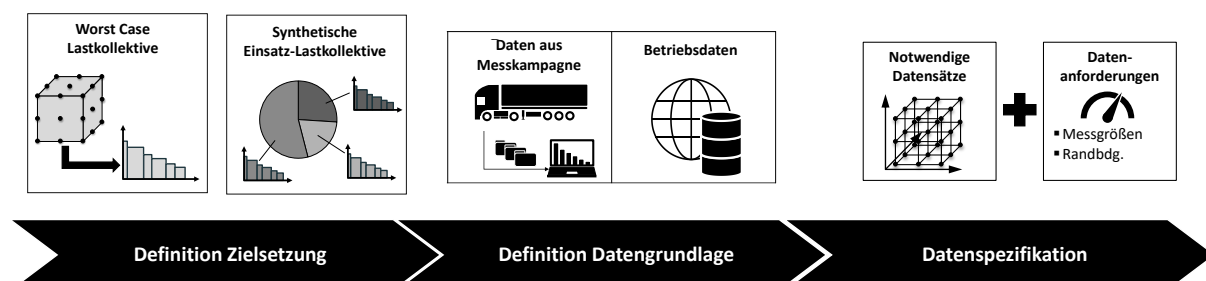


Bild 4: Phase 3 – Zielsetzung und Datenspezifikation

Wesentlich für eine belastungsgerechte Produktauslegung ist die Festlegung der Zielsetzung bei der Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven. Dabei hängt die passende Zielsetzung neben der Einsatzvielfalt eines Produktes in verschiedenen Märkten auch von der Unternehmensstrategie bei der

Produktplatzierung ab. Soll bspw. nur eine Produktauslegung erfolgen, die alle Märkte und Einsatzarten abdeckt, so ist es erforderlich ein Worst Case Lastkollektiv basierend auf den unterschiedlichen Einsatzarten in den verschiedenen Märkten zu ermitteln. Dies hat den Vorteil, dass der Messaufwand auch bei großen Nutzräumen gering sein kann, vorausgesetzt die Worst Case Anwendung ist bekannt. Dann reicht die Lastkollektivermittlung für diese Worst Case Anwendung aus. Wird das Produkt jedoch unterschiedlich stark belastet, resultiert für einen Großteil der Anwendungen eine Überdimensionierung. Kann eine Überdimensionierung nicht in Kauf genommen werden, so müssen repräsentative Lastkollektive für die wesentlichen Einsatzklassen eines Produktes ermittelt werden. Dies hat den Vorteil, dass ausgehend von einem Produktdesign Entwicklungspotenziale für weitere belastungsgerecht ausgelegte Produktvarianten identifiziert werden können. Außerdem können Feldprognosen für verschiedene Einsatzklassen durchgeführt werden, was auch gezielt Rückrufaktionen von kritischen Einsatzklassen ermöglicht.

Im Gegensatz zu einer Worst Case Lastkollektivermittlung ist es natürlich deutlich aufwendiger repräsentative Lastkollektive je Einsatzklasse zu ermitteln. Deshalb muss bereits im Vorfeld einer Messkampagne geprüft werden, ob ähnliche Einsatzklassen zusammenzulegen sind und wie bei einer Betriebsdatenanalyse die Einsatzklassen identifiziert werden können. Dritte Zielsetzung sind synthetische Einsatz-Lastkollektive, die synthetisch aus Basiskollektiven und einer Einsatzverteilung ermittelt werden. Ein plakatives Beispiel hierfür ist der PKW, wofür Basiskollektive für Stadt-, Landstraßen-, Autobahn- und Offroad-Verkehr ermittelt und entsprechend der Verkehrsverteilung für unterschiedliche Kundengruppen superpositioniert werden können. Diese Zielsetzung hat den Vorteil, dass repräsentative Lastkollektive für jede erdenkliche Kundengruppe synthetisch erzeugt werden können. Die Vor- und Nachteile der geschilderten Zielsetzungen sind nachfolgend in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der drei wesentlichen Zielsetzungen

Worst Case Lastkollektiv	<ul style="list-style-type: none"> + Geringer Aufwand auch bei großen Nutzräumen + Einfache Anwendung des Lastkollektives - Gefahr der Überdimensionierung
Lastkollektiv je Einsatzklasse	<ul style="list-style-type: none"> + Vermeidung von Überdimensionierung + Identifizierung von Entwicklungspotenzialen + Anwendungsspezifische Feldprognose + Gezielter Rückruf von kritischen Einsatzklassen - Aufwand steigt mit zunehmender Anzahl von Einsatzklassen
Synthetische Einsatz-Lastkollektive	<ul style="list-style-type: none"> + Ableitung der Lastkollektive für jede Einsatzklasse + Vermeidung von Überdimensionierung + Identifizierung von Entwicklungspotenzialen + Anwendungsspezifische Feldprognose + Gezielter Rückruf von kritischen Einsatzklassen - Zusätzliche Ermittlung der Einsatzverteilung notwendig

Nach der Definition der Zielsetzung muss in Abhängigkeit von dieser und des abzudeckenden Nutzraumes die notwendige Datenbasis festgelegt werden. Hierfür muss zunächst festgelegt werden ob Betriebs- oder Messdaten verwendet werden sollen. Dabei müssen folgende Punkte in Betracht gezogen werden:

- Verfügbarkeit und Qualität von Betriebsdaten
- Relevanter Nutzraum und Lasten
- Zielsetzung der Lastkollektivermittlung
- Hersteller-Kunden-Beziehung
- Personal, Budget und Zeitplan

Anschließend ist die notwendige Datenbasis mitsamt aller erforderlichen Messgrößen und Randbedingungen festzulegen.

3.4 Phase 4: Repräsentative Lastkollektivermittlung

In Phase 4 erfolgt die Datenauswertung und die Ermittlung der repräsentativen Lastkollektiven in den in Bild 5 dargestellten Schritten. Dafür sind Mess- oder Betriebsdaten erforderlich, die zunächst aufzubereiten sind. Nach der Datenaufbereitung sind die Datensätze den definierten Einsatzklassen aus der Zielsetzung in der Einsatzklassifikation zuzuweisen. Abschließend werden die repräsentativen Lastkollektive ermittelt und validiert.

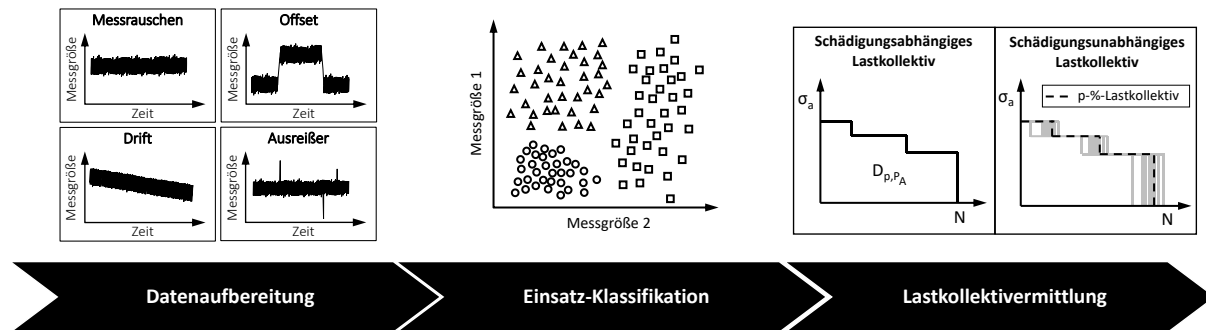


Bild 5: Phase 4 – Repräsentative Lastkollektivermittlung

Im ersten Schritt der Datenanalyse gilt es die Daten auf Messfehler zu prüfen. Dabei sind die Messsignale nicht nur auf Vollständigkeit zu prüfen, sondern auch hinsichtlich der Fehlerbilder: Messrauschen, Messsignaldrift, Offsets, Ausreißer und dem zeitlichen Versatz zwischen den Messsignalen. Ist eine Korrektur dieser Messfehler unmöglich, sind einzelne Messsignale oder Datensätze aus der weiteren Analyse auszuschließen. Außerdem ist die gesamte Datenbasis auf unplausible Datensätze zu prüfen und aus dieser zu entfernen.

Nach der Datenaufbereitung müssen die aufgezeichneten Datensätze den festgelegten Einsatzklassen zugewiesen werden. Dies kann z. B. unter Verwendung von Merkmalen geschehen, anhand derer die Datensätze eindeutig einer Klasse zugewiesen werden können. Als Beispiel hierfür wird im Anwendungsbeispiel erläutert, wie Nutzfahrzeugklassen aufgrund von Achskonfiguration, Chassis und der Durchschnittsgeschwindigkeit definiert und die vorhandenen Datensätze diesen Klassen zugeteilt wurden. Kann anhand von Merkmalen keine eindeutige Klassenzuordnung erfolgen, können mit der Klassifikation und dem Clustering auch zwei Methoden aus dem Data-Mining für die Einsatzklassifikation verwendet werden. Beim Einsatz von Klassifikationsverfahren werden die Datensätze aufgrund eines Klassifikationsmodells den gesuchten Klassen zugeordnet. Dafür muss zunächst das Klassifikationsmodell auf Grundlage von eindeutig zugeordneten Datensätzen antrainiert werden, bevor die unbekannteren Datensätze aufgrund des antrainierten Modells eindeutig identifiziert werden können (Han et al. 2012). Beim Clustering hingegen ist ein Training mit vorab bekannten Klassen nicht erforderlich, da das Clustering Klassen anhand der natürlichen Struktur der Datensätze bestimmt. Dafür kommen hierarchische und partitionierende Verfahren zum Einsatz, die Datensätze aufgrund ihrer Distanz zu den Clusterzentren diesen zuweisen (Härdle et al. 2015). Die Clusteranalyse ist bei der Lastkollektivermittlung insbesondere dann von Vorteil, wenn unbekannt ist, wie viele signifikant unterschiedliche Klassen für eine belastungsgerechte Dimensionierung erforderlich sind. Außerdem können Ausreißer anhand der Clusteranalyse identifiziert und aus der Datenbasis ausgeschlossen werden.

Auf die Einsatzklassifikation folgt die Lastkollektivermittlung, bei der zunächst das passende Klassierverfahren zu wählen ist. Für diese Wahl ist zu untersuchen, ob die Frequenz, die Amplitude oder die Zeitdauer für die Schädigung des Produktes maßgeblich verantwortlich ist. Dementsprechend sind frequenz-, amplituden- oder zeitbasierte Zählverfahren für die Lastkollektivermittlung zu wählen. Sind die Lastkollektive für jeden Datensatz ermittelt, sind daraus die repräsentativen Lastkollektive für die definierten Einsatzklassen zu ermitteln. Dabei muss ein Lastkollektiv ermittelt werden, das ein definiertes Quantil an Kundeneinsätzen abdeckt. Dies kann bspw. für ein amplitudenbasiertes Lastkollektiv rein auf Basis der Häufigkeiten der Lastamplituden oder auf Grundlage eines Lebensdauermodells und einer Schädigungsrechnung erfolgen. Bei letzterem wird für jedes Lastkollektiv ein Schädigungswert

basierend auf dem Lebensdauermodell berechnet. Anhand der Schädigungswerte wird dann das Lastkollektiv das $q\%$ der Kundeneinsätze abdeckt als repräsentatives Lastkollektiv bestimmt. Dies hat den Nachteil, dass das Lebensdauermodell bekannt sein muss und sich dieses auch nicht maßgeblich verändern darf. Erfolgt durch eine Weiterentwicklung des Produktes eine signifikante Änderung des Lebensdauermodells, muss neben dem Lebensdauermodell auch das repräsentative Lastkollektiv neu bestimmt werden. Um diese Problemstellung zu umgehen, kann auch nur aufgrund der Häufigkeiten der Lastamplituden ein repräsentatives Lastkollektiv bestimmt werden. Dieses ist dann zwar konservativer einzuschätzen, bleibt jedoch auch für ein neues Lebensdauermodell repräsentativ. Abschließend sollten die ermittelten Lastkollektive anhand einer kleinen Messkampagne im Betrieb beim Kunden plausibilisiert und validiert werden.

4 Repräsentative Lastkollektive für die Nutzfahrzeugbremse

Die im vorigen Kapitel beschriebene Methodik wurde am Beispiel der Nutzfahrzeugbremse angewendet. Wie einleitend geschildert unterliegt die Nutzfahrzeugbremse einem breiten Anwendungsspektrum, das zu einer unterschiedlich stark ausgeprägten Belastung resultiert. Da der Branche keine standardisierte Beschreibung dieser Belastungen zur Verfügung steht, wurde der Arbeitskreis „Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes“ (AK CV-Brakes) gegründet. Ziel dieses Arbeitskreises war die Entwicklung eines Laststandards für eine belastungsgerechte Auslegung und die Erprobung der Nutzfahrzeugbremse. Der Arbeitskreis setzte sich dabei über einen Zeitraum von drei Jahren aus den nachfolgenden Teilnehmern zusammen: BPW, DAF Trucks, Daimler, Haldex, IMA, IVECO, Knorr-Bremse, MAN, Meritor, SAF-Holland und WABCO. Aufgabe der Industrie-Teilnehmer war das Bereitstellen der fachlichen Expertise bezüglich Nutzfahrzeugtechnik, insbesondere der Bremssysteme, sowie das zur Verfügung stellen der benötigten Daten für die Lastkollektivermittlung.

Das Bremssystem von Nutzfahrzeugen ist als pneumatisch betätigte Scheiben- oder Trommelbremse mit ggfs. einer Dauerbremsanlage ausgeführt. Dabei werden die Funktionen der Betriebs- und der Feststellbremse realisiert. Außerdem ist für den Ausfall der Betriebsbremse die Funktion der Hilfsbremsanlage erforderlich, um auch in diesem Fall das Fahrzeug abbremsen zu können. Um die erforderliche Bremskraft zu erzeugen werden Betriebsbremszylinder verwendet, die den pneumatischen Bremsdruck in eine Betätigungskraft wandeln. Im Fall der Feststellbremse wird die notwendige Bremskraft in einem Federspeicherzylinder generiert. In Phase 1 der Methodik wurde die Nutzfahrzeugbremse analysiert und die relevanten Lasten bestimmt, bevor in Phase 2 der relevante Nutzraum ermittelt wurde. Das Vorgehen und die Ergebnisse von Phase 1 und 2 sind im Beitrag von Lucan et. al (2017) ausführlich beschrieben und werden daher hier nur kurz zusammengefasst. Das zu betrachtende System der Nutzfahrzeugbremse besteht aus der Radbremse, die als Trommel- oder Schiebenbremse ausgeführt sein kann, sowie dem Betriebsbrems- und dem Feststellbremszylinder. Die relevanten Lasten sind die Klemmkraft und das Bremsmoment, die jeweils unterschiedliche Schäden an den Komponenten der Nutzfahrzeugbremse induzieren. Andere Lasten werden aufgrund ihrer deutlich geringeren Bedeutung für die Auslegung der Nutzfahrzeugbremse nicht weiter betrachtet. Der relevante Nutzraum für die Lastkollektivermittlung der Nutzfahrzeugbremse setzt sich aus den nachfolgend aufgeführten system-, umgebungs- und fahrerabhängigen Parametern zusammen:

- Fahrzeugmission
- Straßentypen
- Gesamtgewicht
- Fahrer
- Verkehrsdichte
- Dauerbremsystem
- Zylindergröße
- Zylindertyp
- Systemdruck
- Topographie

Auf Grundlage dieser Parameter und der relevanten Lasten wurde zu Beginn von Phase 3 die Zielsetzung der Lastkollektivermittlung festgelegt. Da die zu bestimmenden Lastkollektive auf unterschiedliche Bremsendesigns anwendbar sein müssen, sind die Lastkollektive designunabhängig zu bestimmen. Dies bedeutet, dass die Ermittlung rein auf Basis der Häufigkeit der Lastamplituden erfolgt. Des Weiteren wurde festgelegt, dass die Lastkollektive 99% der Kunden abdecken sollen. Um auch adressieren zu können, dass nicht jede Radbremse eine Feststellbremse besitzt und auch der Überlastfall von der

Architektur des Bremssystems abhängt, wurden synthetische Einsatzlastkollektive als Zielsetzung festgelegt. Dies hat den Vorteil das Parkbrems- und Überlastanteil in Abhängigkeit des tatsächlich verwendeten Bremssystems berücksichtigt werden können, was für eine differenzierte Betrachtung der Belastung und damit für eine belastungsgerechte Dimensionierung erforderlich ist. Für diese Zielsetzung sind die Basiskollektive: Betriebsbremsmodul, Vorwärtsfahrtmodul, Rückwärtsfahrtmodul, Parkbremsmodul und Überlastmodul zu bestimmen. Diese sind dann, wie links in Bild 6 für die Klemmkraft dargestellt, anhand von Leitfäden zu superpositionieren (Lucan und Bertsche 2019). So sind für eine Sattelzugmaschine an der Hinterachse das Betriebsbremsmodul, das Parkbremsmodul und das Überlastmodul zu superpositionieren, was rechts in Bild 6 schematisch dargestellt ist.

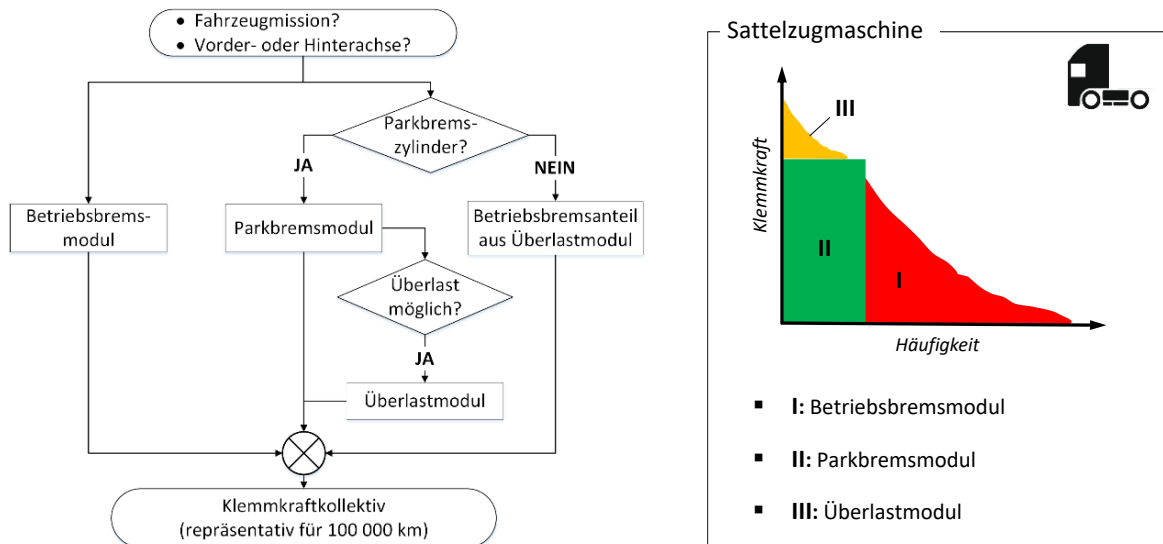


Bild 6: Synthese von Basiskollektiven für die Klemmkraft

Als relevante Fahrzeugmissionen wurden Fernverkehr, Distributionsverkehr, Baustellenverkehr, Kommunalverkehr, Stadtbus und Trailer vom AK CV-Brakes identifiziert. Die für die Datenanalyse erforderlichen Messgrößen und Randbedingungen für die Lastkollektivermittlung sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Randbedingungen sind dabei notwendig für die Identifikation der Fahrzeugmissionen.

Tabelle 4: Datenanforderung für Lastkollektivermittlung

Messgrößen	Randbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsbremsdruck – Vorderachse • Betriebsbremsdruck – Hinterachse • Parkbremsbetätigungen • Fahrzustand • Fahrtrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Radformel • Durchschnittsgeschwindigkeit

Für diese Datenanforderungen wurden 10 000 Datensätze aus dem Feld im AK CV-Brakes gesammelt. Außerdem wurden zur anschließenden Validierung der Lastkollektive eine Messkampagne mit ca. 30 Fahrzeugen im Feld beim Kunden durchgeführt. Die Einsatzklassifikation erfolgte merkmalsbasiert anhand der in Tabelle 5 definierten Fahrzeugmissionen. Da für Trailer keine ausreichende Datenbasis vorhanden war mussten ebenfalls Nutzfahrzeugdaten verwendet werden. Dafür wurden Datensätze von Sattelzugmaschinen verwendet, die entsprechend der Radformel dem Fernverkehr oder dem Baustellenverkehr zuzuordnen sind. Denn für den reinen Fernverkehr kann von nur einer angetriebenen Achse ausgegangen werden, wohingegen bei Offroad Missionen von mehr als einer angetriebenen Achse ausgegangen werden muss.

Tabelle 5: Merkmalsbasierte Einsatzklassifikation

Mission	Radformel	Ø-Geschwindigkeit
Fernverkehr	Sattelzugmaschine: 4x2, 6x2	Keine Einschränkung
Regionaler Verteiler	Chassis: 4x2, 6x2	< 40 km/h
Baustelle/Offroad	Chassis: 4x4, 6x4, 6x6, 8x4, 8x6, 8x8	Keine Einschränkung
Kommunalverkehr	Müllsammelr: 4x2, 6x2, 6x4, 8x2	Keine Einschränkung
Stadtbus	Chassis: 4x2	< 40 km/h
Semitrailer Fernverkehr	Semitrailer an Stallzugmaschine mit: 4x2, 6x2	Keine Einschränkung
Semitrailer Offroad	Semitrailer an Stallzugmaschine mit: 4x4, 6x4, 6x6, 8x4	Keine Einschränkung

Die in Bild 7 dargestellten Basiskollektive für die Nutzfahrzeuggesteuer wurden für die standardisierte Laufleistung von 100 000 km ermittelt, sodass die Fahrzeughersteller die Anforderungen an die Nutzfahrzeuggesteuer in Abhängigkeit von ihren Lebensdaueranforderungen individuell definieren können. Es zeigt sich, dass die Nutzfahrzeuggesteuer in Abhängigkeit der Fahrzeugmission unterschiedlich stark über die Laufleistung beansprucht wird. Die Bremse eines Müllfahrzeuges erfährt bspw. bezogen auf die Laufleistung mehr Bremsbetätigungen als eine Bremse, die im Fernverkehr im Einsatz ist. Bei dieser Bewertung muss allerdings auch berücksichtigt werden, dass der Kommunalverkehr über die gesamte Lebensdauer keine annähernd vergleichbare Laufleistung wie der Fernverkehr erreicht. Die Plausibilität der ermittelten Lastkollektive konnte im Abgleich mit der durchgeführten Messkampagnen bestätigt werden (Lucan und Bertsche 2019).

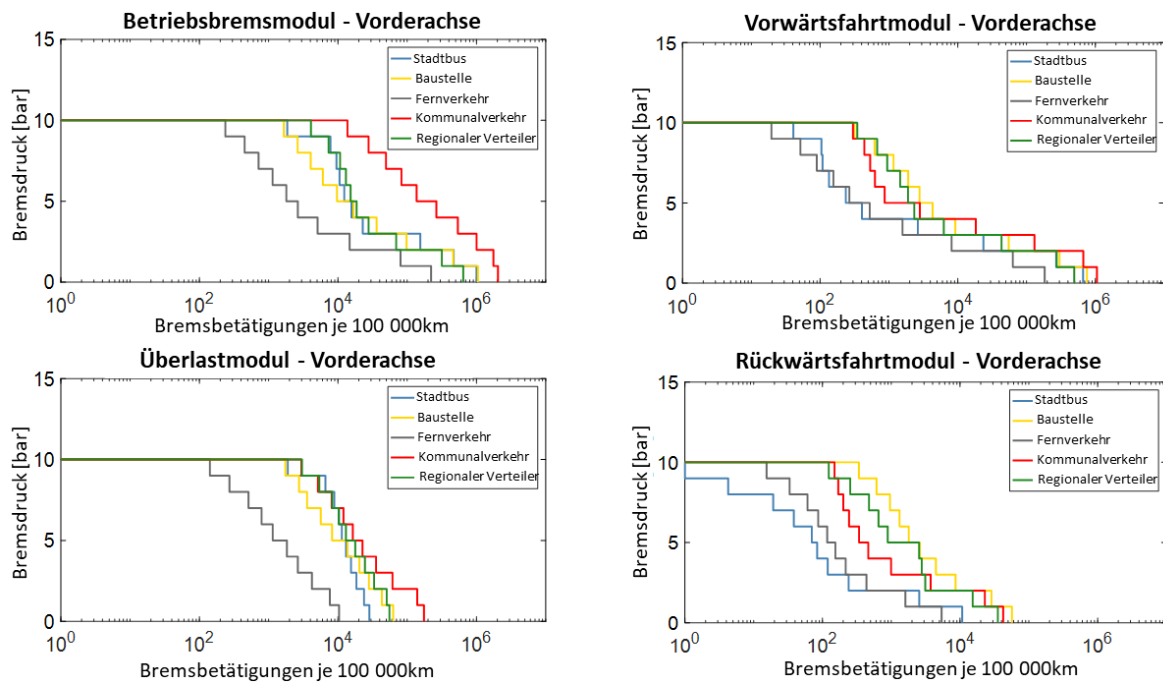


Bild 7: Basiskollektive je Fahrzeugmission für die Vorderachse

Für alle Lastkollektive der Nutzfahrzeuggesteuer und deren Erprobung wird auf die technische Empfehlung des AK CV-Brakes (2019) verwiesen.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde aufgezeigt wie ausgehend von einer Forschungsfrage eine neue Methodik entwickelt und am Beispiel der Nutzfahrzeuggesteuer erfolgreich angewendet wurde. Bestehende Methoden und Verfahren von Lastannahme und Zuverlässigkeitstechnik wurden verknüpft und in vier

Phasen strukturiert, um Anwendbarkeit, Durchgängigkeit und Transparenz zu gewährleisten. Dabei wurden die aus dem Stand der Forschung erarbeiteten funktionalen Anforderungen für die Lastkollektivermittlung in die Methodik integriert, sodass u. a. die Zielsetzung so definiert werden kann, dass eine belastungsgerechte Produktdimensionierung in Abhängigkeit von Produkttyp und Unternehmensstrategie gewählt werden kann. Dies zeigt auch das Anwendungsbeispiel der Nutzfahrzeugsbremse, bei der nicht nur eine große Einsatzvielfalt, sondern auch technische Unterschiede im Bremssystem zu berücksichtigen waren. Aus dem Anwendungsbeispiel der Nutzfahrzeugsbremse, resultierte ein Laststandard in Form einer frei zugänglichen technischen Empfehlung (AK CV-Brakes 2019). Das Ergebnis dieses erfolgreichen Anwendungsbeispiels demonstriert, dass die Methodik eine systematische Ermittlung von repräsentativen Lastkollektiven auch bei großer Einsatzvielfalt und ambitionierter Zielsetzung ermöglicht. So können die ermittelten Lastkollektive für die relevanten Fahrzeugmissionen synthetisch an die Randbedingungen des Bremssystems angepasst werden, was eine belastungsgerechte und damit ressourceneffiziente Auslegung der Nutzfahrzeugsbremse ermöglicht.

Literaturverzeichnis

- AK CV-Brakes 2019 Working Group Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes: Standard Load Spectra for Commercial Vehicle Brakes. https://www.ima.uni-stuttgart.de/dokumente/forschung/zuverlaessigkeitstechnik/publikationen/Standard_Lastkollektive.pdf, 19.11.2020.
- Blessing und Chakrabarti 2009 Blessing, L., Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London, London, 2009.
- DIN EN 60721-1 DIN EN 60721-1:1997-02, Klassifizierung von Umweltbedingungen - Teil 1: Vorzugswerte für Einflußgrößen. Beuth, Berlin, 1997.
- Eckstein 2017 Eckstein, C.: Ermittlung repräsentativer Lastkollektive zur Betriebsfestigkeit von Ackerschleppern. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2017.
- Han et al. 2012 Han, J.; Kamber, M.; Pei, J.: Data mining, Concepts and techniques. 3. Edition. Elsevier, Amsterdam, 2012.
- Härdle et al. 2015 Härdle, W.; Simar, L.: Applied Multivariate Statistical Analysis. 4. Edition. Springer, Berlin, 2015.
- Heuler und Frost 2011 Heuler, P., Frost, M. R.: Ansätze zur Lastannahme für die PKW-Betriebsfestigkeitsauslegung. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (2011), Nr. 42, S. 279-288.
- Küçükay 1990 Küçükay, F.: Rechnerunterstützte Getriebedimensionierung mit repräsentativen Lastkollektiven. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Nr. 92, Nr. 6, 1990; S. 328-333.
- Lucan et al. 2017 Lucan, K., Henß, M., Bertsche, B., Working Group CV-Brakes - Procedure for a Commercial Vehicle Brakes - Standard. In: EuroBrake 2017 : Europe's Braking Technology Conference & Exhibition, 2017.
- Lucan und Bertsche 2019 Lucan, K., Bertsche, B.: Standard-Lastkollektive für die Nutzfahrzeugsbremse. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 121 (2019), S. 78-83.
- Streit et al. 2009 Streit, A.; Dreßler, K.; Speckert, M.; Lichter, J.; Zenner, T.; Bach, P.: Anwendung statistischer Methoden zur Erstellung von Nutzungsprofilen für die Auslegung von Mobilbaggern. Berichte des Fraunhofer-Instituts für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Nr. 163, Kaiserslautern, 2009.
- Wagner 2017 Wagner, M.: Dataloggerbasierte Kundenkollektivermittlung für die Fahrzeugprüfung. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2017.

Schadpartikelverträglichkeitstests zur Reduzierung von Frühausfällen bei elektronischen Komponenten

Fault injection tests to reduce early failures in electronic components

Patrick Brag¹, Markus Rochowicz¹

¹Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, 70569 Stuttgart
Patrick.brag@ipa.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Während der Produktentwicklung von elektronischen Komponenten kommt eine ganze Bandbreite standardisierter Testverfahren zum Einsatz, um die Zuverlässigkeit zu ermitteln und Ausfällen vorzubeugen. Das Risiko von Kurzschlüssen, als Folge partikulärer Verunreinigungen, wird hingegen nicht oder zu spät betrachtet. Dabei könnte die Zuverlässigkeit verbessert werden, wenn Partikel nicht nur als Problem der Produktion verstanden würden. In diesem Artikel wird eine neue Methode vorgestellt, um das partikelbedingte Kurzschlussrisiko experimentell zu ermitteln und so das Design zu erproben.

Keywords (deutsch):

Schadpartikelverträglichkeitstest, Elektronik, Frühausfälle, Zuverlässigkeit

Abstract (english): A broad spectrum of standardized test methods is applied during product development in order to determine the reliability and prevent failures. The risk of short circuits, as a result of particulate contamination, is not considered or considered too late. Instead, reliability could be improved, if particles not only understood as problem of the production. A new method is introduced in this article to determine the particle-related short circuit risk experimentally and thus test the design.

Keywords (english):

Fault injection test, electronic, early failures, reliability

1 Einführung

Mit der zunehmenden Elektrifizierung des Automobils steigen auch die technischen Möglichkeiten im Bereich autonomes Fahren, vernetztes Fahren und alternativer Antriebstechnologien. Damit verbunden sind zunehmende Risiken in der Entwicklung, welche sich aus der steigenden Anzahl und Komplexität der elektrischen/elektronischen (E/E) Komponenten, aber auch der Übernahme sicherheitsrelevanter Fahrfunktionen und der Miniaturisierung der Bauelemente ergeben. Kleinste Partikel, die aus der Fertigung zurückbleiben oder während der Montage in die Komponente gelangen, können zu Kurzschlüssen führen. Aus diesem Grund werden Sauberkeitsanforderungen für sicherheitsrelevante Einzelteile und Baugruppen spezifiziert (Portolan et al. 2019, Bertsche et al. 2009). Für die Festlegung von Sauberkeitsgrenzwerten fehlen bislang einheitliche Methoden und Werkzeuge, sodass sich der Konstrukteur auf seine Berufserfahrung oder Abschätzung verlassen muss. Deshalb wird die Sauberkeit in den meisten Fällen auf Basis einer worst case Betrachtung festgelegt. Für die Produktion ergibt sich daraus ein hoher technischer Aufwand, dem kein gleichwertiger ökonomischer Nutzen gegenübersteht. Zu streng spezifizierte Sauberkeitsgrenzwerte sind unwirtschaftlich. Daran scheitert die Umsetzung häufig (Rochowicz 2018).

Dabei steigt der Handlungsdruck auf die Tier 1 Lieferanten und Automobilhersteller stetig. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) erarbeitet gerade einen neuen Gesetzesentwurf, um „bis zum Jahr 2022 Fahrzeuge mit autonomen Fahrfunktionen in den Regelbetrieb zu bringen.“ (BMVI 2020). Demnach wird auch die Haftungsfrage bei autonom fahrenden bzw. fahrerlosen Kraftfahrzeuge neu geregelt werden. Die Absicherung der Zuverlässigkeit durch geeignete Methoden wird in Zukunft einen höheren Stellenwert bei der Produktentwicklung einnehmen (Attias 2017, Winner et al. 2018). Das gilt auch für Methoden zur Absicherung gegenüber partikelinduzierten Kurzschlüssen.

2 Motivation

Die technischen Anforderungen an E/E Module sollten bereits zu Beginn des Designprozesses festgelegt werden (IPC-2221-B) und sich dabei an den Praktiken Design for Assembly (DFA), Design for Test/Testability (DFT), Design for Reliability (DFR), u.a. orientieren (IPC-2231).

Obwohl die IPC-5703 die Entstehung partikulärer Verunreinigung durch Laminierung, Handhabung, Bohren, Nutzentrennung, Verpacken, u.a. aufführt, werden die Fehlermechanismen überwiegend auf ionische Rückstände, elektrische Potentiale oder Spannungsgradienten bzw. Nässe und Feuchte zurückgeführt (IPC-5703). Der Fehlermechanismus Kurzschluss, ausgelöst durch elektrisch leitfähige Partikel ist zwar aus dem Feld bekannt, findet aber während des Designprozesses von E/E Modulen keine Berücksichtigung (IPC-D-279). Dabei gelangt ein Großteil der metallischen und damit leitfähigen Partikel durch Schraubverbindungen, Lötverbindungen oder als Restschmutz von den (Aluminium-) Gehäusen auf die Leiterplatten.

Im *Test Methods Manual* (IPC-TM-650) sind 246 Tests aufgeführt, wovon nur Methode 2.6.3.5 *Bare Board Cleanliness by Surface Insulation Resistance 01/04* die Sauberkeit adressiert – im Kontext der Oberflächensauberkeit vor und nach dem Lötpastenauftrag.

Die messtechnische Bestimmung der Bauteilsauberkeit nach ISO 16232:2018 bzw. VDA 19.1 ist hingegen gängige Praxis in der Serienproduktion. Die Ergebnisse eignen sich aber nur bedingt zur Ermittlung von Ausfallraten und vice versa. Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls hängt nicht allein von der Existenz der Partikel ab, sondern auch von anderen Faktoren, wie Bild 1 illustriert. Hinzu kommen stochastische Prozesse während des Betriebs, sodass sich Partikel durch Vibration und Schock während einer Autofahrt neu verteilen können.

In der IEC 61709 sind beispielsweise Ausfallraten für einzelne Bauelemente aufgeführt, die für Zuverlässigkeitsberechnungen etabliert sind. Eine vergleichbare Datengrundlage gibt es für das Risiko partikelinduzierter Kurzschlüsse nicht, sodass der ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und

Elektronikindustrie e. V. im Jahr 2018 erstmalig ein *Risikoabschätzungstool zur Bewertung des Kurzschlussrisikos durch Partikel* veröffentlicht hat. Die in Bild 1 dargestellten Faktoren finden sich in dem mathematischen Berechnungsmodell wieder – unterliegen derzeit aber der individuellen Abschätzung des Betrachters.

Das Fraunhofer IPA entwickelt derzeit eine neue Methode, mit der sich das Kurzschlussrisiko experimentell bestimmen lässt. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei an dem generischen Ablaufschema des ZVEI/SAE J1879 *Handbook for Robustness Validation*. Ziel dieser Entwicklung ist die Schaffung einer Datengrundlage auf Basis der empirischen Versuchsergebnisse, sowie die Validierung der Testmethode als neuen Ansatz zur Verifizierung des Leiterplatten-Designs nach ISO 26262-5 im Designprozess.

3 Methodenentwicklung

Frühausträge werden in der IEC 61709 nicht berücksichtigt, weil die Ausfallraten zu unsicher oder die Ausfallursachen zu vielfältig sind. Diese Betrachtung lässt sich aufgrund der gestiegenen Sicherheitsanforderungen im Automobilbau heute nicht mehr rechtfertigen. Fault injection tests sind in der Mikroelektronik eine seit Jahrzehnten bewährte Methode, um die Robustheit der Bauelemente zu verifizieren (Arlat et al. 1993, ISO 26262-11). Auf diesen Ansatz greifen die Schadpartikelverträglichkeitstests zurück, wobei definierte Schadpartikel als Fehler (engl.: faults) in das E/E Modul injiziert werden, um als Reaktion (engl.: error) einen Kurzschluss zu provozieren (Rochowicz 2014). Kurzschlüsse führen nicht unmittelbar zu einem Ausfall, aber sehr häufig zu folgeschweren Fehlern. Für die methodische Entwicklung der Schadpartikelverträglichkeitstests an E/E Modulen findet eine worst case Betrachtung statt, in der ein Kurzschluss mit einem Ausfall gleichgesetzt wird. Als Kurzschluss ist der messbare Spannungsabfall definiert, der sich ergibt, wenn ein oder mehrere Partikel mindestens zwei leitende Bahnen auf einer Leiterplatte kontaktieren. Größe, Menge und Material der Partikel stellen für die Methodenentwicklung einen elementaren Bestandteil dar. Daneben gibt es aber noch andere Faktoren, welche die Kurzschlusswahrscheinlichkeit beeinflussen, siehe Bild 1.

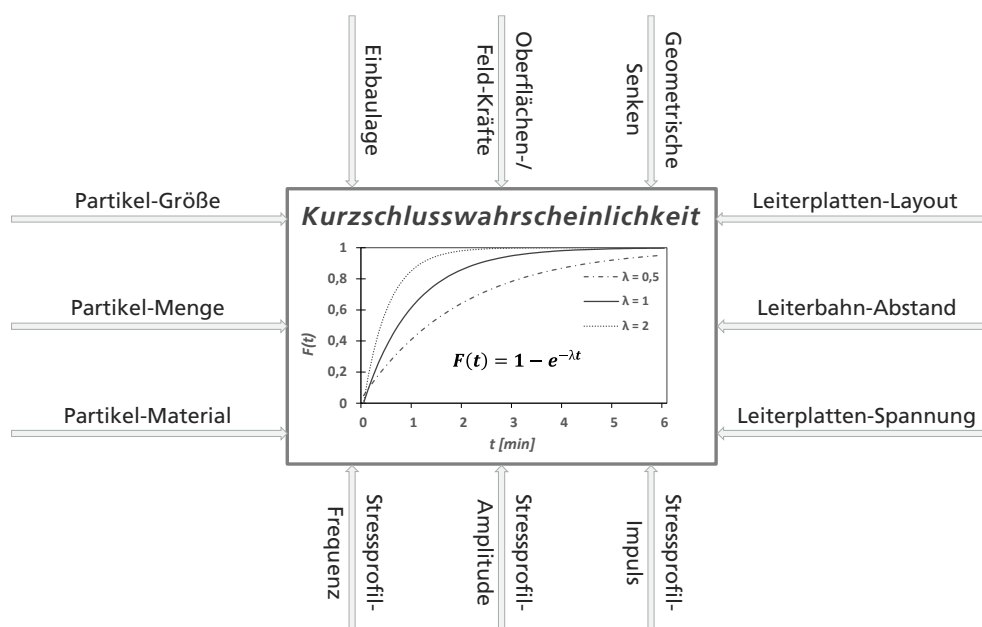


Bild 1: Einflussfaktoren auf die Kurzschlusswahrscheinlichkeit

Bei der Methode der Schadpartikelverträglichkeitstests werden definiert hergestellte Partikelfraktionen auf eine spezielle Test-Platine dosiert und einem zuvor festgelegten Stressprofil ausgesetzt. Das Stressprofil wird durch einen Modalshaker appliziert, wodurch die Partikel mit bis zu 200^{-1} s angeregt werden, um Kurzschlüsse zu generieren. Während der gesamten Testdauer befinden sich die

Partikel zwischen Leiterplatte und Gehäuse, siehe Bild 2. Der einzelne Test endet nach einer festgelegten Versuchsdauer von beispielsweise zwei Stunden. Anschließend werden die zuvor dosierten Partikel in einer eigens dafür konstruierten Reinigungsvorrichtung restlos entfernt, um in dem Folgeversuch eine neue Partikelfraktion zu dosieren.

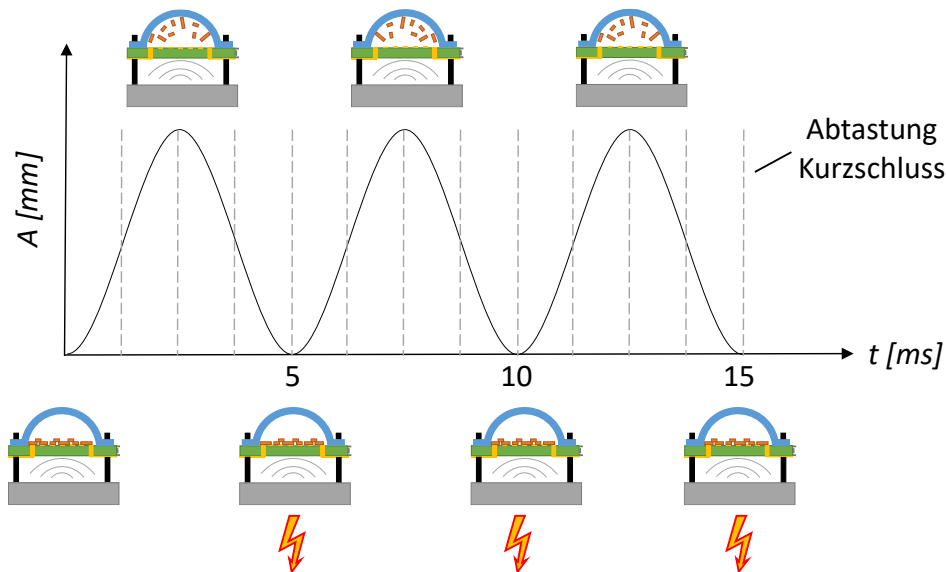


Bild 2: Vereinfachte Darstellung des Stressprofils

Ein Kurzschluss ist möglich, sobald sich das Fahrzeug und damit auch die Partikel in Bewegung versetzen, bedingt durch die äußeren Krafteinflüsse. Amplitude und Frequenz haben einen wesentlichen Einfluss auf die Partikelbewegung (You et al. 2018). Die in der ISO 16750-3:2007 zugrunde gelegten Lastprofile decken allerdings nicht alle realen Fahrsituationen ab. Damit auch Bordsteinkanten, Schlaglöcher, u.ä. Situationen berücksichtigt werden, sollen die genormten Lastprofile um zeitlich getaktete Schock-/ Impulsanregungen erweitert werden.

Damit die in Bild 1 dargestellten Einflussfaktoren systematisch untersucht werden können, soll eine unbestückte Leiterplatte mit mäanderförmigen Teststrukturen eingesetzt werden, wie sie beispielsweise für Surface Insulation Resistance (SIR) Tests zum Einsatz kommen, vgl. Bild 3 (Ferrill et al. 2018).

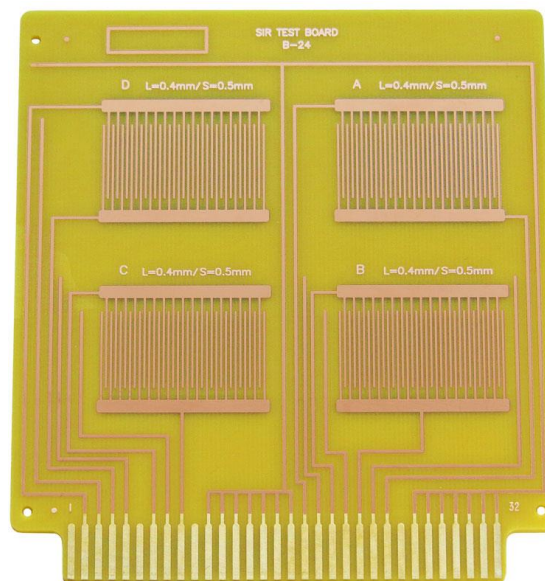


Bild 3: IPC-B-24 SIR Test-Board nach ANSI J-STD-004 bzw. IPC-TM-650, © TopLine Corporation

Das IPC-B-24 Design wird an die Erfordernisse der Schadpartikelverträglichkeitstests angepasst. Der mittlere Leiterbahnabstand (pitch) wird von 2,54 mm auf 0,3 mm reduziert und die Anzahl der Mäander auf über 40 erhöht. Dadurch soll eine höhere Ausbeute an Kurzschlüssen erzielt werden unter Berücksichtigung realitätsnaher Bedingungen. Der fine pitch eines Microchips liegt zum Beispiel zwischen 0,1 mm und 0,4 mm und damit deutlich unterhalb der 2,54 mm.

Bei einer Abtastrate je Mäanderfeld von 800 s^{-1} könnten theoretisch 32.000 Kurzschlüsse pro Sekunde messtechnisch erfasst werden. Die tatsächliche Anzahl der Kurzschlüsse wird um ein Vielfaches kleiner erwartet, da die Kurzschlusswahrscheinlichkeit nicht nur von Größe und Anzahl der Partikel abhängt, sondern auch von den Zufallsgrößen Position und Drehwinkel des/ der Partikel, siehe Bild 4.

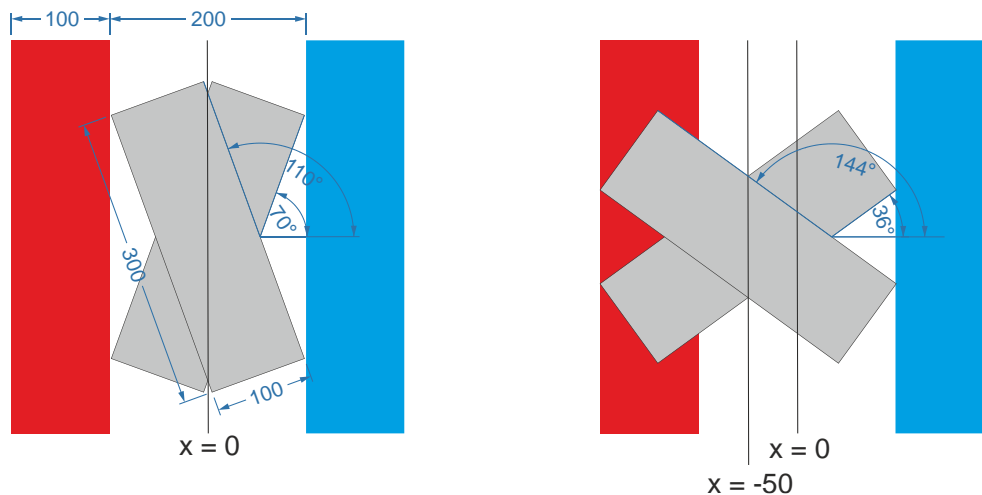


Bild 4: Geometrische Betrachtungen zum Eintritt eines Kurzschlusses

Durch Vibration und Schock sollen sich die Partikel auf der Leiterplatte frei umorientieren können. So als würde man die Partikel bis zu 200 s^{-1} auf die Leiterplatte fallen lassen. Bei einer offenen Leiterplatte würden nach kurzer Zeit nur noch wenige Partikel auf der Leiterplatte sein. Aus diesem Grund ist der Testraum von einem Gehäuse umschlossen, wodurch sich immer die gleiche Anzahl an Partikeln im Testraum befindet.

Als Test-Verunreinigung dienen synthetische Partikel aus Kupfer, Aluminium oder Zinn, die in den Längen 100/ 200/ 300/ 400/ 500 (± 20) μm und in den Testmengen 1/ 2/ 4/ 8/ 16/ 32/ 64/ 128 St. zum Einsatz kommen. Breite und Höhe der Partikel sind mit jeweils 100 μm fix. Material, Anzahl und Länge orientieren sich an den Eigenschaften realer Verunreinigungen im Elektronikbereich (ZVEI 2018). Als Partikelform wird ein Quader präferiert, um reproduzierbare Versuche durchführen zu können. Darüber hinaus lässt sich diese Form auch reproduzierbar fertigen. Reale Partikel haben dagegen eine irreguläre Form, vgl. Bild 5. Eine systematische Klassierung bzw. eine sinnvolle Versuchsplanung sind nicht möglich.

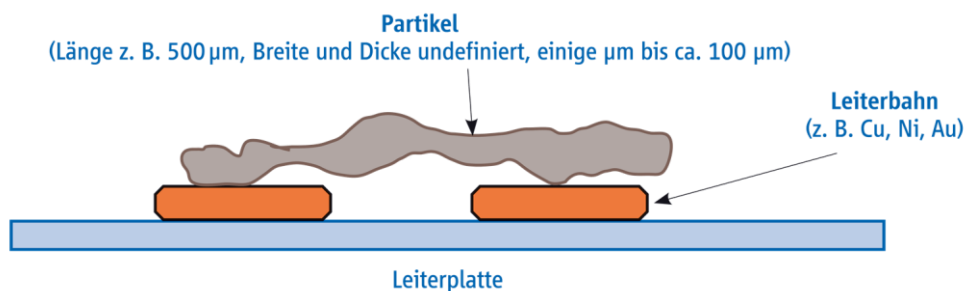


Bild 5: Irreguläre Partikelform realer Verunreinigungen (ZVEI 2018)

4 Testverfahren

Der Schadpartikelverträglichkeitstest nutzt den physics-of-failure (POF) Ansatz, um den Grenzbereich zu ermitteln, in dem die Komponente reproduzierbar ausfällt (SAE J2816). Der Ablauf – bezogen auf eine Komponente, einem Stressprofil und einem Partikelkollektiv – ist in Bild 6 dargestellt.

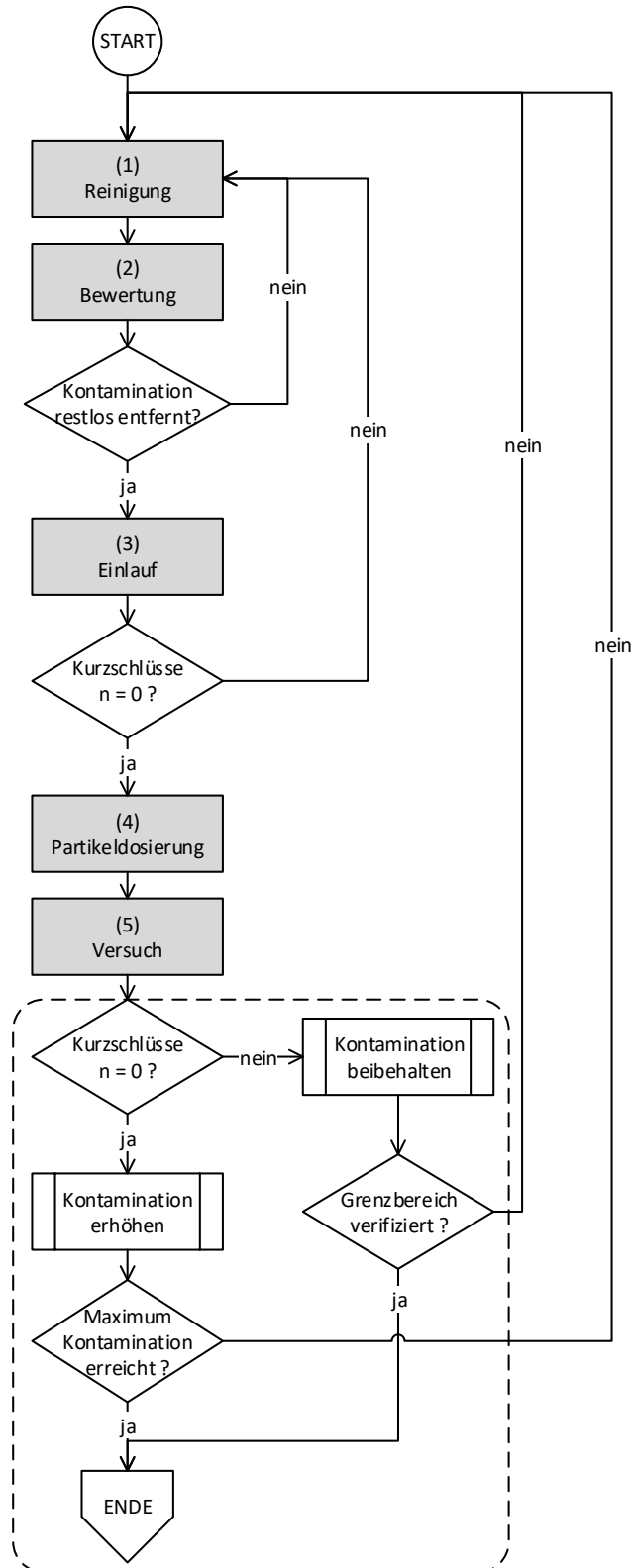


Bild 6: Flussdiagramm Schadpartikelverträglichkeitstest für E/E Module

Unabhängig davon, ob die Leiterplatte wiederverwendet wird, muss zu Beginn eine (1) Reinigung durchgeführt werden. Die (2) Bewertung (bildgebende Partikelmesstechnik) dient als Nachweisführung für den rückstandsfrei sauberen Ausgangszustand von Leiterplatte und Gehäuse.

Der Zusammenbau von Gehäuse und Leiterplatte stellt noch ein Restrisiko für Querverunreinigung dar, weshalb zusätzlich ein (3) Einlauf vorgesehen ist. Sofern innerhalb der verkürzten Testdauer keine Kurzschlüsse gemessen wurden, kann die (4) Partikeldosierung stattfinden. In Abhängigkeit zum vorausgegangenen (5) Versuch wird die Partikelgrößenverteilung gewählt. Hierfür ist eine Vielzahl kleiner Transport- und Aufbewahrungsgefäße mit der jeweiligen Partikelmischung vorzubereiten. Diese Iteration ist in der gestrichelten Box dargestellt und soll im Folgenden durch das in Tabelle 1 dargestellte Beispiel erklärt werden.

Die Anzahl der Versuche je Material sind nicht fest vorgegeben, sondern richten sich danach, wann die Leiterplatte auf die synthetische Verunreinigung mit Kurzschlüssen reagiert. Hierbei ist Anzahl der erfassten Kurzschlüsse irrelevant. Aufgrund der worst case Betrachtung stellt jeder Kurzschluss einen Ausfall dar. Bei einer anvisierten Nullfehler Qualität sind keine Kurzschlüsse tolerierbar.

Tabelle 1: Beispiel zur iterativen Grenzwertermittlung

Versuch	Partikel-Material	Partikel-Größe					Summe Kurzschlüsse
		100 µm	200 µm	300 µm	400 µm	500 µm	
1	Cu	1	0	0	0	0	0
2	Cu	2	0	0	0	0	0
3	Cu	4	0	0	0	0	0
4	Cu	8	0	0	0	0	0
...
8	Cu	128	0	0	0	0	0
9	Cu	128	1	0	0	0	0
10	Cu	128	2	0	0	0	0
11	Cu	128	4				
...
16	Cu	128	128	0	0	0	0
17	Cu	128	128	1	0	0	> 1
...
27	Cu	128	128	1	0	0	> 1
28	Cu	128	128	0	0	0	0
...
37	Cu	128	128	0	0	0	0

In dem skizzierten Beispiel werden Anzahl oder Größe der Partikel mit jedem Versuch erhöht. Bei Versuch Nr. 17 wurde erstmalig mindestens ein Kurzschluss gemessen. Ob es sich dabei um einen statistischen Ausreißer oder den wahren Grenzbereich handelt ist in weiteren Versuchen zu überprüfen. Die Kurzschlüsse müssen sich unter Applikation der gleichen Partikel-Verunreinigung reproduzieren lassen. Die Versuche 17 bis 27 zeigen beispielhaft die reproduzierten Ergebnisse. Die Versuche 28 bis 37 sollten zusätzlich durchgeführt werden, um den Grenzbereich exakt angeben zu können. Nach Versuch 37 lässt sich schlussfolgern, dass die Elektronik zuverlässig ihre Funktion erfüllen kann, solange die Verunreinigung kleiner oder gleich der in den Versuchen 28 bis 37 genutzten synthetischen Verunreinigung ist.

Ein Ausfall, der auf produktionsbedingte Verunreinigungen zurückzuführen ist, findet in den meisten Fällen zu Beginn der Produktlebensdauer statt. Aus diesem Grund kann die Testdauer auf ca. 2 Stunden begrenzt werden. In der ISO 16750-3:2007 beträgt die Testdauer dagegen 22 Stunden. Ohnehin ist es besser eine hohe Anzahl an Versuchen mit variierender Partikelgrößenverteilung durchzuführen, um

die Irrtumswahrscheinlichkeit zu reduzieren. Ausgedehnte Versuche mit unveränderter Partikelgrößenverteilung reduzieren diese hingegen nicht, da bereits innerhalb der 2 Stunden eine hohe Ereignisdichte vorliegt – über 230 Mio. Kurzschlussmöglichkeiten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Risiko partikelinduzierter Kurzschlüsse in elektronischen Komponenten nimmt infolge der Miniaturisierung kontinuierlich zu. Bislang fehlen einheitliche Methoden, mit denen das Kurzschlussrisiko systematisch bestimmt werden kann. Schadpartikelverträglichkeitstests sind ein neues und wichtiges Instrument, um das richtige Maß an Sauberkeit empirisch zu bestimmen.

Mit Hilfe definiert hergestellter Partikelfraktionen wird untersucht, welche Verunreinigung für ein E/E Modul gerade noch tolerierbar ist, d.h. Null Kurzschlüsse.

Ausschlaggebend für die Robustheit eines E/E Moduls ist in der Regel die Leiterplatte. Eine Beschichtung kann dazu beitragen die Robustheit zu erhöhen. Welche weiteren Faktoren die Robustheit beeinflussen soll mit Hilfe der Antwortoberflächenmethode (engl. response surface methodology) genauer untersucht werden. Die Erkenntnisse könnten wiederum eine sinnvolle Ergänzung des ZVEI Risikoabschätzungstool darstellen.

Inwieweit diese Methode auf bestückte Leiterplatten übertragen werden kann muss in einem weiteren Schritt untersucht werden. Hierbei sind auch die Hersteller gefordert passende Test-/ Messstrategien zu entwickeln, um die Kurzschlüsse zu detektieren. Eine Möglichkeit wäre die Nutzung der Selbstdiagnosefunktionen. Ob diese ausreichen oder sogar über zusätzliche standardisierte Schnittstellen nachgedacht werden muss, lässt sich nur im Dialog mit der Industrie klären.

Danksagung

Die Arbeiten sind im Rahmen des Verbundprojektes „Entwicklung und Erprobung einer Prüfmethode (fault injection testing) für E/E-Systeme zur Absicherung der Ausfallwahrscheinlichkeit während der Produktentwicklungsphase“ – unter dem Förderkennzeichen ZF4056523PO9 – entstanden. Die Autoren bedanken sich für die Zuwendung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), die Betreuung durch den Projektträger AiF Projekt GmbH, sowie die Kooperation mit den Projektpartnern measX GmbH & Co. KG, KIST + ESCHERICH GmbH, BIDAG Technologies GmbH & Co. KG und der Spies Lasertechnik GmbH.

Literatur

- | | |
|----------------------|--|
| Arlat et al. 1993 | ARLAT, Jean; COSTES, Alain; CROUZET, Yves; LAPRIE, Jean-Claude; POWELL, David: Fault injection and dependability evaluation of fault-tolerant systems. In: IEEE Transactions on Computers 42 (1993), Nr. 8, S. 913–923 |
| Attias 2017 | ATTIAS, Danielle (Hrsg.): The Automobile Revolution: Towards a New Electro-Mobility Paradigm. Cham, s.l.: Springer International Publishing, 2017 |
| Bertsche et al. 2009 | BERTSCHE, Bernd; GÖHNER, Peter; JENSEN, Uwe; SCHINKÖTHE, Wolfgang; WUNDERLICH, Hans-Joachim: Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009 (VDI-Buch) |
| BMVI 2020 | BUNDESVERKEHRSMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: Deutschland wird international die Nummer 1 beim autonomen Fahren.
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html – Überprüfungsdatum 15.11.2020 |

Ferrill et al. 2018	FERRILL, Mitchell; KELLY, Matt; MA, Wai; RANADIVE, Nandu; NDIAYE, Cheikhou; BIELICK, Jim; BAGHERI, Simin: The IPC-B-52 SIR test vehicle: A discussion of the current test vehicle design and possible modifications for the future. In: SMTA International Conference.
IEC 61709	Norm IEC 61709 Februar 2017. Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion
IPC-2221B	Norm IPC-2221B November 2012. Generic Standard on Printed Board Design.
IPC-2231	Norm IPC-2231 Mai 2019. DFX Guidelines.
IPC-5703	Norm IPC-5703 Mai 2013. Cleanliness Guidelines for Printed Board Fabricators.
IPC-D-279	Norm IPC-D-279 Juli 1996. Design Guidelines for Reliable Surface Mount Technology Printed Board Assemblies.
IPC-TM-650	Handbuch. Test Methods Manual.
ISO 16232	Norm ISO 16232 Dezember 2018. Road vehicles - Cleanliness of components and systems.
ISO 16750-3	Norm ISO 16750-3 Dezember 2012. Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 3: Mechanical loads.
ISO 26262-5	Norm ISO 26262-5 Dezember 2018. Road vehicles – Functional safety – Part 5: Product development at the hardware level.
ISO 26262-11	Norm ISO 26262-5 Dezember 2018. Road vehicles – Functional safety – Part 11: Guidelines on application of ISO 26262 to semiconductors.
SAE J2816	Richtlinie SAE J2816 April 2018. Guide for Reliability Analysis Using the Physics-of-Failure Process.
Portolan et al. 2019	PORTOLAN, Michele; SAVINO, Alessandro; LEVEUGLE, Regis; DI CARLO, Stefano; BOSIO, Alberto; DI NATALE, Giorgio: Alternatives to fault injections for early safety/security evaluations, 2019-May. In: IEEE European Test Symposium (ETS 2019), 2019
Rochowicz 2014	ROCHOWICZ, Markus: Erstellung von Sauberkeitsgrenzwerten. In: JOT Journal für Oberflächentechnik 54 (2014), Nr. 3, S. 58–61
Rochowicz 2018	ROCHOWICZ, Markus: Elektromobilität und Technische Sauberkeit. In: JOT Journal für Oberflächentechnik 58 (2018), S1, S. 10–14
Winner et al. 2018	WINNER, Hermann (Hrsg.); PROKOP, Günther (Hrsg.); MAURER, Markus (Hrsg.): Automotive Systems Engineering II. Cham: Springer International Publishing, 2018
You et al. 2018	YOU, Ying; LIU, Malin; MA, Huaqing; XU, Lei; LIU, Bing; SHAO, Youlin; TANG, Yaping; ZHAO, Yongzhi: Investigation of the vibration sorting of non-spherical particles based on DEM simulation. In: Powder Technology 325 (2018), S. 316–332

VDA 19.1	Richtlinie VDA Band 19 Teil 1 März 2015. Prüfung der Technischen Sauberkeit – Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile.
ZVEI 2018	ZVEI Leitfaden Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik Oktober 2018. Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik.
ZVEI/SAE J1879	Handbuch ZVEI/SAE J1879 Juni 2013. Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules.

Konzept für ein selbstlernendes Assistenzsystem zur Mensch-Computer-Interaktion in der Produktentwicklung (deutsch)

Concept for a self-learning assistance system for human-computer interaction in product development (english)

Matthias Müller¹, Prof. Dr. Bogdan Franczyk²

¹Hochschule Magdeburg-Stendal, Institut für Technische Betriebswirtschaft, Magdeburg
matthias2.mueller@gast.hs-magdeburg.de

²Business Information Systems Institute, 04109 Leipzig, Germany und 53-345 Wrocław, Poland
franczyk@wifa.uni-leipzig.de

Abstract (deutsch): Mit steigender Kollaboration der Entwicklungspartner aus dem Ingenieurs- und Informatikumfeld entstehen immer hochkomplexere Zusammenarbeitsmodelle, welche eine interdisziplinäre Interaktion zunehmend schwieriger machen. Der heute zwischen den beteiligten Fachbereichen der Produktentwicklung existierende Kommunikationsprozess bietet mit seinen schlecht vernetzten Arbeitsabläufen keine ganzheitliche IT-Systemsteuerung. Viel mehr führen monolithische Einzelsysteme in der Produktentwicklung häufig zu unerwünschten Unterbrechungen in den Arbeitsprozessen der Entwickler. Diese systemischen Insellösungen sind sehr ineffizient und ermöglichen zur Bewältigung der hohen Komplexität somit auch keine reibungslose Interaktion in der Produktentwicklung. In der Literatur zum Management der Produktentwicklung werden Vorgehensmodelle für eine fachbereichsübergreifende Zusammenarbeit beschrieben. Dennoch sind die Erkenntnisse der aktuellen Fachliteratur häufig nicht eindeutig, als dass sie für eine künftige Lösung zur Entwicklung eines selbstlernenden Entscheidungsfindungssystems in der Produktentwicklung in Betracht kämen. Die Autoren stellen eine erste Konzeptidee für ein smartes, regelbasiertes Assistenzsystem für Entscheidungen im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie vor. Dieser Ansatz soll die digitalen Interaktionen zwischen den Fachbereichen unterstützen, unvollständige Formalismen weiter ergänzen sowie die automatisierte Entscheidungsfindung effizienter machen.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Produktentwicklung, Automobilindustrie, V-Modell, regelbasierte Entscheidungsfindung

Abstract (english): With increasing collaboration between development partners from the engineering and IT environment more and more complex collaboration models are emerging, thus making interdisciplinary interaction increasingly difficult. The communication process that exists today between the involved product development departments with their poorly networked work processes does not offer a holistic means of steering an IT system. Instead, monolithic single-systems in product development often lead to undesirable interruptions in the work processes of developers. These systemic isolated solutions are very inefficient and therefore do not enable smooth interaction in product development to cope with the high level of complexity. The literature on the management of product development explains which procedural models exist for interdisciplinary cooperation. Nevertheless, the findings reported in the current literature are often not clear enough to be considered for the future development of a self-learning decision-making system in product development. The authors present an initial concept idea for a smart, rule-based assistance system for decisions in the product development process in the automotive industry. This approach is intended to provide greater support for digital interactions between the departments, to further supplement incomplete formalisms and to make automated decision-making more efficient.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Product development, automotive industry, V Model, rule-based decision-making

1 Einleitung

Die ständig steigenden Erwartungen an neue Technologien erhöhen auch den Druck auf die digitale Transformation in den Automobilunternehmen sowie den industriellen Netzwerken zusehends (Gassmann 2017; Bauernhansl et al. 2016, S. 3). Damit verbunden ist auch eine zunehmende Dynamisierung der Daten- und Informationsverfügbarkeit. Mit dem schnellen Wachstum der „Working-from-Home-Wirtschaft“ verstärkt sich die Umsetzungsgeschwindigkeit von Kommunikation zusätzlich (Bloom 2020). Es kommt zu einem Paradigmenwechsel und damit auch zu einer Neuordnung der bestehenden Arbeitswelt mit seinen Business Prozessen (Bloom 2020; Robbins 2016; Scheer 2018, S. 8-56; Brandes et al. 2011, S. 16-19). Auf Grund dieses disruptiven Umbruchs werden auch alle bisher bekannten, traditionellen Formen von Zusammenarbeit und Kommunikation in der Produktentwicklung kritisch hinterfragt werden müssen (Kotter 2017). Entscheidende Weichenstellungen für einen effizienten Produktentwicklungsprozess (PEP) sind die Faktoren Organisation, Ressourcen und interdisziplinäre Kommunikation (Kleinaltenkamp und Plinke 1999, S. 80 ff.). Die aktuell, unterstützenden IT-Systeme im PEP der Automobilindustrie, wie z. B. Enterprise Resource Planning (ERP) sind systemische Einzellösungen der verschiedenen Fachbereiche und zeigen noch starken Optimierungsbedarf in der Steuerung von ganzheitlichen Geschäfts- und Entscheidungsfindungsprozessen (Scheer 2018, S. 8-45; Eigner et al. 2017, S. 9-38; Klein 2017, S. 25-55; Appelfeller und Feldmann 2018, S. 157-159; Abramovici et al. 2018). Insbesondere der hohe Grad an Interdisziplinarität (Techniker, Informatiker, Ökonom und Humanwissenschaftler) in der Zusammenarbeit und die damit verbundene Komplexität steigert die Anforderung an zukünftige, kognitive Systeme erheblich (Wolff und Cunningham 2020; Gluchowski und Chamonie 2016, S. 4 ff.; Leyer und Schneider 2021).

Als methodisches Vorgehen zur Erkenntnisgewinnung über derzeitige Prozessabläufe in der Produktentwicklung wurde eine 3-Phasen-Kombination aus Expertengesprächen, einschlägiger Fachliteraturrecherche und einer Online-Befragung für eine erste Vorabrecherche gewählt. Aktuelle Forschungsergebnisse aus Expertengesprächen (Umfeld der Produktentwicklung) in wissenschaftlichen Konferenzen (Mensch und Computer 2019 in Hamburg, Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung in Stuttgart 2019, Research & Development Conference in Mailand 2018, Magdeburger Maschinenbautage 2017) zeigen, dass eine Auseinandersetzung mit der Digitalisierung der Produktentwicklung in der Automobilindustrie bereits begonnen hat, jedoch fehlt es an einer durchgängigen, zusammenführenden, automatisierten IT-Steuerung und somit an einer assistierten Entscheidungsfindung für alle beteiligten Fachbereiche. Auch eine umfangreiche Literatur- und Studienrecherche (Sichtung und Analyse von über 20 Studien und Journals im Bereich digitale Produktentwicklung, Industrie 4.0 und Künstlicher Intelligenz) weist bestehende Forschungslücken zur assistierten und adaptiven Unterstützung in den derzeit existierenden Zusammenarbeitsmodellen in der Produktentwicklung auf (Scheer 2018, S. 8-202; Eigner et al. 2017, S. 9-38; Müller et al. 2020; Abramovici et al. 2018; Alan und Urbach 2019, S. 12-44; Wahlster 2019, S. 13-14; Acatech 2019; Jetter et al. 2020; van Giffen et al. 2020).

Durch eine eigene empirische Voruntersuchung wurden die bereits gewonnenen Erkenntnisse (wissenschaftliche Konferenzen und Fachliteratur) zur assistierten, adaptiven Interaktion in der Produktentwicklung noch einmal überprüft und durch das Studienergebnis weiter gestärkt. Als Grundgesamtheit wurden beteiligte Akteure der Produktentwicklung definiert, über die Erkenntnisse gewonnen werden sollen und auf welche die Ergebnisse der Forschungsarbeit später anwendbar sind (Raab-Steiner und Benesch 2015, S. 17-19). Die Teilnehmer der durchgeführten Online-Befragung waren Angehörige unterschiedlicher Hierarchiestufen mit hohem Spezialwissen sowie Bezug zur Produktentwicklung und als Entscheidungsträger oder Angestellter aus den Bereichen Technik, Sales und IT in ihren Unternehmen tätig. Daher ist zu erwarten, dass Expertise und berufliche Erfahrung über Effizienzen in der Produktentwicklung vorhanden sind und sie einen wesentlichen Bezug zur Forschungsarbeit bieten (Müller und Bostrom 2016, S. 553-571). Anhand der vorliegenden Online-Befragung mit 50 Teilnehmern aus verschiedenen Fachbereichen und unterschiedlichen

Hierarchieebenen sollten zusätzliche Erkenntnisse für die Verbesserung digitaler Organisations- und Kommunikationsmethoden in der Produktentwicklung vorliegen. Die Resultate der durchgeführten Empirie wurden auf der Grundlage von 50 Fragebogen-Rückläufern ermittelt. Es erfolgte eine Gewichtung der Antwortgeber-Rückmeldungen mit einem notenbasierten Bewertungssystem. Siehe dazu die folgende Aufstellung der Skalierung.

Note 1 = „trifft gar nicht zu“ > Bewertung mit „einem“ Punkt

Note 2 = „trifft weniger zu“ > Bewertung mit „zwei“ Punkten

Note 3 = „neutral“ > Bewertung mit „drei“ Punkten

Note 4 = „trifft zu“ > Bewertung mit „vier“ Punkten

Note 5 = „trifft stark zu“ > Bewertung mit „fünf“ Punkten

Nach Eingang, Verdichtung und Analyse der Datenrückflüsse ergab sich das folgende Umfrageergebnis:

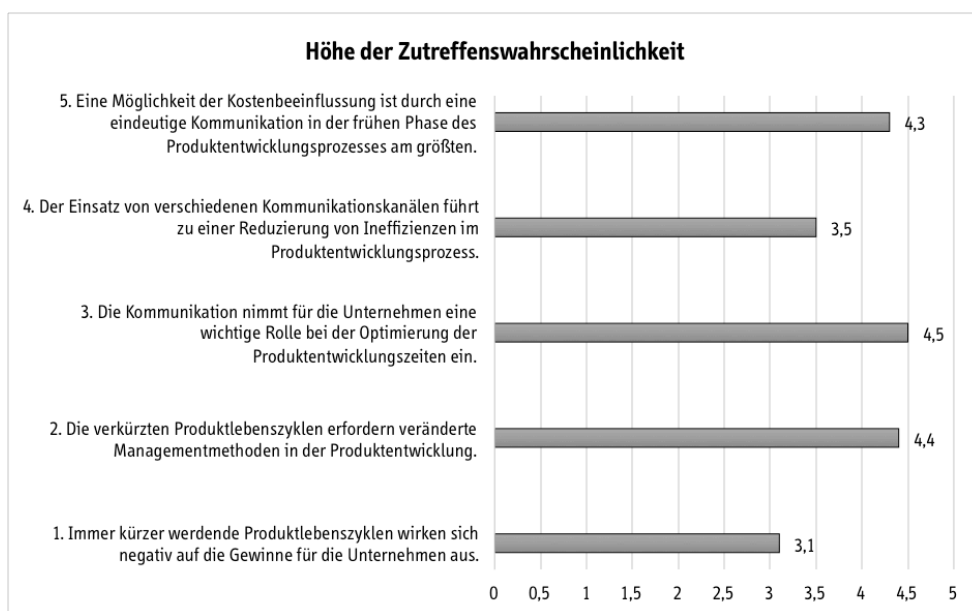


Bild 1: Höhe der Zutreffenswahrscheinlichkeit

Die in Abb. 1 gezeigten Ergebnisse und die sich daraus ergebenden Ränge 1-3 liegen mit ihren ermittelten Werten von 4,5 bis 4,3 sehr eng beieinander. Die analysierten Befragungsergebnisse zeigen sehr deutlich auf, wo die Herausforderungen bei der Organisation und im Management des Produktentwicklungsprozesses liegen. Das größte und damit dringendste Problem im PEP ist nach Aussage der Befragten, die unzureichende Kommunikation. Zweitgrößter Handlungsdruck wird beim aktuellen Einsatz von digitalen Managementmethoden im PEP testiert. Auf Grund der erlangten Erkenntnisse zu existierenden Interaktionsmodellen in der Produktentwicklung (PE) ist es aus Autorensicht von Relevanz, die These zu stellen, ob ein assistiertes, selbstlernendes IT-Entscheidungsunterstützungssystem für eine nahtlose, interdisziplinäre und automatisierte Interaktion zwischen den Beteiligten der PE eine Lösung bietet (Bauernhansl et al. 2014, S. 174). Das Ziel der Forschung ist es, Erkenntnisse zu generieren, wie ein ganzheitlicher, systemischer Ansatz für eine durchgängige und effiziente Steuerung der Entscheidungsfindung des Produktentwicklungsprozesses für alle Akteure in der Automobilindustrie aussieht. Dabei soll das Prinzip "Computer fordert Mensch" in "Mensch fordert Computer" umgekehrt werden.

2 Theoretischer Hintergrund

Der Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie bildet den Kern der Produktentwicklung. Er gliedert sich grundsätzlich in die Phasen – Planen, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten (Schmidt und Paetzold 2016, S. 256-264). In diesem Zusammenhang wird oft von einem multidisziplinären, phasenbasierenden Ansatz gesprochen, der digitale Systemmodelle entlang des Entwicklungsprozesses integrieren soll und die Durchgängigkeit zu allen internen sowie externen Akteuren sichert (Friedenthal et al. 2011). In den letzten Jahren hat sich das „V-Modell-VDI 2206“ als zentrales Vorgehensmodell des System Engineering in der Produktentwicklung etabliert (Abramovici et al. 2018; Ahrens und Hieronymus 2014, S. 3-4; Friedrich et al. 2009, S. 1-27; Scharch 2016, S. 16-25). Mit steigender Interaktionsintensität der Entwicklungspartner aus dem Ingenieurs- und Informatikumfeld erhöhen sich aber auch die Anforderungen an die Vorgehensmethodik und die Steuerung im PEP (Eigner et al. 2017, S. 9-38; Gehrke et al. 2006, S. 1-2; Vajna 2014, S. 13-24). Die aktuellen Hauptprobleme in der Produktentwicklung begründen sich unter anderem in einem fehlenden, vernetzten und adaptiven IT-Steuerungs- und Entscheidungsfindungssystem (Kunath und Winkler 2019, S. 322-327). Die bestehenden monolithischen Einzelsystemlösungen (z. B. ERP, Product Lifecycle Management (PLM), Produktplanungssystem (PPS), Customer Relationship Management (CRM) oder Dealer Management System (DMS)) verursachen einen lückenhaften, kaum automatisierten Informations- und Kommunikationsfluss zwischen den verschiedenen Fachbereichen (Müller et al. 2020; Leyer und Schneider 2021). Weitere Probleme dieser unbefriedigenden Zusammenarbeit sind wenig strukturierte Fachbereichsabstimmungen, zeitintensive, manuelle Freigabeprozesse sowie kaum vernetzte Datenbanken. Zusätzlich erhöhen die Insellösungen Doppelarbeits- und Datenrecherchezeiten, sind nicht real-time fähig sowie intransparent und liefern zusätzlich unstrukturiertes, manuelles Administrieren des PEP. Den bisherigen IT-Systemanwendungen in der PE fehlt es an einer gemeinsamen Terminologie und daher erscheinen sie auch als nicht mehr zeitgemäß (Hoffmann 2018, S. 1-3). Aus genannten Gründen ist der derzeitige Produktentwicklungsprozess mit all seinen manuellen Abläufen, der aktuellen Organisationsform sowie der bestehenden Zusammenarbeitssysteme stark optimierungsbedürftig (Alan und Urbach 2019, S. 12-44; Stark et al. 2016; Rumpe 2012, S. 1; Hesse 1992, S. 12-33). Der Einsatz eines automatisierten, adaptiven IT-Steuerungs- und Entscheidungsfindungssystems in der Produktentwicklung wird für die Unternehmen und die zu treffenden Entscheidungen immer wichtiger (Bullinger 1994, S. 30-32; Universität Potsdam 2020; Schaub 2019, S. 16-18; van Giffen et al. 2020; Leyer und Schneider 2021). Für eine durchgängige Automatisierung im PEP sowie selbstlernenden, regelbasierenden Teilsystemen, wie z. B. Entscheidungsfindung, ist ein Definieren der notwendigen Komponenten für ein theoretisches Konzept erforderlich.

3 Konzept für ein selbstlernendes Assistenzsystem in der Produktentwicklung

Zum Bestehen im globalen Wettbewerb müssen alle Unternehmensfunktionen jedoch auf innovative Weise digital organisiert werden und interdisziplinär zusammenarbeiten (Wahlster 2019, S. 13-14; Müller und Bostrom 2016, S. 553-571). Mit der Automatisierung verschiedener Prozessschritte, einer durchgängigen Vernetzung aller Systemkomponenten, einer assistierten Koordination von Interaktionen zwischen den verschiedenen Nutzern sowie dem digitalen Management von Aufgaben ließe sich ein cyber-physisches System (CPS) erschaffen, unnötige Ressourcenverschwendung reduzieren und die Effizienz im PEP steigern (Kuron et al. 2017, S. 87 ff.; Aichele und Doleski 2014, S. 509). Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, mit der Entwicklung eines anwenderfreundlichen, selbstlernenden Assistenzsystems zur Verbesserung der Interaktionen im automatisierten Entscheidungsfindungsprozess der Produktentwicklung dringend zu beginnen. In der wissenschaftlichen Literatur wird dabei auch von hybrider Zusammenarbeit gesprochen.

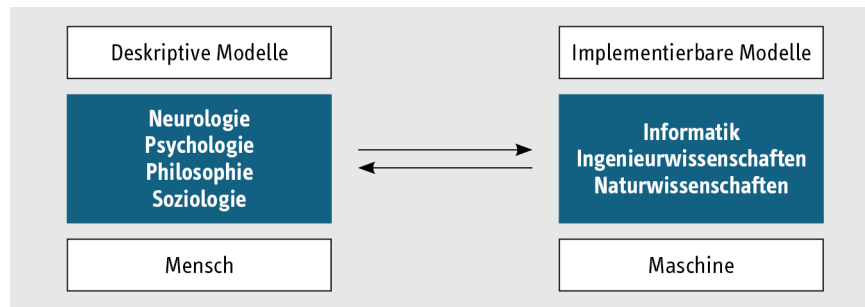


Bild 2: Hybrides Interaktionsformat (Wolff und Cunningham 2020; RWTH Aachen University 2020)

Die Entwicklung von „hybrider“ Technologie ist auf Grund zweier parallel verlaufender Forschungsdisziplinen entstanden. Zum einen haben Human- und Sozialwissenschaftler deskriptive Modelle zur Beschreibung menschlicher Tätigkeiten entwickelt. Andererseits setzen Informatiker und Ingenieure quantitative Modellierungsmodelle zur Realisierung technischer Systeme ein. Diese hybride Zusammenarbeit ermöglicht eine algorithmische Formalisierung von kognitiven Anwendungen und erleichtert insofern eine digitale Interaktion der einzelnen Beteiligten. Diese multidisziplinäre Methode ermöglicht eine Entwicklung von neuartigen, kognitiven, technischen Systemen für eine assistierte HCI (Alan und Urbach 2019, S. 12-44; BMBF 2016, S. 36-42; RWTH Aachen University 2020; Leyer und Schneider 2021). Sie bildet damit ein wesentliches Element bei der Entwicklung eines selbstlernenden, anwenderfreundlichen Assistenzsystems in der Produktentwicklung. Durch ein stufenweises Automatisieren des Assistenzsystems und der Entwicklung weiterer Kompetenzen, wie maschinelles Erkennen, Interagieren und das Treffen von Entscheidungen wird mit dem assistierten IT-System eine systemische, anwenderfreundliche Lösung im PEP geschaffen. Dabei sollte grundsätzlich beachtet werden, dass in der komplexen Interaktion ein „Dialog des Technischen mit dem Humanen“ stattfindet und so ein Verständnis zur gemeinsamen Problemlösung zwischen den Fachbereichen erzielt werden kann (Horx 2016; Gluchowski und Chamonie 2016, S. 4 ff.). Mit diesen Erkenntnissen über digitale, hybride Systeme und der Analyse der bestehenden Probleme soll ein theoretischer Ansatz zur Entscheidungsfindungsoptimierung im Produktentwicklungsprozess gestaltet werden. Bei der Ideenentwicklung muss beachtet werden, wie die Kompetenzen der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, die arbeitsorganisatorische Ausgestaltung und die technischen Konzepte wirksam zusammenkommen (Albers et al. 2017, BMBF 2018, Hirsch-Kreinsen und Hompel 2017). Am Anfang der Konzeptentwicklung für automatische Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung steht neben der Analyse der genannten Probleme auch die Aufstellung von künftigen Bedürfnissen und Anforderungen an dieses innovative Assistenzsystem. Es soll erst teilautomatisch und später vollautomatisch die algorithmische Entscheidungsfindung im PEP übernehmen, mit Ausreißererkennung und Feedbackschleifen den Algorithmus durch Selbstlernen weiterentwickeln und dabei alle mitwirkenden Akteure nachhaltig beteiligen. Die Herleitung der neuen Anforderungen ist dabei überwiegend geprägt durch den Wandel zur dynamischen, prozessbezogenen Arbeitsmethode, zu selbstständigen Teams und digitalen, überwiegend autonomen Ökosystemen (Anderl et al. 2006). Ebenso steigert der hohe Grad an Interdisziplinarität (Techniker, Informatiker, Ökonom, Psychologen, Juristen) die Entwicklungskomplexität sowie die kreative Informationsarbeit die Interaktionsanforderungen an den künftigen, automatisierten PEP-Assistenten (Gluchowski und Chamonie 2016, S. 4 ff.). Ein wesentlicher Anspruch an die IT-Systemsteuerung ist eine durchgängige Interoperabilität. Aus der bisherigen Forschungstätigkeit (Kongressgespräche mit Experten, der durchgeführten Literatur- und Studienrecherche und einer eigenen Empirie) ergeben sich die folgenden Anforderungen an eine erweiterte, smarte Systemsteuerung zur Entscheidungsfindung in der Produktentwicklung.

Die gewonnenen Erkenntnisse können in die Perspektiven der Anwender, das IT-System und Services differenziert werden. Wichtige Merkmale im Bezug auf die Anwender sind die direkte Einbindung externer und interner Nutzer, ein hybrider Rollen- und Rechtesplitt und flexible, agile Zusammenarbeitsformate. Notwendige systemische Anforderungen sind eine weltweite Vernetzung,

hohe Interoperabilität mit marktgängigen Devices, Echtzeit-Antwort, eine zentrale Vernetzung mit internen und externen Informations- und Wissensdatenbanken, die Erfüllung hoher Sicherheitsstandards und automatische Systemoptimierungen durch Erkennung neuer Datenmuster. Aus der Serviceperspektive sind Automatisierungen der Administration, automatisierte Recherchen (mit Unterstützung von Recommender-Systemen), ein Real-Time Projektcontrolling und ein adaptives Automatisieren von Freigaben und Beauftragungen wesentliche Bestandteile der Anforderungen an ein IT-System in der Produktentwicklung (Eigner et al. 2017, S. 9-38; Abramovici et al. 2018; Stark et al. 2016; BMBF 2018; Hirsch-Kreinsen und Hompel 2017; Ebert 2016; Gluchowski und Chamonie 2016, S. 4 ff.). Mit den genannten Anforderungen kann die Entwicklung einer assistierten IT-Systemlösung für eine innovative Unterstützung zur Entscheidungsfindung in der Produktentwicklung gestartet werden. Gefordert ist ein selbstlernendes, assistiertes sowie computerunterstütztes Lösungskonzept mit geschäftsprozess- und systemsteuernden Funktionen zur Verarbeitung von Daten für eine regelbasierte Entscheidungsfindung und ein aktiv betriebenes Kompetenz- und Wissensmanagement (Eigner et al. 2017, S. 9-38; Koch und Alt 2017, S. 1; Bergman und Timm 2020). Es ist in einem ersten Teilschritt das Ziel, ein Konzept für ein adaptives und rechnergestütztes Entscheidungsfindungssystem für den PEP zu entwickeln, welches anhand von durchgeführten Handlungen Strukturen der Anwenderabsichten erkennen und in interpretierbare Informationen umwandeln sowie bei der Umsetzung der Aufgaben unterstützen kann. Um diesem Systemanspruch gerecht zu werden, müssen im Vorfeld die Phasen im Entwicklungsprozess in verschiedene Aufgabekassen differenziert werden (Ludwig 2015, S. 7). Mit dem neuen Software-Lösungsansatz – selbstlernendes und regelbasiertes Entscheidungsfindungsmodell – soll die interdisziplinäre Kommunikation für Freigaben in der Produktentwicklung erheblich vereinfacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, durch eine transparente Entwicklung des IT-Systems das Vertrauen in die künftige Interaktion Mensch-Computer aufzubauen (Leyer und Schneider 2021). Aufgrund der angeführten Anforderungen an ein autonomes, kollaboratives Entscheidungsfindungssystem (Assistenzsystem in der PE) wurde ein erstes Architekturmodell für eine Anwendung in der Produktentwicklung der Automobilindustrie erstellt:

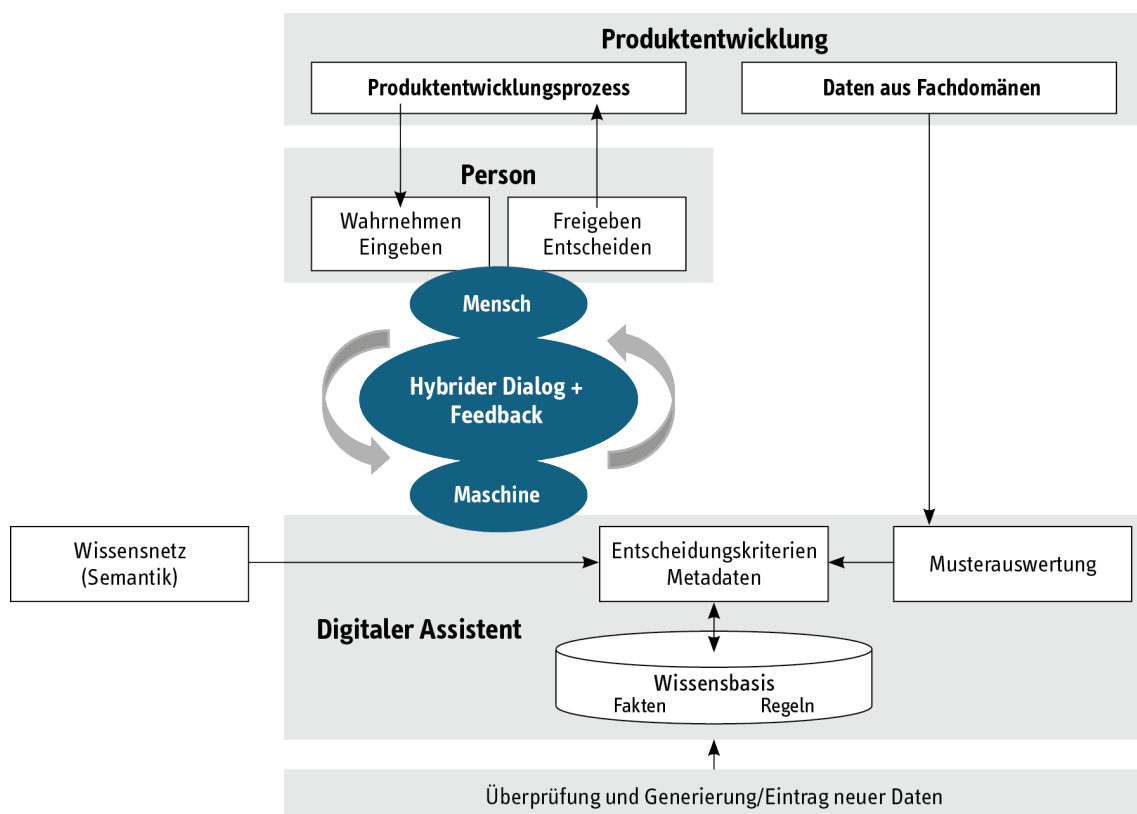


Bild 3: Architekturentwurf für ein dynamisches, selbstlernendes Entscheidungsfindungssystem

Mit dem Entwurf eines autonomen, assistierten Vorgehenstools (Abb. 3) zur Findung von Entscheidungen sollen der theoretische Ansatz und die Systemarchitektur an ein smartes „Software-System“ veranschaulicht werden. Das selbstlernende und computerunterstützte Assistenzsystem ist mit seiner Interoperabilität digitales Steuergerät und Unterstützer für die Entscheidungsfindung in den einzelnen Prozessphasen der Produktentwicklung. Somit soll sichergestellt werden, dass die Zusammenarbeit Mensch und autonomes System zuverlässig funktioniert. Der digitale Assistent navigiert automatisch den Freigabeprozess und übernimmt dabei die Kommunikationssteuerung und ein Teil der administrativen Aufgaben. Mit seiner aktiven Assistenzfunktion unterstützen spezielle Algorithmen den Menschen bei der Ausführung von bisher manuellen Tätigkeiten z. B. bei automatischen Recherchen in Wissensdatenbanken und einer damit verbundenen Mustererkennung zur Wissensgenerierung sowie beim Treffen von Entscheidungen als auch Erteilen von Freigaben. Des Weiteren soll der digitale Assistent die einzelnen Datenbanken und Rechnersysteme der beteiligten Fachdomänen (technische Entwicklung, Vertrieb, IT, Qualitätssicherung, Beschaffung, Produktion und Recht) über entwickelte Datenschnittstellen so intelligent miteinander vernetzen, dass Informationen und Wissen jederzeit und überall die Entscheidungsfindung im Produktentwicklungsprozess unterstützt. Zudem kontrolliert das Assistenzsystem autonom die erreichten Ergebnisse, regelt unter Anwendung einer Ausreißerererkennung sowie Feedbackschleifen die Optimierung der Algorithmen und bietet auf Grund neuester Datenlagen regelmäßig neue Lösungsvorschläge für bisher unvollständige Formalsimen (Mainzer 2019, S. 33-35). Die möglichen Zeitersparnisse durch die automatisierte Entscheidungs- und Freigabeunterstützung ließen sich für weitere kreative Aktivitäten nutzen. Für die Umsetzung einer solchen smarten Entwicklungsprozessstruktur müssen die Unternehmen eine vollkommen neue Technologiearchitektur entwickeln und installieren (Porter und Heppelmann 2018, S. 1-23). Von bedeutender Relevanz ist auch die Qualifizierung der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen zum Umgang mit den innovativen, multimodalen Systemen (Wahlster 2019, S. 13-14). Mit dem digitalen, assistierten IT-System könnte es gelingen, künftig das große Problem der zeitintensiven, manuellen Entscheidungs- und Freigabeprozesse im PEP deutlich zu reduzieren und Entwicklungszeiten zu verkürzen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dieser Ausarbeitung wurde ein erster Einblick zum Stand der Forschung über die Konzeption eines automatischen und selbstlernenden Entscheidungsfindungssystems in der Produktentwicklung vermittelt. In der Einleitung sollte auf die aktuelle Situation und die Problematiken bei der Entscheidungsfindung zwischen den involvierten Fachbereichen in der Produktentwicklung hingewiesen werden. Dabei stand auch die Definition einer Forschungsmethode und die daraus gewonnenen Erkenntnisse im Fokus. Das Fazit war, dass bisherige Interaktions- und Organisationsmodelle häufig passive Systeme sind und ihren Nutzungszeitraum teilweise überschritten haben (Ludwig 2015, S. 7; Porter und Heppelmann 2018, S. 1-23). Die im Rahmen der Analyse gewonnenen Erkenntnisse zu fachbereichsübergreifenden Interaktionen bei Entscheidungen galt es dezidiert zu erfassen und bei der Entwicklung von Anforderungen für eine Konzeptidee zu nutzen. Mit der Definition von künftigen Anforderungen, insbesondere an einen selbstoptimierenden Algorithmus zur regelbasierten Entscheidungsfindung sowie automatischen Freigabeerteilung für den Produktentwicklungsprozesses, ist ein erster Architekturentwurf für ein dynamisches, anwenderfreundliche Assistenzsystem (Abb. 3) entstanden (Porter und Heppelmann 2018, S. 1-23). In der Informationsgesellschaft wird bei der Suche nach Antworten immer mehr auf neue Technologien und Algorithmen der künstlichen Intelligenz gesetzt (Ludwig 2015, S. 7; Leyer und Schneider 2021). Ein wirksamer und zugleich auch vielversprechender Weg für die Unternehmen wäre dazu die Entwicklung hybrider Teams (Mensch-Computer), wo unterschiedliche autonome Systeme und mehrere Menschen gemeinsame Problemstellungen in der Produktentwicklung lösen (Wolff und Cunningham 2020; Gross und HCI 2017). Grundsätzlich eignet sich diese aktive und digitale Systemlösung auch für die Optimierung der Produktentwicklung in anderen Branchen. Eine

Akzeptanz innovativer Technologien und die Nutzung technischer Artefakte wird in der Mensch-Computer-Interaktion als sozialer Partner mehr und mehr wahrgenommen (Wachsmut 2013, S. 4-8). Mit diesem Paper zum selbstlernenden und automatisierten Entscheidungsfindungs- und Freigabeassistenten soll proaktiv ein erster Konzeptansatz zu unterstützenden und adaptiven Systemanwendungen im PEP der Automobilindustrie gezeigt werden. In den nächsten Schritten geht es ganz besonders darum, die neusten Erkenntnisse zur aktiv, assistierten Interaktion in der Produktentwicklung weiter zu entwickeln und konkrete Anwendungsbeispiele für die Praxis, wie z. B. die Entwicklung eines ersten Minimum Viable Products (MVP) zur automatisierten Erteilung von Freigaben, zu modellieren. Insofern empfiehlt es sich dringend, dass ein weiteres intensives Auseinandersetzen mit selbstlernenden und computerunterstützten Zusammenarbeitsformaten in der Produktentwicklung der Automobilindustrie stattfindet. Dieses aktive, selbstassistierte IT-Entscheidungsfindungs- und Freigabebetool wird künftig zu einem nachhaltigen und digitalen Helfer für den gesamten Produktentwicklungsprozess von der Konzeptidee bis zur technischen Produktbeschreibung.

Literatur

Zeitschriftenaufsatz:

Porter und Heppelmann 2018 PORTER, Michael E.; HEPELMANN, James E.: *Wie smarte Produkte Unternehmen verändern*. In: *Harvard Business Manager (2018)*, S. 1-23.

Beitrag in Sammelwerk (z. B. Beitrag in einem Konferenzband):

Hirsch-Kreinsen und Hompel 2017 HIRSCH-KREINSEN, Hartmut; HOMPEL, Michael Ten: Digitalisierung industrieller Arbeit: Entwicklungsperspektiven und Gestaltungsansätze. In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael Ten: *Handbuch Industrie 4.0*. Bd. 3. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.

Müller und Bostrom 2016 MÜLLER, Vincent C.; BOSTROM, Nick: Future Progress in Artificial Intelligence: A Survey of Expert Opinion. In: Müller, Vincent C.: *Fundamental Issues of Artificial Intelligence*. Basel: Springer International Publishing, 2016, S. 553-571.

Buch:

Abramovici et al. 2018 ABRAMOVICI, Michael; GEBUS, Philip; SAVARINO, Philipp: *Engineering smarter Produkte und Services – Plattform Industrie 4.0 Studie*. München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2018.

Aichele und Doleski 2014 AICHELE, Christian; DOLESKI, Oliver-D.: *Smart Market: Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt*. Wiesbaden: Springer, 2014, S. 509.

Albers et al. 2017 ALBERS, Albert; RAPP, Simon; BIRK, Clemens; BURSAC, Nikola: *Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung*. Abstractheft des Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017, Track 3, Session 2.

Appelfeller et al.2018 APPELFELLER, Wieland; FELDMANN, Carsten: *Markt- und Produktmanagement – Die digitale Transformation des Unternehmens*. Berlin/Heidelberg: Gabler Verlag, 1999, S. 157-159.

- Bauerhansl et al. 2014 BAUERNHANSL, Thomas; HOMPEL, Michael ten; VOGEL-HEUSER, Birgit: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Wiesbaden: Springer, 2014, S. 174.
- Bullinger 1994 BULLINGER, Hans-Jörg: *Einführung in das Technologiemanagement*. Berlin/Heidelberg: Vieweg+Teubner Verlag, 1994, S. 30-32.
- Gluchowski und Chamonie 2016 GLUCHOWSKI, Peter; CHAMONI, Peter: *Analytische Informationssysteme*. 5. Aufl. Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2016, S. 4 ff.
- Eigner et al. 2017 EIGNER, Martin; KOCH, Walter; MUGGEO, Christian: *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 9-38.
- Friedenthal et al. 2011 FRIEDENTHAL, Sanford; MOORE, Alan; STEINER, Rick: *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*. 2. Aufl. Waltham: Morgan Kaufmann/Elsevier, 2011.
- Friedrich et al. 2009 FRIEDRICH, Jan; HAMMERSCHALL, Ulrike; KUHRMANN, Marco; SIHLING, Marc: *Das V-Modell XT*. 1. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, S. 1-27.
- Gross und HCI 2017 GROSS, Tom; HUMAN-COMPUTER INTERACTION EDUCATION AND DIVERSITY IN MASAOKI KUROSU: *Human-Computer Interaction. Theories, Methods, and Tools*. Cham: Springer, 2017.
- Hesse 1992 HESSE, Wolfgang: *Software-Entwicklung*. München: Oldenbourg München, 1992, S. 12-33.
- Kleinaltenkamp und Plinke 1999 KLEINALTENKAMP, Michael; PLINKE, Wulff: *Markt- und Produktmanagement – Die Instrumente des technischen Vertriebs*. 1. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999, S. 80 ff.
- Kuron et al. 2017 KURON, Ulrich; SCHÄFER, Dorothee; VOIGT, Erika: *Gestaltungsansprüche an Arbeit und Leben im digitalen Wandel*. Berlin/Münster: LIT, 2017, S. 87 ff.
- Ludwig 2015 LUDWIG, Bernd: *Planbasierte Mensch-Maschine-Interaktionen in multimodalen Assistenzsystemen*. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, S. 7.
- Mainzer 2019 MAINZER, Klaus: *Künstliche Intelligenz. Wann übernehmen die Maschinen*. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2019, S. 33-35.
- Raab-Steiner und Benesch 2015 RAAB-STEINER, Elisabeth; BENESCH, Michael: *Der Fragebogen*. 4. Aufl. Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG Wien, 2015, S. 17-19.
- Rumpe 2012 RUMPE, Bernhard: *Agile Modellentwicklung mit UML*. 2. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S. 1.
- Scheer 2018 SCHEER, August-Wilhelm: *Unternehmung 4.0 – Vom disruptiven Geschäftsmodell zur Automatisierung der Geschäftsprozesse*. Saarbrücken: AWSi Publishing, 2018, S. 8-202.
- Schmidt und Paetzold 2016 SCHMIDT, Tobias Sebastian; PAETZOLD, Kristin: *Agilität als Alternative zu traditionellen Standards in der Entwicklung physischer Produkte: Chancen und Herausforderungen*. Hamburg: 27. DfX-Symposium 2016, S. 256-264.
- Vajna 2014 VAJNA, Sándor: *Integrated Design Engineering*. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, S. 13-24.

Internet:

- Acatech 2019 ACATECH: *Zehn Zukunftsfragen zur KI-Entwicklung in Deutschland*. In: <https://www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0>, abgerufen am 20.03.2020.
- Ahrens und Hieronymus 2014 AHRENS, Volker; HIERONYMUS, Martin: *Das Kreismodell als Grundlage der Entwicklungsmethodik für cyber-physikalische Systeme*. In: <https://econpapers.repec.org/scripts/redir.pf?u=https%3A%2F%2Fwww.econstor.eu%2Fbitstream%2F10419%2F106163%2F1%2F814411665.pdf;h=repec:zbw:nordwp:201407>, abgerufen am 25.03.2018, S. 3-4.
- Alan und Urbach 2019 ALAN, Yilmaz; URBACH, Nils: *KI, mein Freund und Helfer – Herausforderungen und Implikationen für die Mensch-KI-Interaktion*. In: <https://www.fim-rc.de/Paperbibliothek/Veroeffentlicht/1048/wi-1048.pdf>, abgerufen am 23.02.2020, S. 12-44.
- Anderl et al. 2006 ANDERL, Reiner; PFEIFFER, Sabine; SCHMIEDE, Rudi: *Virtuelle Produktentwicklung in der Automobilindustrie*. In: https://www.researchgate.net/publication/273227206_Virtuelle_Produktenwicklung_in_der_Automobilindustrie, abgerufen am 30.01.2020.
- Bauernhansl et al. 2016 BAUERNHANSL, Thomas; KRÜGER, Jörg; REINHART, Gunther; SCHUH, Günther: *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. In: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Presse/Presseinformationen/2016/Juni/WGP_Standpunkt_Industrie_40.pdf, zuletzt geprüft am: 29.03.2018.
- Bergman und Timm 2020 BERGMAN, Ralph; TIMM, Ingo: *Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, KI-Forschung für die Praxis – DFki gründet Außenstelle an der Universität Trier*. In: <https://www.dfki.de/web/news/detail/News/dfki-aussenstelle-trier>, abgerufen am 27.03.2020.
- Bloom 2020 BLOOM, Nicholas: *Die Stanford-Forschung liefert eine Momentaufnahme einer neuen Wirtschaft, die von zu Hause aus arbeitet*. In: <https://news.stanford.edu/2020/06/29/snapshot-new-working-home-economy/>, abgerufen am 18.10.2020.
- BMBF 2016 BMBF: *Zukunft der Arbeit Innovationen für die Arbeit von morgen*. In: https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Zukunft_der_Arbeit.pdf, abgerufen am 18.03.2020, S. 36-42.
- BMBF 2018 BMBF: *Arbeitswelten 4.0: Wie gestaltet sich die Mensch-Technik-Interaktion in der Zukunft?*. In: <https://www.bildung-forschung.digital/de/arbeitswelten-4-0-wie-gestaltet-sich-die-mensch-technik-interaktion-in-der-zukunft-2235.html>, abgerufen am 18.03.2020.
- Brandes et al. 2011 BRANDES, Ulrik; GÜNTHER, Christoph; SITTIG, Eva; WEIKUM, Gerhard; ZENS, Joseph: *Wie erforschen: Kommunikation*. In: https://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/geschaeftsstelle/publikationen/allianzbroschuere_kommunikation.pdf, abgerufen am 07.01.2020, S. 16-19.
- Ebert 2016 EBERT, Christof: *Produktentwicklung und Industrie 4.0*. In: https://www.ias.uni-stuttgart.de/dokumente/vortraege/2016-06-29_Industrie40_ChristofEbert.pdf, abgerufen am 18.03.2020.

- Gassmann 2017 GASSMANN, Oliver: *Die Digitalisierung verändert das Geschäftsmodell*. In: https://www.unisg.ch/-/media/dateien/instituteundcenters/item/innovation-management/unternehmertag_olivergassmann.pdf, abgerufen am 09.03.2020.
- Gehrke et al. 2006 GEHRKE, Matthias; MEYER, Jan; SCHÄFER, Wilhelm: *Modellierung von Softwarekomponenten für mechatronische Systeme in UML auf Basis von Systemstrukturen*. In: https://web.cs.upb.de/archive/slab/fileadmin/Informatik/slab/veroeffentlichungen/2007_Modellierung_von_Softwarekomponenten_fuer_mechatronische_Systeme_in_UML_auf_Basis_von_Systemstrukturen.pdf, abgerufen am 22.03.2020, S. 1-2.
- Hoffmann 2018 HOFFMANN, Jörg: *Informationssystem-Architekturen produzierender Unternehmen bei software-definierten Plattformen*. In: <http://publications.rwth-aachen.de/record/751148/files/751148.pdf>, abgerufen am 27.03.2020, S. 1-3.
- Horx 2016 HORX, Matthias: *Menschen sind nicht digital*. In: <http://www.handelsblatt.com/my/unternehmen/management/zukunftsforscher-matthias-horx-menschen-sind-nicht-digital/14003174.html>, abgerufen am 12.03.2020.
- Jetter et al. 2020 JETTER, Hans-Christian; GEYER, Florian; SCHWARZ, Tobias; REITERER, Harald: *Mensch-Computer-Interaktion, Forschungsschwerpunkte*. In: <https://hci.uni-konstanz.de/forschung/forschungsschwerpunkte>, abgerufen am 23.03.2020.
- Klein 2017 KLEIN, Thorsten Philipp: *Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau*. In: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1284645/document.pdf>, abgerufen am 30.03.2020, S. 25-55.
- Koch und Alt 2017 KOCH, Michael; ALT, Florian: *Allgegenwärtige Mensch-Computer-Interaktion*. In: <https://www.unibw.de/usable-security-and-privacy/publikationen/pdf/koch2017informatikspektrum.pdf>, abgerufen am 23.02.2020, S. 1.
- Kotter 2017 KOTTER, John P.: *Accelerate!*. In: <https://hbr.org/2012/11/accelerate>, abgerufen am 07.01.2020.
- Kunath und Winkler 2019 KUNATH, Martin; WINKLER, Herwig: *Usability of information systems to support decision making in the order management process*. In: https://www.researchgate.net/publication/333986236_Usability_of_information_systems_to_support_decision_making_in_the_order_management_process, abgerufen am 13.03.2021, S. 322-327.
- Leyer und Schneider 2021 LEYER, Michael; SCHNEIDER, Sabrina: *Decision augmentation and automation with artificial intelligence: Threat or opportunity for managers?* In: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007681321000288?via%3Dihub>, abgerufen am 13.03.2021.
- Müller et al. 2020 MÜLLER, Patrik; GEMBARSKI, Paul Christoph; LACHMAYER, Roland: *Detektion von Konstruktionsfehlern durch eine automatisierte Objekterkennung mittels Deep Learning*. In: https://www.researchgate.net/profile/Patrik-Mueller-2/publication/346628303_Detektion_von_Konstruktionsfehlern_durch_eine_automatisierte_Objekterkennung_mittels_Deep_Learning/links/5fcd72b299bf188d4fd8b97/Detektion-von-Konstruktionsfehlern-durch-eine-

- automatisierte-Objekterkennung-mittels-Deep-Learning.pdf*, abgerufen am 13.03.2021.
- Robbins 2016 ROBBINS, C.: *Der Schnellste gewinnt*. In: https://archiv.handelsblatt.com/document?id=HB__8F94244C-0572-444C-BA3F-B7047A202655%7CHBPM__8F94244C-0572-444C-BA3F-B7047A202655&src=hitlist&offset=520, abgerufen am 09.12.2019.
- RWTH Aachen University 2020 RWTH AACHEN UNIVERSITY - CHAIR FOR COMPUTATIONAL SOCIAL SCIENCES AND HUMANITIES (CSSH): *Research*. In: <http://cssh.rwth-aachen.de/research>, abgerufen am 23.03.2020.
- Scharch 2016 SCHARCH, Manuel: *Vorgehensmodelle in der Softwareentwicklung*. In: https://wiwi.uni-giessen.de/gi_td/Apap_WI_GI_2016_04_VGM.pdf, abgerufen am 30.03.2020, S. 16-25.
- Schaub 2016 SCHAUB, Torsten: *Der universale Problemlöser*. In: https://www.uni-potsdam.de/fileadmin/projects/up-entdecken/docs/portal_wissen/2019/PortalWissen_1-2019_de_web.pdf, abgerufen am 25.10.2020, S. 16-18.
- Stark et al. 2016 STARK, Rainer; MÜLLER, Patrick; HAYKA, Haygazun; DREWINSKI, Roland: *Zusammenarbeit in der Produktentwicklung mangelt es an Transparenz*. In: <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/medien-aktuelles/presseinformationen/20160116-expertenstudie-zeigt-zusammenarbeit-in-produktentwicklung-mangelt-es-an-transparenz.html>, abgerufen am 23.02.2020.
- Universität Potsdam 2020 UNIVERSITÄT POTSDAM: *Digitale Prozesse*. In: <https://lswi.de/forschung/forschungsgruppen/digitale-prozesse>, abgerufen am 25.10.2020.
- van Giffen et al. 2020 VAN GIFFEN, Benjamin; BORTH, Damian; BRENNER, Walter: *Management von Künstlicher Intelligenz in Unternehmen*. In: <https://ics.unisg.ch/publications/management-von-kunstlicher-intelligenz-in-unternehmen>, abgerufen am 14.11.2020.
- Wachsmut 2013 WACHSMUT, Ipke: *Mensch-Maschine-Interaktion*. In: https://pub.uni-bielefeld.de/download/2628682/2628685/Wachsmuth_MMI.pdf, abgerufen am 23.03.2020, S. 4-8.
- Wahlster 2019 WAHLSTER, Wolfgang: *Künstliche Intelligenz: Digitales Verstehen*. In: <http://www.wolfgang-wahlster.de/wordpress/wp-content/uploads/KI-Digitales-Verstehen-GDNÄ-Festvortrag-2018-in-Naturwissenschaftlicher-Rundschau-Wahlster.pdf>, abgerufen am 27.03.2020, S. 13-14.
- Wolff und Cunningham 2020 WOLFF, Matthias; CUNNINGHAM, Douglas W.: *Forschungscluster Kognitive Systeme*. In: <https://www.b-tu.de/rc-cognitive-systems/>, abgerufen am 20.03.2020.

Wirkungsgraduntersuchungen am Antriebsstrang von Multifunktionsfahrzeugen unter Berücksichtigung von empirisch ermittelten Lastkollektiven

Driveline efficiency tests of multifunctional vehicles with regard to empirically determined load spectrums

Leon Stütz¹, Patrick Beck¹, Markus Kley¹

¹Hochschule Aalen, Institut für Antriebstechnik Aalen
Leon.Stütz@hs-aalen.de

Abstract (deutsch): Ein fortschreitender Transformationsprozess innerhalb der Branche stellt die Fahrzeugindustrie vor weitreichende Herausforderungen. In diesem Kontext soll die Optimierungen hinsichtlich der Getriebeeffizienz durch die Elektrifizierung von Antriebssträngen vorangetrieben werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden Wirkungsgraduntersuchungen am Getriebe eines elektrifizierten Multifunktionsfahrzeuges vorgenommen. Unter Berücksichtigung des empirisch ermittelten Gesamlastkollektivs des Multifunktionsfahrzeuges wird aufgezeigt, in welchen Betriebspunkten der Wirkungsgrad des Getriebes optimal ist und in welchen Bereichen des Drehmoment-Drehzahl-Kennfelds die Verlustleistungen und Verlustenergien am größten sind. Es konnte aufgezeigt werden, inwieweit der Getriebewirkungsgrad vom übertragenen Drehmoment und der Antriebsdrehzahl abhängt. Des Weiteren wird aufgezeigt, dass vor allem die Betriebspunkte im oberen Drehzahlbereich des Gesamlastkollektivs den größten Anteil am Energieverlust des Getriebes haben. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades in diesen Punkten bedeutet eine überproportionale Reduzierung der Energieverluste des Getriebes und damit des Fahrzeugs.

Keywords (deutsch):

Elektromobilität, Getriebewirkungsgrad, Lastkollektiv, Multifunktionsfahrzeug

Abstract (english): An ongoing transformation process within the industry presents the automotive industry with far-reaching challenges. In this context, the optimization of efficiency through the electrification of powertrains is to be promoted. Within the scope of this publication, efficiency studies are carried out on the transmission of an electrified multi-functional vehicle. Considering the empirically determined total load collective of the multifunctional vehicle, it is shown at which operating points the efficiency of the transmission is optimal and in which areas of the torque-speed map the power losses and loss energies are the greatest. It could be shown to what extent the transmission efficiency depends on the transmitted torque and the input speed. Furthermore, it is shown that especially the operating points in the upper speed range of the total load spectrum have the largest share in the energy loss of the transmission. An improvement of the efficiency in these points means a disproportionate reduction of the energy loss of the transmission and thus of the vehicle.

Keywords (english):

Electromobility, transmission efficiency, load collective, multifunctional vehicle

1 Einleitung

Bedingt durch den fortschreitenden Transformationsprozess innerhalb der Branche, steht die Automobilindustrie vor weitreichenden Herausforderungen. Treiber für den Wandel sind gesetzliche Regulierungen zum CO₂-Flottenzielwert, zur Einhaltung niedrigerer Schadstoffgrenzwerte und zur Verbesserung der Luftqualität vor allem in den Ballungszentren (Riegert et al. 2019). Infolge dieser Entwicklung wird die Situation nicht nur global, sondern auch in deutschen Städten zunehmend kritisch betrachtet. Gesundheits- und umweltbelastende Faktoren wie Abgase, Feinstaub und Lärm belasten die Lebensqualität und sind heutzutage als relevante Themen anzusehen (Haag und Ade 2015). Gerade im Bereich der Kommalfahrzeuge ergibt sich durch (Hybrid-)Elektrische Multifunktionsfahrzeuge ein entschiedener Vorteil, verglichen mit einem dieselhydraulischen Antriebssystem, in einem deutlich höheren Gesamtwirkungsgrad (Riegert et al. 2019). Die Optimierung des Wirkungsgrads bei Fahrzeugantrieben beschäftigt die Wissenschaft schon seit es Fahrzeuge gibt. Entwicklungsziele wie Reichweiterehöhung, Minimierung des Energiebedarfs pro gefahrene Kilometerleistung und Verringerung der CO₂-Emissionen gelten für Verbrennungskraftmaschinen als auch für elektrisch-betriebene Fahrzeuge. Gleichwohl ist die Effizienzsteigerung bei elektrischen Fahrzeugen von größerer Bedeutung als bei Verbrennungskraftmaschinen. Grund hierfür ist die abweichende Kostenstruktur eines Elektrofahrzeugs. So beträgt der durchschnittliche Kaufpreisaufschlag für ein Elektrofahrzeug in der Neuanschaffung mehr als 40 % im Vergleich zu vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Köllner 2019). Grund hierfür sind mitunter die hohen Kosten für die Batterien zur Speicherung der elektrischen Energie im Fahrzeug. Zur Erreichung der Kostenziele für ein Elektrofahrzeug ist es deshalb wichtig, eine möglichst geringe Batteriekapazität zu verwenden, um dabei die Gesamtkosten des Fahrzeugs im Rahmen zu halten. Gleichzeitig jedoch fordern Kunden eine Mindestreichweite des Fahrzeugs, damit das Fahrzeug für die Kunden ein Mindestmaß an Praxistauglichkeit darstellt. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades im Antriebsstrang führt zu einem geringeren Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs und folglich zu einer geringeren Mindestkapazität der Fahrzeugbatterie. Folgerichtig können Fahrzeughersteller größere Entwicklungsaufwendungen mit dem Ziel der Reduzierung von Ineffizienzen im Antriebsstrang einsetzen, da sich Wirkungsgradsteigerungen in einem größeren Verhältnis als bisher bei Verbrennungskraftmotoren, positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge durchschlagen. Deshalb ist es im Zuge der Elektromobilität wichtiger denn je effiziente Antriebsstränge zu entwickeln.

2 Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit werden Untersuchungen am Getriebe eines elektrifizierten Multifunktionsfahrzeuges vorgenommen. Das übergeordnete Ziel dabei ist die Weiterentwicklung des bestehenden Antriebsstrangs durch Schaffung eines vertieften Verständnisses bezüglich der Energieverluste des Getriebes. Im Zuge der Transformation innerhalb der Fahrzeugindustrie hin zu elektrisch-betriebenen Fahrzeugen, gibt es veränderte Rahmenbedingungen und Zielsetzungen, wie z.B. Reichweitenproblematik, Thermomanagement der Batterietechnik, Ladeinfrastruktur, u.v.m., die spezifisch für die neue Technologien gelten.

Die dargestellten Forschungsergebnisse verfolgen das Ziel der Steigerung des Wirkungsgrades im Antriebsstrang eines elektrischen Multifunktionsfahrzeugs mit Fokus auf das zweistufige Getriebe des Fahrzeugs. Unter Berücksichtigung der empirischen Lastkollektive des Fahrzeugs soll aufgezeigt werden, in welchen Bereichen des Drehmoment-Drehzahl-Kennfelds der Wirkungsgrad des Getriebes am größten ist und in welchen Bereichen die Verlustleistung am größten sind. Weiterhin wird das Ziel verfolgt, das Fahrzeug so wenig wie möglich in Betriebspunkten zu betreiben, die einen geringen Wirkungsgrad aufweisen. In Summe sollen durch Verschiebung der Zeitanteile der jeweiligen Lastpunkte unter Berücksichtigung deren Wirkungsgrade, Effizienzpotentiale aufgezeigt werden.

3 Stand der Technik

3.1 Multifunktionsfahrzeuge

Multifunktionsfahrzeuge kennzeichnen sich dadurch, dass neben dem Fahrtrieb für die Fortbewegung auch noch am Antriebsstrang angeflanschte Nebenaggregate wie beispielsweise Bürsten, Schneefräsen oder Häcksler angetrieben werden. Diese Fahrzeuge finden sich u. a. bei selbstfahrenden Bau- und Arbeitsmaschinen, Forstmaschinen und allradgetriebenen Kommunalfahrzeugen wieder, bei denen ein kleiner Wendekreis im Vordergrund steht (Stütz et al. 2017). Im Hinblick auf die Einordnung eines Multifunktionsfahrzeugs in ein Nutzfahrzeugsegment wird in der Literatur mehrfach der Begriff mobile Arbeitsmaschine genannt. Unter dem Begriff mobile Arbeitsmaschinen wird eine Maschine verstanden, die einen gewissen Arbeitsauftrag besitzt. Diese Maschine verrichtet ihre Aufgabe jedoch nicht stationär an einem Ort, sondern kann sich autark räumlich bewegen. Man findet sie häufig in den Bereichen der Forst- und Landwirtschaft oder im Bereich der kommunalen Geräteträger und des Öfteren unter dem Namen „Non-Road Mobile Machinery“, kurz NRMM. Jedoch existiert hierzu keine exakte, allgemeingültige und anerkannte Definition weshalb es in der Literatur verschiedenste Definitionen für mobile Arbeitsmaschinen gibt. Im Hinblick auf das Hauptmerkmal von mobilen Arbeitsmaschinen, welche sowohl im Fahr- als auch im Arbeitsantrieb signifikante Energieanteile besitzen, wird sich in diesem Konferenzbeitrag an die Definition von (Geimer und Pohlandt 2014) angelehnt, in der es heißt:

„Mobile Arbeitsmaschinen haben die Aufgabe der Verrichtung eines Arbeitsprozesses; sie verfügen dazu über einen Fahr- und Arbeitsantrieb mit signifikanten Energieanteilen in beiden Antrieben“ (Geimer und Pohlandt 2014, S. I-5).

Demnach unterscheidet sich ein Multifunktionsfahrzeug von einem PKW und einem LKW durch den Arbeitsantrieb und von stationären Maschinen durch den Fahrtrieb. Angelehnt an dieser Definition wird als Referenzfahrzeug der Holder C70 für die Untersuchungen herangezogen. Der Holder C70 ist ein multifunktionaler knickgelenkter Geräteträger, welcher mit einem hydrostatischen System, bestehend aus einer Hydropumpe und vier am Rad wirkenden Hydromotoren, angetrieben wird. Dabei wird die Hydropumpe von einem 48 kW Dieselmotor angetrieben. Der Hydraulikfluss wird durch elektrische Ventilblöcke angesteuert und sorgt für eine optimale Drehmomentverteilung auf die angetriebenen Räder. Ferner kann dadurch je nach Bedarf zwischen Allrad- und Zweiradmodus umgeschaltet werden (Max Holder 2020). Dieses integrierte System trägt den Namen Holder Powerdrive und wird in Bild 1 schematisch dargestellt.

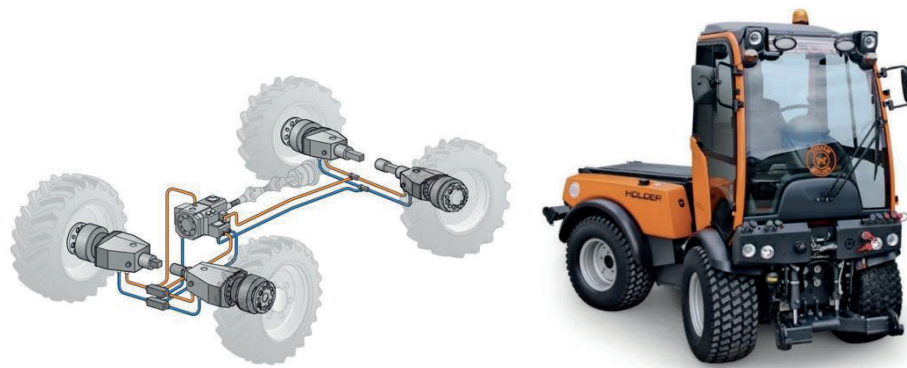


Bild 1: Holder Powerdrive / Holder C70 (Max Holder 2020)

3.2 Getriebewirkungsgrad

Bei der Wirkungsgradbestimmung von Getrieben wird zwischen verschiedenen Verfahren unterschieden. Grundsätzlich differenziert man zwischen einer Verlustleistungsmessung und einer Leistungsdifferenzmessung (Novak 2010). In der nachfolgenden Abbildung sind die unterschiedlichen Verfahren zur Wirkungsgradbestimmung aufgezeigt.

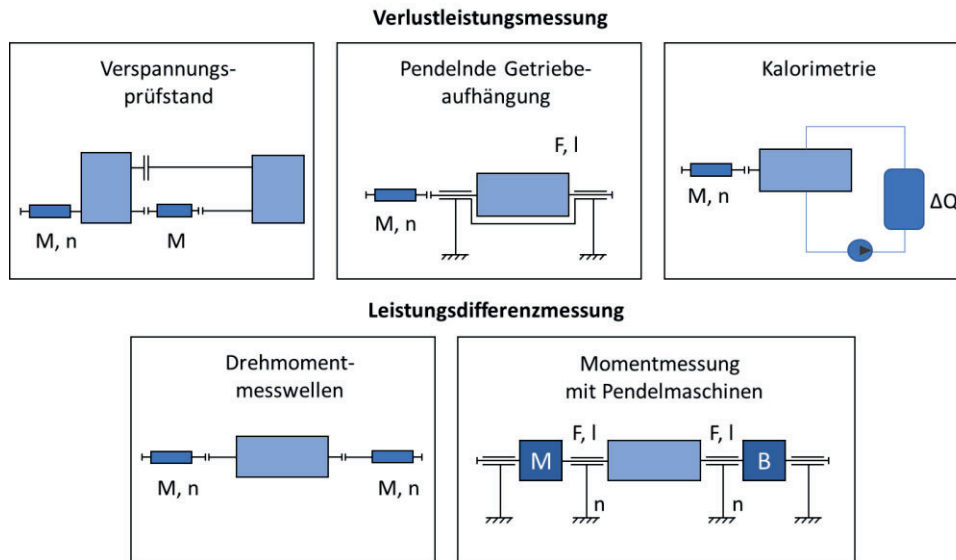


Bild 2: Verfahren zur Wirkungsgradmessung (vgl. Imdahl et al. 1992)

Bei der Wirkungsgradbestimmung mittels Verlustleistungsmessung wird die Verlustleistung P_V und die Antriebsleistung P_{An} messtechnisch ermittelt. Hierfür kann die Messung mit einem Verspannungsprüfstand, einer pendelnden Getriebeaufhängung oder mittels Kalorimetrie durchgeführt werden (Novak 2010). Die erreichbare Messgenauigkeit ist bei der Verlustleistungsmessung u.a. abhängig von der Messgenauigkeit der Messmittel und vom aktuellen Wirkungsgrad (Imdahl et al. 1992). Der Wirkungsgrad wird dabei wie folgt berechnet:

$$\eta = 1 - \frac{P_V}{P_{An}} \quad (3.1)$$

Wird eine Leistungsdifferenzmessung durchgeführt, wird hingegen die Antriebsleistung P_{An} und die Abtriebsleistung P_{Ab} messtechnisch erfasst und direkt miteinander in Relation gesetzt. Für die Erfassung der Messdaten werden meist Drehzahl- und Drehmomentsensoren oder Pendelmaschinen verwendet (Novak 2010). Bei der Leistungsdifferenzmessung hängt die Messgenauigkeit des Wirkungsgrads zum größten Teil von der Genauigkeit der Messgeräte ab (Imdahl et al. 1992). Anhand der gemessenen Drehzahlen und Drehmomenten am An- und Abtrieb kann die jeweilige Leistung berechnet werden.

$$P = 2\pi \cdot M \cdot n \quad (3.2)$$

Aus der berechneten An- und Abtriebsleistung wird der Wirkungsgrad dann wie folgt berechnet:

$$\eta = \frac{P_{Ab}}{P_{An}} \quad (3.3)$$

Die Gesamtverlustleistung eines Getriebes kann in lastunabhängige und lastabhängige Verluste unterteilt werden. Somit ergibt sich eine weitere Aufteilung in Verzahnungsverlustleistung, Lagerverlustleistung, Dichtungsverlustleistung und sonstige Verlustleistungen (Hoppert 2015).

$$P_V = \underbrace{P_{VZ} + P_{VZ0}}_{\text{lastabhängig}} + \underbrace{P_{VL} + P_{VLO} + P_D + P_{VX}}_{\text{lastunabhängig}} \quad (3.4)$$

Bei den lastabhängigen Verlusten bilden die Verzahnungsverluste (P_{VZ}) den zahlenmäßig größten Anteil und erfahren bei steigendem Drehmoment eine proportionale Zunahme. Die Lagerverluste (P_{VL}) verhalten sich bei Lastabhängigkeit linear zum Lastmoment, sind jedoch bedeutend geringer als die Verzahnungsverluste. Die lastunabhängigen Verluste beinhalten alle Verlustarten, wobei die Verzahnungsverluste (P_{VZ0}) eher geringer ausfallen. Die Lager- und Dichtungsverluste (P_{VLO} , P_D) sind extrem drehzahlabhängig und haben ihre größten Reibverluste bei maximaler Drehzahl. Ferner besitzen bei einer Öltauchschmierung die Planschverluste einen erheblichen Anteil und sind ebenfalls stark drehzahlabhängig (Novak 2010).

4 Versuchsaufbau (Leistungsdifferenzmessung)

Zur Bestimmung der Wirkungsgrade in den einzelnen Lastpunkten des Getriebes wird auf die vorhandene Infrastruktur am Institut für Antriebstechnik Aalen (HS Aalen) zurückgegriffen. Mittels des Antriebsprüfstands APS300 ist eine performante und reproduzierbare Prüfstandsumgebung zur empirischen Ermittlung des Wirkungsgradkennfelds des zweistufigen Getriebes vorhanden.

Der Antriebsprüfstand besteht aus zwei Gleichstrommaschinen – eine Antriebsmaschine (GSM1) mit 300 kW und eine Abtriebsmaschine (GSM2) mit 361 kW Leistung. Der GSM1 ist ein Übersetzungsgetriebe nachgelagert, sodass eine Antriebsdrehzahl prüflingsseitig von 8.000 1/min erreicht wird. Durch dieses Übersetzungsverhältnis ist es möglich die im untersuchten Multifunktionsfahrzeug benötigten Antriebsdrehzahlen von bis zu 6.000 1/min zu erreichen. Weitere Hauptbestandteile des Prüfstands sind die Drehzahl- und Drehmomentsensoren zur Erfassung der für die Berechnung des Wirkungsgrades relevanten Messdaten. Auf der Antriebsseite befindet sich ein Drehzahlsensor vom Typ: POG 90, Hersteller: Hübner und auf der Abtriebsseite vom Typ: IE-60-H, Hersteller: Heidenhain. Die Drehmomentmesswellen auf der An- und Abtriebsseite vom Typ: T10F, Hersteller: HBM, erfassen die Drehmomentmessdaten entsprechend Werkskalibrierprotokoll mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,263$ %.

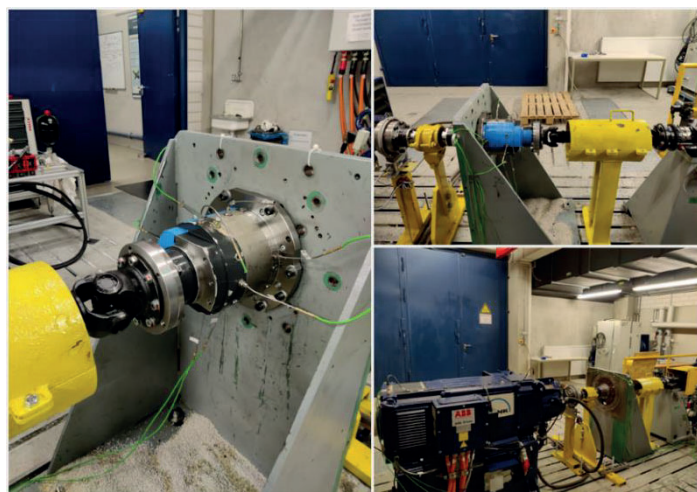


Bild 3: Versuchsaufbau Getriebeprüfstand APS300

Die Automatisierungstechnik des APS300 regelt die elektrischen Maschinen während des Prüflaufs mittels Master-Slave-Prinzip. Wie bei Regelsystemen üblich, gibt es ein zeitabhängiges Verhalten der Regelparameter, wodurch Überschwingungen während des Regelvorgangs erzeugt werden.

5 Bestimmung des Wirkungsgradkennfelds und der Verlustenergie

Bei der Identifikation der Optimierungspotentiale hinsichtlich des Wirkungsgrades, ist es wichtig, zwei Haupteinflussfaktoren auf den durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrad über die gesamte Lebensdauer eines Multifunktionsfahrzeuges zu untersuchen: Zum einen ist der spezifische Wirkungsgrad je Betriebspunkt in Abhängigkeit des anliegenden An- und Abtriebdrehmoments sowie der Drehzahl am Getriebe entscheidend und zum anderen ist der zu erwartende Zeitanteil, welchen das Fahrzeug in diesem Betriebspunkt verbringt, entscheidend. Bezieht man beide Faktoren in die Bewertung mit ein, lässt sich der Zusammenhang wie folgt darstellen:

$$\eta_{ges} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i * \eta_i)}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (5.1)$$

mit

η_{ges}	Zeitlich-gewichtete Gesamtwirkungsgrad über die Lebensdauer [%]
t_i	Anteil der Einsatzdauer je Lastpunkt bezogen auf die Lebensdauer [%]
η_i	Wirkungsgrad je Lastpunkt [%]

Bei der Erstellung des Versuchsprogramms für die Wirkungsgradversuche des Getriebes werden die Leistungs- und Fahrdaten des Multifunktionsfahrzeuges zu Grunde gelegt. Das Fahrzeug bewegt sich in einem Geschwindigkeitsbereich von 0 – 28 km/h und bringt abtriebsseitig ein Drehmoment von bis zu 1.750 Nm auf. Entsprechend der Leistungshyperbel des Elektromotors ergeben sich die Versuchspunkte, die mit dem APS300 angefahren werden. Jeder Versuchspunkt, bestehend aus einem Drehzahl- und Drehmomentsollwert, wird durch die Automatisierungstechnik des Prüfstands angefahren und für eine Dauer von 30 s gehalten, bevor der nachfolgende Versuchspunkt angefahren wird. Um sicherzustellen, dass regelungstechnische Über- und Unterschwingungen das Messergebnis hinsichtlich des Wirkungsgrades nicht verfälschen, werden die erfassten Messdaten der ersten und letzten 10 s pro Versuchspunkt nicht in die Berechnung des Wirkungsgrads miteinbezogen. Es wird für die mittleren 10 s Messzeit unterstellt, dass sich die Drehmomentregelung eingependelt hat. Das Versuchsprogramm wurde drei Mal durchlaufen, um anschließend für jeden Versuchspunkt den arithmetischen Mittelwert zu bestimmen. Zur Begrenzung der Auswirkungen des Getriebeöls (Shell Spirax S4 ATF HDX) wurde das Getriebe vor Messbeginn auf eine Betriebstemperatur von 65 °C warm gefahren. Das Ergebnis dieser Auswertung ist Bild 4 zu entnehmen.

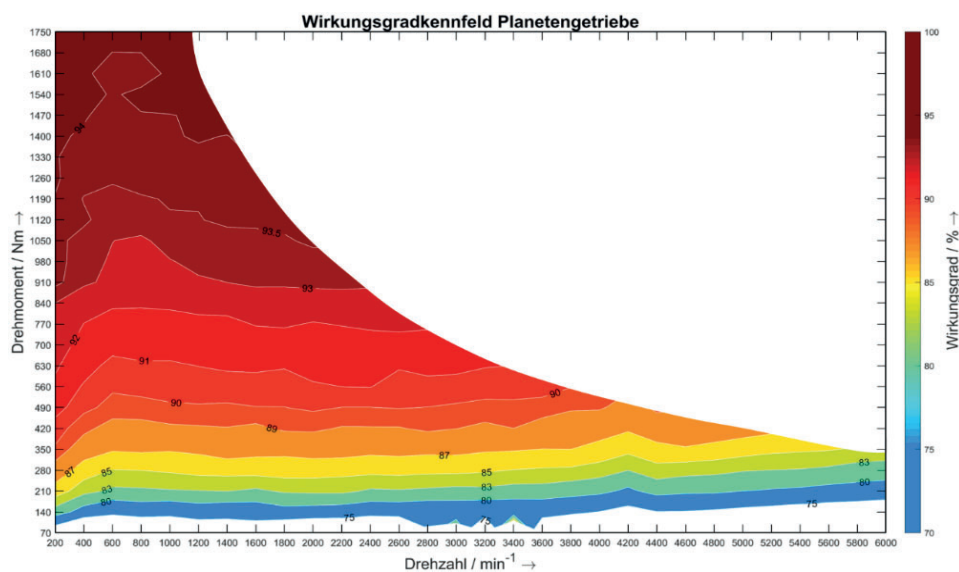


Bild 4: Wirkungsgradkennfeld des Getriebes

Anhand des Wirkungsgradkennfelds ist eine Drehmoment- und Drehzahlabhängigkeit des Getriebewirkungsgrads festzustellen. Der Wirkungsgrad des Getriebes steigt mit zunehmendem

Abtriebsdrehmoment. Gleichzeitig sinkt der Wirkungsgrad mit zunehmender Antriebsdrehzahl des Getriebes. Entsprechend der im Kapitel 3.2 dargestellten Zusammensetzung der Verlustleistung im Getriebe, gibt es Verlustleistungen, die sich drehzahlabhängig verhalten. Hier sind insbesondere die Verluste der Lager und Dichtungen, als auch die Planschverluste der Öltauchschmierung zu nennen. Folglich entsprechen die gewonnenen Versuchsergebnisse den erwarteten Wirkungsgraden hinsichtlich einer Drehzahlabhängigkeit. Bei der Analyse des drehmomentabhängigen Verhaltens des Wirkungsgrads muss differenziert werden: Betragsmäßig erhöht sich die Verlustleistung des Getriebes mit zunehmendem Drehmoment, jedoch wird mit zunehmendem Drehmoment auch eine höhere Leistung im Getriebe übertragen. Da sich der Wirkungsgrad des Getriebes als Quotient aus Abtriebs- und Antriebsleistung definiert (vgl. Formel 3.3), nimmt dieser mit steigendem Drehmoment zu, sofern die Abtriebsleistung überproportional im Verhältnis zur Verlustleistung ansteigt. Dies ist bei den vorliegenden Messergebnissen folglich der Fall (vgl. Bild 4).

Seitens des Fahrzeugherstellers werden typische Lastkollektive für ein Multifunktionsfahrzeug im Feld ermittelt. Dabei werden die unterschiedlichsten Einsatzfelder der Fahrzeuge bei der Ermittlung des Lastkollektivs berücksichtigt. Anhand der unterschiedlichen Zeitanteile, die ein Multifunktionsfahrzeug in einem bestimmten Lastpunkt verbringt, können die Kerneinsatzbereiche identifiziert werden. In untenstehender Abbildung ist das empirisch ermittelte Lastkollektiv eines Multifunktionsfahrzeugs dargestellt (Bild 5). Die Kreisfläche der abgebildeten Betriebspunkte ist dabei proportional zur Betriebszeit, den das Multifunktionsfahrzeug in diesem Punkt verbringt. Das Gesamlastkollektiv des Multifunktionsfahrzeugs setzt sich aus den drei Teillastkollektiven Straßenfahrt, Arbeitsfahrt und Hangfahrt zusammen. Die Teillastkollektive stellen dabei typische Einsatzbereiche eines Multifunktionsfahrzeugs dar, welche je nach Einsatzfeld des Betreibers zu erwarten sind. Mittels Superposition kann aus den einzelnen Teillastkollektive ein Gesamlastkollektiv erzeugt werden (Thomisch et al. 2018). Aufgrund der standardisierten Antriebsstrangtopologie aller ausgelieferten Multifunktionsfahrzeuge ist es nicht sinnvoll den Wirkungsgrad hinsichtlich einzelner Teillastkollektive zu optimieren. Es wird deshalb stets das Gesamlastkollektiv nachfolgend betrachtet.

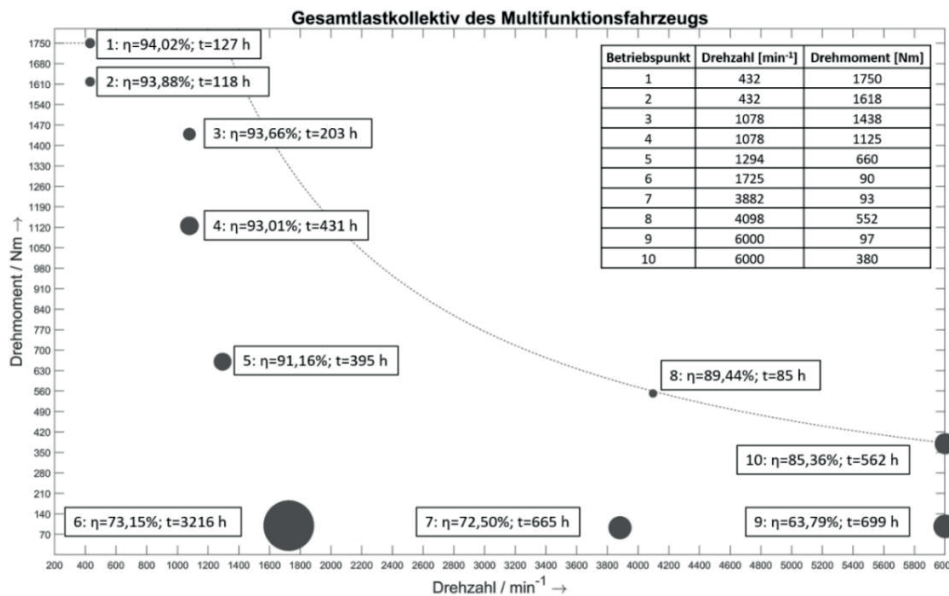


Bild 5: Empirisch ermitteltes Gesamlastkollektiv des Multifunktionsfahrzeugs

Anhand des Gesamlastkollektivs lässt sich erkennen, in welchen Betriebspunkte das Fahrzeug die meiste Zeit betrieben wird. Ergänzend sind die in diesen Betriebspunkten empirisch ermittelten Wirkungsgrade der Prüfstandsmessungen dargestellt. Folglich kann unter Verwendung der Gleichung für den zeitlich-gewichteten Wirkungsgrad (5.1), der durchschnittlich zu erwartende Wirkungsgrad des Multifunktionsfahrzeugs über die Lebensdauer ermittelt werden:

$$\eta_{ges} = 77,18 \% \quad (5.2)$$

Auf den ersten Blick erscheint ein Getriebewirkungsgrad von 77,18 % als sehr gering. Dies liegt darin begründet, dass bei dieser Berechnung lediglich die relativen Wirkungsgrade je Betriebspunkt berücksichtigt werden sowie deren zeitliche Anteile, nicht jedoch die in diesem Punkt übertragene Leistung. Somit bleiben bei dieser Betrachtung die absoluten Verluste des Getriebes unberücksichtigt. Das Multifunktionsfahrzeug wird gemäß Lastkollektiv für hohe Zeitanteile in Betriebspunkten mit niedrigem Wirkungsgrad betrieben, was sich negativ auf den hier berechneten Gesamtwirkungsgrad auswirkt. Entsprechend gering fällt der nach dieser Methode berechnete durchschnittliche Wirkungsgrad aus.

Die relative Betrachtung der Verluste wird um eine Verlustleistungsberechnung des Getriebes ergänzt, um die absoluten Verluste im Betrieb zu berücksichtigen. Dabei wird erneut das empirisch ermittelte Lastkollektiv als Basis für die untersuchten Betriebspunkte herangezogen. Es wird gemäß folgender Gleichung berechnet, wie hoch die Verlustleistung in den zehn Betriebspunkten ausfällt:

$$P_{\text{Verlust},i} = (1 - \eta_i) * P_{\text{Antrieb},i} \quad (5.3)$$

Im untenstehenden Bild 6 sind die Ergebnisse der Verlustleistungsberechnungen dargestellt, wobei die Größe der im jeweiligen Betriebspunkt dargestellten Kreise proportional zur erzeugten Verlustleistung ist. Es ist deutlich zu erkennen, dass die drei Hauptverlustleistungen im höheren Drehzahlbereich, ab ca. 4.100 1/min, zu finden sind. Es bleibt festzuhalten, dass hohe Drehzahlen nicht nur auf den Wirkungsgrad einen negativen Einfluss haben, sondern auch auf den absoluten Betrag der erzeugten Verlustleistung in einem bestimmten Betriebspunkt des Getriebes.

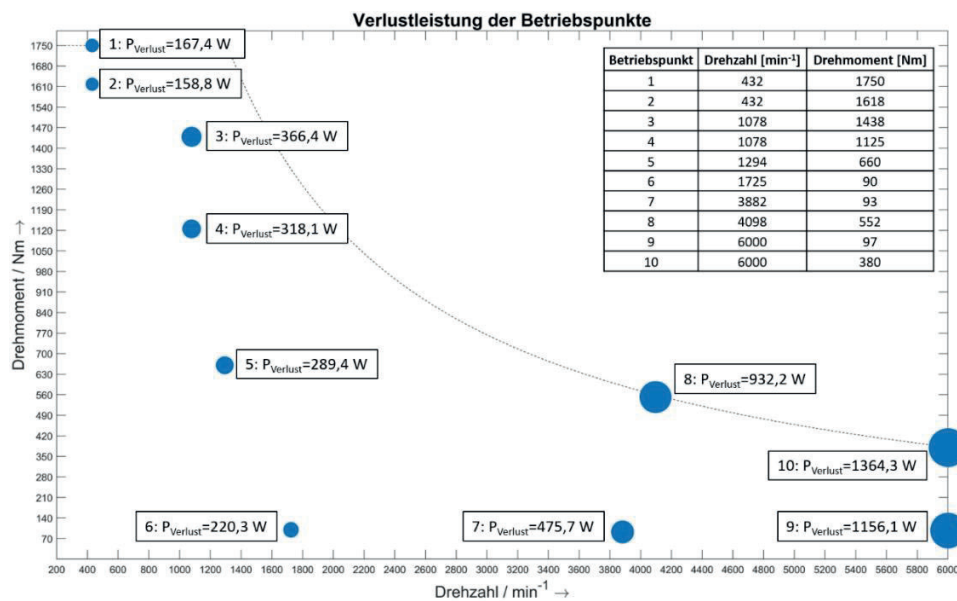


Bild 6: Verlustleistung der Betriebspunkte

Ein Vergleich der Verlustleistung (Bild 6), des Wirkungsgradkennfelds (Bild 4) und des Gesamlastkollektivs (Bild 5) zeigt, dass der Betriebspunkt 6 trotz eines schlechten Wirkungsgrads und einem hohem Zeitanteil über die Lebensdauer des Fahrzeugs einen verhältnismäßig geringen Effekt auf die erzeugte Verlustleistung hat. Dies lässt sich mit der geringen Antriebsleistung in diesem Betriebspunkt erklären. Im Vergleich dazu weist der Betriebspunkt 10 mit 85,36 % einen hohen Wirkungsgrad auf, ist aber aufgrund der maximalen Antriebsleistung in diesem Punkt der Betriebspunkt des Gesamlastkollektivs mit der höchsten Verlustleistung.

Abschließend wird die Verlustenergie der Betriebspunkte über die gesamte zu erwartende Betriebsdauer des Multifunktionsfahrzeugs berechnet. Dies stellt eine geeignete Kenngröße für die Bestimmung der Verluste des Fahrzeugs dar, da die absolute Energiemenge betrachtet wird. Zur Bestimmung wird die Verlustleistung eines jeden Betriebspunkts mit der Betriebsdauer multipliziert,

um die Verlustenergie pro Betriebspunkt zu erhalten. Die Ergebnisse sind Bild 7 zu entnehmen. Anhand der berechneten Verlustenergien wird deutlich, dass die Betriebspunkte 6, 9 und 10 die Hauptenergieverluste innerhalb des Getriebes erzeugen. Zusammen sind diese für ca. 75 % der Verlustenergie verantwortlich, die im Laufe der Lebensdauer des Getriebes anfällt. Der Betriebspunkt 7 erzeugt mit einem Wirkungsgrad von 72,50 % hohe relative Verluste, bei Analyse der absoluten Energieverluste wird jedoch deutlich, dass dieser Betriebspunkt lediglich für 10,39 % der Verlustenergie verantwortlich ist. Es zeigt sich folglich, dass eine reine Betrachtung der Wirkungsgrade und deren Optimierung zur Reduzierung der Energieverluste des Fahrzeuggetriebes nicht sinnvoll ist. Vielmehr ist ein ganzheitlicher Ansatz unter Berücksichtigung der Gesamtenergieverluste in Verbindung mit dem Gesamtlastkollektiv vielversprechend. Somit können die Hauptverluste identifiziert werden.

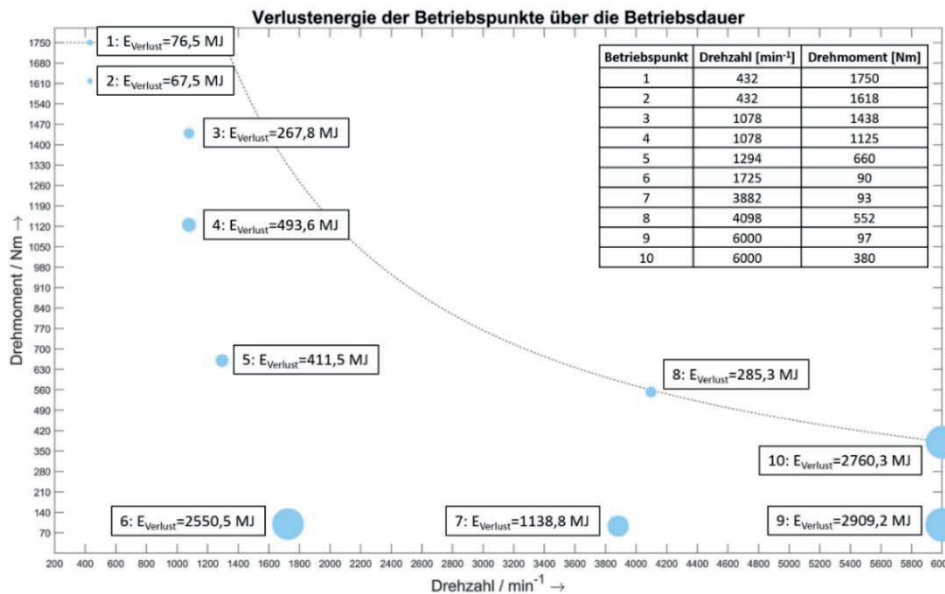


Bild 7: Verlustenergie der Betriebspunkte

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von Versuchen zur Bestimmung des Wirkungsgradkennfelds des Getriebes konnten die relativen Verluste des Getriebes bestimmt werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Wirkungsgrad des Getriebes vom übertragenen Drehmoment und der Antriebsdrehzahl abhängt. Der Wirkungsgrad steigt dabei mit zunehmendem Antriebsmoment und besitzt sein größtes Steigerungspotential im Teillastbereich, in denen die Leerlaufverluste überwiegen. In Verbindung mit dem empirisch ermittelten Gesamtlastkollektiv des Multifunktionsfahrzeugs konnten anschließend die Wirkungsgrade in den zehn Hauptbetriebspunkten bestimmt werden. Auffallend ist, dass das Fahrzeug ca. 49,49 % der Betriebsstunden im Betriebspunkt 6 mit einem verhältnismäßig schlechten Wirkungsgrad von 73,15 % verbringt. Ein Mehrwert des Beitrags ist die Bestimmung, welche Betriebspunkte das größte Potential hinsichtlich einer Minimierung der Verluste besitzen. Damit konnte die Verlustleistung pro Betriebspunkt sowie die über die zu erwartende Lebensdauer des Fahrzeugs anfallende Verlustenergie pro Betriebspunkt berechnet werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass vor allem die Betriebspunkte 9 und 10 im oberen Drehzahlbereich des Gesamtlastkollektivs den größten Anteil am Energieverlust des Getriebes haben. Bei einer Optimierung der Energieverluste durch das Getriebe empfiehlt es sich daher diese zwei Betriebspunkte in den Fokus zu nehmen. Eine Verbesserung des Wirkungsgrades in diesen Punkten hat eine überproportional große Auswirkung auf die Reduzierung der Energieverluste des Getriebes und damit des Fahrzeugs. Weitere Ansätze zur Verbesserung des Wirkungsgrades des Getriebes, die verfolgt werden können, sind:

- Untersuchung des Temperatureinflusses auf den Wirkungsgrad
- Minimierung der Lagerreibverluste
- Reduzierung der Planschverluste durch die Öltauchschmierung

Der Neuheitsgrad des Beitrags wird durch die Kombination der empirischen Lastpunkte des Fahrzeugs mit den spezifischen Wirkungsgraden je Betriebspunkt zur Ermittlung der Gesamtverluste bestimmt. In der Praxis kann bei der Fahrzeugauslegung darauf geachtet werden, die Übersetzungsverhältnisse im Antriebsstrang derart zu wählen, dass die Hauptbetriebspunkte in optimale Bereiche platziert werden.

Danksagung

Die Ergebnisse dieses Beitrags wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts Muffel+ erforscht. Die Autoren danken dem Bundesministerium für die Unterstützung des Vorhabens als auch der Fa. Max Holder für die aktive Teilnahme am Projekt.

Literaturverzeichnis

- | | |
|--------------------------|---|
| Geimer und Pohlandt 2014 | Geimer, Marcus; Pohlandt, Christian: Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. Bd. 22. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Fahrzeugsystemtechnik, 2014. |
| Hoppert 2015 | HOPPERT, Maik: Analytische und experimentelle Untersuchungen zum Wirkungsgradverhalten von Achsgetrieben. Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2015. |
| Haag 2015 | Haag, Michael; Ade, Lieselotte: Elektromobilität in kommunalen Reinigungsflotten. Stuttgart: Universität Stuttgart IAT, 2015. |
| Imdahl et al. 1992 | Imdahl, Michael; Mauer, Georg; Weck, Manfred: Einfluss realer Betriebsverhältnisse auf die Reproduzierbarkeit von Wirkungsgradbestimmungen an nicht stationär betriebenen Getrieben. Bd. 92. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), 1992. |
| Max Holder 2020 | Max Holder GmbH: Die Holder B-/C-Reihe. Unter: https://www.max-holder.com/de/kommunaltechnik/kommunalfahrzeuge-b-c-reihe . Zugriff am 2020-12-03. |
| Novak 2010 | NOVAK, Wolfgang: Geräusch- und Wirkungsgradoptimierung bei Fahrzeuggetrieben durch Festradentkopplung. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Dissertation, 2010. |
| Riegert et al. 2019 | Riegert, Hartmut; König, Sebastian; Reusch, Sebastian; Merkel, Markus; Trost, Jürgen; Puntigam, Fabian: Muffel+ – Entwicklung eines hybridelektrischen Kommunalfahrzeugs, Bd. 7. In: Wissenschaftlicher Verein für Mobile Arbeitsmaschinen (Hrsg.): Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, 2019, S. 127-140. |
| Stütz et al. 2017 | Stütz, Julian; Wagner, Fabian; Thomisch, Marco; Kley, Markus: Antriebsstrangkonzepktion eines elektrifizierten Multifunktionsfahrzeugs, In: DMK 2017 - Dresdner Maschinenelemente Kolloquium, 2017, S. 683-892. |
| Thomisch et al. 2018 | Thomisch, Marco; Kley, Markus; Stütz, Julian: Antriebskonzeption für ein elektrifiziertes Multifunktionsfahrzeug, In: Aalener Kolloquium antriebs-technische Anwendungen, 2018. |

Modellierung des Mensch-Maschine-Systems für Systemzuverlässigkeitstests: Ermittlung des Anwendereinflusses auf die Belastung der Maschine

Modeling of Human-Machine Systems for System Reliability Testing: Investigation of the User Impact on the Load of the Machine

Thomas Gwosch¹, Matthias Dörr¹, Sven Matthiesen¹

¹Karlsruher Institut für Technologie, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe
thomas.gwosch@kit.edu

Abstract (deutsch): Für die Bewertung der Systemzuverlässigkeit bei Mensch-Maschine-Systeme ist die Kenntnis der Belastung auf das technische System notwendig. Dabei fehlen Simulationsmodelle, welche die Anwenderkräfte bei der Analyse der Systemzuverlässigkeit berücksichtigen.

In dieser Veröffentlichung werden zwei Ansätze zur Ermittlung der durch den Anwender verursachten Belastung auf die Maschine vorgestellt. Der erste Ansatz ist ein Open-Loop-Ansatz, mit dem eine Extraktion in den Kraft-Zeitverläufen möglich wird. Der zweite Ansatz ist ein Closed-Loop-Ansatz, der das Regler-Mensch-Modell als parametrischer, quasilinearer Regler abbildet. Es wird ein Regler-Mensch-Modell aus dem Stand der Forschung eingesetzt und unter Einbezug von experimentellen Daten parametrisiert.

Die Ergebnisse zeigen den Einfluss des Anwenders auf die Belastungsverteilung der Maschine in der Simulation und die Notwendigkeit zur Berücksichtigung des Menschen im Regelkreis. Durch die Modellierung des Regler-Mensch-Maschine-Systems wird es möglich, mit Hilfe von Simulationen Lastkollektive zu ermitteln, welche die Bewertung der Systemzuverlässigkeit für geänderte Systemparameter und damit unterschiedliche Betriebspunkte zulässt.

Keywords (deutsch):

Mensch-Maschine-System, Systemzuverlässigkeit, Belastungsverteilung, Regler-Mensch-Modell, Lastkollektiv

Abstract (english):

For the evaluation of system reliability in human-machine systems, knowledge of the load on the technical system is necessary. Simulation models for the consideration of user forces in the evaluation of system reliability are missing.

In this publication, two approaches for determining the load on the machine caused by the user are presented. The first approach is an open loop approach, which allows an extraction in the force-time courses. The second approach is a closed loop approach, which models the controller-human model as a parametric quasilinear controller. A controller-human model from the state of the art is used and parameterized with the use of experimental data.

The results show the influence of the user on the load distribution of the machine in the simulation and the necessity to consider the human in the control loop. By modelling the controller-human-machine system it is possible to use simulations to estimate the load collectives. This allows the evaluation of the system reliability for different system parameters and thus different operating points.

Keywords (english):

Human-Machine System, System Reliability, Load Distribution, Control-Human Model, Load Collective

1 Introduction

The reliability analysis of mechatronic products is an important aspect in product development, since the systems are characterized by a high level of complexity (cf. Bertsche et al. 2009). In the quantitative reliability evaluation of a technical system, the failure probability of the subsystems and their interconnection is determined. Starting point of the evaluation are loads, which can lead to damage the components. In addition, the damage mechanisms and the stress tolerance of the components are considered. It is therefore necessary to have knowledge about the load on the particular subsystems. Often these are summarized by experimentally measured load-time courses in load collectives. In order to reduce the time and effort in product development, efficient testing strategies are necessary (see Herzig et al. 2019). Therefore, simulations are used to determine the stress on the components (Bertsche and Lechner 2004; Robert Bosch GmbH 2011; Rieg and Steinhilper 2012).

In human-machine systems, the human behavior influences the reliability of the system, which must be taken into account in the functional and safety evaluations (cp. to VDI 4006 Blatt 1 2015). Thus, it is important that the influence on the load of the human-machine system and its components is appropriately represented. The load on the machine depends on the interaction with the user and the environment.

In the context of the application of handheld power tools - a human-machine system - there is some research on measuring the operating forces between user and machine (hand transmitted force) (see Kalra et al. 2015; Kaulbars 2006; Steffen and Kaulbars 2017; Matthiesen and Uhl 2017; Matthiesen et al. 2015; Uhl et al. 2019), measuring the tool forces resulting from the working process (see Matthiesen and Uhl 2017; Doerr et al. 2019; Matthiesen et al. 2017b) as well as the indirect measurement of the operating forces (Lim et al. 2013; Lim 2014) and load on the machine components (Matthiesen et al. 2016; Matthiesen et al. 2017a). These approaches enables direct or indirect measurement of the external load on the machine or the component load in the application, but the measured load-time courses cannot be transferred to other operating points because the control system *user* is unknown at other operating points. In order to be able to make predictions about the load beyond the experimentally determined operating conditions, models are necessary which allow predictions about the system behavior and the load at other operating points. To ensure this, the human-machine system must be properly modeled, as outlined in VDI-Richtlinie 4006 Blatt 1 (2015) and Havlikova and Sediva (2012).

The interaction with the user can be described for each application by the control loop using the control force and the reaction force. Thus, the control force and the reaction force between user and machine in the control loop are the relevant evaluation parameters that determines in addition with the external forces the load on the machine. While the interactions are system and domain specific for the modeling of the machine, the modeling of the user is done as a controller.

Models for humans as a controller can generally be classified into quasilinear models, optimal theoretical models, as well as nonlinear and adaptive models (Johannsen 1993). Due to the simplicity of the modeling and the acceptable accuracy for the range under investigation, quasi-linear models are commonly used in many investigations. The approximation consists of a linear transfer element with a remnant quantity that is superimposed on the output (Gloeckner 1978; Johannsen 1993; Johannsen et al. 1977). The remnant quantity represents the signal contributions, which cannot be explained by the model. In manual control, there is a distinction between compensatory tracking and pursuit tracking. In pursuit tracking, in addition to the control deviation, both the reference variable and the controlled variable are displayed to the human. In practical situations, there is only a small difference between the two tracking types, especially in the presence of stochastic disturbance variables (Johannsen et al. 1977).

The determination of the transfer functions of human and machine can be carried out by identification procedures using closed or open loop control technology methods of control engineering. Johannsen proposes a transfer function with one zero and two poles as well as a transport delay as basic form of the parametric quasilinear model for the human (Johannsen 1993, p. 234), which we use in the present contribution. The values for the delay time, time constant of muscle delay, delay and lead element are taken from literature, whereby Johannsen (1993) provides a good overview of the ranges.

So far as the authors know, in human modelling a control loop has not been used to determine the loads under consideration of user influence, which are the basis of load distribution and load collectives for reliability analysis. There is a lack of simulation models to enable predictions about the human-machine system behavior and the load on the technical system with respect to the operating point. Thus, the research question in this paper is the following:

How can the human-machine system be modelled and simulated with the purpose of predicting the load distribution for system reliability?

Therefore, this paper contributes two approaches: First, a classical open loop approach based on measurement data evaluation to determine the load between machine and environment considering the influence of the user posteriori. Second, a model-based approach to determine the load on the technical system by modelling the human being as a closed loop. The disadvantage of the open loop approach is that the transfer to other operating points is not allowed. For the closed loop approach there is a lack of models which enables the prediction of the load in new operating conditions.

2 Approaches to Modeling the Human-Machine Interaction

To respond to the presented research challenge, we propose two approaches to evaluate the human impact on the mechanical load. The approaches are shown in figure 1. The open loop approach (a) is a kind of measurement data evaluation method. It splits the mechanical load in two parts. The load caused by the machine excitation is extracted by highpass filtering. The load caused by the user is extracted by lowpass filtering. The closed loop approach (b) models the human-machine system as a control loop with a model of the user and the machine. External forces on the machine are considered and the task is used for set point determination. The closed loop approach is implemented as a simulation model.

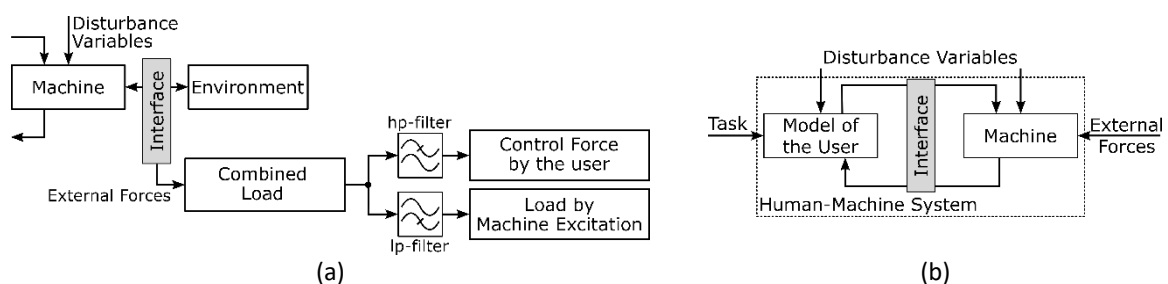


Fig 1: Open loop (a) and closed loop approach (b) to evaluate the human impact on the mechanical load.

2.1 Open Loop Approach for Measurement Data Evaluation

In this approach, the load signal $y(t)$ is divided into the signals $y_h(t)$ and $y_m(t)$. The signal processing is shown in figure 2. The signal $y_h(t)$ is the lowpass filtered signal $y(t)$ with the cutoff frequency $f_g = 10$ Hz and represents the low-frequency control force by the user. The signal $y_m(t)$ is the highpass filtered signal $y(t)$ with the cutoff frequency $f_g = 10$ Hz and represents the high-frequency excitation force caused by the machine. The low-frequency portion of the exposure results from human exposure and

the high-frequency portion of the exposure from machine excitation (see Buxbaum 1972; Radaj and Vormwald 2007). The choose of the cutoff frequency is based on Kern et al. (2009). In this case, the human-induced loads on the machine can be determined. The signal portions can be computed deterministically out of a time signal. For the signal processing, we used a Butterworth filter 5th order. This means a damping rate of about 3 dB at the cutoff frequency and about 100 dB/decade beyond the cutoff frequency.

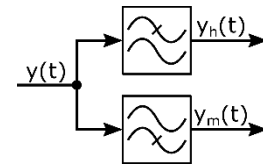


Fig 2: Signal processing of the open loop approach.

2.2 Closed Loop Approach for Simulation Modelling

In this approach, a model of the human-machine control loop is built as shown in figure 3. Note that we use the z-transform for discrete transfer function description. The control-human model consists of the control function $G_c(z)$, $G_h(z)$ and the remnant quantity $v(t)$ based on literature suggestion of Johannsen (1993). The machine model consists a transfer function $G_m(z)$ and the excitation term $w(t)$. The specific parameters for the simulation study described in chapter 3.

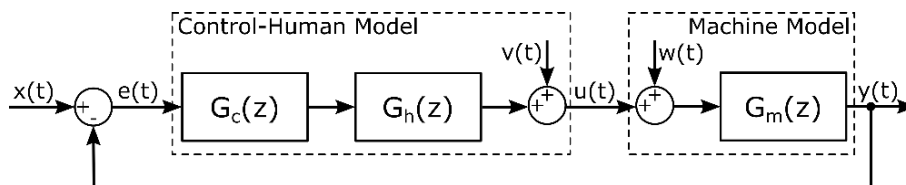


Fig 3: Control loop of the human-machine system.

3 Materials and Methods

3.1 Experimental Data Set

The data set based on an experimental study for roughing metal with a hand-held angle grinder. In the study, a constant pressure force was given to the user and returned to him via a screen. The external forces (tool forces) which applied to the angle grinder were measured using an experimental setup shown in figure 4 (a). For a detailed description of the experimental setup, see Doerr et al. (2019). The results of the experimental study were load-time courses as shown in Fig. 4 (b). The experimental data is used to investigate the two approaches. Note that we use the circumflex to mark the experimental data variable $\hat{y}(t)$ in contrast to simulated data variables.

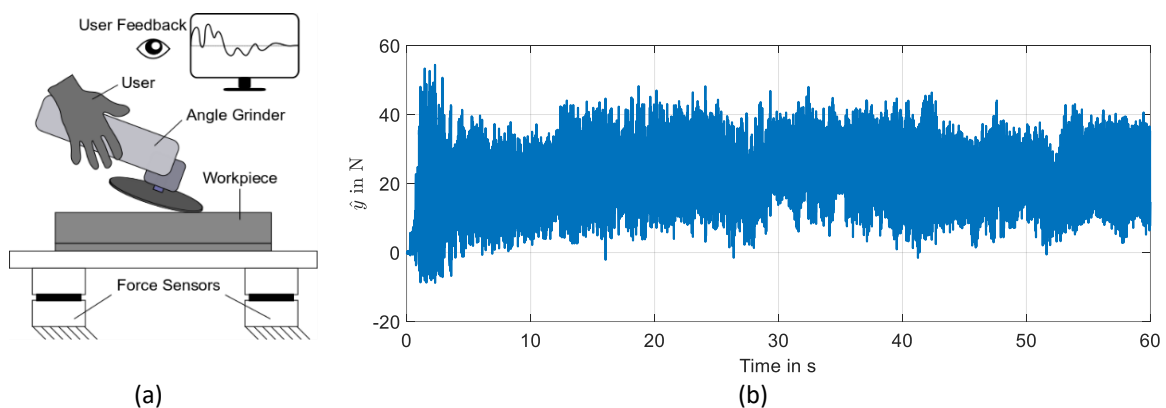


Fig 4: Experimental data set: (a) experimental data setup, (b) time course of the tool force between angle grinder and workpiece, which is measured by the force sensors.

3.2 Simulation Study

A simulation study was carried out and the system behavior was evaluated in the time domain. We assumed the transfer functions $G_c(z)$ with a proportional and integral element as shown in equation 1 and $G_h(z)$ as shown in equation 2. We assumed the remnant quantity $v(t)$ as a random number following normal distribution. The transfer function $G_m(z)$ was derived from experimental data as shown in equation 3 and we defined the function $w(t)$ by a sinusoidal excitation superimposed with a random number following normal distribution. The parameter values were assumed to represent a time course as shown in figure 4. The parameter set was listed in table 1. The label #n describes the parameter set of the simulation run with the according parameter values. The independent variables were the set point of the load and the consideration of the human model. In simulation run #1 and #2 the human model was considered, in simulation run #3 we set $G_h(z) = 1$ and $v(t) = 0$.

Transfer Function $G_c(z)$

$$G_c(z) = \left\{ K_h \frac{K_I T_s z}{z-1} \right\} \quad (1)$$

Transfer Function $G_h(z)$

$$G_h(z) = \left\{ \frac{8.332 \cdot 10^{-5} z - 8.331 \cdot 10^{-5}}{z^2 - 1.999 z + 0.9995} z^{-6000} \right\} \quad (2)$$

Transfer Function $G_m(z)$

$$G_m(z) = \left\{ \frac{0.03928 z^{-1} - 0.03872 z^{-2}}{1 - 1.918 z^{-1} + 0.9191 z^{-2}} \right\} \quad (3)$$

Table 1: Parameter of the simulation study

Parameter/ Time course	Value		
	Simulation run #1	Simulation run #2	Simulation run #3
$x(t)$	Step after 1 s to value 25 N	Step after 1 s to value 35 N	Step after 1 s to value 25 N
$v(t)$	$randn(\sigma^2 = 25,$ $\mu = 0, T_s = 1s)$	$randn(\sigma^2 = 25,$ $\mu = 0, T_s = 1s)$	0
$w(t)$	$18 \sin(2\pi * 100t) + randn(\sigma^2 = 35, \mu = 0, T_s = 0.005s)$		
K_h	3		
K_I	15		
T_s	5e-5 s		
randn	Random number following normal distribution		

3.3 Data Analysis

The results were evaluated with regard to the load course of the step response and the stress range distribution. For the open loop approach the time course of y_m and y_h is evaluated. The results of the simulation study (closed loop approach) are evaluated for the two step responses (simulation run #1 and #2) as well as for the control loop without human model (simulation run #3) in the time domain. The lowpass filtered signal labeled with a bar. Additionally, the load distribution for the simulation runs is evaluated using the rainflow distribution. The experimental data set $\hat{y}(t)$ serves as reference.

4 Results

In this chapter, the results of the two approaches are presented. The time course of the tool forces and the load distribution was evaluated.

4.1 Open Loop Approach

Figure 5 shows the results of the open loop approach. $y_h(t)$ is shown in the upper part of the figure. At the beginning, the force increases to 15 N within about 1.5 s and rises to 20 N at about 2 s. The force level is kept until 12 s and the target value of 25 N reached. The force quantity $y_h(t)$ varies with a maximum amplitude of about 10 N over the test duration time of 60 s.

The lower part of figure 5 shows $y_m(t)$. The maximum vibration amplitude is about 30 N at the beginning and decreases to a value of about 17 N after rapidly increasing of the mean force.

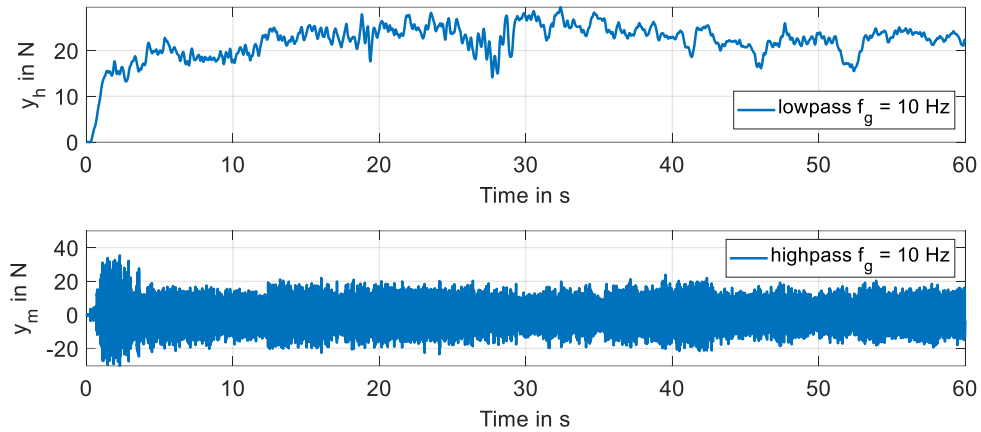


Fig 5: Time courses of the low-frequency control force $y_h(t)$ and high-frequency machine excitation $y_m(t)$.

4.2 Closed Loop Approach

Figure 6 to 8 show the results of the closed loop approach. The step response of the load with a set point value of 25 N in figure 6 shows a ramp response of about 0.7 s to reach the target value. The maximum amplitude of the oscillation is about 25 N. The step response of the load with a set point value of 35 N shows in figure 7 a similar characteristic behavior as in figure 6, where a slight overshoot can be observed.

The time course in figure 8 shows the step response without the human model. The set point value is reached within about 0.6 s. The maximum amplitude of the oscillation is about 5 N and thus significantly smaller than in simulation run #1 and #2.

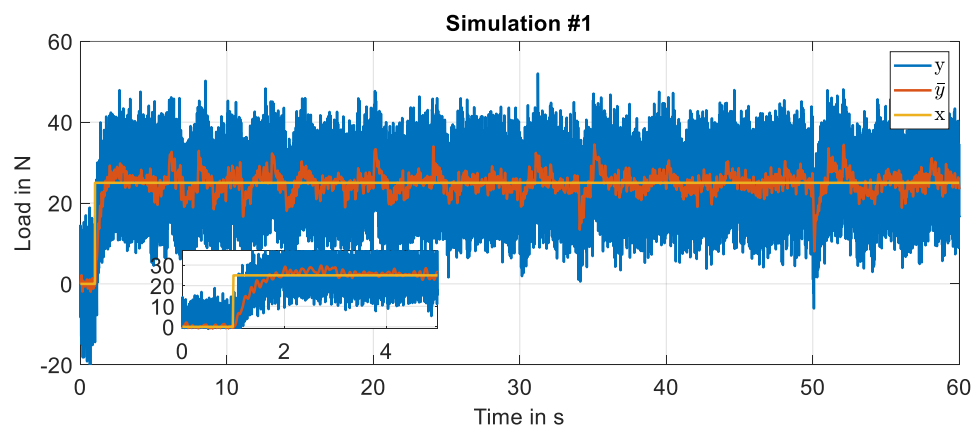


Fig 6: Time course of the load in simulation run #1.

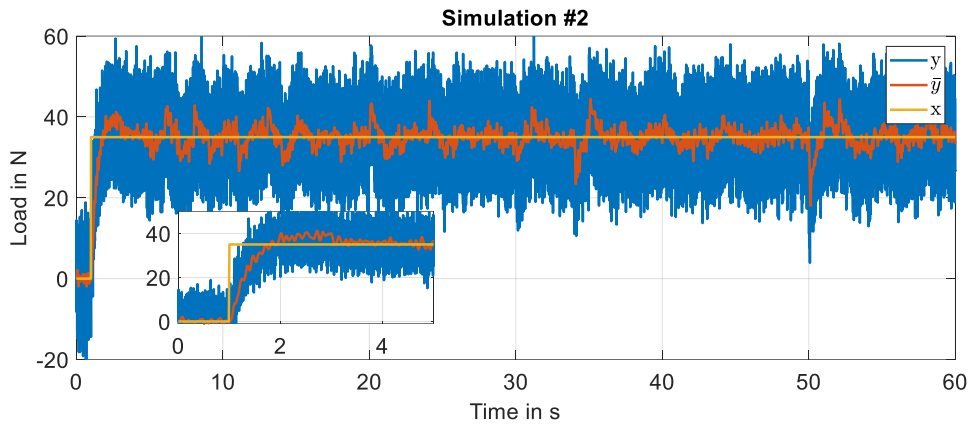


Fig 7: Time course of the load in simulation run #2.

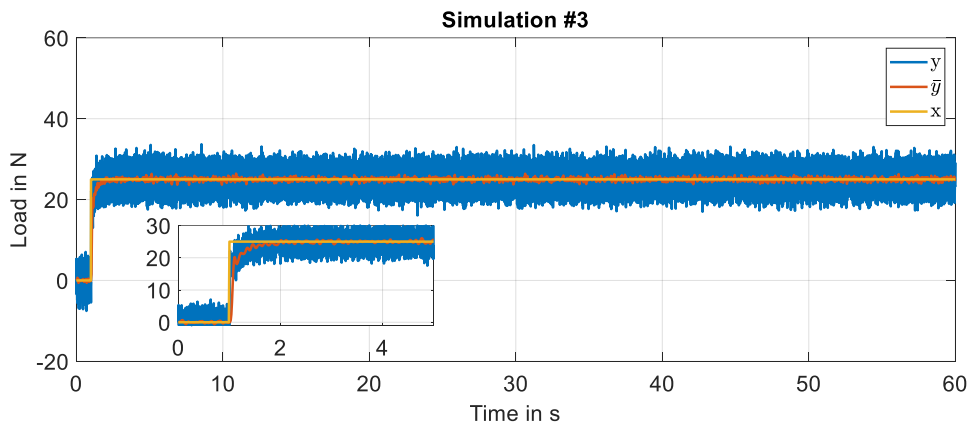


Fig 8: Time course of the load in simulation run #3.

4.3 Evaluation of the Load Distribution for System Reliability Analysis

To evaluate system reliability, the stress range distribution of the load is considered. Figure 9 shows the stress range distribution for the experimental data and simulation run #1 to #3. Simulation run #1 and #2 show a similar distribution as the experimental data, although some deviations could be observed for small load values. The distribution of the stress range is nearly equal for simulation run #1 and #2, only small differences can be observed. The simulation run #3 (without a human model) shows a different behavior in closed loop, both the mean value of the distribution and the number of cycles were much lower.

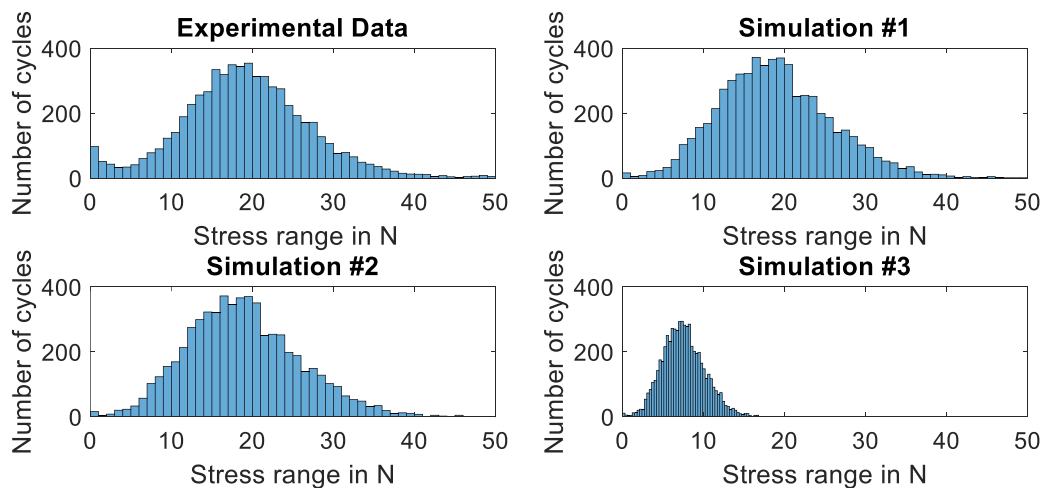


Fig 9: Stress range distribution.

5 Discussion

The open loop approach shows the separation of the load into two parts. One part is influenced by the user and the other part which is determined by the machine excitation. The advantage of this approach is the simple calculation of the load-time data. The disadvantage is that the determined time histories can only be used for the investigated operating points and thus do not allow for variations of the boundary conditions for the analysis of cycle distribution of the load and load collectives.

The closed loop approach makes it possible to consider the human being as a controller in the control loop. The results show comparable load-time data. This is also valid for other operating points, which was evaluated by a different set point. The stress range distribution of the load shows a good match with the experimental data. However, small load amplitudes are significantly reduced in the simulation. Simulation run #3 shows that closed loop modeling is necessary to achieve results comparable to the experimental data.

It must be noted, however, that the analysis of the stress range does not take the mean value of the load into account. Therefore in simulation run #2 the load on the system is higher. Therefore, the distribution is strongly dependent on the machine excitation, since constant operating points were investigated in this contribution. This is particularly relevant for varying operating points. However, the difficulty arises that the target force changes and therefore the traceability of the results is not given. The parameterization of the machine was done by a basic transfer function. It follows that the model of the machine has a limited reproducibility of reality.

The limitations result from the limited investigation of operating points and comparison with experimental data related to these operating points. Furthermore, the parameterization of the controller-human model should be adapted to the investigated human being. The validity of the cycle distribution should be verified by a larger database.

6 Conclusion

In this paper, two approaches to consider the user impact on the load distribution in human-machine systems were presented. While the open loop approach allows a frequency-based evaluation of the forces, the closed loop approach allows the usage of the control-human-machine system for the simulative calculation of load-time courses. The stress range distribution shows a good agreement with the experimental data for the closed loop approach. In the next step, the approaches for evaluating system reliability should be applied and verified in a study.

Acknowledgments

The experimental data was conducted in the research project 19881 N of the research association Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e. V. - FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid, Germany, which was funded through the German Federation of Industrial Research Associations (AiF) as part of the Industrial Collective Research program (IGF) by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy according to a resolution passed at the German Federal Parliament.

Literature

- Bertsche et al. 2009 BERTSCHE, B.; GOEHNER, P.; JENSEN, U.; SCHINKOETHE, W.; WUNDERLICH, H.-J.: *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme: Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- Bertsche and Lechner 2004 BERTSCHE, B.; LECHNER, G.: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten (VDI-Buch)*. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2004.
- Buxbaum 1972 BUXBAUM, O.: *Beschreibung einer im Fahrbetrieb gemessenen Beanspruchungs-Zeit-Funktion mit Hilfe der spektralen Leistungsdichte*. Darmstadt, 1972.
- Doerr et al. 2019 DOERR, M.; ZIMPRICH, S.; DUERKOPP, A.; BRUCHMUELLER, T.; GITTEL, H.-J.; MATTHIESEN, S.; PELSSENKE, C.; DUELTGEN, P.: *Experimental Abrasive Contact Analysis – Dynamic Forces between Grinding Discs and Steel for common Angle Grinder Applications*. In: *Tooling Conference 2019* (2019).
- Gloeckner 1978 GLOECKNER, M.: *Zur Identifikation des Übertragungsverhaltens des Menschen im geschlossenen Regelkreis durch Parameterschätzverfahren*. Aachen, RWTH. Dissertation. 1978.
- Havlikova and Sediva 2012 HAVLIKOVA, M.; SEDIVA, S.: Reliability analysis of the human operator. In: *Proceedings of the 13th International Carpathian Control Conference (ICCC)*: IEEE, 2012, S. 209–214.
- Herzig et al. 2019 HERZIG, T.; DAZER, M.; BERTSCHE, B.: Zuverlässigkeitsabsicherung ressourcenschonender Produkte durch effiziente Erprobungsplanung. In: BAUER, W.; SPATH, D.; BINZ, H.-G.; BERTSCHE, B.; RIEDEL, O. (Hrsg.): *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, 2019*, S. 113–122.
- Johannsen 1993 JOHANNSEN, G.: *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer, 1993.
- Johannsen et al. 1977 JOHANNSEN, G.; BOLLAR, H. E.; DONGES, E., STEIN, W.: *Der Mensch im Regelkreis: Lineare Modelle*. 1. Aufl. München, Wien: Oldenbourg, 1977.
- Kalra et al. 2015 KALRA, M.; RAKHEJA, S.; MARCOTTE, P.; DEWANGAN, K. N.; ADEWUSI, S.: *Measurement of coupling forces at the power tool handle-hand interface*. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 50 (2015), S. 105–120.
- Kaulbars 2006 KAULBARS, U.: *Schwingungen fest im Griff*. In: *TECHNISCHE ÜBERWACHUNG-DÜSSELDORF- 47* (2006), Nr. 6, S. 35.
- Kern et al. 2009 KERN, T. A.; MATYSEK, M.; MECKEL, O.; RAUSCH, J.; RETTIG, A.; ROESE, A.; SINDLINGER, S.: *Entwicklung haptischer Geräte: ein Einstieg für Ingenieure*, 2009.
- Lim 2014 LIM, A.: *Development of a Semi-Analytic Method to Estimate Forces Between Tool and Hand, Tool and Workpiece in Operation of a Hand-held Power Tool*. University of Cincinnati. Master thesis. 2014.
- Lim et al. 2013 LIM, A.; KIM, J.; ZECHMANN, E.: Development of an Experimental Method to Estimate the Operating Force of a Hand-Held Power Tool Utilizing Measured

- Transfer Functions. In: *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2013*.
- Matthiesen and Uhl 2017 MATTHIESEN, S.; UHL, M.: Methodical Approach for the Analysis of the Active User Behavior during the Usage of Power Tools. In: KRAUSE, D.; PAETZOLD, K.; WARTZACK, S. (Hrsg.): *Design for X: Beiträge zum 28. DfX-Symposium Oktober 2017*. 1. Auflage. Hamburg: TuTech Verlag, 2017 (28), S. 1–12.
- Matthiesen et al. 2015 MATTHIESEN, S.; MANGOLD, S.; BRUCHMUELLER, T.; STELZER, D.; TRUENKLE, B.: The Influence of the User on the Power Tool Functionality - A Force Sensing Handle for a Hammer Drill -. In: *The Proceedings of the 13th International Conference on Hand-Arm Vibration. Beijing, China, Oct. 13-16, 2015*, S. 89–90.
- Matthiesen et al. 2016 MATTHIESEN, S.; GWOSCH, T.; SCHAEFER, T.; DUELTGEN, P.; PELSchenke, C.; GITTEL, H.-J.: *Experimentelle Ermittlung von Bauteilbelastungen eines Power Tool Antriebsstrangs durch indirektes Messen in realitätsnahen Anwendungen als ein Baustein in der Teilsystemvalidierung*. In: *Forsch Ingenieurwes* (2016).
- Matthiesen et al. 2017a MATTHIESEN, S.; GWOSCH, T.; MANGOLD, S.; DUELTGEN, P.; PELSchenke, C.; GITTEL, H.-J.: *Realitätsnahe Komponententests zur Unterstützung der Produktentwicklung bei der Validierung von Power-Tools*. In: *Konstruktion* 69 (2017), 7-8, S. 76–81.
- Matthiesen et al. 2017b MATTHIESEN, S.; GWOSCH, T.; BRUCHMUELLER, T.: *Experimentelle Identifikation von Schwingungsursachen in Antriebssträngen von Power-Tools*. In: *VDI Fachtagung Schwingungen 2017: Berechnung, Überwachung, Anwendung 2295* (2017).
- Radaj and Vormwald 2007 RADAJ, D.; VORMWALD, M.: *Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure*. Dritte, neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- Rieg and Steinhilper 2012 RIEG, F.; STEINHILPER, R.: Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit. In: RIEG, F.; STEINHILPER, R. (Hrsg.): *Handbuch Konstruktion*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012, S. 103–128.
- Robert Bosch GmbH 2011 ROBERT BOSCH GMBH: *Methoden der Zuverlässigkeitsgestaltung, Verifizierung und Validierung*. 2011.
- Steffen and Kaulbars 2017 STEFFEN, O.; KAULBARS, U.: *Messen von Ankopplungskräften zur Beurteilung der Vibrationsübertragung auf die Hände: Preiswerte Alternative zu konventioneller Messtechnik*. In: *Technische Sicherheit* (2017), 1/2, S. 41–46.
- Uhl et al. 2019 UHL, M.; BRUCHMUELLER, T.; MATTHIESEN, S.: *Experimental analysis of user forces by test bench and manual hammer drill experiments with regard to vibrations and productivity*. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 72 (2019), S. 398–407.
- VDI 4006 Blatt 1 2015 VDI-Richtlinie 4006 Blatt 1. 03-2015. *Menschliche Zuverlässigkeit - Ergonomische Forderungen und Methoden der Bewertung*.

METHODE ZUR ZUVERLÄSSIGEN, SICHEREN UND NACHHALTIGEN AUSLEGUNG ADAPTIVER TRAGWERKE

A METHOD FOR THE RELIABLE, SAFE AND SUSTAINABLE DESIGN OF ADAPTIVE LOAD-BEARING STRUCTURES

Andreas Ostertag¹, Martin Dazer¹, Bernd Bertsche¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Stuttgart
andreas.ostertag@uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Adaptive Tragwerke sind eine vielversprechende Möglichkeit, den Verbrauch von Baumaterialien und die durch ihre Herstellung verursachte Umweltbelastung zu reduzieren. Diese ermöglichen die aktive Manipulation interner Kräfte, um dadurch eine Spannungshomogenisierung bzw. Dämpfung äußerer Einwirkungen, wie Wind- oder Erdbebenlasten zu erreichen. Bestehende Untersuchungen zur Auslegung beschränken sich auf statische Analysen und betrachten nicht den Zielkonflikt in der zuverlässigkeits- und sicherheitsgerechten Entwicklung im Kontext der Nachhaltigkeit. Auf der Grundlage der Bewegungsgleichung wird eine interdisziplinäre Auslegungsmethode vorgestellt, welche die dynamische Simulation adaptiver Tragwerke mit Gewährleistung von Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit ermöglicht. Die aktive Kompensation dynamischer Lasten wird durch Last-Zeit-Verläufe auf Basis örtlicher Windlasten mittels eines Lastkollektivs zur Lebensdaueranalyse der Tragstruktur und Ermittlung des Energieverbrauchs der Adaption untersucht. In einem Anwendungsbeispiel wird das Potential adaptiver Tragwerke zur Einsparung von Treibhausgasen aufgezeigt und die Anwendbarkeit der Methode demonstriert.

Keywords (deutsch): Adaptive Tragwerke, Auslegungsmethode, Nachhaltigkeit, SFB 1244

Abstract (english): Adaptive load-bearing structures are a promising way to decrease the consumption of building materials and the environmental impact caused by the production. They enable the structure to actively manipulate internal forces to achieve stress homogenization or damping of external effects such as wind or earthquake loads. Existing studies on design are limited to static analyses and do not consider the conflict of objectives in reliability and safety-related development in the context of sustainability. On the basis of the equation of motion, an interdisciplinary design method is presented, which allows the dynamic simulation of adaptive structures with regard to reliability, safety and sustainability. The active compensation of dynamic loads is investigated by load-time histories based on local wind loads using a load spectrum for life cycle analysis of the support structure and determination of the energy consumption of the adaptation. An example shows the potential of adaptive load-bearing structures to save greenhouse gases and demonstrates the applicability of the method.

Keywords (english): Adaptive Load-Bearing Structure, Design Method, Sustainability, SFR 1244

1 Motivation

Im Bauwesen werden bis heute große Mengen an Rohstoffen eingesetzt, um der Nachfrage nach Wohnraum und Infrastruktur gerecht zu werden. Die kontinuierlich steigende Weltbevölkerung bedingt eine weitere Zunahme der Bautätigkeiten, welche aufgrund des dafür notwendigen Ressourcenbedarfs nicht zu bewältigen ist. Daneben schränken gesetzliche Vorgaben den Anteil zulässiger Emissionen weiter ein. Um den Rohstoffverbrauch und die durch die Herstellung verursachten Umweltbelastungen zu reduzieren, ist eine Aktivierung der tragenden Struktur eine vielversprechende Möglichkeit. Sogenannte adaptive Strukturen sind in der Lage sich an verschiedene Lastfälle durch gezielte Manipulation der inneren Spannungen und Verformungen mittels strukturintegrierter Aktoren anzupassen. Diese werden aktuell im Sonderforschungsbereich (SFB) 1244, beantragt von Sobek et al. (2016), an einem Hochhaus-Demonstrator beforscht, Bild 1 links.

Herkömmliche Tragwerke werden für einen selten auftretenden Extrem-Lastfall, wie z. B. ein Jahrhundertunwetter ausgelegt, um dieses mit hoher Wahrscheinlichkeit ohne Tragwerksversagen zu überstehen. Darüber hinaus wird bei Tragwerken mit zunehmender Höhe ein beträchtlicher Materialanteil für eine ausreichende Steifigkeit aufgewendet. Für einen Großteil der Nutzungszeit mit moderater Belastung sind diese Tragwerke daraus resultierend stark überdimensioniert. Ziel ist die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit über die Nutzungsdauer, also einerseits den Steifigkeits- und Komfortansprüchen, andererseits der (Ermüdungs-)Festigkeit. Die Aktivierung der Tragstruktur ermöglicht eine aktive Adaption von Lasten, die mehrheitlich zur Dämpfung von Schwingungen aufgrund von dynamischen Einwirkungen eingesetzt wird. Eine Bemessung dieser Tragwerke nach Norm erfolgt jedoch statisch, mittels empirisch ermittelten Teilsicherheitsfaktoren nach der Eurocode Norm (DIN EN 1990). Überdies besteht eine durch Bild 1, rechts verdeutlichte, hohe Interdisziplinarität des Forschungsfeldes, welche neben dem klassischen Bauingenieurwesen und der Architektur die Regelungstechnik, den Maschinenbau und die Ganzheitliche Bilanzierung umfasst.

Daher muss ein fachübergreifender Ansatz zur Auslegung adaptiver Tragwerke angestrebt werden. Durch Verknüpfung etablierter Verfahren und Methoden aller Disziplinen müssen Sicherheit, Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit adaptiver Tragwerke gewährleistet werden. Hierzu wird in dieser Veröffentlichung ein methodisches Vorgehen vorgestellt, welches aufbauend auf der im Bauwesen gültigen Eurocode Norm durch dynamische Untersuchung der Tragstruktur eine nachhaltige Auslegung bei Sicherstellung von Zuverlässigkeit und Sicherheit erzielt.

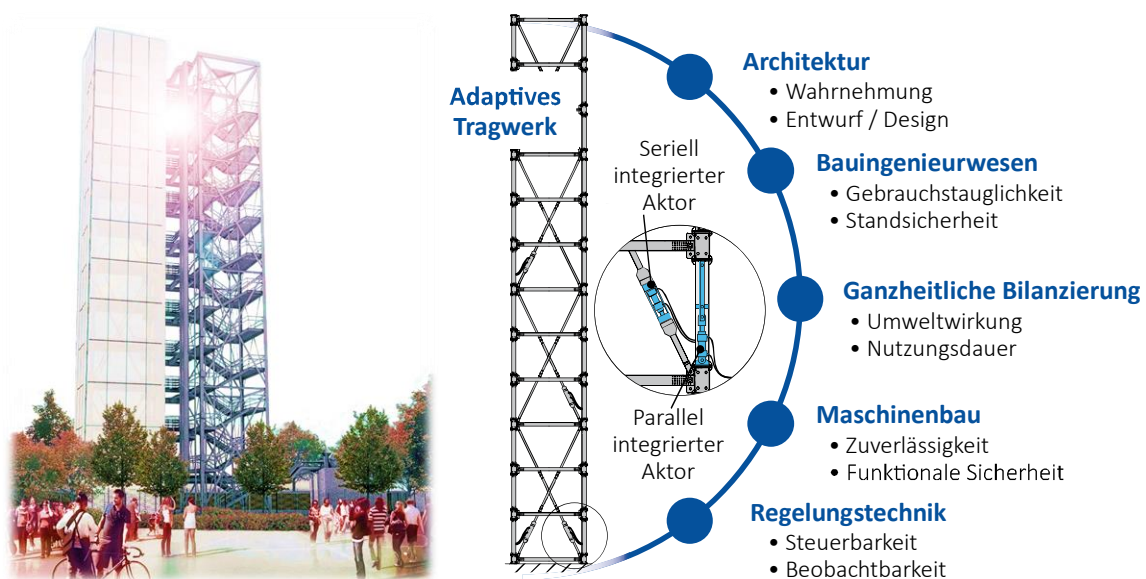


Bild 1: Links: Adaptives Demonstrator-Hochhaus mit Treppenturm des SFB 1244, Universität Stuttgart (ILEK). Rechts: An der Auslegung adaptiver Tragwerke beteiligte Disziplinen

2 Problemstellung

Eine nachhaltige Auslegung erfordert die Definition von repräsentativen Lastkollektiven, welche durch die bisherige, mittels statischen Ersatzlasten durchgeführte Auslegung nach Eurocode und den bestehenden Ansätzen, vornehmlich von Teuffel (2004) und Senatore (2019) nicht vorgesehen ist. In der bisher mechanisch geprägten Auslegung der Tragstruktur wurde durch Überdimensionierung ein Zuverlässigkeits- und Sicherheitsniveau erreicht. Die Gegenüberstellung von Belastung und Belastbarkeit wird durch eine Grenzzustandsfunktion ausgedrückt, für die Versagen bei Überschreiten der Belastbarkeit eintritt, was durch einen Sicherheitsfaktor hinreichend vermieden wird. Die Beherrschung von Unsicherheiten für lasttragende Systeme des Maschinenbaus wurde von Pelz et al. (2009) im SFB 805 unter anderem unter Einsatz von Adaption untersucht. Gegenstand der Folgenden Untersuchungen ist dagegen der Zuverlässigkeitsnachweis für adaptive Tragwerke und eine funktionale Absicherung der Adaptionfunktion unter der Prämisse einer Steigerung der Nachhaltigkeit. Der Einsatz mechatronischer Komponenten erfordert Prozesse und Methoden, um sowohl eine geeignete funktional sichere Systemarchitektur festzulegen, als auch einen Zuverlässigkeitsnachweis zu führen. Aufgrund der verhältnismäßig langen Lebensdauern im Bauwesen müssen Reparatur und Wartung Bestandteil dieser Auslegungsmethode sein. Neben diesen Anforderungen besteht mit dem Einsatz adaptiver Tragwerke zudem der Anspruch durch Masseneinsparung die Umweltwirkung, auf die sich in der vorliegenden Arbeit mit dem Begriff der Nachhaltigkeit bezogen wird, zu verringern. Eine Auslegung erfolgt daher unter der Prämisse einer Verbesserung der Nachhaltigkeit gegenüber herkömmlichen passiven Tragwerken. Die Abhängigkeit der Adaptionfunktion von der Bemessung der Tragstruktur stellt das zentrale Optimierungsproblem dar. Materialeinsparungen innerhalb der Tragstruktur bewirken einen Verlust von Festigkeit und Steifigkeit. Der Einsatz von Aktoren und die Versteifung der Struktur im Bedarfsfall gleichen diesen Verlust unter Energieeinsatz und ihrerseits Materialaufwand für Komponenten sowie Peripheriegeräte aus. In Bild 2 sind die elementaren Beziehungen dargestellt.

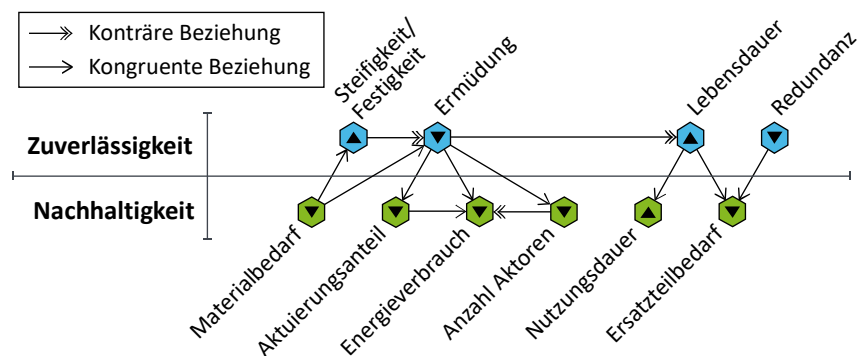


Bild 2: Parameter der Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit und deren Abhängigkeiten

Die Pfeile zeigen an, inwiefern der Parameter Einfluss auf einen anderen nimmt und ob es sich um eine konträre bzw. kongruente Beziehung handelt. Die Dreiecke weisen nach oben oder unten, je nachdem ob für die Disziplin der Zuverlässigkeit bzw. Nachhaltigkeit eine Zunahme oder Abnahme des Parameters gewünscht ist. Wird der Materialbedarf reduziert, so steigt die Nachhaltigkeit, die Festigkeit bzw. Steifigkeit sinkt dagegen und die Ermüdungsbeanspruchung nimmt zu. Durch die Verringerung des Eigengewichts wird die Ermüdungsfestigkeit dagegen ggf. positiv beeinflusst. Eine geringere Ermüdungsfestigkeit führt letztlich zu einer abnehmenden Lebensdauer und kürzeren Nutzungsdauer. Der Ersatzteilbedarf sinkt, wenn die Lebensdauer abnimmt. Eine ggf. erforderliche Redundanz lässt den Bedarf wiederum steigen. Um die Tragstruktur effektiver zu versteifen, kann die Anzahl Aktoren bzw. der Aktuierungsanteil erhöht werden. Dieser beschreibt den Zeitanteil in der eine Adaption von Lasten erfolgt und beeinflusst den Energieverbrauch. Aufgrund der Vielzahl an Abhängigkeiten stellt sich die Forschungsfrage, inwiefern innerhalb des Spannungsfelds eine Auslegung adaptiver Tragwerke durch einen ganzheitlichen Ansatz unter Berücksichtigung von vorhandenen Normen möglich ist.

3 Auslegungsmethode

Forschungsgegenstand dieser Veröffentlichung ist die Entwicklung einer Auslegungsmethode, welche dynamische Analysen der in der Regel zur Schwingungsdämpfung eingesetzten adaptiven Tragwerke vorschlägt. Der beschriebene Zielkonflikt wird durch den in Bild 4. dargestellten iterativen Prozess gelöst.

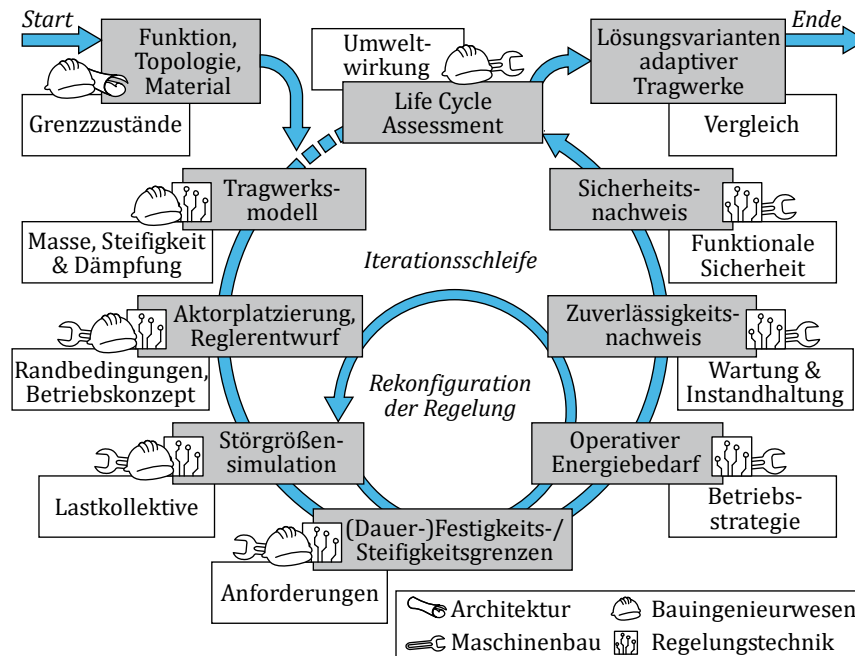


Bild 3: Interdisziplinäre Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke ähnlich Ostertag et al. (2020)

Die Tragwerksreaktion auf dynamische Lasten wird in einer Simulation mittels eines linear-elastischen Strukturmodells berechnet und durch Schadensakkumulation die Ermüdungsbemessung der Tragstruktur vorgenommen. Davon unabhängig bestehen die Kriterien Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit als Grenzzustände des Eurocode, welche Grenzwerte für Spannung, Auslenkung und Beschleunigung vorsehen. Deren Einhaltung muss anhand der Simulation des Tragwerksmodells überprüft werden. Das Modell basiert auf der Bewegungsgleichung zur dynamischen Modellierung mechanischer Strukturen als gängige Modellierungsmethode der Regelungstechnik. Regelgrößen sowie die Regeldynamik werden hierbei berücksichtigt. Iterationsschleifen ergeben sich für die Querschnittsanpassung der Tragstruktur sowie ggf. für den Entwurf des Reglers, der auf einen geringen Energieverbrauch optimiert werden kann.

Aus der Störgrößensimulation mit implementierten Ausfällen geht das Tragwerksverhalten im Fehlerfall hervor. Die Betrachtung von Fehlern innerhalb der Simulation dient als Grundlage für die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen nach Methoden und Verfahren des Maschinenbaus. Insbesondere die Analyse und Bewertung der Adaptionfunktion ist von Bedeutung, da diese im Bauwesen nicht erfasst wird. Liegt eine mittels einer Risikoanalyse als sicherheitsrelevant eingestufte Adaptionfunktion vor, so ist auf Sicherheitsnormen des Maschinenbaus zurückzugreifen. Die Absicherung der Funktionalen Sicherheit nach IEC 61508 durch systematisches Vorgehen und eine entsprechende Systemarchitektur, wie sie zur Absicherung automatisierter Fahrzeuge realisiert wird, ist nach Ostertag et al. (2019) hier zielführend. Mittels geeigneter Modellierungsmethoden der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ist ein wahrscheinlicher Ersatzteilbedarf zu ermitteln.

In der Gesamtbilanz wird schließlich der Energie- und Materialbedarf der adaptiven Komponenten und deren Peripherie gegen die erzielten Einsparungen aufgrund des reduzierten Materialbedarfs der Tragstruktur aufgewogen. Damit ist die zielgerichtete Entwicklung adaptiver Tragwerke durch Verknüpfung von Vorgehensweisen der Domänen in einer interdisziplinären Methode möglich.

3.1 Teilschritte des Vorgehens zur Auslegung adaptiver Tragwerke

Der in Bild 3 veranschaulichte, iterative Auslegungsprozess ist in Bild 4 in Teilschritte gegliedert und nachfolgend bezugnehmend hierauf im Detail beschrieben.

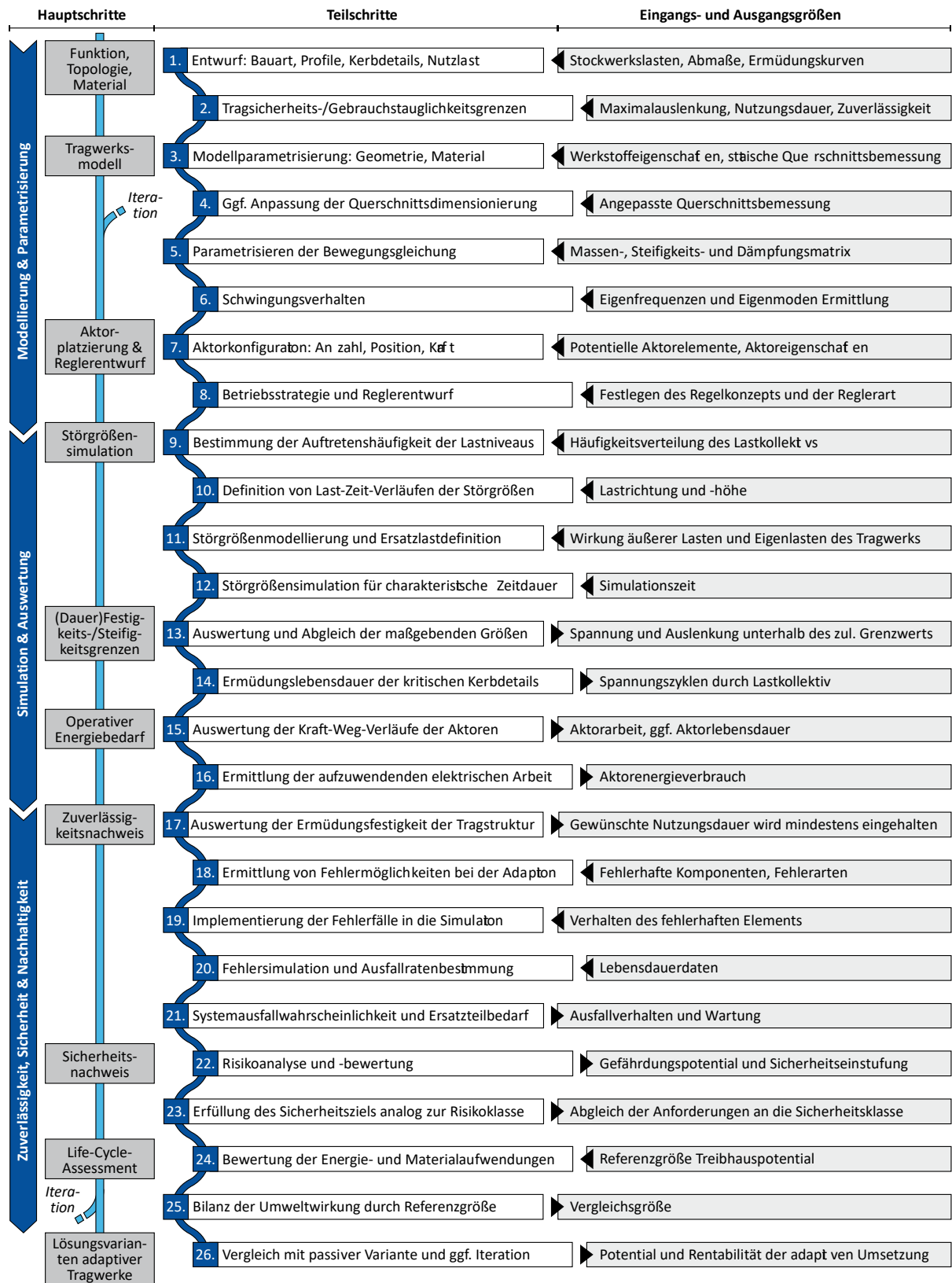


Bild 4: Detaillierter Auslegungsprozess adaptiver Tragwerke mit Teilschritten und Eingangs-/ Ausgangsgrößen

3.1.1 Modellierung und Parametrisierung

Die Modellierung der adaptiven Tragstruktur erfolgt durch Beschreibung des Aufbaus in Länge, Breite und Höhe. Die Gestaltung in Modulbauweise vereinfacht eine Festlegung der Profile und Modellierung. Für Wartungsmaßnahmen ist der Austausch von aktiven Tragwerksteilen vorzusehen und in den Verbindungsarten zu berücksichtigen. Die Kerbdetails der Verbindungsstellen mit Kerbzahlen werden nach DIN EN 1993-1-9 (2010), Eurocode 3 klassifiziert und zur Auswertung der Ermüdungsfestigkeit benötigt. Die zu erwartenden, näherungsweise statischen Nutzlasten der Stockwerks- und Fassadenlasten sowie den Schneelasten mit Lastkombinationen nach Eurocode sind für die Dimensionierung festzulegen, sodass der statische Lastabtrag gewährleistet ist. Die Bauart bestimmt die verwendeten Materialien und bildet die Grundlage für die Parametrisierung des Modells in Schritt drei.

In Schritt zwei ist die erforderliche Tragsicherheit der Tragstruktur zu bestimmen. Dieser Schritt bestimmt den Kompensationsanteil der Aktorik des adaptiven Tragwerks. Damit ist festgelegt, ob eine Sicherheitsfunktion durch Ausgleich lateraler, außergewöhnlicher Lasten ausführt wird. Hierzu sind entsprechende Lastkombinationen anzunehmen, die noch durch ein passives Verhalten der Struktur abgetragen werden sollen. Das Zuverlässigkeitsziel ist anhand der Schadensfolge als Grenzwert nach Eurocode oder der Sicherheitsnorm zu bestimmen. Eine angestrebte Nutzungsdauer für das Tragwerk wird darüber hinaus bestimmt. Die Gebrauchstauglichkeitsgrenzen sind über die Randbedingungen der maximalen Kopfpunktauslenkung und gegebenenfalls Beschleunigung festgelegt.

In Schritt drei entsteht das Tragwerksmodell aus dem beschriebenen Aufbau mit den festgelegten Querschnittsflächen und Materialparametern. Ein linear-elastisches Werkstoffverhalten stellt nach DIN EN 1990 (2010), Eurocode 0 für dynamische Untersuchungen eine ausreichend gute Näherung dar. Das Simulationsmodell kann mit üblichen FE-Tools, wie z. B. ANSYS Mechanical erstellt und ausgewertet werden. In einer Iterationsschleife besteht die Möglichkeit die Querschnittsdimensionierung iterativ anzupassen.

Mit Hilfe eines FE-Programms sieht Schritt fünf eine automatisierte Auswertung der Massenmatrix M und Steifigkeitsmatrix K vor. Die Dämpfungsmatrix D ergibt sich z. B. als Rayleigh Dämpfung wie in Fachliteratur zur Regelungstechnik, z. B. von Preumont (2018) beschrieben. Ausgehend vom homogenen, ungedämpften Teil der Bewegungsgleichung zweiter Ordnung kann, wie von Heidingsfeld (2017) bzw. Wagner (2019) beschrieben und nachfolgend zusammengefasst, durch die Kopplung mit der harmonischen Lösung das generalisierte Eigenwertproblem (1) über die Eigenfrequenzen ω_i und Eigenmoden φ_i formuliert werden.

$$(K - \omega_i^2 M)\varphi_i = 0 \quad (1)$$

Eine Modalanalyse liefert die gesuchten Größen. Mittels der Modalen Amplituden $\eta(t)$ lässt sich schließlich die entkoppelte, modale Bewegungsgleichung (2) mit $q(t) = \Phi\eta(t)$ formulieren, wobei Φ die Matrix der Eigenmoden darstellt.

$$\ddot{\eta}(t) + 2Z\Omega\dot{\eta}(t) + \Omega^2\eta(t) = \Phi^T f(t), \quad t > 0, \quad \eta(0) = \Phi^{-1}q_0, \quad \dot{\eta}(0) = \Phi^{-1}q_1 \quad (2)$$

In Schritt sieben werden Parameter zur Konfiguration des Reglers festgelegt. Hierzu gehören Anzahl der Aktoren und Sensoren als auch die Platzierung dieser innerhalb des adaptiven Tragwerks. Die Aktivierung von Hochhaus-Tragwerken erfordert große Kräfte. Die Maximalkraft ist in jedem Fall beschränkt, was vom Regler zu berücksichtigen ist.

Eine Platzierung der Aktoren kann hinsichtlich statischer und dynamischer Lasten erfolgen, wie bei Weidner et al. (2018) gezeigt. Die Platzierung der Aktoren stellt einen Kompromiss aus den Zielgrößen minimaler Energieverbrauch, geringe Anzahl an Aktoren und gewährleistete Steuerbarkeit, bzw. Lastkompensation dar. Während in Luftfahrt und Automobilindustrie eine primäre Anströmrichtung existiert, ist im Bauwesen die Anströmung aus variablen Windrichtungen möglich. Die muss in der Platzierung berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist eine symmetrische Platzierung der Aktoren naheliegend, um nicht durch einseitige Aktivierung zusätzliche Verformungen und Zwänge einzubringen. Die Platzierung wird zudem auf bestimmte, sinnvolle Tragwerkelemente begrenzt, was den Lösungsraum einschränkt. Statische Lasten werden über die Stützen abgetragen. Die dynamischen Dämpfungseigen-

schaften lassen sich am geeignetsten über die Diagonalen beeinflussen. Da Hochhaus-Strukturen im übertragenen Sinne einem Kragträger gleichen, ist die Manipulation an der Einspannstelle je nach Anregung am effektivsten. Die Platzierung der Sensoren zur Ermittlung der Führungsgrößen kann analog erfolgen.

Für den Reglerentwurf in Schritt acht ist eine Überführung der modalen Bewegungsgleichung (2) in die entsprechende Zustandsraumdarstellung, beschrieben durch Differentialgleichungen erster Ordnung zur Vereinfachung sinnvoll. Wie von Heidingsfeld (2017) und Wagner (2019) gezeigt, ist eine systemtheoretische Beschreibung der auf das Tragwerk einwirkenden Kräfte als Stellgrößen $u(t) \in \mathbb{R}$ und Störgrößen $F_v(v(t)) \in \mathbb{R}$ nach Gleichung (3) möglich.

$$f(t) = Fu(t) + F_v(v(t)) \quad (3)$$

Über $F \in \mathbb{R}$ ist die Wirkung der Stellgrößen auf die Tragstruktur in Form der Aktorkräfte beschrieben.

3.1.2 Simulation repräsentativer Lastkollektive und Auswertung

Die DIN EN 1990 (2010) definiert außergewöhnliche Lasten und Lasten ständiger Bemessungssituationen. Für Lebensdauerabschätzungen sind statische Ersatzlastannahmen, wie sie für Windlasten nach Eurocode als mittlere Windgeschwindigkeit über der Nutzungsdauer definiert sind, unzureichend. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich daher auf die Ermittlung von Auftretenshäufigkeiten verschiedener Windlasten bei unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten sowie Last-Zeit-Verläufe. Schritt neun sieht zunächst die Definition der Häufigkeitsverteilung der einzelnen Lastniveaus vor. Zusammengefasst bilden die Lastniveaus das Lastkollektiv, welches eine repräsentative Beschreibung der, über der Lebensdauer schädigend auftretenden Lasten darstellt.

In Schritt zehn des Auslegungsprozesses erfolgt die Ermittlung von Last-Zeit-Verläufen. Für Windlasten ist dies der Schrieb der Windgeschwindigkeit über der Zeit. Das Erfassen der Hauptwindrichtung kann die Lastrichtung einschränken. Eine Berücksichtigung ist aufgrund der meist willkürlichen Richtung von Naturereignissen jedoch kritisch zu bewerten. Detailliertere Aussagen der sehr lokalen Umweltbedingungen müssen standortspezifisch vorliegen. Für Baden-Württemberg bietet der Daten- und Kartendienst der Landesanstalt für Umwelt (LUBW 2019) eine ausreichende Datengrundlage. Dieser liefert Angaben zu Windstatistiken auf der Grundlage der Jahre 2001 bis 2010 mit genauerer Berücksichtigung des Standorts. Die mathematische Modellierung der Last-Zeit-Schriebe erfolgt anhand des Energiedichtespektrums als Kaimal-Spektrum wie von Gienger et al. (2018) vorgeschlagen.

Der auf diese Weise generierte Last-Zeit-Verlauf muss in Schritt elf durch Definition von Ersatzlasten auf das Tragwerk aufgebracht werden. Hierfür wird das Störgrößenmodell, nach Gienger (2018) verwendet. Da eine numerische Ermittlung der dynamischen Bauwerksreaktion auf den natürlich modellierten Wind erfolgt, ist in Übereinstimmung mit dem Eurocode eine Berücksichtigung von Strukturbeiwerten nicht erforderlich. Die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Tragwerkshöhe z_x und der Referenzgeschwindigkeit v_w in der Referenzhöhe z berechnet sich nach dem in Deutschland gültigen Potenzprofil (4).

$$v_w(z_x) = v_w \cdot \left(\frac{z_x}{z}\right)^a \quad (4)$$

Der Profilexponent a nach Hellmann berücksichtigt die Geländerauigkeit. Die Windkraft auf die Fassadenfläche eines Stockwerks folgt aus der Integration der flächigen Anströmung in Abhängigkeit des Anströmwinkels und der Höhe in der sich das Stockwerk befindet.

Im folgenden Schritt zwölf ist für die Simulation der Störgrößeneinwirkung auf das Tragwerk eine Simulationsdauer zu bestimmen. Bei einer möglichst kurzen Simulationszeit sollen die Einflüsse der dynamischen Einwirkung erfasst werden. Hierfür ist das schwingungsverhalten der Tragstruktur und die Frequenz der dynamischen Einwirkung zu bewerten.

Schritt dreizehn sieht den Abgleich der funktionsmaßgebenden Größen vor. Die Bewertung erfolgt anhand einer festigkeits-, steifigkeits- oder dauerfestigkeitsdominierten Auslegung. Ersteres erfordert die Auswertung der Spannungen aus dem Quotienten der Normalkräfte sowie der Bauteilquerschnitte

und Abgleich mit den zulässigen Werkstoffkennwerten. Die Biegespannung ergibt sich aus der Biegelinie des Tragwerks und den Randbedingungen einer festen Einspannung. Die Näherung durch ein Polynom ist meist hinreichend genau. Die Steifigkeitseigenschaften ergeben sich aus dem Zusammenspiel der Tragstruktur mit dem adaptiven System. Die vereinbarten Gebrauchstauglichkeitsgrenzen, zumeist Kopfpunktverschiebung und -beschleunigung, müssen unter der maßgeblichen Lastkombination eingehalten werden.

Die Ermittlung der Ermüdungsschädigung erfolgt in Schritt vierzehn. Ermüdungsrelevante Kerbstellen sind nach DIN EN 1993-1-9 (2010) zu bestimmen und auszuwerten. Eine niedrige Kerbfallzahl ist ein Indiz für eine ermüdungskritische Kerbstelle. Die Dämpfung von Schwingungen führt zu einem Eintrag an Kräften durch die Aktorik, weshalb eine vorzeitige Ermüdung der Strukturkerbstellen der Integrationspunkte möglich ist. Aus der Simulation werden die Spannungszyklen jedes Lastniveaus mittels Zyklen-Zählung unter Berücksichtigung der Mittelspannung ausgewertet. Durch die Auswertung der Spannungsamplitude und der Mittelspannung kann für jedes Schwingenspiel nach Bewerten des Schädigungsbeitrags auf die Anzahl ertragbarer Schwingenspiele durch Schadensakkumulation über die Lastzeit-Simulation hochgerechnet werden. Die Auftretenshäufigkeit aller Lastniveaus führt schließlich zu einer Aussage über die Ermüdungslebensdauer unter der Kollektivbeanspruchung.

In Schritt fünfzehn erfolgt die Auswertung der Kraft-Weg-Verläufe der Aktoren. Hieraus ergibt sich der operative Energieverbrauch für die Nachhaltigkeitsbilanz. Aus der Differenz der Längenänderung durch die Knotenverschiebung und der Dehnung des Strukturelements zu den Zeitpunkten t und $t+1$ ergibt sich der erforderliche Stellweg Δs innerhalb des Zeitschritts Δt . Die Arbeitsänderung mit Wirkungsgrad η ergibt sich mittels der Aktorkräfte ΔF nach Gleichung (5).

$$W(\Delta t) = \frac{1}{2\eta} \cdot \Delta F(\Delta t) \cdot \Delta s(\Delta t) \quad (5)$$

In Schritt sechzehn stellt schließlich die Summe der zu verrichtenden Arbeit eine Näherung der zu erwartenden elektrischen Arbeit, unter Vernachlässigung der Bereitstellungsenergie und der theoretisch gewinnbaren elektrischen Arbeit aus dem Rückhub, dar.

3.1.3 Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit

Mit Schritt siebzehn folgt innerhalb des Zuverlässigkeitsnachweises die Auswertung der Ermüdungsfestigkeit und daraus die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit durch Ermüdung. Die Ermüdungsfestigkeitskurven aus Versuchen basieren auf einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{ij} = 95\%$. Die Anforderung an die Versagenswahrscheinlichkeit durch Ermüdung ist durch den Eurocode festgelegt. Wichtig ist in diesem Fall die Angabe einer Lebensdauer in Verbindung mit einer Wahrscheinlichkeit für Überleben oder Versagen. Ein alleiniger Abgleich der in Schritt vierzehn ermittelten Lebensdauer ist nicht ausreichend.

In Schritt achtzehn ist die Untersuchung des adaptiven Systems und seiner Fehlermöglichkeiten vorgesehen. Nach Analyse des Systems und seiner Bauteile werden darauf aufbauend die Funktionen und Fehlfunktionen abgeleitet. Dies geschieht mittels gängiger Methoden des Maschinenbaus, wie FMEA und FTA beschrieben von Bertsche (2004). Neben der Ermittlung und Beseitigung von Fehlerursachen ist die Untersuchung der Auswirkung von Fehlern auf die Adaptionfähigkeit des Tragwerks von Interesse. Durch Implementieren von Fehlerfällen in das Simulationsmodell besteht die Möglichkeit die Auswirkung von Fehlern zu untersuchen.

In Schritt neunzehn ist das Einbringen von Fehlerfällen in das Simulationsmodell, welches eine anschließende Untersuchung der Fehler in Schritt 20 erlaubt vorgesehen. Innerhalb des Simulationsmodells können beliebige Parameter ausgewertet und als Eingangsgrößen des Reglers genutzt werden. Für die Modellierung der Fehler wird an dieser Stelle auf Gienger (2018 & 2020) verwiesen.

In Schritt zwanzig ist die Auswertung der Fehlerfälle innerhalb der Simulation vorgesehen. Hierfür ist eine repräsentative, kritische Last anzunehmen, die gerade nicht mehr ohne Adaption ertragen werden kann. Da sich aus der Kombination aller Fehlerfälle eine Vielzahl möglicher Fehlerkombinationen ergibt, muss der Simulationsaufwand bei Bedarf durch eine kürzere Simulationszeiten oder Priorisie-

rung der Fehler vermindert werden. Für eine quantitative Analyse sind umfassende Versuchsdaten der Hauptfehlermechanismen der entsprechenden Komponenten aus Versuchen oder Literatur zu bestimmen.

Schritt einundzwanzig sieht die Auswertung der Systemausfallwahrscheinlichkeit und des Ersatzteilbedarfs vor. Über zeitabhängige Modellierungsmethoden, wie z. B. Petri-Netze, lassen sich Reparaturzeiten berücksichtigen und die Funktionsverfügbarkeit berechnen. Zu einem Versagen der Tragstruktur kommt es, wenn sich die Nicht-Verfügbarkeit der Adaptionfunktion mit dem kritischen Lastereignis überschneidet.

Gegenstand von Schritt zweiundzwanzig ist die Sicherheitsanalyse, für welche das Vorgehen nach IEC 61508 (2011) zum Erreichen der erforderlichen funktionalen Sicherheit der Adaptionfunktion empfohlen wird. Eine Risikoanalyse identifiziert Gefährdungen durch Vorfälle ausgehend von Situationen. Gegenstand der Analyse müssen alle notwendigen Betriebsarten sowie Fehlbedienung sein. Für alle identifizierten gefährlichen Vorfälle ist eine Risikobewertung erforderlich. Hierfür wird z. B. mittels einer Risikographen eine Einstufung in ein Sicherheitsintegritätslevel (SIL) vorgenommen.

Schritt dreiundzwanzig sieht daraufhin das Erreichen des ermittelten Sicherheitsziels vor. Hierzu müssen die Komponenten die Zuverlässigkeitsvorgaben und Diagnoseanforderungen nach IEC 61508 sowohl qualitativ als auch quantitativ erfüllen. Eine geeignete Sicherheitsarchitektur und Fehlertoleranz erfordert ggf. Redundanz, was wiederum in die Nachhaltigkeitsbilanz eingeht.

In Schritt 24 folgt schließlich die Bewertung der Nachhaltigkeit in Form des Treibhauspotentials (engl.: Global Warming Potential: GWP), als Vergleichskriterium gegenüber einer passiven Variante. Anhand der Masse kann der Materialverbrauch ermittelt werden. Durch notwendige Bearbeitungsschritte zur Herstellung fallen überdies Aufwendungen in Form von Energie an. Für die Bewertung bieten Datenbanken zur Umweltbilanzierung eine hilfreiche Grundlage.

In Schritt fünfundzwanzig wird mit den Angaben zum GWP aus den einzelnen Positionen die Bilanz der Umweltwirkung gebildet. Die Angaben werden bezogen auf die Nutzungsdauer. Wird durch den Einsatz adaptiver Tragwerke eine längere Ermüdungslebensdauer erreicht, ist ggf. eine verlängerte Nutzungsdauer erzielbar. Der Ersatzteilbedarf ist wiederum für den verlängerten Zeitraum zu berücksichtigen. Im letzten Schritt ist ein Vergleich mit der passiven Ausführung des Tragwerks vorgesehen.

3.2 Fazit

Das iterative Vorgehen ergibt sich aus der Notwendigkeit die Anforderungen an Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit zu erfüllen. Zudem ist erst mit der abschließenden Umweltbewertung der Vergleich zu einer passiven Variante möglich. Auf diese Weise wird der Anspruch an die Nachhaltigkeit des adaptiven Tragwerks bewertbar. Die Vielzahl an Einflussfaktoren, welche sich sowohl untereinander als auch die Nachhaltigkeit beeinflussen, sind nicht separat voneinander zu betrachten und erfordern einen ganzheitlichen Ansatz. Die interdisziplinäre Methode zur Auslegung adaptiver Tragwerke ermöglicht ein systematisches, schrittweises Vorgehen, um den Anforderungen an Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit gerecht zu werden und bezieht dabei aktuelle Normen und Richtlinien ein.

Innerhalb der DIN EN 1990 (2010), Eurocode 0 ist bei winderregten Schwingungen ein dynamischer Nachweis mittels linear-elastischer Modelle erlaubt. Quasi-statische Ersatzlasten sind nur für gewöhnliche Geometrien bzw. Steifigkeitsverteilungen zulässig. Dies trifft auf adaptive Tragwerke mit veränderlichen, lokalen Steifigkeiten aufgrund der Aktoren nicht zu. Die Ermittlung von Bauwerksreaktionen mittels Last-Zeit-Verläufen zur Abbildung dynamischer Lasten bzw. die Annahme einer Häufigkeitsverteilung ist zulässig. Die getroffenen Vereinfachungen zur Untersuchung der dynamischen Einwirkungen innerhalb der Methode sind somit Eurocode konform.

4 Anwendungsbeispiel

Ein Anwendungsbeispiel soll die Anwendung der Methode demonstrieren und das Potential adaptiver Tragwerke aufzeigen. Dazu wird der in Bild 1 links gezeigte Hochhaus-Demonstrator des SFB 1244 ver-

wendet. Die Nutzlasten und Fassadenlasten werden anhand der Vorgaben des Eurocodes vorgesehen. Die Festlegung der Querschnitte erfolgt in Abhängigkeit der Profilabmaße zur Vermeidung von Knicken. Für die Platzierung der Aktoren wird eine symmetrische, lastrichtungsunabhängige Platzierung gewählt. Dabei wird, ausgehend vom untersten Modul, eine Platzierung mit steigender Anzahl Aktoren vorgenommen, siehe Bild 5 links.

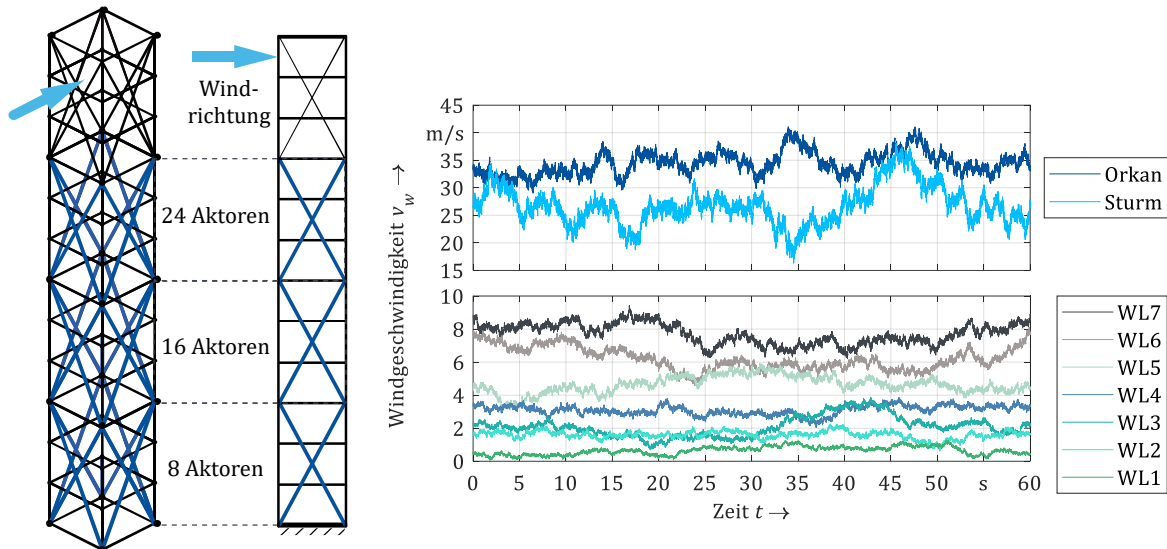


Bild 5: Links: Mögliche Aktorplatzierung (blau). Rechts: Windlastkollektiv ähnlich Ostertag et al. (2020)

Die Simulation erfolgt mittels eines Windlastkollektivs, welches in Bild 5 rechts dargestellt ist. Eine Aktuierung erfolgt lediglich für die kritischste Windlast „Orkan“. Auf die Auswertung der Ausfallanalyse und die Berechnung der Zuverlässigkeit bzw. den Sicherheitsnachweis wird in diesem Beispiel nicht weiter eingegangen und auf Ostertag et al. (2019) bzw. Sobek et al. (2016-2) verwiesen. Für die Nachhaltigkeitsbilanz wurde der Ersatzteilbedarf der Aktoren aus der Zuverlässigkeitsanalyse abgeschätzt. Weiter wurden Aufwendungen für die wesentlichen Komponenten des adaptiven Hochhaus-Demonstrators erfasst und bewertet. Die Ermüdungslebensdauer folgt aus der Simulation der Lastkollektive und der Auswertung der kritischen Kerbstellen. Das Ergebnis der Nachhaltigkeitsbewertung als GWP pro Jahr zeigt Bild 6.

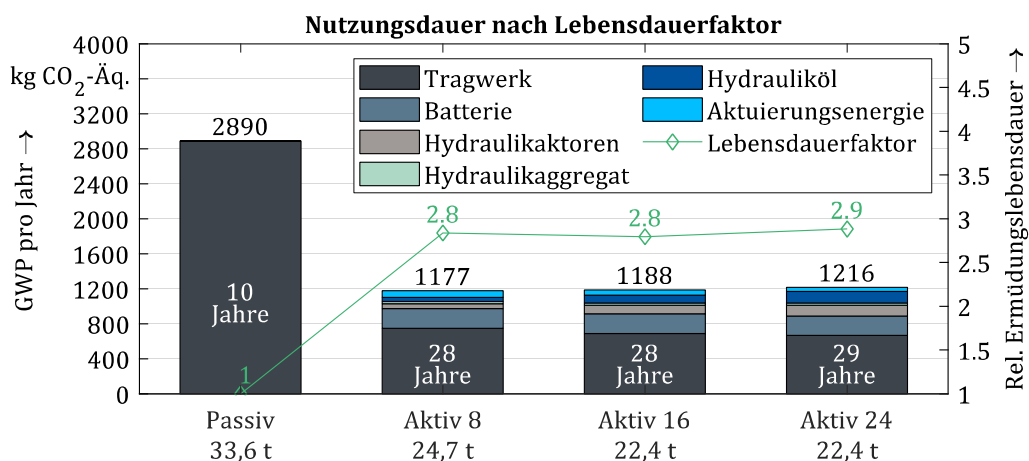


Bild 6: Vergleich der adaptiven Tragwerksvarianten des Hochhaus-Demonstrators mit der passiven unter Berücksichtigung des Lebensdauerfaktors bei einer Bezugslebensdauer von 10 Jahren

Aufgrund der Gewichtseinsparung und Schwingungsdämpfung ist eine deutlich geringere Ermüdung vorhanden. Die dadurch erweiterte Nutzungsdauer, ausgedrückt durch den Lebensdauerfaktor, führt

zu einem enormen Einsparpotential der aktiven Varianten. Durch die größere Anzahl Aktoren und Menge an Hydrauliköl erreichen die Varianten Aktiv 16 und Aktiv 24 eine schlechtere Umweltwirkung als Variante Aktiv 8. Diese erzielt die effektivste Reduzierung des GWP mit einer Verringerung von 59 %. Aufgrund mangelnder Daten sind Hydraulikleitungen und Sensorik sowie Regelungshardware nicht berücksichtigt. Für die Variante mit acht Aktoren sind hingegen die kürzesten Zuleitungen notwendig. Durch den zunehmenden Einsatz erneuerbarer Energien sinkt der Anteil des GWP durch Verringerung des Anteils an Aktuierungsenergie weiter.

5 Zusammenfassung und Bewertung der Methode

In dieser Veröffentlichung wurden Adaptive Tragwerke als eine vielversprechende Möglichkeit, den Verbrauch von Baumaterialien und die durch ihre Herstellung verursachte Umweltbelastung zu reduzieren vorgestellt. Der bisher nicht umfänglich erfasste Zielkonflikt der Auslegung adaptiver Tragwerke und die mangelnde Bewertung von Zuverlässigkeit und Sicherheit der adaptiven Komponenten nach herkömmlichen Vorgehensweisen erfordert eine neue Herangehensweise.

Die Auslegung mit Hilfe der vorgestellten Methode lässt eine Untersuchung des dynamischen Verhaltens adaptiver Tragwerke zu und führt zu einer optimalen Auslegung im aufgezeigten Spannungsfeld Zuverlässigkeit, Sicherheit und Nachhaltigkeit. In Abgrenzung zu den bisherigen statischen Analysen untersucht diese Methode die aktive Kompensation von Lasten mittels eines auf örtlichen Windlasten basierenden Lastkollektivs zur Lebensdaueranalyse ermüdungsrelevanter Kerbstellen der Tragstruktur. Ebenso werden Zuverlässigkeit und Sicherheit der adaptiven Komponenten betrachtet. Eine Auslegung erfolgt dabei unter den gleichen hohen Anforderungen wie für passive Tragwerke, um ein ausreichendes Zuverlässigkeits- und Sicherheitsniveau zu gewährleisten.

Der Ablauf der Methode ist in Teilschritte gegliedert. Durch Einbinden der entwicklungs beteiligten Disziplinen und Verknüpfen der Vorgehensweisen mit Bezug auf gegenwärtige Normen ist der Entwicklungsprozess interdisziplinär, aktuell und verbindlich. Die Methode ist dabei insofern flexibel und erweiterbar, als dass z. B. die Einbindung der Lebensdauerberechnung der Aktoren an die dynamische Lastkollektivsimulation bei vorhandenen Belastbarkeitsmodellen möglich ist. Ein konsistenter und verständlich aufgebauter, zielorientierter Ablauf führt zu einem eindeutigen Ergebnis unter den gewählten Randbedingungen.

Die Anwendung der Methode wurde in einem kurzen Anwendungsbeispiel verdeutlicht. Durch Rechenzeiten mit wenigen Minuten, ist die Methode praxistauglich. Die Skalierbarkeit auf größere Bauwerke ist daher vorhanden, wobei weitere Vereinfachungen, z. B durch eine zweidimensionale Umsetzung oder Modellreduktion denkbar sind.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts 279064222 als Sonderforschungsbereich (SFB) 1244: „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“, innerhalb dessen diese Arbeit entstanden ist.

Literatur

- | | |
|----------------------|---|
| Bertsche et al. 2004 | BERTSCHE, B.; LECHNER, G.: <i>Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeit</i> . 3. Auflage: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, Berlin, Heidelberg. (2004). |
| DIN EN 1993-1-9 | Norm DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 1993-1-9: <i>Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9. Ermüdung</i> . Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010). |

- DIN EN 1990 Norm DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 1990: *Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2010).
- Gienger et al. 2018 GIENGER, A., et al.: *Robust Fault Diagnosis for Adaptive Structures with unknown Stochastic Disturbances*. In: *IEEE Transactions on Control Systems Theory* (2018).
- Gienger et al. 2020 GIENGER, A., ET AL.: *Data-based Distributed Fault Diagnosis for Adaptive Structures using Convolutional Neural Networks*. In: *Unmanned Systems 15/1*, (2020).
- Pelz et al. 2009 PELZ, F. et al.: *Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus*. Sonderforschungsbereich 805, DFG-Projekt: 57157498, Technische Universität Darmstadt, (2009)
- Heidingsfeld et al. 2017 HEIDINGSFELD, M., et al.: *Gramian-based actuator placement with spillover reduction for active damping of adaptive structures*. In: *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 3-7 July 2017. Piscataway, NJ, (2017).
- IEC 61508 Norm DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 61508: *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, (2011)
- LUBW 2019 LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg: *Daten- und Kartendienst der LUBW. Synthetisch repräsentative Ausbreitungsklassenzeitreihen für Wind*. URL (01.12.2020): udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public (2019)
- Ostertag et al. 2019 OSTERTAG, A. et al.: *System-Safety in the Application of Adaptive Load-Bearing Structures*. Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 28 Jan-31 Feb 2019, Orlando, FL. In: *IEEE Xplore, Proc. of RAMS*, (2019).
- Ostertag et al. 2020 OSTERTAG, A., et al.: *Reliable Design of Adaptive Load-Bearing Structures with Focus on Sustainability*. In: Baraldi, P.; Di Maio, F.; Zio, E. (Hrsg.): *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*. Singapore, 2020.
- Preumont 2018 PREUMONT, A.: *Vibration Control of Active Structures. An introduction*. Fourth edition: Springer International Publishing; Springer, Cham (2018).
- Senatore et al. 2019 SENATORE, G.; DUFFOUR, P.; WINSLOW, P.: *Synthesis of minimum energy adaptive structures*. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization 60/3*, S. 849–77. (2019)
- Sobek et al. 2016 SOBEK, W. et al.: *Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen*. Sonderforschungsbereich 1244, DFG-Projekt: 279064222, Uni Stuttgart (2016)
- Sobek et al. 2016-2 SOBEK, W., et al.: *Sicherheitsuntersuchungen eines adaptiven Schalentragwerks. Teil 1 & 2*, In: *Stahlbau 85 6*, S. 380–86 & 3, S. 195–99, (2016).
- Teuffel 2004 TEUFFEL, P.: *Entwerfen adaptiver Strukturen. Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen*, Dissertation. Universität Stuttgart, (2004).
- Wagner et al. 2019 WAGNER, J.; BÖHM, M.; SAWODNY, O.: *Nonlinear Modelling and Control of Tension-Only Elements in Adaptive Structures*. In: *IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials*. (2019).
- Weidner et al. 2019 WEIDNER, S. et al.: *The Implementation of Adaptive Elements into an Experimental High-Rise Building*. In: *Steel Construction 11 2*, S. 109-17. (2018)

Untersuchung zur nutzerzentrierten Feedbackgestaltung im Raum anhand virtueller Bedienelemente

Investigation of User-centered Feedback Design in Space Using Virtual Control Elements

Peter Schmid¹, Philipp Junger¹, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design,
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Stuttgart, Deutschland

peter.schmid@iktd.uni-stuttgart.de

st145122@stud.uni-stuttgart.de

thomas.maier@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Obwohl durch die Gestenbedienung ein immer höherer Freiheitsgrad bei der Interaktion zwischen Mensch und Maschine ermöglicht wird, scheitert die Bedienung meist aufgrund des fehlenden haptischen Feedbacks. In dieser Studie wird deshalb das ultraschallbasierte Feedback bei der Gestenbedienung im Raum anhand zweier experimenteller Versuchsreihen untersucht. In der ersten Versuchsreihe wird die Eingabe über einen virtuellen Button im Raum während der Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe untersucht. Dazu wird ein Button mit und ohne Druckpunkt am Stellwegende im Raum implementiert. Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe werden anhand eines virtuellen Sliders vier verschiedene Feedbackmuster zur Informationsübermittlung im Raum untersucht. Hinsichtlich der subjektiven Nutzerbewertung als auch anhand der objektiven Messergebnisse kann in beiden Versuchsreihen nachgewiesen werden, dass das taktile Feedback im Raum bei der Ausführung einer Stellaufgabe via Gesten unterstützt und dadurch ein präzises Stellen ermöglicht wird. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse besitzt diese Technologie großes Potential für die Verbesserung der Akzeptanz bei der Interaktion mit Handgesten.

Keywords:

Ultraschallbasiertes Feedback, taktiles Feedback, virtuelle Bedienelemente, Mensch-Maschine-Interaktion

Abstract: Although gesture-based operation allows an ever-increasing degree of freedom in the interaction between man and machine, operation usually fails due to the lack of haptic feedback. In this study, therefore, the ultrasound-based feedback of gesture control in space is investigated in two experimental test series. In the first test series, the input via a virtual button in the room during the execution of a main and secondary task is investigated. For this purpose, a button with and without a pressure point at the end of the stroke is implemented in the room. In the second series of experiments, four different feedback patterns for information transfer in space are investigated using a virtual slider. With regard to the subjective user evaluation as well as the objective measurement results, the tactile feedback in the air supports the execution of an adjustment task via gestures and thus enables a precise adjustment. Based on the test results, this technology has great potential for improving the acceptance of interaction with hand gestures.

Keywords:

Ultrasonic based feedback, tactile feedback, virtual control elements, human-machine interaction

1 Einleitung

Der zunehmende Einsatz neuer Kommunikationstechnologien wie Blick-, Gesten- oder Sprachsteuerung im Konsum- als auch im Investitionsgüterbereich ermöglicht einen immer höheren Freiheitsgrad der Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Die kontinuierliche Weiterentwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen schafft neue Interaktionsmöglichkeiten für den Nutzer. Eine zu beobachtende Interior-Entwicklung im PKW-Bereich geht hin zu „Touchless-Sensing-Technologien“, bei welchen physische Stellteile komplett verschwinden und nur bei einer gewünschten Interaktion dem Nutzer (virtuell) in Erscheinung treten (Schlott 2019). Der Begriff „Touchless-Sensing“ ist kein fest definierter Begriff, beschreibt jedoch allgemein alle softwarebasierten berührungslosen Methoden der Mensch-Maschine-Interaktion. Die gebräuchlichsten dieser Methoden sind die Sprach- und die Gestensteuerung, aber auch Blick- und Gedankensteuerung können dazugezählt werden. Bei der Gestensteuerung werden spezifische Steuerungsgesten der Finger, Hände oder Arme zur Bedienung eines Systems genutzt. Die Gesten werden dabei in der Regel von Kameras erfasst (Cheng et al. 2016). Die meisten Ansätze zur Gestensteuerung sind daher komplett berührungsfrei. Gleichzeitig bieten Displays die Möglichkeit auf einer kleinen Interaktionsfläche möglichst viele komplexe virtuelle Funktionen menübasiert darzustellen und auszuführen. Ein Feedback über eine korrekte oder misslungene Bedienung wird bei diesen Systemen meist audiovisuell ausgegeben. Neben dem Gaming- und Infotainment-Bereich finden Touchless-Sensing-Technologien zunehmend Einsatz in mobilen Maschinen und weiteren Investitionsgütern. Auf dem Gebiet des berührungslosen haptischen Feedbacks werden in der Forschung derzeit diverse Ansätze verfolgt. Um haptisches Feedback zu erzeugen, gibt es zwei grundlegende Ansätze: die Nutzung von tragbaren Geräten, wie beispielsweise taktilen Handschuhen und die Übertragung einer Berührung im Raum (Hoshi & Shinoda 2016). Die zweite Methode ist dagegen komplett berührungslos. Die Reizung der Rezeptoren erfolgt durch Druck und Vibration. Der momentan vielversprechendste Ansatz ist die Nutzung von Ultraschall. Durch fokussierten Ultraschall werden die Mechanorezeptoren in der Hand mechanisch stimuliert. Der Vorteil gegenüber anderen Methoden ist die hohe zeitliche und räumliche Auflösung, wodurch eine genaue Fokussierung möglich ist (Chouvardas et al. 2008). Die Verwendung von Ultraschall im Raum für eine taktile Anzeige sowie die Entwicklung eines Prototyps, welcher einen fixen Fokuspunkt zur haptischen Wahrnehmung erzeugt, wurden erstmals von Iwamoto et al. gezeigt. (Iwamoto et al. 2008) Derzeit existieren verschiedene prototypische Systeme, die für die Erzeugung von ultraschallbasiertem haptischen Feedback entwickelt wurden. Alle Systeme sind auf Phased Arrays aufgebaut und basieren auf der Modulation des Schallstrahlungsdrucks. Um die Fokuspunkte auf der menschlichen Haut wahrnehmen zu können, erfolgt deren Generierung durch Amplitudenmodulation mit einer Frequenz von 40-400 Hz. Die menschliche Haut stellt nach Harrison et al. eine Projektorwand dar und bietet somit die Möglichkeit als Interface genutzt zu werden (Harrison et al. 2010). Ein potentieller Anwendungsbereich des ultraschallbasierten Feedbacks bietet der Automobilbereich. Dort dominieren derzeit immer größer werdende Touchscreens, welche jedoch aufgrund des fehlenden haptischen Feedbacks zu großer Ablenkung der Autofahrer während des Fahrens führen. Harrington et al. führten Untersuchungen zur Entlastung des visuellen Wahrnehmungskanals durch. Am Beispiel einer simulierten Autofahrt wurde die Bedienung eines haptischen Touch-Displays und die Gestenbedienung mit ultraschallbasiertem Feedback untersucht. Ihnen gelang der Nachweis anhand der Spurhaltung, dass Aufgaben mit Feedback besser erfüllt wurden als ohne Feedback und die Probanden weniger abgelenkt waren. (Harrington et al. 2018)

Einen Schritt weiter gehen Georgiou et al. mit der Entwicklung eines ultraschallbasierten Feedbacks zur Gestaltung des Infotainmentsystems im PKW zur Einstellung der Lautstärke und der Lüftungsstufe. Im Rahmen dieser Studie wurde ein erster Prototyp entwickelt. Die Bedienung des virtuellen Drehbedienelements funktioniert über einfache Drehbewegungen, welche in Form von Gesten im und gegen den Uhrzeigersinn ausgeführt werden. Die Gesten werden mittels eines Leap-Motion-Trackers erfasst. Das haptische Feedback für das virtuelle Bedienelement wird mittels eines Phased-Arrays an Ultraschallwandlern erzeugt. (Georgiou et al. 2017)

Aus den beschriebenen Studien ist ersichtlich, dass das taktile Feedback bei der Gesteninteraktion im Raum unterstützen kann. Allerdings vernachlässigen diese Studien die Anpassung des Feedbacks an den Nutzer. Im Rahmen der Forschung am IKTD wird die nutzerzentrierte Gestaltung des taktilen Feedbacks im Raum untersucht, um Informationen zwischen Mensch und Maschine zu übertragen. Dabei liefert diese Arbeit einen ersten Beitrag zur Gestaltung des taktilen Feedbacks im Raum zur Übertragung von Informationen über die Änderung und Modulation der Feedbackintensität.

2 Methode

Bei der Gestaltung von berührungslosen Mensch-Maschine-Schnittstellen spielt vor allem das Feedback eine wesentliche Rolle bei der Bedienung. Daher sind insbesondere im Gaming-Bereich Bewegungsrückkopplungen in Form eines aktiven, haptischen oder taktilen Feedbacks immer häufiger vorzufinden. Sie dienen vor allem als Interaktionswerkzeug im dreidimensionalen Raum, bei denen der Benutzer Informationen über die aktuelle Position, die Bestätigung über die Auswahl eines Wertes sowie Warnmeldungen, z. B. Signaltöne oder Vibrationen, erhält. Im Rahmen dieser Untersuchung werden zwei Studien zur Gestaltung des ultraschallbasierten Feedbacks bei Gestenbedienung im Raum durchgeführt. Die Untersuchung umfasst zwei experimentelle Versuchsreihen zweier Versuchsgruppen. Diese werden im Folgenden nun näher beschrieben.

2.1 Studie 1

In der ersten Versuchsreihe wird die Eingabe über einen virtuellen Button im Raum (Bild 1) während der Ausführung einer Haupt- und Nebenaufgabe untersucht. Um die Aufmerksamkeit der Probanden auf die Hauptaufgabe zu lenken und eine Blindbedienung der Nebenaufgabe zu untersuchen, wird als Hauptaufgabe eine Aufgabe gewählt, welche besonders hohe Konzentration von den Probanden erfordert. Die Hauptaufgabe der Probanden besteht darin, eine Drahtöse über einem Draht zu halten, ohne diesen mit der Öse zu berühren und als Nebenaufgabe am Prüfstand eine Stellaufgabe im Raum mit unterschiedlichen Stellcharakteristiken auszuführen (siehe Bild 1). Die Hauptaufgabe wird dabei mit der dominierenden Hand ausgeführt, womit folglich die Nebenaufgabe, eine Stellaufgabe, mit der nicht-dominierenden Hand ausgeführt wird. Als Nebenaufgabe muss auf einer 10-stufigen Skala durch Blindbetätigung der Skalenwert 6 eingestellt werden. Die Eingabe erfolgt dabei über einen virtuellen Button im Raum. Dieser kann im Raum ca. 20 cm oberhalb des Ultraschallpads gedrückt werden. Durch das Drücken des Buttons wird jeweils eine Skalenposition weiter gestellt. Dem Nutzer wird durch Ultraschallwellen ein Feedback über die Stellbewegung rückgemeldet. Im Rahmen der ersten Studie nehmen insgesamt 10 Probanden (5 männlich/ 5 weiblich) im Alter von 23 bis 29 Jahren teil. Das Durchschnittsalter liegt bei 25,5 Jahren ($SD=1,9$ Jahre). Alle der getesteten Personen sind rechtshändig. Drei der Probanden üben ein feinmotorisches Hobby aus und keine der Testpersonen hat eine Verletzung oder eine Einschränkung im Hand-/Armbereich. Die Studiendauer beträgt 45 Minuten. Für die erste Studie wird ein virtueller Button mit einem Feedback von unterschiedlicher Intensität und Stellcharakteristik entsprechend Tabelle 1 implementiert. Insgesamt werden 12 verschiedene Versuchsmerkmale aufgebaut. Die Stellcharakteristik des Buttons wird zum einen ohne einen Druckpunkt am unteren Ende des Stellwegs und in einer zweiten Ausführung mit einem Druckpunkt durch die sprunghafte Zunahme der Feedbackintensität aufgebaut. Die Stellcharakteristik der beiden Feedbackverläufe kann anhand Bild 1 rechts nachvollzogen werden. In Bild 1 oben rechts ist der Verlauf ohne Druckpunkt zu sehen. In diesem Intensitäts-Stellwegdiagramm ist ersichtlich, dass über den gesamten Stellweg dieselbe Intensität als Feedback wiedergegeben wird. Folglich nimmt der Proband hier keinen Druckpunkt am Ende des Stellwegs wahr. Im Intensitäts-Stellwegdiagramm rechts unten (Bild 1) ist eine sprunghafte Intensitätszunahme über den Stellweg mit anschließender Entlastung erkennbar. Diese Stellcharakteristik soll dem Nutzer einen virtuellen Druckpunkt im Raum vermitteln. Nach ausgeführter Stellaufgabe bewerten die Probanden das eingestellte Feedback anhand einer Ratingskala mit Gegensatzpaaren. Vom Versuchsleiter wird zusätzlich zur subjektiven Bewertung der

Probanden die eingestellte Skalenposition sowie die Berührungszahl der Drahtöse, in Folge die Ablenkung von der Hauptaufgabe, dokumentiert. Die Benutzerfreundlichkeit dieser Stellaufgabe wird im Kontext der Stellzufriedenheit und Stelleffektivität über eine objektive Bewertung der Aufgabenerfüllung sowie über die subjektive Bewertung der Ausprägung und Präzision von der Nebenaufgabe mittels einer 7-stufigen Likert-Skala ermittelt. Die Versuchsergebnisse beider Studien werden deskriptiv als auch interferenzstatistisch mit Hilfe von IBM SPSS Statistics 25 ausgewertet. Dabei werden die Daten zunächst mit Hilfe von Box-Plot-Diagrammen und Balkendiagrammen grafisch dargestellt. Im Rahmen der interferenzstatistischen Auswertung werden die Daten auf eine Normalverteilung geprüft. Anschließend erfolgt eine Dependenzanalyse bezüglich der zentralen Tendenz. Die Unterschiedsprüfung wird mittels eines Friedman-Tests mit anschließender Bonferroni-Korrektur durchgeführt.

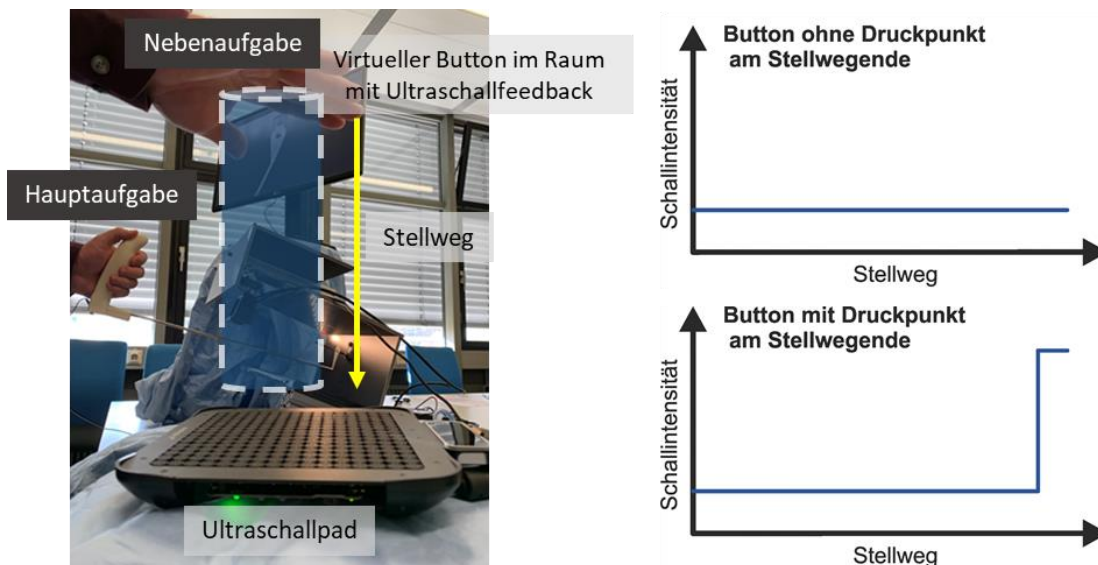


Bild 1: Versuchsaufbau Studie 1 (links) mit zugehörigem Intensitätsverlauf des Feedbacks (rechts)

Tabelle 1: Untersuchungsparameter der ersten Studie

	Versuchsmerkmal	Intensität [%]
Button ohne Druckpunkt am Stellwegende	B1	30
	B2	38
	B3	48
	B4	60
	B5	75
	B6	95
Button mit Druckpunkt am Stellwegende	B7	30
	B8	38
	B9	48
	B10	60
	B11	75
	B12	95

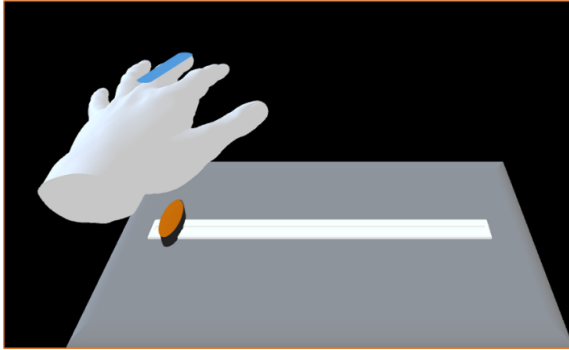
2.2 Studie 2

Im Gegensatz zur ersten Studie wird in der zweiten Studie die Bedienung eines virtuellen Schiebereglers (Slider) im Raum mit taktilem Feedback via Ultraschall untersucht. Bei dieser Untersuchung müssen die Probanden blind, nur über das taktile Feedback des Sliders im Raum, definierte Werte einstellen und über das Feedbackmuster den Fortschritt des Eingabevorgangs erkennen. Dazu werden vier verschiedene Feedbackmuster F1, F2, F3 und F4 (siehe Bild 2) mittels einer

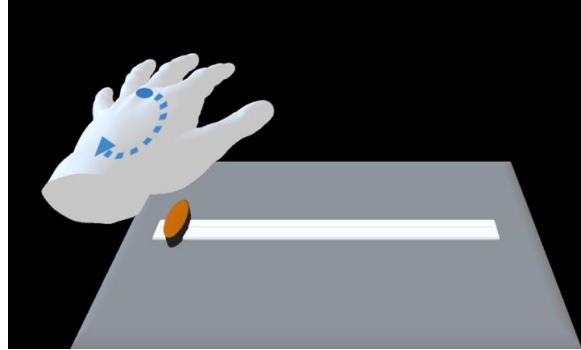
empirischen Studie untersucht. Die vier Feedbackmuster unterschieden sich anhand des implementierten Feedbacks. Das Statusfeedback des ersten Feedbackmusters F1 besteht aus einem diskreten Feedback von 10 Rastpunkten, welche in gleichmäßig verteilten Abständen auf der virtuellen Skala angeordnet sind. Das Feedback ist am Mittelfinger des Nutzers platziert und verändert seine Position relativ zur Hand nicht. Die Form des Feedbacks ist eine vertikale Linie mit einer Intensität von 100 %. Im Vergleich zum Feedback F1 sind die Feedbackmuster F2, F3 und F4 als kontinuierliche Eingabe ausgelegt. Das Statusfeedback von Feedback F2 ist eine Kreiskontur, die an der Handinnenfläche anliegt und die sich abhängig vom vorliegenden Sliderwert dynamisch ändert. Beginnend bei 0° schließt sich mit zunehmendem Skalenwert der Kreisbogen, bis er zuletzt mit 360° gänzlich geschlossen ist. Die Feedbackintensität beträgt 100 %. Das Statusfeedback des Feedbacks F3 ist als pulsierendes Feedback implementiert. Dabei wird in die Handinnenfläche des Nutzers ein Kreis projiziert, dessen Erscheinungsfrequenz mit zunehmendem Skalenwert zunimmt. Die Feedbackintensität beträgt kontinuierlich 100 %. Das Feedback F4 besteht aus einem kreisförmigen Statusfeedback, dessen Durchmesser sich in Abhängigkeit zum Skalenwert verändert. Mit steigendem Skalenwert vergrößert sich der Durchmesser. Der Aufbau der Studie ist in Bild 3 dargestellt. Der Proband sitzt während der gesamten Evaluierung an einem Arbeitsplatz. Vor ihm befindet sich das Stratos Explore Development Kit von Ultrahaptics und ein Monitor. Der Monitor zeigt das zu evaluierende Feedback und den einzustellenden Sliderwert. Neben dem Probanden liegt ein Fragebogen bereit, welcher der qualitativen Datenerhebung dient. Der Ablauf der Studie wird durch den Studienleiter vom Arbeitsplatz gegenüber überwacht. An dieser Studie nehmen insgesamt 11 Probanden (7 männlich/ 4 weiblich) im Alter von 20 bis 57 Jahren teil. Das Durchschnittsalter liegt bei 30,27 Jahren. Drei Teilnehmer sind links- und acht Personen rechtshändig. Drei der Probanden üben ein feinmotorisches Hobby aus und keine der Testpersonen hat eine Verletzung oder eine Einschränkung im Hand-/Armbereich. Die Studiendauer beträgt 45 Minuten. Zu Beginn erhält jeder Proband eine Einführung in den Aufbau und die Funktionsweise des Stratos Explore Development Kits. Die Evaluierung der Feedbackarten F1, F2, F3 und F4 erfolgt nacheinander. Beginnend mit einer Vorstellung des jeweiligen Feedbacks, bekommt der Proband anschließend in einer einminütigen Phase die Gelegenheit, das jeweilige Feedback vor Versuchsbeginn kennenzulernen und die Randwerte der Skala abzuprüfen. Im Anschluss startet die eigentliche Durchführung, bei welcher der Proband zehn zufällig generierte Sliderwerte unter Zuhilfenahme des taktilen Feedbacks einstellen muss. Die einzustellenden Sliderwerte liegen dabei auf einer Skala zwischen 0 % und 100 %. Dabei werden die Nutzungseffektivität, Nutzungseffizienz und Nutzerzufriedenheit der Stellaufgabe untersucht. Diese werden mittels der Aufgabenerfüllung, der Stellzeit sowie der subjektiven Wahrnehmung und Erlernbarkeit des taktilen Feedbacks erfasst. Die subjektiven Daten werden über einen Fragebogen anhand einer 7-stufigen Likert-Skala bewertet. Die feedbackspezifischen Fragen der Datenerhebung werden unmittelbar nach der Durchführung beantwortet. Die Evaluierung endet mit einer Nachbesprechung, um positive Aspekte und Verbesserungsvorschläge zu ermitteln sowie offene Fragen des Probanden zu klären. Die Datenerhebung während der Durchführung der Evaluierung erfolgt sowohl quantitativ in Form einer Aufzeichnung von Messwerten als auch qualitativ mithilfe eines Fragebogens. Aus diesem Grund werden der Sollwert und der Istwert des Sliders erfasst. Daraus kann für jede der zehn Durchführungen die Abweichung, also die Genauigkeit der Slidereinstellung, berechnet werden. Die Summe der Abweichungen über alle Durchführungen gibt Aufschluss, ob tendenziell ein zu geringer bzw. ein zu hoher Sliderwert eingestellt wird oder ob sich die Abweichungen gegenseitig ausgleichen. Der Mittelwert gibt die mittlere Abweichung des Sliderwertes pro Durchführung an. Um Rückschlüsse über die Geschwindigkeit ziehen zu können, wird darüber hinaus die für die Einstellung benötigte Zeit festgehalten. Die qualitative Datenerhebung ermittelt das subjektive Empfinden des Probanden. Die Komponente Wahrnehmbarkeit (nicht wahrnehmbar – wahrnehmbar) bezieht sich auf die spürbare Intensität des Feedbacks auf Ultraschallbasis, unabhängig von dessen Erscheinungsbild. Zuletzt ist auch der Grad der Erlernbarkeit (nicht zu erlernen – gut zu erlernen) von der ersten bis zur zehnten Einstellung eines Sliderwertes Bestandteil des Fragebogens. Die Bewertung erfolgt mit einer siebenstufigen Likert-Skala, deren Wertebereich sich von null bis sechs Punkten erstreckte. Die Versuchsergebnisse beider Studien werden deskriptiv als auch inter-

ferenzstatistisch mit Hilfe von IBM SPSS Statistics 25 ausgewertet. Dabei werden die Daten zunächst mit Hilfe von Box-Plot-Diagrammen und Balkendiagrammen grafisch dargestellt. Im Rahmen der interferenzstatistischen Auswertung erfolgt eine Prüfung hinsichtlich einer Normalverteilung der Ergebnisse. Anschließend wird eine Dependenzanalyse bezüglich der zentralen Tendenz durchgeführt. Die Überprüfung der Daten erfolgt mittels eines Friedman-Tests mit anschließender Bonferroni-Korrektur.

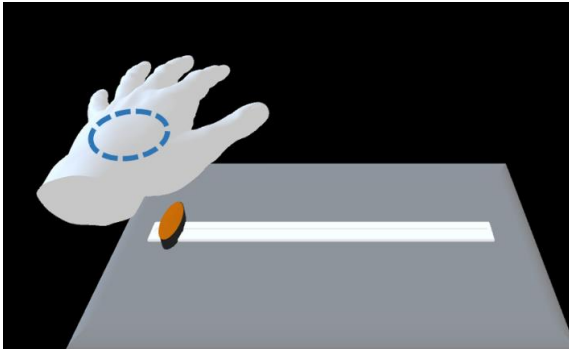
Feedback F1: Vertikale Linie



Feedback F2: Kreis mit Konturänderung



Feedback F3: Pulsierender Kreis mit Frequenzzunahme



Feedback F4: Kreis mit Durchmesseränderung

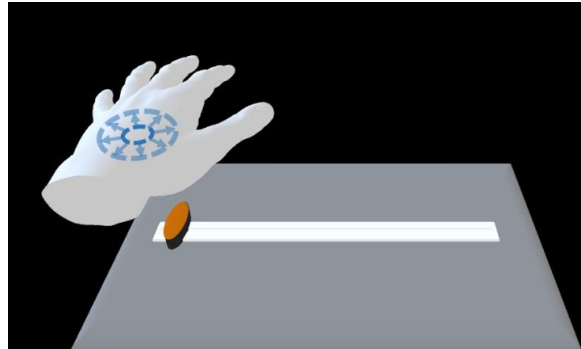


Bild 2: Feedbackarten der zweiten Studie zur taktilen Kennzeichnung des Sliderstatus



Bild 3: Versuchsaufbau Studie 2 (links), schematische Darstellung des virtuellen Sliders mit Kennzeichnung des taktilen Feedbacks im Raum (rechts)

3 Ergebnisse

3.1 Studie 1

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zeigen bei Feedback 1 (virtueller Button ohne Druckpunkt) eine weniger zufriedenere Nutzerbewertung als bei Feedback 2 (virtueller Button mit Druckpunkt).

Auch die objektiven Messdaten bezüglich der Erfüllung der Hauptaufgabe und die Abweichung des Ist-vom Sollwert der Stellaufgabe bestätigen diese Beobachtung.

3.1.1 Berührungszahl Hauptaufgabe

Bild 4 zeigt die Berührungszahl der Drahtöse mit dem Draht der Hauptaufgabe. Anhand Bild 4 kann festgestellt werden, dass die Berührungszahl bei den Versuchsmerkmalen B1 bis B6 (Button ohne Druckpunkt) mit zunehmender Intensität abnehmen. Die niedrigste Berührungszahl ergibt sich für Versuchsmerkmal B6, die größte Berührungszahl für Versuchsmerkmal B1. Bei den Versuchsmerkmalen B7 bis B12 (Button mit Druckpunkt) ist die Berührungszahl allgemein niedriger als bei den Versuchsmerkmalen ohne Druckpunkt. Die niedrigste Anzahl wird hier im Mittel bei der geringsten Intensität erreicht (Versuchsmerkmal B7). Die Berührungszahl des Versuchsmerkmals B6 fällt signifikant geringer aus (vgl. Bild 6), als die Berührungszahl des Versuchsmerkmals B1 ($z=3,167$, $p=0,023$). Ebenfalls kann ein hoch signifikanter Unterschied bei den Versuchsmerkmalen B1 und B7 ($z=4,192$, $p=0,005$) und ein signifikanter Unterschied bezüglich der Versuchsmerkmale B1 und B10 ($z=3,636$, $p=0,047$) identifiziert werden. Die Berührungszahl fällt bei den Merkmalen B7 hoch signifikant und B10 signifikant geringer aus als bei Versuchsmerkmal B1.

3.1.2 Abweichung von der Soll- zur Ist-Position (Stellgenauigkeit)

Bei Betrachtung der Abweichung zwischen der Soll- und der Ist-Position der Nebenaufgabe ist ersichtlich, dass die Aufgabe mit einem Button mit einem Druckpunkt besser erfüllt wird als mit einem Button ohne Druckpunkt (siehe Bild 4). Durchschnittlich liegt die Abweichung der Stellaufgabe bei einem Button ohne Druckpunkt bei +1,32 und bei einem Button mit Druckpunkt bei +0,22. Zu erkennen ist ebenfalls, dass bei einem Button ohne Druckpunkt die Stellaufgabe bei einer höheren Intensität mit einer geringeren Abweichung besser ausfällt, als bei den niedrigeren Intensitäten. Die niedrigste Abweichung wird bei einem Button ohne Druckpunkt mit Versuchsmerkmal B6 erreicht. Bei einem Button mit Druckpunkt hingegen steigt die Abweichung zwischen der Soll- und Ist-Position bei zunehmender Intensität. Das Maximum wird hier bei Versuchsmerkmal B12 erreicht. Hinsichtlich der Abweichung zwischen Soll- und Istwert können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Stellcharakteristiken als auch innerhalb der Stellcharakteristiken gefunden werden (siehe Bild 6).

3.1.3 Ausprägung des Feedbacks

Die subjektive Bewertung des Feedbacks ist in Bild 4 dargestellt. Anhand dieses Bildes lässt sich erkennen, dass die Ausprägung des Feedbacks mit zunehmender Intensität bei einem Button ohne Druckpunkt besser bewertet wird. Gemäß dem Median der Untersuchungsergebnisse für die Versuchsmerkmale B1 und B2 wird das Feedback als zu leicht eingestuft. Die Ausprägung des Feedbacks der Versuchsmerkmale B3 und B4 werden tendenziell als etwas zu leicht eingestuft. Hingegen zeigt die Betrachtung der Medianwerte der Bewertung der Ausprägung des Feedbacks des Buttons mit Druckpunkt, dass diese als genau richtig betrachtet wird. Lediglich Versuchsmerkmal B8 zeigt die Tendenz in Richtung einer Bewertung „etwas zu leicht“. Zwischen den Versuchsmerkmalen B1 und B6 ($z=-3,411$, $p=0,043$), B2 und B6 ($z=-3,380$, $p=0,048$), B1 und B12 ($z=-3,442$, $p=0,038$) und B2 und B12 ($z=-3,411$, $p=0,043$) können dahingehend signifikante Unterschiede festgestellt werden, dass die Ausprägung der Versuchsmerkmale B6 und B12 signifikant besser bewertet wird (siehe Bild 4 und 6).

3.1.4 Präzision des Feedbacks

Bild 4 zeigt die subjektive Bewertung der Präzisionseinschätzung des Feedbacks durch die Probanden. Eine zunehmend bessere Bewertung der Präzision beim Button ohne Druckpunkt erfolgt mit steigender Feedbackintensität. Die beste Bewertung der Präzision erreicht Versuchsmerkmal B6 mit einem Medianwert von rund 80 %. Versuchsmerkmal B1 wird hingegen als vollkommen unpräzise

beschrieben. Bei den Versuchsmerkmalen B7 bis B12 fällt die Präzisionsbewertung deutlich besser aus als bei den Versuchsmerkmalen ohne Druckpunkt. Die Medianwerte liegen zwischen 75 % und 87,5 %. Die bestbewerteten Versuchsmerkmale sind B7, B9 und B11 mit einer Präzision von 87,5 % (Medianwert). Dabei können signifikante Unterschiede bei der Bewertung zwischen den Versuchsmerkmalen B2 und B6 ($z=-3,835$, $p=0,022$), B2 und B10 ($z=-3,954$, $p=0,013$), B2 und B11 ($z=-3,993$, $p=0,011$) und B2 und B12 ($z=-3,715$, $p=0,035$) identifiziert werden (siehe Bild 6). Hoch signifikante Unterschiede können indes zwischen folgenden Versuchsmerkmalen festgestellt werden: B1 und B6 ($z=-4,133$, $p=0,006$), B1 und B7 ($z=-4,570$, $p=0,001$), B1 und B8 ($z=-4,351$, $p=0,002$), B1 und B9 ($z=-4,530$, $p=0,001$), B1 und B10 ($z=-4,252$, $p=0,004$), B1 und B11 ($z=-4,291$, $p=0,003$), B1 und B12 ($z=-4,013$, $p=0,010$), B2 und B7 ($z=-4,272$, $p=0,003$), B2 und B8 ($z=-4,053$, $p=0,009$) und B2 und B9 ($z=-4,232$, $p=0,004$). Im Vergleich zu den Versuchsmerkmalen B1 und B2 werden die anderen Versuchsmerkmale bezüglich der Präzision signifikant und hoch signifikant besser bewertet.

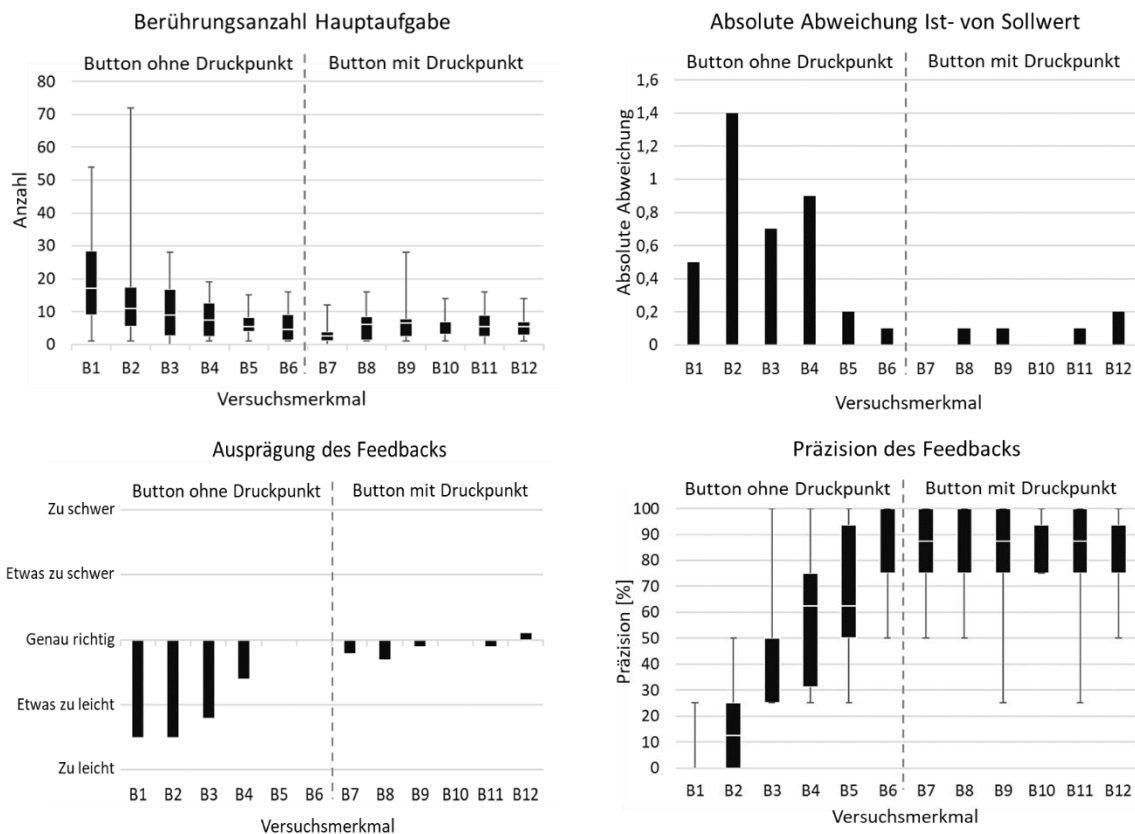


Bild 4: Versuchsergebnisse Studie 1

3.2 Studie 2

Hinsichtlich Versuchsreihe 2 können bei der interferenzstatistischen Untersuchung keine signifikanten Unterschiede der Bedienzeit, der Wahrnehmung, der Erlernbarkeit des Feedbacks und der Bediengeschwindigkeit gefunden werden. Auch bezüglich der Abweichung des Ist- vom Sollwert der Stellaufgabe gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den getesteten Feedbackarten. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Personengruppen gefiltert nach Händigkeit, Alter oder Geschlecht, kann kein Einfluss auf die Bewertung festgestellt werden.

3.2.1 Stellgenauigkeit

Die Abweichung des Slider-Istwertes vom Slider-Sollwert bei 10 Stellvorgängen je Feedback pro Proband ist in Bild 5 als Box-Plot dargestellt. Die Medianwerte der Abweichung zwischen der Ist-Soll-

Position des Stellvorgangs liegen zwischen 4,2 % und 5,5 %. Feedback F1 und F2 weisen nahezu dieselbe Abweichung auf (Medianwert Feedback F1: 5,5 % und bei Feedback F2: 5 %). Auch die Streuung der Versuchsergebnisse liegt bei beiden Feedbackarten in etwa auf einem gleichen Niveau. Mit Feedback F3 wird die Stellaufgabe am besten ausgeführt. Der Medianwert zeigt hier eine Abweichung von der Sollposition von 4,2 %. Die Stellwerte dieses Feedbacks zeigen auch die geringste Streuung. Einen leicht höheren Medianwert weist Feedback F4 auf und auch die Streuung der Versuchsergebnisse ist deutlich größer als bei Feedback F3.

3.2.2 Bedienzeit

Die Versuchsergebnisse der Stellzeit sind in Bild 5 abgebildet. Die Stellzeit variiert dabei zwischen den Medianwerten 5,9 s (Feedback F1) und 9,3 s (Feedback F3). Zur Ausführung der Stellaufgabe benötigen die Probanden mit Feedback F1 (5,9 s) die geringste Stellzeit. Die Medianwerte der Stellzeit für die Feedbackarten F2 und F4 liegen bei 6,2 s und 7 s. Die Versuchsergebnisse von Feedback F2 zeigen zudem die geringste Streuung auf, wohingegen bei Feedback F3 die größte Streuung der Messergebnisse auftritt. Die längste Zeit zum Ausführen der Stellaufgabe benötigen die Probanden bei Feedback F3 (9,3 s).

3.2.3 Subjektive Befragung zur Einschätzung des Feedbacks

Bei den subjektiven Versuchsergebnissen zeigt sich bezüglich der Bewertung der Wahrnehmung und Erlernbarkeit des Feedbacks, dass Feedback F1 am besten wahrgenommen wird und als gut erlernbar klassifiziert wird. Die zweitbeste Bewertung hinsichtlich der Wahrnehmung erhält Feedback F3, wohingegen die Erlernbarkeit dieses Feedbacks schlechter eingestuft wird. Die schlechteste Bewertung erhält Feedback F2, gefolgt von Feedback F4. Dennoch wird die Bewertung der Wahrnehmung des Feedbacks bei allen 4 Feedbackarten positiv bewertet. Die Erlernbarkeit nimmt von Feedback F1 bis F4 ab. So wird die Erlernbarkeit von Feedback F4 am schlechtesten bewertet. Dennoch schätzen auch hier die Probanden die Erlernbarkeit positiv ein.

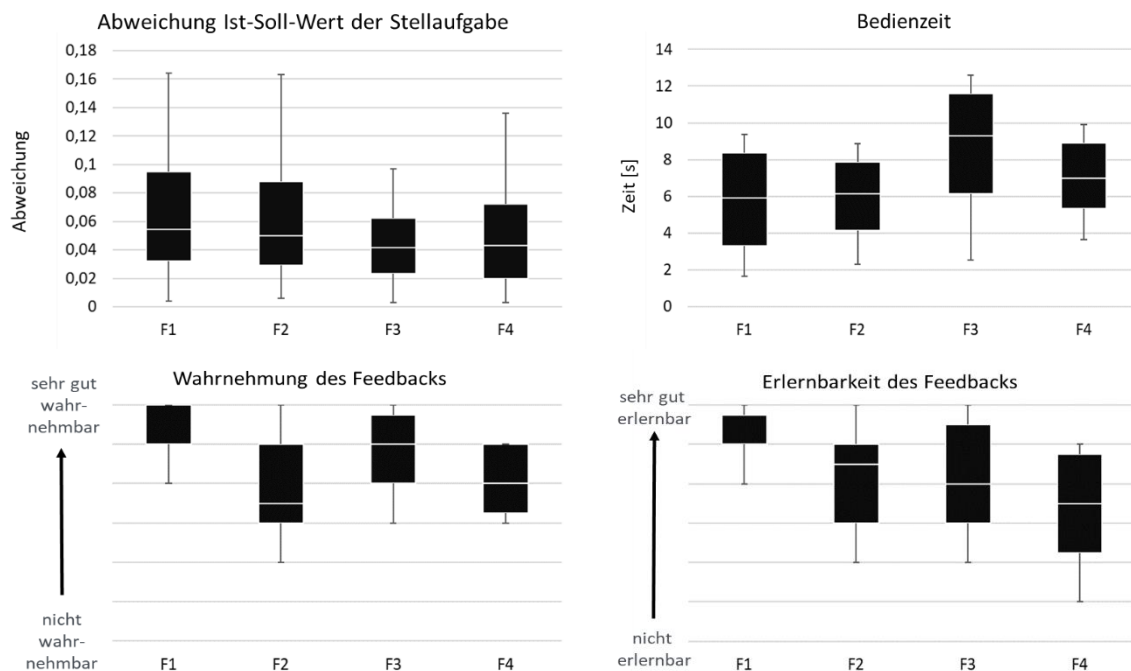


Bild 5: Versuchsergebnisse Studie 2

		... und ... bezüglich der Berührungszahl der Hauptaufgabe											
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Signifikanter Unterschied zwischen ...	B1	-	-	-	-	-	*	**	-	-	*	-	-
	B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

		... und ... bezüglich der Abweichung zwischen Soll- und Istwert											
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Signifikanter Unterschied zwischen ...	B1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

		... und ... bezüglich der Ausprägung des Feedbacks											
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Signifikanter Unterschied zwischen ...	B1	-	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	*
	B2	-	-	-	-	-	*	-	-	-	-	-	*
	B3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

		... und ... bezüglich der Präzision des Feedbacks											
		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Signifikanter Unterschied zwischen ...	B1	-	-	-	-	-	**	**	**	**	**	**	**
	B2	-	-	-	-	-	*	**	**	**	*	*	*
	B3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	B12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Bild 6: Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Berührungszahl der Hauptaufgabe, der Stellgenauigkeit sowie der Ausprägung und Wahrnehmung des Feedbacks (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$)

4 Diskussion

4.1 Studie 1

Die empirischen Studien zeigen, analog zu Harrison et al. (2010), dass die Ausführung einer Stellaufgabe im Raum rein über die taktile Wahrnehmung mit taktilem Feedback auf Ultraschallbasis möglich ist. Im Vergleich zu Georgiou et al. (2017) oder Harrington et al. (2018) benötigt der Nutzer in dieser Studie folglich keine visuelle Anzeige bezüglich des Fortschritts des Eingabeprozesses. Die Ergebnisse der interferenzstatistischen Untersuchung zeigen dennoch bei allen untersuchten Versuchsparametern, d.h. die Erfüllung der Hauptaufgabe, die Stellgenauigkeit und die Präzision, signifikante und hoch signifikante Unterschiede zwischen den getesteten Feedbackarten (vgl. Bild 6). Hinsichtlich dieser Studie eignet sich für die Buttonbedienung ein Button mit Druckpunkt besser für die Bedienung im Raum, anstatt einen Button ohne Druckpunkt zu verwenden. Der Button mit Druckpunkt schneidet auch hinsichtlich der subjektiven Nutzerbewertung besser ab, in dem er dem Nutzer, analog des „Klickens eines Tasters“, den erfolgreichen Abschluss der Eingabe rückmeldet. Im Vergleich zu den Untersuchungen von Georgiou et al. (2017) oder Harrington et al. (2018) wird erstmals auch der Einfluss der Änderung der Feedbackintensität auf den Eingabevorgang untersucht. Durch den taktilen Druckpunkt werden sehr geringe Intensitäten deutlich besser wahrgenommen und ein exaktes und effizientes Stellen ermöglicht. Es ist erkennbar, dass eine sehr geringe Intensität durch die Stellcharakteristik kompensiert werden kann. Eine Zunahme der Feedbackintensität unterstützt dabei zusätzlich die Ausführung der Hauptaufgabe. Allerdings zeigen die Ausprägung als auch die Präzision bei den beiden letzten Intensitätsstufen des Buttons mit Druckpunkt eine abnehmende Bewertung. Eine mögliche Ursache für diese Bewertung könnte im geringeren Unterschied zwischen der Start- und Endintensität des Buttons sein. Die Unterschiedsdifferenz ist bei diesen Versuchsmerkmalen deutlich geringer, weshalb die Änderung der Intensität entlang des Stellwegs schlechter wahrgenommen werden könnte. Die Unterschieds- und Wahrnehmungsschwelle soll daher in

weiteren Versuchsreihen genauer untersucht werden. Potentielle Einsatzgebiete dieser Technologie könnten daher die Bestätigung der Auswahl einer Menüfunktion bei der Gestensteuerung sein. Anbieten würde sich dies beispielsweise bei der Bedienung von medizinischen Geräten, um eine Kontamination der Geräteoberfläche zu vermeiden.

4.2 Studie 2

Hinsichtlich Versuchsreihe 2 kann bei der interferenzstatistischen Untersuchung ein signifikanter Unterschied zwischen den Feedbackarten hinsichtlich der Erlernbarkeit gefunden werden. Im Rahmen der Bewertung der Erlernbarkeit des Feedbacks kann festgestellt werden, dass Feedback F1 im Vergleich zu Feedback F4 ($z=2,685$, $p=0,044$) signifikant besser bewertet wird. Dabei könnte von Vorteil sein, dass nach Brisben et al. (1999) im Bereich des Mittelfingers eine höhere Präsenz an Mechanorezeptoren vorhanden ist, weshalb eine gute Lokalisation der Feedbackintensität möglich ist. Ebenfalls handelt es sich bei diesem Feedback um ein kontinuierlich auftretendes taktiles Feedbacksignal, bei welchem entlang des Skalenverlauf keine Formänderung auftritt. Bei der Wahrnehmung des Status muss dieses nicht mit dem vorherigen Signal bezüglich einer Formänderung abgeglichen werden und reduziert somit den Aufwand bei der Wahrnehmungsverarbeitung im Vergleich zu einem Signal mit Formänderung. Anhand Bild 5 ist zu erkennen, dass alle Feedbackarten eine sehr geringe Abweichung aufweisen und folglich mit allen Feedbackarten ein sehr präzises Stellen möglich ist. Demnach können alle Feedbackmuster auf der Haut erkannt werden und über deren Änderung ein Rückschluss auf den Status des Eingabevorgangs abgeleitet werden. Folglich eignen sich zeitlich ändernde Muster auf der Haut, als Statusfeedback und das Ergebnis von Harrison et al. (2010), die Haut als Projektionswand zu nutzen, kann in dieser Versuchsreihe bestätigt werden. Auch hinsichtlich der Bedienzeit liegen die Feedbackarten auf dem gleichen Niveau. Eine Ausnahme bildet Feedback 3, hier wird für die Erfüllung der Aufgabe länger gebraucht. Aufgrund der guten Wahrnehmung von Feedback F1 vermittelt dieses einen sicheren Eindruck zur Ausführung der Stelltaufgabe, was anhand der Bewertung der Wahrnehmung ersichtlich ist. Das Zuordnen eines Feedbackdurchmessers zu einem bestimmten Sliderwert bereitet den Probanden bei Feedback F4 Schwierigkeiten, was Auswirkungen auf die Wahrnehmung und Erlernbarkeit des Feedbacks hat. Die Schwierigkeiten könnten dabei mit den verschiedenen Handgrößen der Probanden und der daraus resultierenden unterschiedlichen Verteilung der rezeptiven Felder und folglich der Wahrnehmung des Feedbacks erklärt werden (vgl. Brisben et al. 1999). Die Wahrnehmungsgrenzen unter anderem in Abhängigkeit der Handgröße sollten in einer weiteren Versuchsreihe untersucht und berücksichtigt werden. Bei den Feedbackarten F2 und F4 muss nicht nur erkannt werden, ob das Feedback aktiviert bzw. deaktiviert ist, sondern auch die genaue Position des Reizes. Dies fällt einigen Probanden aufgrund der geringen Ultraschallintensität schwer. Möglicherweise resultiert daraus die Bewertung hinsichtlich der Wahrnehmung. Die Mehrheit der Probanden findet das Feedback auf Ultraschallbasis generell zu schwach, was Auswirkungen auf die gesamte Evaluierung des Versuchs hat. Diese Thematik kann bereits während der Durchführung der Evaluierung beobachtet werden. Die Ursache könnte durch die ungleichmäßige Verteilung der rezeptiven Felder der Vater-Pacini-Körper auf der Handinnenfläche erklärt werden (vgl. Brisben et al. 1999). Gemäß dieser Untersuchung könnte die Mustererkennung beispielsweise im PKW-Sektor zur Regulierung der Lautstärke des Infotainment-systems oder für die Regulierung der Lüftung sowie für die Ambiente-Beleuchtung genutzt werden. Diese Studie zeigt auch, dass verschiedene Menüfunktionen mit unterschiedlichen taktilen Mustern belegt werden könnten.

5 Zusammenfassung

Die Eingabe über eine Buttoneingabe als auch die Eingabe über einen virtuellen Slider im Raum mit taktilem Feedback auf Ultraschallbasis ohne visuelles Feedback ist möglich. Hinsichtlich der ersten Machbarkeitsstudie eignet sich für die Buttonbedienung ein Button mit Druckpunkt besser für die

Bedienung im Raum, anstatt einen Button ohne Druckpunkt zu verwenden. Durch den taktilen Druckpunkt werden sehr geringe Intensitäten deutlich besser wahrgenommen und ein exaktes Stellen ermöglicht. Bezüglich der zweiten Studie lässt sich der Eingabestatus eines virtuellen Sliders über alle vier getesteten Feedbackarten realisieren. Es ist mit allen Feedbackarten ein exaktes Einstellen einer Sliderposition möglich. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass der Status eines virtuellen Sliders über die Änderung der Feedbackintensität des taktilen Feedbacks sowie über taktile Muster auf der Haut vermittelt werden kann. Erfolgt die taktile Rückmeldung jedoch nur über die Intensität wie beispielsweise beim Button ohne Druckpunkt oder wie bei der zweiten Studie, ergeben sich bei der Wahl sehr geringer Intensitätsstufen Schwierigkeiten hinsichtlich eines genauen Stellens. Um dieser Gestaltungsaufgabe gerecht zu werden, müssen weitere Studien mit einem größeren Probandenkollektiv durchgeführt werden. Ebenso müssen Einschränkungen verschiedener Nutzer- und Altersgruppen für die Untersuchungen in Betracht gezogen werden. Folglich könnten dann mit Fokus auf das Universal Design erste nutzerzentrierte Gestaltungsempfehlungen für virtuelle Bedienelemente mit taktilen Feedback im Raum abgeleitet, an die Nutzergruppe angepasst und in prototypischen Interfaces von zunächst stationären Anwendungen implementiert werden.

6 Quellen

- Brisben et al. 1999 Brisben, A. J., Hsiao, S. S., Johnson, K. O.: Detection of vibration transmitted through an object grasped in the hand. In: *Journal of Neurophysiology*, 81 4, 1999, S. 1548-1558.
- Cheng et al. 2016 Cheng, H., Yang, L., Liu, Z.: Survey on 3D Hand Gesture Recognition. In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* (26), 2016.
- Chouvardas et al. 2008 Chouvardas, V. G., Miliou, A.N., Hatalis, M.K.: Tactile displays: Overview and recent advances. In: *Displays*, 2008, 29. Jg., Nr. 3, S. 185-194.
- Georgiou et al. 2017 Georgiou, O., Biscione, V., Harwood, A., Griffiths D., Giordano, M., Long, B., Carter, T.: Haptic In-Vehicle Gesture Controls. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct – Andreas Löcken u. a. (Hrsg.)*. New York, USA: ACM Press, 2017, S. 233-238.
- Harrington et al. 2018 Harrington, K., Large, D. R., Burnett, G., Georgiu, O.: Exploring the Use of Mid-Air Ultrasonic Feedback to Enhance Automotive User Interfaces. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications – AutomotiveUI 18*, ACM (Hrsg.). New York, USA, 2018, S. 11-20.
- Harrison et al. 2010 Harrison, C., Tan, D., Morris, D.: Skinput: Appropriating the Body as an Input Surface. In: *Proceedings of the 28th International Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM (Hrsg.). Atlanta, USA 2010.
- Hoshi & Shinoda 2016 Hoshi, T., Shinoda H.: Airborne Ultrasound Tactile Display. In: *Pervasive Haptics*. Kajimoto et al. (Hrsg.), Sendai: Springer-Verlag Japan, 2016, S. 121-137.
- Iwamoto et al. 2008 Iwamoto, T., Tatzono, M., Shinoda, H.: Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound. In: *Proceedings of the 6th international Conference on Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, S. 504-513.
- Schlott 2019 Schlott, Stefan: *Intelligente Oberflächen als diskrete Bedienelemente*. In: *ATZ Elektron* 14 (2019), S. 8-13.

Menschorientiertes Design: Ein Vergleich der Einstiegsbewegung für zwei Fahrzeugkonzepte anhand eines muskuloskeletalen, digitalen Menschmodells

Human-centred design: a comparison of ingress motion for two car concepts using a musculoskeletal, digital human body model

Johannes R. Walter^{1,2}, Patrick Lerge^{1,2}, Syn Schmitt^{1,2}

¹University of Stuttgart, Institute for Modelling and Simulation of Biomechanical Systems (IMSB), Stuttgart, Germany

²University of Stuttgart, Stuttgart Center for Simulation Science (SimTech), Stuttgart, Germany
johannes.walter@simtech.uni-stuttgart.de
patrick.lerge@simtech.uni-stuttgart.de
schmitt@simtech.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch): Prospektiv einsetzbare digitale Menschmodelle für die Bewertung von Designentscheidungen, wie z.B. die Proportionen eines Türrahmens für einen optimalen PKW-Einstieg, sind immer noch selten. Bestehende Methoden stoßen an ihre Grenzen, wenn das Design künstlicher Natur ist und keine vergleichbaren Bewegungsdaten in den Datenbanken zur Verfügung stehen. Um diese Lücke zu schließen, stellen wir hier ein vorwärtsdynamisches, muskelgetriebenes Menschmodell und eine zugehörige Muskelregelungsarchitektur vor, die zur Bestimmung der lokalen Gelenkinematik und der internen Dynamik an den Gelenken verwendet werden, ohne dass eine Bewegungsdatenbank oder inverse Dynamik genutzt werden muss. Hierzu wird eine erste simulierte Bewegung mit den kinematischen Ergebnissen einer experimentellen Studie validiert. Im Folgenden wird auf Basis einer Designänderung die Einstiegsbewegung wiederholt und die Änderungen in Bezug auf die biomechanischen Parameter quantifiziert. Im Ergebnis sagt unser Modell voraus, dass die beispielhafte Konfiguration eines 50 mm höheren Türrahmens zu geringeren Muskelkräften und zu einem geringeren Arbeitsaufwand insbesondere in der Lateralflexion der Wirbelsäule führt.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Ergonomie, digitale Menschmodellierung, neuro-muskuloskelettales Modell, PKW Einstieg, Biomechanik

Abstract (english): Prospectively applicable digital human models for the evaluation of design decisions such as the proportions of a door frame for an optimal car ingress are still rare. Existing methods come to their limits at latest when the design is of purely synthetic nature and no comparable motion from real data reconstructions is available in motion databases. To close this gap, in this paper, we present a forward-dynamical, muscle-driven human body model and an associated muscle control architecture that is used to determine the necessary range of motion, local joint kinematics and internal dynamics at the joints without neither a background motion database nor inverse dynamics. To do so, an initial simulated motion, generated for a real existing car design, is validated with the kinematic results of an experimental study. In the following, based on a design change, the same model is used to repeat the entry movement and to quantify the resulting change in terms of biomechanical parameters. In conclusion, our model predicts that the exemplary configuration of a 50 mm higher door frame leads to lower muscle forces and to less work effort, especially in the lateral flexion of the spine.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Ergonomics, digital human modelling, neuro-muskuloskeletal model, car ingress, biomechanics

1 Introduction

Critical decisions in designing future products are made at a very early stage in the conceptual phase of the product development. The shape of a car, for example, is such a critical decision and one key feature of this product. This decision presets many depending factors, like air drag or packaging space for engine and other necessary technical parts. While air drag or package space can be easily calculated for each new configuration using well-established CAE methods, the space required by a potential user to use the product is determined primarily based on motion capture measurements as in Causse et al. (2011) and Monnier et al. (2006) and with kinematic reproducing anthropometrically biofidelic human body models like RAMSIS (Van Der Meulen and Seidl 2007; Robert et al. 2014). This sets clear limitations for complex tasks like entering a car, especially with regard to the development of new vehicle concepts for the future. In a consequence, it is then left to the test users, whether they accept the new design decision when the product is first completed as an actual prototype. Also considering the perception of discomfort caused by biomechanical parameters like force and torque effort (Helander and Zhang 1997; Zacher and Bubb 2004), which currently can only be answered in an inverse dynamic way as in Kim and Lee (2009) and Peng et al. (2016).

This decision of acceptance is at a very late stage in the product development. Human-centered design, using a forward dynamic digital human body model (DHBM) engineering method, can help to improve this design and decision process. In this contribution, we present a novel method to compare different design concepts and how they affect human behaviour using digital engineering. We validate the model predictions with experimental measurements of real humans getting into the car with the slip strategy (“Schlupf Strategie” in Rigel (2005)) and predict internal forces for two different design concepts (door frame height) of one product category (car with higher hip entrance height, i.e., SUV) in forward dynamics. To accomplish the comparison, we use a musculoskeletal DHBM and a hierarchical motion control. The experimental results are the outcome of a parameter study of a local OEM.

2 Materials & Methods

2.1 Musculoskeletal Digital Human Body Model

For the simulation study, the three-dimensional digital human body model (DHBM) shown in Figure 1 is used.

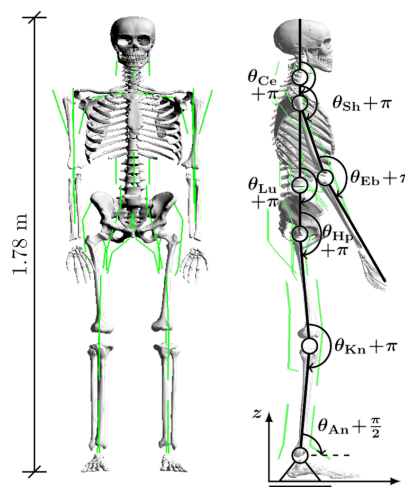


Figure 1: The model represents a generic 50th percentile male and its skeletal structure consists of 15 rigid bodies, connected via 14 joints including 20 mechanical degrees of freedom (DoFs) θ that are actuated by 36 MTUs (Haeufle et al. 2014; Schmitt et al. 2014). The only input that drives the movement is the neural stimulation u of the MTUs. ($u \rightarrow a \rightarrow f^{mtu} \rightarrow \tau^{mtu} \rightarrow \dot{\theta} \rightarrow \theta$)

The joints of the DHBM are actuated by muscle-tendon units (MTUs), which produce active forces as elementary biological drives (Schmitt et al. 2019). The MTUs are modelled using an extended Hill-type muscle model (Figure 2) as described by Haeufle et al. (2014) that takes into account the force-length-velocity characteristics of the contractile element (CE), the non-linear tendon- and muscle-tissue elasticities of the serial- and parallel elastic elements (SEE and PEE), as well as the damping in the tendon (SDE). The activity $a_k = a_k(\gamma_k, l_k^{ce})$ of a k-th MTU is determined using a model of fibre-length-dependent, first-order activation dynamics $\dot{\gamma}_k = f(\gamma_k, u_k)$, as introduced by Hatze (1977) and advanced by Rockenfeller and Günther (2018), where $\gamma_k(t)$ denotes the intramuscular concentration in the sarcoplasm of calcium ions and $u_k(t)$ the normalized, continuous neural excitation at a neuromuscular junction of the MTU. The consequential state of activity $a_k(t)$ represents the source of mechanical energy provided by ATP hydrolysis that leads to a force production of the contractile element of the MTU. In its entirety, the DHBM is identical to the one described and used by Walter et al. (2021) and Stollenmaier et al. (2020b). Therefore, all MTU parameters used in this study, including those of contraction- and activation dynamics, are listed in the same supplementary Material (Stollenmaier et al. 2020a).

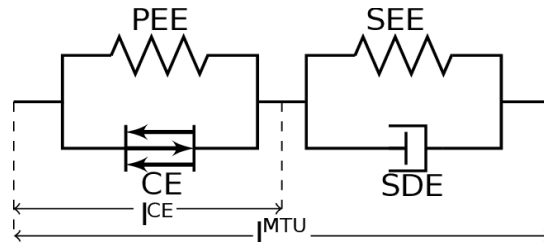


Figure 2: By considering the force equilibrium $f_k^{mtu} = f_k^{ce} + f_k^{pee} = f_k^{see} + f_k^{sde}$ of the MTU and solving for the CE's contraction velocity \dot{l}_k^{ce} , a formulation of the MTU's contraction dynamics $\dot{l}_k^{ce} = \dot{l}_k^{ce}(l_k^{ce}, l_k^{mtu}, \dot{l}_k^{mtu}, a_k)$ is obtained that can be integrated over time in a forward dynamics simulation environment. The specific force-laws and other mathematical particulars of MTU force production are given in Stollenmaier et al. (2020a), Haeufle et al. (2014) and Rockenfeller and Günther (2018).

MTU forces f_k^{mtu} are internal forces that act on the skeleton and generate joint torques according to their state-dependent (Hammer et al. 2019) moment arms $\tau_q^{mtu} = r_{q,k} f_k^{mtu}$.

The external forces that act on the system are gravity and contact forces. Taken together, the movement of the DHBM can be described in a forward dynamics simulation by integrating the Lagrangian formulation of the rigid body motion

$$M(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) = \tau^{mtu}(u) + \tau^{lmt} + \tau^{cnt}, \quad (1)$$

where $M(\theta) \in R^{n_\theta \times n_\theta}$ is the mass matrix, $c(\theta, \dot{\theta}) \in R^{n_\theta}$ is a vector of gravitational, centrifugal, and Coriolis forces, $\tau^{mtu}(u) \in R^{n_\theta}$, $\tau^{lmt} \in R^{n_\theta}$ and $\tau^{cnt} \in R^{n_\theta}$ are vectors of the generalized forces (torques) of the MTUs, joint limitations and contacts with the environment, respectively. To predict coordinated movements under variations of the environment with the presented DHBM, MTU stimulations $u(t) \in R^{n_{mtu}}$ must be generated that lead to MTU force productions $\tau^{mtu}(u(t))$ driving the mechanical states $\theta(t)$ to execute a desired movement.

2.1 Hierarchical Control Architecture

For the generation of the MTU stimulation signals $u(t) \in R^{n_{mtu}}$ a hierarchical control architecture (Walter et al. 2021) is used that allows to formulate the desired movement in a conceptual space of joint angles, joint torques and limb positions. This approach has the advantage of an intuitive way to set desired set-points for the movement of the DHBM. In total four joint-based controllers for the left and right lower and upper extremities are used in combination with a position controller of the head that actuates the lumbar and cervical spine joints. In addition, to initially achieve a stable upright stance in front of the car, a torque-based controller for the lower limbs is used, exactly as described in Walter et al. (2021).

The control architecture is schematically displayed in Figure 3 (right). Hereby the control problem is divided into three layers, namely a conceptual, a transformational and a structural layer. In the conceptual layer, the movement is planned in terms of the respective high-level coordinate spaces of joint torques, joint angles or the position of the head in 3D-space and a controlled output signal is fed to the transformational layer. The transformational layer translates this conceptually obtained postural plan to the structural layer, where low-level spinal circuits (monosynaptic reflex) are modelled and the MTUs are actuated. Thereby the muscle-joint redundancy is resolved.

Hierarchically distributed, on each layer, PID feedback controllers are implemented to ensure a robust task fulfilment and Jacobian matrices of the form $J^{yx} = \partial y / \partial x \in R^{n_y \times n_x}$ are used to project the controlled signal $x^{pid} \in R^{n_x}$ of the current layer into the control space of the respective lower layer with the controlled variable $y \in R^{n_y}$. That is, the movement plan of the position of the head in 3D-space (conceptual layer) is compared to its actual value and a resulting, PID controlled signal is used to provide a respective movement plan for the joint angles (transformational layer) of cervical and lumbar lateral and ventral flexion and extension (the trunk). These movement plans for the joint angles of the trunk are then compared (in the transformational layer) to their actual values and a resulting, PID controlled signal is calculated. The subsequent transformation to the structural layer is carried out in a twofold way: Firstly, a model of the monosynaptic reflex arc, which is based on the muscle spindle's sensor signal $l_{head}^{ce}(t)$, is supplied with translating (by $J_{head}^{\lambda\theta} = \partial \lambda_{head} / \partial \theta_{head} \in R^{8 \times 4}$) the movement plan of joint angles into a movement plan of nominal MTU lengths $\lambda_{head}(t)$.

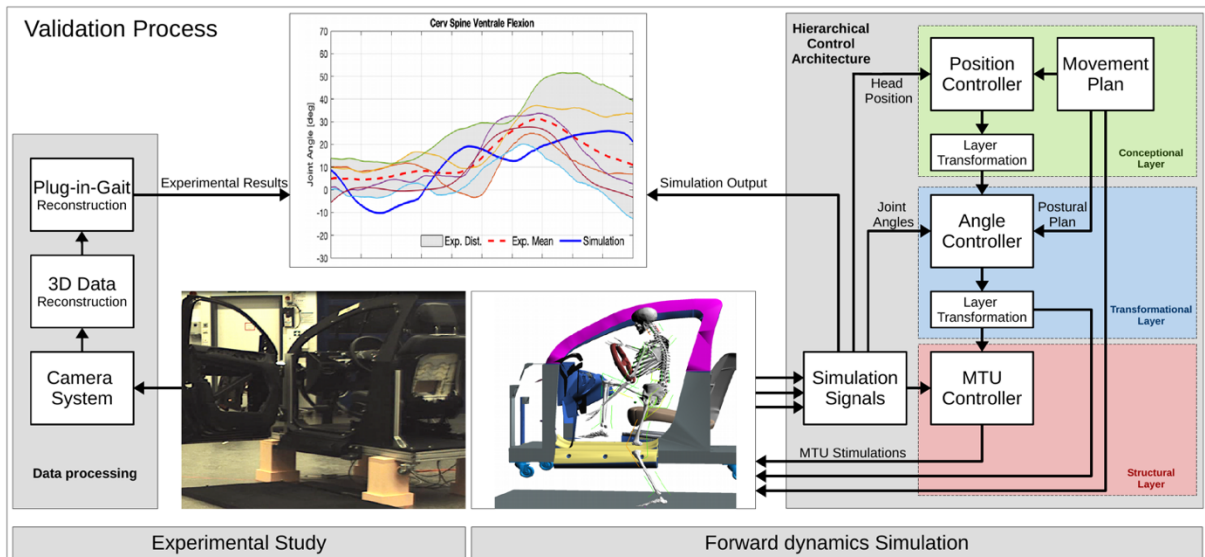


Figure 3: Block diagram of the validation process. Experiments (left) are performed to obtain kinematic data of real human car ingress motion. Separated from the experiments, forward dynamics simulations (right) are performed in ‘demoa’ (Mörl et al. 2020; Walter et al. 2021). The required MTU stimulations for driving the model are generated by a hierarchical control architecture (Walter et al. 2021) that allows to formulate the desired motion in terms of a movement plan of the position of the head and the joint angle configuration of the left and right lower and upper extremities. The movement plan is divided into movement primitives and is optimized off-line in a heuristic learning process to execute a successful ingress motion without the violation of boundary restrictions such as collision avoidance. At last, the simulation signals are compared to the experimental results to validate the motion.

By comparing $l_{head}^{ce}(t)$ and $\lambda_{head}(t)$, and feeding back the (this way P-controlled) stimulation signal $u_{head}^{\lambda} := \kappa \cdot (l_{head}^{ce} - l_{head}^{ce,des})$, the reflex arc is closed (Bayer et al. 2017; Kistemaker et al. 2006; Walter et al. 2021). Secondly, the movement plan of joint angles is directly projected into the space of MTU stimulations (by $J_{head}^{u\theta} = \partial u_{head} / \partial \theta_{head} \in R^{8 \times 4}$), adapting the co-contractive stimulation $u_{head}^{coc}(t)$ continuously to fulfil the movement plan (Walter et al. 2021).

For the joint controllers of the left and right upper extremities, the postural plan $\theta_{limb}^{des}(t)$ is set directly in the transformational layer of the control architecture (see arrow labeled postural plan in Figure 3). The simulated car ingress motion was driven by this control architecture by formulating movement plans for the controllers, i.e., for the head-position controller and the joint-angle controllers of the left and right upper and lower extremities. Furthermore, boundary criteria have been defined to identify successfully executed synthetic ingress motions. A successful simulation was one, that did not violate any of the boundary restrictions of:

i) collision avoidance (right foot and sill), ii) grabbing position of the hand at the steering wheel, iii) compliance with a minimum of head clearance (head and door frame), iv) placement of the right foot on the footwell in the car, v) placement of the buttock on the seat in the car vi) keeping a stable position. By dividing the movement plan into movement primitives and adjusting those, the movement was heuristically learned. Only a successfully synthesized car ingress motion did undergo the validation process (see Section 3.1).

2.2 Experimental and simulated setting

The experimental recordings were made with 28 Vicon[®] Bonita cameras at 100 Hz recording rate that were circularly arranged around the vehicle. Control, calibration and synchronization of the measuring devices was done with Vicon Nexus V 2.4. The recorded ingress motion was performed by six male volunteers with a total body height between 1.71 m to 1.80 m and a “normal” body mass index. All volunteers were in possession of a driver's license, as such regular users of a car and (by self-disclosure) users of the slip ingress-strategy as in Rigel (2005).

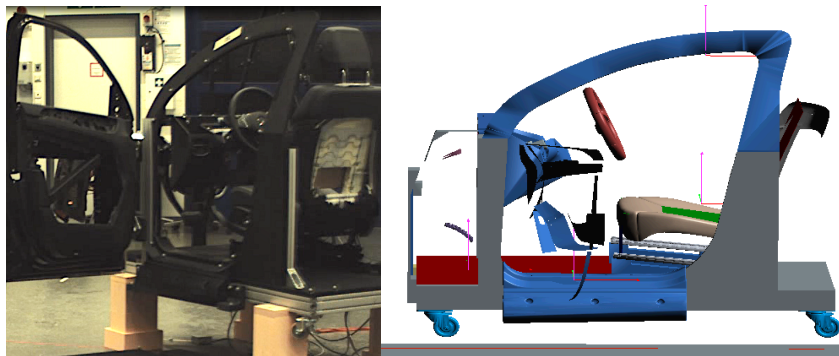


Figure 4: Mock-up for experimental study (above) and Simulation (below). The simulated object as displayed is structurally identical to the mock-up used in the parameter study

They were also neither physically nor coordinatively handicapped. For recordings, the ingress execution started left next to the B-pillar and was categorized as “ingress” between the event of forward directed left foot contact left next to the car to the event of left foot contact in the footwell. These reference events simultaneously represent the orientation points for the later normalization of the movement to the standard of “progress”. This movement was repeated five times by each volunteer taking about 30 minutes per person and 2.5 s to 3.0 s per episode. The marker setup used was a typical Plug-In Gait setup for the full body as described in Vicon (2018) with two additional markers on top of the greater trochanter for a more reliable detection of hip movement. The Plug-In Gait functionality as provided by Vicon[®] was further used for the joint kinematics reconstruction. The vehicle model used in the parameter study was a simplified replica (mock-up) of a real existing car, representing the car’s driver-seat and its nearest interior and exterior as shown in Figure 4. For this purpose, the door (permanently opened at 70 degree), steering wheel, pedals and seat were taken from a real vehicle. Seat height, seat tilt and steering axis tilt were adjusted right before the ingress by every volunteer to make it comparable to their individually preferred driving position. Side sill and front console were further accurate and non-adjustable 3D print replicas.

The door frame on which we are focusing here was represented by a correctly shaped wooden model, while the features of the car roof and footwell were neglected.

Following the practical completion of the study, the recorded data was post-processed. After visual inspection of the kinematic results, the three most similar of the five entry movements were selected and normalized to 1000 equidistant discrete time intervals. Subsequently, an arithmetic mean of the kinematics was calculated for each volunteer, which is used for the presentation of the results in Section 3. No filters were applied.

Separated from the experiments, forward dynamics simulations were performed in the C/C++ simulation environment 'demoa' (IMSB, Chair of Computational Biophysics and Biorobotics in-house code (Mörl et al. 2020; Walter et al. 2021)). In these simulations, the mock-up model displayed in Figure 4 (right) was used. For HBM's interaction with the virtual vehicle, flat contact surfaces were defined on the virtual ground, in the footwell, on front of the seat, the seat top and at the backrest as well as a possible punctual contact at the upper centre of the steering wheel.

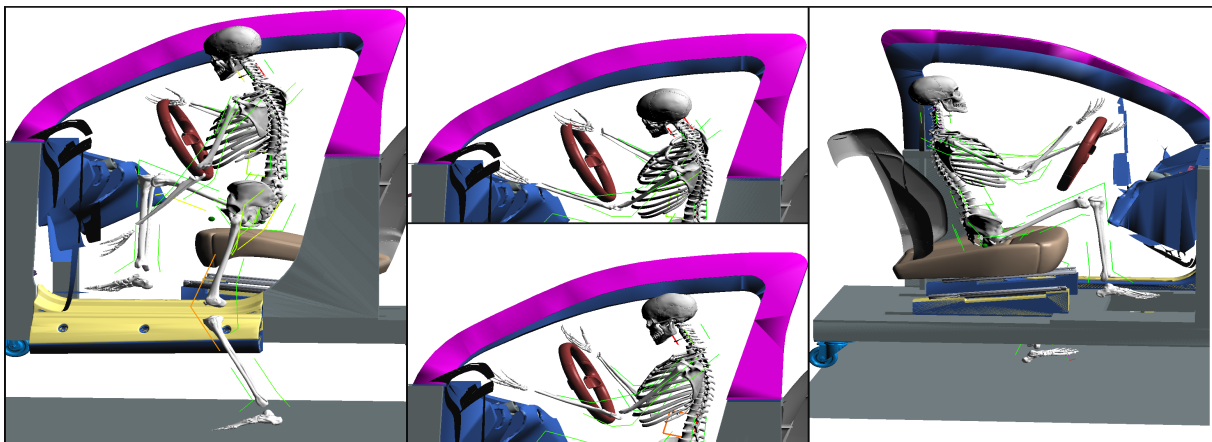


Figure 5: Phases and movement primitives of the simulated car ingress motions. First, the right leg is lifted above the sill and the right arm grabs the steering wheel (left picture P=34%). In the middle picture (P=65%) the transition of the head through the door is shown as a comparison of the two door frame heights. The movement plan was adapted in the control architecture according to available headspace. In the right picture (P=100%) the final position in the car is shown.

To mimic a design change in the context of a digital prototype, the door frame height was increased by 50mm for the second simulation, displayed as magenta coloured object in Figure 5. These geometrical setups in the cars design are used for a prediction of potential changes in the biomechanical features of the ingress motion.

3 Results

3.1 Validation of the simulation on data from the experimental study

The validation of the simulated movement is done using the kinematics to compare the motion patterns encoded in the joint angles of the simulation model $\theta(t)$ with those observed in the experiments. A simulation that showed a plausible agreement with the motion patterns of the subjects was considered valid. Thereby, a general match of the shapes of the motion patterns was weighted higher than the deviation to the mean over all individually performed trials of the experimental study (red dashed line). In Figure 6, the simulation outputs (blue lines) of such a valid motion are shown in a comparison to those of the experimental study (grey corridor).

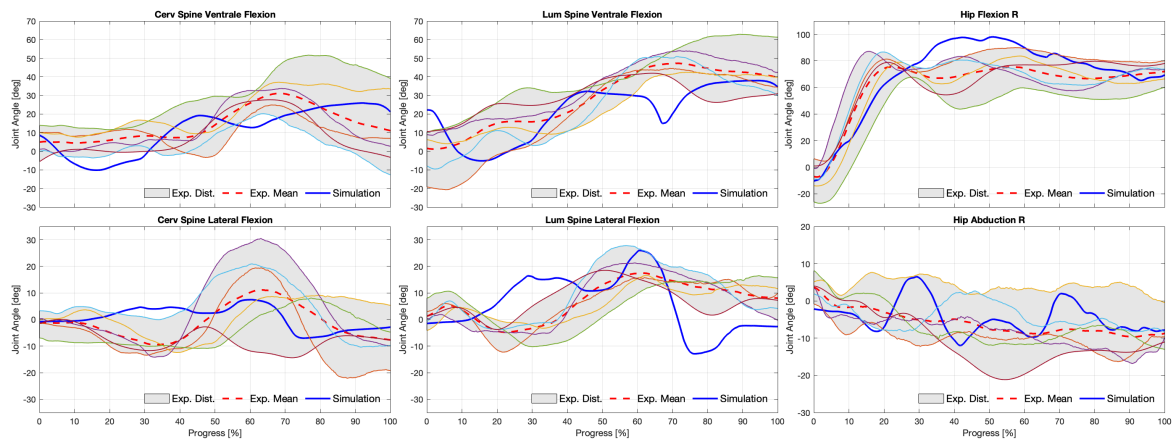


Figure 6: Even though the simulated motion does not always stay within the corridor that is spanned by the motion data obtained from the experimental measurements, it is considered valid for the purpose of this contribution. Leaving the corridor was considered tolerable, as the synthetic motion is a successful individual motion by its own, i.e. the boundary restrictions (see Sec. 2.2 and Figure 5) were not violated.

As these kinematics are the results of a self-driven simulation, i.e. stimulated MTUs produce the necessary torques to generate the kinematics shown in Figure 6, the kinematics validation brings along that the dynamical contributions of MTU-generated torques can also be considered valid. Reverse thought experiment: Unappropriated MTU forces would lead to the collapse of the model and not to a successful ingress motion as seen. A valid computer simulation means the availability of all states of the DHBM at all times of the motion. This includes MTU stimulations, activities and even individual force contributions of the MTU's elements (see eq(1) and Figure 2).

3.2 Prediction of changes in biomechanical features due to the digital design change

To predict a potential change in the biomechanical features of the ingress motion due to a design change of a digital car prototype (higher door frame, see Sec. 2.3 and Figure 5), a second motion was synthesised that was still successful with a different frame height (see Sec 2.2) and re-learning the movement. The comparison of the simulated results for the different car designs is shown in Figure 7 for the movement phase of the transition of the head into the car (30%-80% progress), where the biggest change in terms of movement execution occurred.

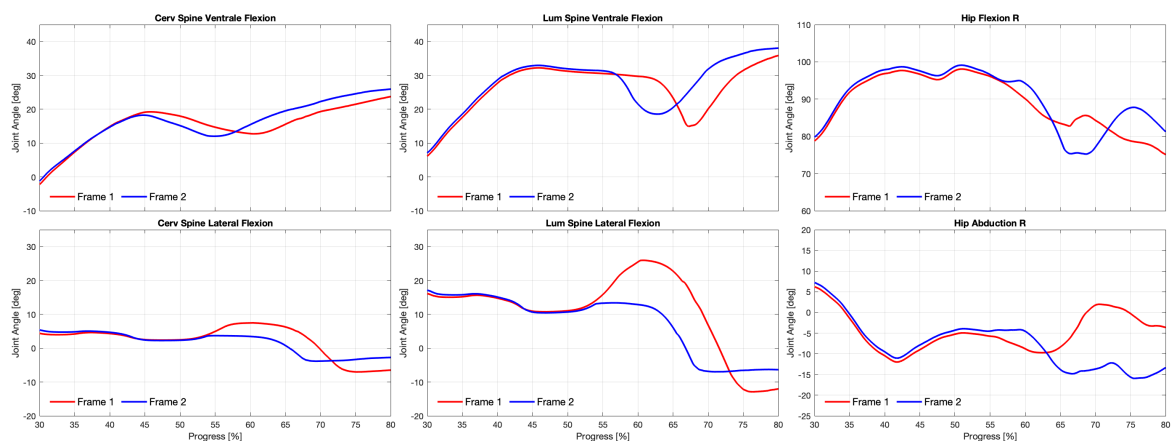


Figure 7: The most obvious prediction for the kinematics is that a higher door frame (Frame 2) allows a more upright entry position within the coronal plane, i.e., less lateral flexion in cervical (5°) and lumbar spine (13°) and a less intense bending in the hip flexion (plots [2,1], [2,2] and [1,3]). In the forward bending within the sagittal plane a clear time shift of 130 ms is visible, particularly prominent in the lumbar spine ventral flexion (plot [1,2]). Overall, this indicates less work to be done in the scenario of a higher door frame.

Overall the predicted motion shows a plausible reaction to the design change of allowing a more upright entry position (see also Figure 5). More precisely, it led to a joint angle decrease of 5° in the cervical spine lateral flexion and 13° in the lumbar spine lateral flexion with a simultaneous delay of 130 ms ($p \approx 5\%$) in both joints. For a prediction of changes in the DHBM-internal dynamics, in Figure 8, for both design scenarios, the normalized MTU-generated torques (τ^{mtu}) are displayed for the cervical and lumbar lateral and ventral flexion and right hip flexion and abduction. This value represents the active contribution of all MTUs (by their moment arms) to the motion of the respective joint. The MTUs themselves are surrogates of the physiological muscle groups that act on the same joint and therefore τ^{mtu} carries information of the net-torque of the whole muscle group. The normalization was done by dividing all MTU-torque results by the maximum absolute torque that occurred in the first scenario.

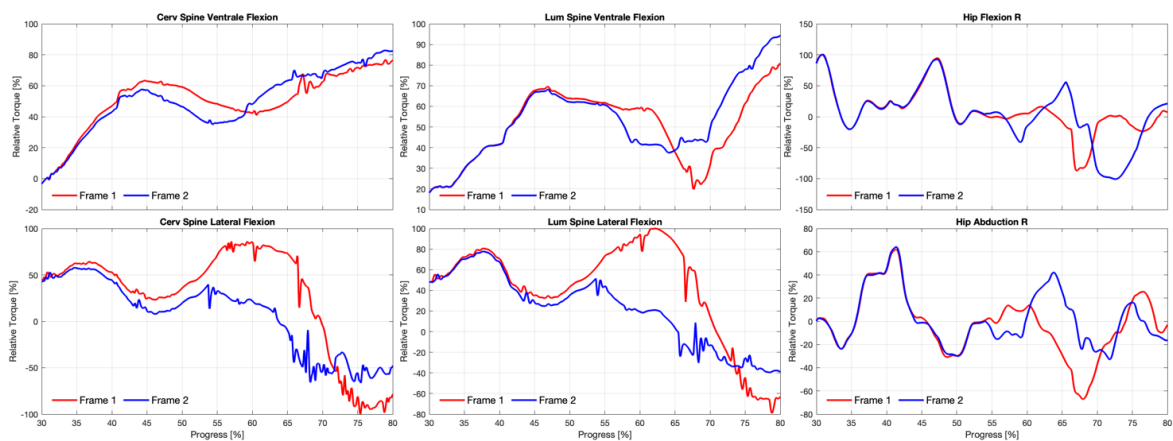


Figure 8: Predictions (Frame 2) of the MTU-generated torques, normalized by the maximal torque that occurred during the original scenario. The big picture is that with a higher door frame (blue) significantly less effort is taken by the MTUs involved in the lateral flexion of the lumbar and cervical spine joints (plots [2,1] and [2,2]). In the unfiltered plots of the MTU-torques, it can be observed how the controller adjust MTU stimulation and therewith force production to compensate disturbances and that the same delay effect occurs that was already visible in the kinematics (130 ms). Although a higher absolute Adduction is observed in the hip (Figure 7, plot [2,3]), overall MTU-torques are lower.

In the simulations shown in Figure 8, this led to the result that in the cervical spine, the MTU-produced torque decreased at its former climax from 80% to 14%, while in the lumbar spine there was a decrease from 100% to 20%. In relation to this, the next most noticeable difference in the relative torque of the ventral direction of the lumbar spine from 60% to 40% can be neglected. Further characteristic features of the results correspond with those from the kinematics analysis, which is also supported by a correlation value of the kinematics-to-torque results of greater than +0.9.

4 Discussion

4.1 Limitations

With our model, a plausible prediction of changes in the biomechanical features of an ingress motion, and of internal states of the DHBM regarding different car design scenarios was achieved. The validation of the simulated motion was performed on the basis of kinematics data. In order to achieve a viable dynamics validation of the musculoskeletal model, the data obtained from the experiments validation must satisfy a minimum quality standard and comprehensiveness to identify the dynamical states of the simulation (joint angles and velocities and muscle activities (eq(1) and Figure 2)). That is, information on energy flow between the model and its environment, e.g., the impact of contact interactions, must be confidently estimated by the experimental measurement system via

force plates and EMG measurements need to deliver information on the muscular activity during the motion. As this brings strong requirements for the experimental setup, current digital human body models are based on isolated model parts, which themselves are validated. A full validation, still today, is rarely seen in full human body models, but required in the future. Additionally, neuronal features, like co-contraction have to be validated, because they are taken into account by more sophisticated controllers, e.g. Walter et al. (2021). Model improvements, such as i) increasing the number of MTUs and the physiological details of their implementation and ii) opening additional DoFs in the hip, the shoulder and the spine joints, and therewith increasing the overall biofidelity of the DHBM, are the required next steps for the model's evolution. To then execute movements with a better agreement to experimental measurements, the boundary restrictions for the simulation task can be sharpened, more sensor signals from the environment can be integrated into the control architecture, e.g., humans can feel and thereby control the status of stick-slip transitions of contacts with the environment, and the applicability of systematic optimization methods to automate the learning process can be investigated.

4.2 Scientific and Engineering Relevance

A seemingly simple task to enter a car turns out to be both a deciding factor for a car purchase when comfortably achievable and a not insignificant challenge to understand and improve in ergonomics research and development.

In the late nineties of the past century and early 2000s years, basic foundations were laid. Experimental paradigms were developed by designing car mock-ups as in Bubb and Estermann (2000) and Wang et al. (2006), appropriate car environments and biomechanical user studies combined with surveys (Rigel 2005).

Based on such studies, it was found that, at least, four different ingress strategies are to be differentiated (Rigel 2005). Additionally, guidelines were developed on how to select participants for and cluster in such user studies.

Since the early 2000s to present, experimental studies were enriched by inverse kinematics analyses (Reed et al. 2002) and gradually increasing inverse dynamics analyses (Robert et al. 2014). The goal was to analyse and reconstruct ingress and egress motion in standardized lab experiments. The concept of reference movements was established. Reference movements are assumed to represent car ingress and egress from which real movements deviate only slightly or partly in (joint) space and (execution) time.

This concept was even used for movement approximation and optimisation outside of experimentally determined states, which was called movement simulation. This approach represents a very sophisticated interpolation method using prior assumptions of how humans differ in size and vary in motion execution. It is a data base approach to analyse and reconstruct pre-recorded experimental data, restricted to kinematics, which approximates a potential movement given the car parameters. Despite its wide use, already in production processes, this approach does not allow to assess the simulated movement without having each single human interviewed or even causally understand discomfort.

Still today, decisions in car ergonomics are made based on expert knowledge and experience. In this contribution, we argue in favour of a model-based ergonomics approach. We show that it is possible to achieve a predictive biomechanical simulation, which generally allows for an ergonomics assessment based on predicted mechanical values (Pannetier and Wang 2012; Pannetier and Wang 2014). That way, often one-dimensional threshold or limit values known by experts or from experience potentially develop into multidimensional pattern for a more precise prediction of user responses. This is interesting both from a science and an engineering perspective. For science, the challenge is to bridge biomechanical assessment and user survey study results.

It is not trivial to relate a user's judgment on how it felt getting into a car with, for example, a hip-angle-over-time trajectory of one or the other leg. This issue is still unsolved. Further, sophisticated digital human body models are reported in literature and commercially available. It is possible to study instant mechanical loads on specific subparts of the whole body. However, they lack a comprehensive evaluation feature for analysing effects of long-term use: material fatigue, wear and tear, etc. Additionally, even lab experiments are prone to a psychological bias when the user knows the type of car in which he/she is supposed to get in. From an engineering perspective, the next step and first challenge, is to adopt neuro-musculoskeletal models and integrate (dis-)comfort models into it. Similar attempts have proven to be feasible and successful in the field of room climatization (Katić et al. 2016). A second challenge is to reduce the costs and effort for setting up and accomplish user studies using the current experimental paradigm. Especially when taking data quality and recording capability into consideration. The third challenge is to convince higher management that despite available, enormous expert knowledge and experience in car producing companies, movement and (dis-)comfort predictions become inevitable in times of i) very short development times and ii) entirely digitalised development processes.

5 Conclusion

To conclude, expert knowledge is available and used in ergonomics. But this knowledge is often not transparent and objective and always inseparably bound to individual people. Traditionally, design decision based on expert knowledge was checked in the development process, as soon as first physical prototypes of new cars were built. However, reduced development cycles cut the physical prototype phase almost completely and thus demands for digitalized processes. This holds even and especially for ergonomics. Design decisions, already in an early car development phase, emerge to compromises between competing technical needs and user demands based on digitally generated results. Future cars demand increasing space and new car concepts, e.g., additional hybrid drive systems or battery placement in the floor. Therefore, technical specifications have to be valid and sharp. For ergonomics, this imposes the burden of developing and using new, predictive tools, which, at least, cover present expert knowledge enriched by growing scientific evidence to produce valid and sharp ergonomic specifications. This contribution presents such a potentially useful, new method.

Acknowledgement

This study was performed in close collaboration with the ergonomics department of Mercedes Benz AG. First and foremost, we thank Bernd Brückner for supporting this research project from sketching first ideas to general discussions of the overall topic. We deeply appreciate his constructive contributions and benefit from his profound knowledge and overview of ergonomics in cars. Additionally, we would like to thank Johannes Schnaidt for developing the experimental setup, improving the data quality and general discussions on car ergonomics. Additionally, we would like to thank Sriram Rajakumaran for his support on sharing and interpreting the motion capture data and general support in visualization.

The research leading to this publication has received funding from the German Research Foundation (DFG) as part of the International Research Training Group "Soft Tissue Robotics" (GRK 2198/1) and under Germany's Excellence Strategy - EXC 2075 - 390740016.

Literature

- Bayer et al. 2017 BAYER, Alexandra; SCHMITT, Syn; GÜNTHER, Michael; HAEUFLE, Daniel F. B.: *The influence of biophysical muscle properties on simulating fast human arm movements*. In: *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 20 (2017), Nr. 8, S. 803–821
- Bubb and Heiner 2000 BUBB, Heiner; ESTERMANN, Stefan: *Influence of Forces on Comfort Feeling in Vehicles*. In: *Conference: Digital Human Modeling For Design And Engineering Conference And Exposition*, 2000
- Causse et al. 2011 CAUSSE, Julien; WANG, Xuguang; DENNINGER, Lisa: *Effects of roof height on car ingress/egress movement*. In: *Conference: International Symposium of the Digital Human Modelling*, 2011
- Haeufle et al. 2014 HAEUFLE, Daniel F. B.; GÜNTHER, Michael; BAYER, Alexandra; SCHMITT, Syn: *Hill-type muscle model with serial damping and eccentric force–velocity relation*. In: *Journal of Biomechanics* 47 (2014), Nr. 6, S. 1531–1536
- Hammer et al. 2019 HAMMER, Maria; GÜNTHER, Michael; HAEUFLE, Daniel; SCHMITT, Syn: *Tailoring anatomical muscle paths: a sheath-like solution for muscle routing in musculo-skeletal computer models*. In: *Mathematical Biosciences* 311 (2019)
- Hatze 1977 HATZE, Herbert: *A myocybernetic control model of skeletal muscle*. In: *Biological Cybernetics* 25 (1977), Nr. 2, S. 103–119
- Helander and Zhang 1997 HELANDER, M. G.; ZHANG, L.: *Field studies of comfort and discomfort in sitting*. In: *Ergonomics* 40 (1997), Nr. 9, S. 895–915
- Katić et al. 2016 KATIĆ, Katarina; LI, Rongling; ZEILER, Wim: *Thermophysiological models and their applications: A review*. In: *Building and Environment* 106 (2016), S. 286–300
- Kim and Lee 2009 KIM, S.H.; LEE, Kunwoo: *Development of discomfort evaluation method for car ingress motion*. In: *International Journal of Automotive Technology* 10 (2009), S. 619–627
- Kistemaker et al. 2006 KISTEMAKER, Dinant; VAN SOEST, Knoek; BOBBERT, Maarten: *Is equilibrium point control feasible for fast goal-directed single-joint movements?* In: *Journal of neurophysiology* 95 (2006), S. 2898–912
- van der Meulen and Seidl 2007 VAN DER MEULEN, Peter; SEIDL, Andreas: *Ramsis – The Leading Cad Tool for Ergonomic Analysis of Vehicles*. In: DUFFY, V. G. (Hrsg.): *Digital Human Modeling, Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007 — ISBN 978-3-540-73321-8, S. 1008–1017
- Monnier et al. 2006 MONNIER, Gilles; RENARD, Frédéric; CHAMEROY, Adrien; WANG, Xuguang ; TRASBOT, Jules: *A Motion Simulation Approach Integrated into a Design Engineering Process*. In: *SAE Technical Papers* (2006)
- Mörl et al. 2020 MÖRL, Falk; GÜNTHER, Michael; RIEDE, Julia M.; HAMMER, Maria; SCHMITT, Syn: *Loads distributed in vivo among vertebrae, muscles, spinal ligaments, and intervertebral discs in a passively flexed lumbar spine*. In: *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 19 (2020), Nr. 6, S. 2015–2047
- Pannetier and Wang 2012 PANNETIER, Romain; WANG, Xuguang: *Development of objective discomfort evaluation indicators for a task-oriented motion using less constrained motion concept: application to automotive pedal clutching task*. In: *Work* 41 (2012), S. 1461–1465

- Pannetier and Wang 2014 PANNETIER, Romain; WANG, Xuguang: *A comparison of clutching movements of freely adjusted and imposed pedal configurations for identifying discomfort assessment criteria*. In: *Applied Ergonomics* 45 (2014), Nr. 4, S. 1010–1018
- Peng et al. 2016 PENG, Junfeng; WANG, Xuguang; DENNINGER, Lisa: *Ranges of the least uncomfortable joint angles for assessing automotive driving posture*. In: *Applied Ergonomics* 61 (2016)
- Reed et al. 2020 REED, Matthew P.; MANARY, Miriam A.; FLANNAGAN, Carol A. C.; SCHNEIDER, Lawrence W.: *A statistical method for predicting automobile driving posture*. In: *Human Factors* 44 (2002), Nr. 4, S. 557–568
- Rigel 2005 RIGEL, Stefan: *Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen Pkw*. München, Technische Universität München, 2005
- Robert et al. 2014 ROBERT, Thomas; CAUSSE, Julien; DENNINGER, Lisa; WANG, Xuguang: *A 3D analysis of the joint torques developed during driver's Ingress-Egress motion*. In: *Ergonomics* 57 (2014), S. 1–13
- Rockenfeller and Günther 2018 ROCKENFELLER, Robert; GÜNTHER, Michael: *Inter-filament spacing mediates calcium binding to troponin: A simple geometric-mechanistic model explains the shift of force-length maxima with muscle activation*. In: *Journal of Theoretical Biology* 454 (2018), S. 240–252
- Schmitt et al. 2019 SCHMITT, Syn; GÜNTHER, Michael; HAEUFLE, Daniel F. B.: *The dynamics of the skeletal muscle: A systems biophysics perspective on muscle modeling with the focus on Hill-type muscle models*. In: *GAMM-Mitteilungen* 42 (2019), Nr. 3
- Stollenmaier et al. 2020b STOLLENMAIER, Katrin; ILG, Winfried; HAEUFLE, Daniel F. B.: *Predicting Perturbed Human Arm Movements in a Neuro-Musculoskeletal Model to Investigate the Muscular Force Response*. In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020b)
- Stollenmaier et al. 2020a STOLLENMAIER, Katrin; ILG, Winfried; HAEUFLE, Daniel F. B.: *Supplementary Material to „Predicting Perturbed Human Arm Movements in a Neuro-Musculoskeletal Model to Investigate the Muscular Force Response“*, In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020a)
- Vicon 2018 VICON MOTION SYSTEMS LIMITED: *Plug-in Gait Reference Guide* (2018)
- Walter et al. 2021 WALTER, Johannes R.; GÜNTHER, Michael; HAEUFLE, Daniel F. B.; SCHMITT, Syn: *A geometry- and muscle-based control architecture for synthesising biological movement*. In: *Biological Cybernetics* 115 (2021), Nr. 1, S. 7–37
- Wang et al. 2006 WANG, Xuguang; CHEVALOT, Nicolas; MONNIER, Gilles; TRASBOT, Jules: *From Motion Capture to Motion Simulation: An In-vehicle Reach Motion Database for Car Design* (SAE Technical Paper Nr. 2006-01–2362). Warrendale, PA: SAE International, 2006
- Zacher and Bubb 2004 ZACHER, Iris; BUBB, Heiner: *Strength Based Discomfort Model of Posture and Movement*. In: *Conference: Digital Human Modeling for Design and Engineering Symposium*, 2004

Methodischer Ansatz zur Analyse haptischer Bedienelemente im Kraftfahrzeug

Methodical approach to the analysis of haptic control elements in cars

Michael Tondera¹, Florian Reichelt², Markus Schmid², Thomas Maier²

¹Mercedes-Benz AG, Deutschland
michael.tondera@daimler.com

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Forschungs- und Lehrgebiet
Technisches Design
sekretariat@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch):

Das Human-Machine-Interface (HMI) im Pkw unterliegt einem stetigen Wandel. Als ein wesentlicher Trend kann die Zunahme von virtuellen Bedienmöglichkeiten beobachtet werden, wie beispielsweise beim Einsatz von Touchscreens. Handbetätigte Bedienelemente gelten aufgrund diverser Rückkoppelungsfunktionen als präzise und zuverlässig. Doch auch das reale HMI unterliegt diesem Wandel, insbesondere durch den steigenden Automatisierungsgrad. Neben der funktional-ergonomischen Betrachtung, ist speziell im Pkw-Innenraum die Komfortoptimierung und der Eindruck von Wertigkeit mit Blick auf die Nutzerzufriedenheit bedeutsam. Ziel dieses Beitrags ist neben der allgemeinen Darlegung des Stands der Technik und Forschung haptischer Bedienelemente die Analyse unterschiedlicher Modelle von Komfort und kundenrelevanter Wertigkeit. Darauf basierend wird ein methodischer Ansatz präsentiert, der v.a. die ergonomischen Vorteile handbetätigter Bedienelemente analysiert und somit eine nutzerzentrierte Entwicklung haptischer Bedienelemente ermöglicht. Darauf aufbauend werden Vorschläge für die konkrete Durchführung solcher Analysen aufgezeigt.

Keywords (deutsch):

Interface, Fahrzeug, Haptik, Komfort, Wertigkeit

Abstract (english): The human-machine interface (HMI) in passenger cars is subject to constant change. The increase in virtual operating options such as the use of touchscreens, can be seen as a major trend. Due to their specific haptic feedback, manually operated controls have proven to be safe and precise while driving. However, the real HMI is also subject to these change constraints, especially in context of an increase in automation. In addition to the functional-ergonomic investigation, a design for comfort and perceived quality with regard to user satisfaction is especially important within the passenger car interior. The aim of this paper is to present the current state of research of haptic control elements and to analyze different models of comfort and customer-relevant value perception. Based on these considerations, a methodical approach is introduced, which analyzes the ergonomic benefits of manually operated controls and thus enables a user-centered development of haptic controls. Based on this, suggestions for the implementation of such analyses as well as concrete ideas for experimental setups are presented.

Keywords (english):

Interface, passenger car, haptic, comfort, perceived quality

1 Ausgangssituation und Motivation

1.1 Vermeintliche Obsoleszenz realer Interfaceelemente

Im Fahrzeuginnenraum des Premium-Segments setzen Hersteller bereits seit längerer Zeit auf die Kombination aus virtuellem Display und Dreh-Drück-Schiebe-Steller zur Bedienung des Infotainment-Systems. Parallel dazu nimmt der Einsatz großer, berührungsempfindlicher Bildschirme zur zentralen Anzeige und Bedienung zu. In diesem Kontext werden aber auch Conversational User-Interfaces, Ultraschall oder auch Blick- und Gestensteuerungen geprüft oder bereits serienreif angeboten. Die Umsetzung einer Gestensteuerung im Pkw präsentierte BMW 2015 im 7er-Modell. Definierte Funktionen können mit spezifischen Gesten gesteuert werden, wie etwa das Regulieren der Lautstärke per Wischen oder Zeigen im Bereich der Mittelkonsole (Stecher 2016). Das redundante Bedienkonzept muss vom Nutzer zunächst aktiv erlernt werden. Der ergonomische Mehrwert ist daher umstritten (Bubb et al. 2015, S. 291). Zu einer Verbesserung der Gestensteuerung könnte der Einsatz von Ultraschall beitragen, der an der Hand des Nutzers eine freiprogrammierbare haptische Rückmeldung erzeugt (Ultraleap 2020). Der Einsatz von Ultraschall-Vibration wird auch bei Touchscreens geprüft. Dabei kann die Reibung zwischen Finger und Bildschirmoberfläche gezielt manipuliert werden (Hap2U 2020). Dies soll und könnte den visuellen Wahrnehmungskanal bei der Fahrzeugführung entlasten. Weitere denkbare Mensch-Maschine-Schnittstellen im Pkw bietet die physiologische Überwachung des Nutzers wie beispielsweise bei Wearables. Die Auswertung der Gesundheitsdaten könnte zu einer automatisierten, optimierten Klimakomfortregelung oder zur Vermeidung einer anbahnenden Kinetose beitragen. Studien bezüglich der Nutzerakzeptanz werden hierzu seitens der Automobilhersteller erforderlich sein. Auch ein neuronales Interface und damit die gedankliche Eingabe ist bereits realisierbar. Mittels EEG-Signal wird diejenige Gehirnaktivität erkannt, die der Vorstellung „nach links“ oder „nach rechts“ entspricht, um damit ein eindimensionales Bedienelement zu steuern (Baumann und Lanz 1998, S. 71).

Die aktuellen Entwicklungen zu Fahrerassistenzsystemen und automatisiertem Fahren werden auf die Gestaltung des Pkw-Innenraums zweifelslos Einfluss nehmen. Bei Konzeptstudien zukünftiger Passagierkabinen vollautonomer Fahrzeuge ist teils ein Verzicht auf jegliche physischen Stellteile zu beobachten. Der Verzicht von realen Bedienelementen sollte jedoch nicht zu voreilig beschlossen werden. So sorgte ein Urteil des Karlsruher Oberlandesgericht vom März 2020 für Aufsehen, das den Touchscreen eines Teslafahrers als elektronisches Gerät einstufte (Berger und Beste 2020). Dessen Benutzung ist nach StVO §23 Abs. 1a beim Führen eines Fahrzeuges verboten. Der Fahrer war von der Fahrbahn abgekommen, als er bei einsetzendem Starkregen versuchte, die Geschwindigkeit des Scheibenwischers auf dem Bildschirm in einem Untermenü anzupassen. Um die Bandbreite virtueller und realer Human-Machine-Interfaces (HMI) von aktuellen auf dem Markt befindlichen Fahrzeugmodellen abzubilden, werden in Bild 1 die Cockpits des Suzuki Jimny (2018) sowie des Tesla Model Y (2019) exemplarisch gegenübergestellt. Es stellt sich die Frage nach dem richtigen Verhältnis, im Sinne der nutzergerechten Gestaltung, an realen und virtuellen Interfaceelementen.



Bild 1: Das Kontinuum aktueller PKW Interfaces

Es gilt zu prüfen, ob ein minimalistischer, aufgeräumt wirkender Fahrzeuginnenraum, der dem Nutzer mit Blick auf die Reduzierung kognitiver Belastung den Sinneskanal der Haptik entzieht, eine hohe Qualität an ergonomischer Auslegung bieten kann. Womöglich erweist sich hier der Kompromiss, also ein hybrides Interface, dessen Anteile und Gestaltung virtueller und realer Elemente zu erforschen sind, als ein geeigneter Lösungsansatz.

1.2 Komfort und Wertigkeit als relevante Gestaltungsansätze im Pkw

Um künftig Bedienelemente im Innenraum den erforderlichen wahrnehmungsbasierten Nutzeranalysen zu unterziehen, wird nachfolgend ein Konzeptbaukasten entwickelt, der relevante Untersuchungsgegenstände auflistet und Möglichkeiten zur Operationalisierung vorschlägt. Dabei ist eine Vorgehensweise zu erarbeiten, mit der Realfahrzeuge oder zumindest ganze Instrumententafeln in Sitzkisten mittels Probandenversuchen erprobt werden. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit werden Ideen und konkrete Umsetzungen von Versuchsaufbauten gezeigt. Für ein umfassendes Verständnis von Bedienabläufen im Fahrzeugcockpit soll neben der Selbstauskunft der Teilnehmer per Fragebogen, auch deren Verhalten systematisch erfasst werden. Zusätzlich sollen anschließend die physikalische Akustik und die aufzubringenden Bedienkräfte vermessen werden, um subjektive und objektive Ergebnisse in Beziehung zu setzen. Neben der Untersuchung funktional-ergonomischer Aspekte steht insbesondere die Komfortoptimierung dabei als relevanter Gestaltungsansatz im Fokus. Hinsichtlich der Nutzerzufriedenheit sind hier bedeutende Vorteile zu erwarten. Aber auch im zunehmenden globalen Wettbewerb der Automobilhersteller im Premiumsegment gewinnt Komfort bzw. Wertigkeit an Bedeutung. Bubb et al. (2015, S. 285) geben zu bedenken, dass Haptik nicht nur als Rückmeldung im Sinne eines multimodalen Bedienkonzepts dient, sondern auch erheblichen Einfluss auf die wahrgenommene Qualität des Fahrzeugs besitzt. Sie fördere somit wesentlich die Akzeptanz der Betätigung und damit das Komfortempfinden. Nach Desmet und Hekkert (2007) ist der haptische Eindruck relevant für die ästhetische Evaluation von Konsum- und Designobjekten. Ein günstig ausgelegtes haptisches Design könne nach Grunwald (2017, S. 221) höhere Nutzerzufriedenheit, als auch höhere Kaufbereitschaft zur Folge haben. Neben der Verstärkung des Wertigkeitserlebens haben Hersteller ein ausgeprägtes Interesse an Wiedererkennung, also einen möglichst einheitlichen und markentypischen Eindruck des Bedienkonzepts. Folglich ist auch die Umsetzung einer einheitlichen Bedienphilosophie sowie die eindeutige Markenzuordnung ein relevanter Untersuchungsgegenstand.

1.3 Lösungsansatz

Nach Erläuterung der Ausgangssituation sowie der Motivation des Vorhabens in Kapitel 1, folgt die Beschreibung der Bedienelemente als mechanische Vorrichtung zum Bedienen von Maschinen im Allgemeinen. Anschließend wird exemplarisch ein Fahrzeugcockpit gezeigt (vgl. Bild 3), anhand dessen ausgewählte Schalter und Bedienfelder genannt werden. Darauf folgt in Kapitel 3 die Darstellung des Stands der Forschung zu diversen Modellen des Komforts und der Wertigkeit und Wertanmutung. Dies wird anschließend zu Untersuchungen in Beziehung gesetzt, die sich explizit mit der Variation technischer Parameter und deren Einfluss auf die wahrgenommene Wertigkeit von Bedienelementen befassen. Mit Hilfe der recherchierten Inhalte aus Kapitel 2 und 3 soll in Kapitel 4 ein methodischer Ansatz aufgezeigt werden, mit dem vergleichbare Nutzeranalysen im Pkw umzusetzen sind. Bild 2 zeigt den Aufbau des Beitrags in der Übersicht.

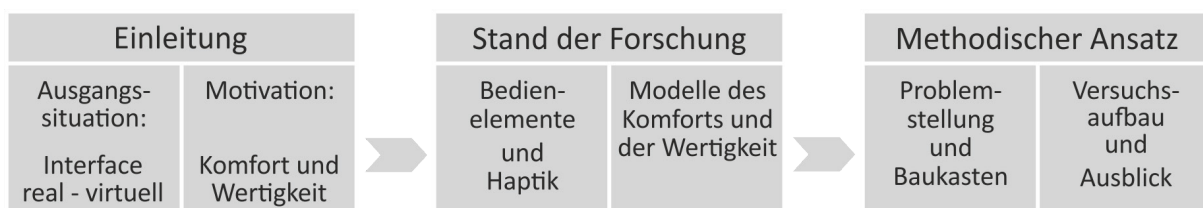


Bild 2: Aufbau des Beitrags

2 Haptische Bedienelemente im Fahrzeugcockpit eines Pkw

2.1 Beschreibung und Abgrenzung von Bedienelementen

Nach Zeilinger (2005, S. 7) bezeichnet der Begriff *Bedienelement* das Medium der manuellen Informationseingabe. Rühmann (1981, S. 362) gibt für *Bedienelement* an, dass „alle technischen Einrichtungen der Eingangsseite der Maschine verstanden werden, die durch physikalischen Kontakt mit der Körperoberfläche aktiviert werden“. Weitere Bezeichnungen können Stellteil, Bedienteil, Betätigungsteil oder Steuerarmatur sein (Zeilinger 2005, S. 7). Nach Muntzinger (1986, S. 1) sind Stellteile „Schnittstellen im Mensch-Maschine-System (MMS), über die der Mensch motorische Information an das Maschine-System überträgt zur Durchführung von Steuer- und Regelaufgaben“.

Differenziert werden können Bedienelemente einerseits hinsichtlich ihrer Bewegungsmerkmale. Im Wesentlichen sind translatorische und rotatorische Stellbewegungen zu unterscheiden (Götz 2007, S. 21). Nach Götz (2007) erfolgt hierbei die Zuordnung nach der Handbewegung, weshalb ein Kippschalter, obschon um eine Drehachse bewegt, per Translationsbewegung der Hand betätigt wird. In Ergänzung dazu nennt Glohr (2018, S. 19) die quasi-translatorische Bewegung, bei der die Kraft geradlinig ausgeführt wird und infolge dessen das Bedienelement um eine feste Achse rotiert. Als Beispiel für die Quasitranslationsbewegung soll der Lenkstockhebel (vgl. Bild 3) erwähnt werden, der zur Steuerung der Funktion Blinken radial am Mantelrohr zu rotieren ist, vom Nutzer jedoch mit einer Handbewegung in Z-Richtung betätigt wird.

Eine weitere Kategorisierung von Bedienelementen kann anhand der Dimensionalität erfolgen, welche die bauartbedingten Freiheitsgrade beschreibt. Eindimensionale Bedienelemente, beispielsweise Taster oder Drehschalter, werden in nur einem Freiheitsgrad bewegt und bewirken die Änderung einer Funktion. Ein zweidimensionales Bedienelement ist ein Steuerknüppel oder der Gangwahlschalter aufgrund seiner Longitudinal- als auch Transversalbewegung. In diesem Zusammenhang ist die ergonomische Problematik zu bedenken, wonach die zweidimensionale Aufgabe der Fahrzeugführung mit bis zu fünf Stellteilen zu bewältigen ist und folglich die Dimensionalität der Aufgabe mit der der Bedienung nicht übereinstimmt. (Bubb et al. 2015, S. 292)

Die Eingabeform kann diskret oder kontinuierlich erfolgen. Der diskrete Verlauf eines Drehstellers ist bedingt durch die endliche Anzahl exakter Stellungen bzw. Rastungen. Der Drehregler zur Steuerung der Klimatemperatur ist ein Beispiel für eine kontinuierliche Eingabeform, findet aber in aktuellen Baureihen nur noch wenig Einsatz. Dieser kann in unendlich vielen Stellungen bewegt werden, jedoch wird bedingt durch die fehlenden Rastungen kein haptisches Feedback erzeugt.

Bullinger (1994, S. 321) unterscheidet für die Betätigung mit der Hand oder den Fingern die Greifartgruppen Kontakt-, Zufassungs- und Umfassungsgriff. Für die Durchführung der primären Fahraufgabe (Bubb et al. 2015, S. 20) wird das Lenkrad mit dem Umfassungsgriff bedient, da hier relativ hohe Drehmomente aufgebracht werden müssen. Sekundäre und tertiäre Fahraufgaben werden in der Regel mittels Kontakt- und Umfassungsgriff bedient. Eine weitere Kategorisierung gemäß den Extremitäten kann nach Hand- und Fuß-Stellteilen erfolgen (Bubb et al. 2015, S. 292).

Hinsichtlich ihrer technischen Gestaltung lassen sich Bedienelemente in Schalter, Taster und Steller einteilen. Taster sind monostabil und gehen nach einer translatorischen Verschiebung bis an einen Anschlag in die Ausgangsposition zurück. Der Schalter hat demgegenüber mindestens zwei einrastende, also diskrete, Stellungen. Mit einem Steller wird die kontinuierliche Einstellung ermöglicht, wenngleich im Pkw zur besseren Differenzierung überwiegend diskrete Eingabeformen verwendet werden. (Zeilinger 2005, S. 9)

Bild 3 zeigt das Fahrzeugcockpit einer Mercedes-Benz E-Klasse. Weitere Unterscheidungen können in mechanische und mechatronische Bedienelemente getroffen werden. Erkennbar wird auch die Gruppierung von Funktionen sowie deren Anordnung im Cockpit, wie es dem Konzept der Selbsterklärungsfähigkeit entspricht (Müller 2004, S. 67).

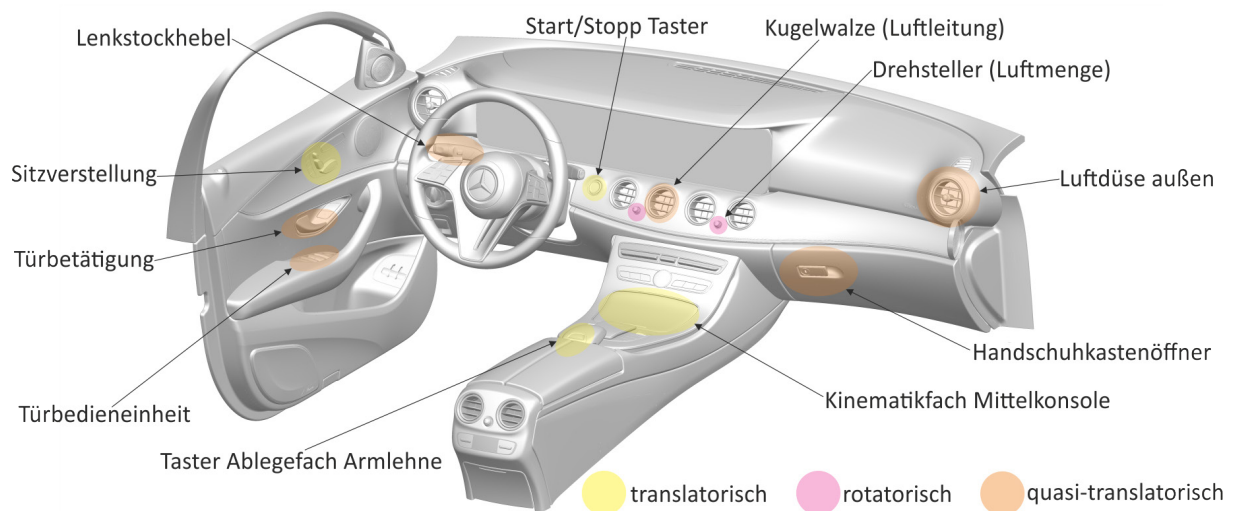


Bild 3: Cockpit einer Mercedes-Benz E-Klasse, Baureihe 213, mit ausgewählten Schaltern und Bedienelementen

2.2 Haptische Rückkopplung bei handbetätigten Bedienelementen im Pkw

Die Eingabe mittels Bedienelement erfordert eine aktive und gezielte Bewegung des muskulären Bewegungsapparats, dies gilt auch für Gesten- und Sprachsteuerung. Zugleich überträgt ein handbetätigtes Stellteil die zur Aufgabenerfüllung notwendige haptische Information auf den Menschen (Muntzinger 1986, S. 1). Dies kann zum einem die Lage- bzw. Positionsänderung des Stellteils sein, aber auch die Informationsweitergabe mittels sogenannter haptische Anzeiger (Bubb et al. 2015, S. 269). Haptische Anzeigen können zum einem die Oberflächenhaptik sein, zum anderem die Bedien- oder Betätigungshaptik (Bubb et al. 2015, S. 285).

Der haptische Eindruck von Oberflächen lässt sich nach Tietz (2001, S. 183) in der subjektiven Bewertung durch folgende Empfindungen beschreiben: das Weichheitsgefühl, die Oberflächenstabilität, das Tast- bzw. Streichgefühl und das Temperaturempfinden. Eine messbare Oberflächenbeschreibung mit Blick auf die technische Umsetzung liefern die Parameter Anfangssteifigkeit und Rückstellverhalten über den Kraft-Weg-Verlauf bei Belastungs- und Entlastungsversuchen (Tietz 2001, S. 184). Neben der Wärmeableitung an der Oberfläche sind weitere Parameter die Rauigkeit der Oberflächenstruktur sowie die Reibkräfte zwischen der Oberfläche und der Haut (Tietz 2001, S. 184). Im Zusammenhang mit Oberflächen ist insbesondere im Premiumsegment die Verwendung von hochwertigen Materialien von Bedeutung (Esch 2013, S. 115). Ein hochwertiges Material zeichnet sich durch Langlebigkeit, geringe Neigung zu Gebrauchsspuren sowie Seltenheit aus (Grunwald 2017, S. 223). Zugleich lassen sich durch zunehmende Möglichkeiten in der Oberflächenbearbeitung aus dem gleichen Grundmaterial eine Vielzahl an Oberflächenvarianten gestalten (Esch 2013, S. 98). Eine wichtige ergonomische Gestaltungsmaxime ist die Formkodierung von Bedienelementen, wonach neben der visuellen auch die taktilen Merkmale einen wichtigen Hinweis auf die Betätigungsfunktion vermittelt (Götz 2007, S. 11). Als Beispiel für die Erzeugung hochwertiger Oberflächenmerkmale soll die dekorative Glanzverchromung von Kunststoffteilen mit galvanischem Beschichtungsverfahren herangezogen werden. Eine solche glänzende oder seidenmatten Oberfläche gilt als sehr hochwertig und ist mittels Lackierung zumeist nicht zu erreichen. In jedem Fall muss laut Bubb et al. (2015, S. 285) für eine positive Beurteilung der optische Eindruck mit der Berührungshaptik der Oberfläche übereinstimmen.

Die Bedien- und Betätigungshaptik bei Druckschaltern und Tastern ist im Wesentlichen durch den Kraft-Weg-Verlauf geprägt. Je größer dabei die Federvorspannung, auch Anfangswiderstand genannt, ausfällt, desto tiefer wird das Eindringen wahrgenommen (Kosaka und Watanabe 1996). Ein Leerhub vor dem eigentlichen Kraftanstieg der Federvorspannung wird eher negativ bewertet (Bubb et al. 2015, S. 288). Bei Drehschaltern ist dies entsprechend der Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf, der folglich auch das maximale Drehmoment und die Anzahl der Rastpositionen enthält (Reisinger 2009, S. 31–32).

Weitere Einflüsse auf das haptische Feedback bei Drehschaltern wie etwa Massenträgheit, Dämpfung und Reibungshysterese wurde von Kühner (2013) untersucht. Aber auch die Verriegelung oder Arretierung hat einen Einfluss auf die Betätigungshaptik. Als Anwendungsbeispiel im Pkw kann hier das Öffnen bzw. Entriegeln des Handschuhkastens mittels Handschuhkastenöffner genannt werden, der dem Funktionsprinzip nach eine Wippe auf Zug ist (vgl. Bild 3). An diesem Beispiel wird deutlich, dass auch das Wirkteil, auf das mit Hilfe des Stellteils zum Zweck der Aufgabenerfüllung eingewirkt wird, eine haptische Rückkopplung verursachen kann. Mit Blick auf die wahrgenommene Wertigkeit haptischer Bedienelemente hat auch die akustische Wahrnehmung bzw. deren Wechselwirkung mit der Betätigungshaptik einen Einfluss (vgl. Glohr 2018; Anguelov 2009). Die Untersuchungen von Anguelov (2009) haben ergeben, dass die Tonhöhe als relevanter psychoakustischer Parameter zur subjektiven Beschreibung von Betätigungsgeräuschen identifiziert worden ist.

3 Annäherung an Modelle des Komforts und der Wertigkeit

3.1 Zum Komfort

In der Literatur lassen sich unterschiedliche Komfortbegriffe und -modelle finden. Weiterhin findet auch der Begriff Diskomfort Anwendung. Eine Übersicht und Einordnung des Konzepts Komfort und der Komfortempfindung soll nachfolgend gegeben werden. Der Duden (2020b) beschreibt die Bedeutung des Begriffs Komfort mit „auf technisch ausgereifte Einrichtungen beruhende Bequemlichkeit, Annehmlichkeiten; einen bestimmten Luxus bietende Ausstattung“.

In der wissenschaftlichen Betrachtung gelten nach Mandel (2019) bezüglich des Komfortbegriffs die drei postulierten Annahmen von Looze et al. (2003) als anerkannter Wissenstand. Demnach sei Komfort (1) ein subjektiv definiertes und persönliches Konstrukt, das (2) von einer Vielzahl an Faktoren, wie physischen, physiologischen und psychologischen beeinflusst wird und als (3) Reaktion auf die Umwelt zu verstehen ist. Weite Verbreitung findet das Komfortmodell von Zhang et al. (1996). Diese untersuchten welche Assoziationen und Faktoren den Begriffen Komfort und Diskomfort im Kontext des Sitzens zugeordnet werden können. Dazu wurden 104 Büroangestellte der State University of New York in Buffalo befragt. Hierbei wurde jeweils die Hälfte der Teilnehmer nach Deskriptoren für Komfort, und unabhängig dazu die andere Hälfte nach Deskriptoren für Diskomfort gebeten. Dadurch sollte verhindert werden, dass Komfort und Diskomfort als zwei gegenteilige Pole dargestellt würden. Es ließen sich 43 Beschreibungen identifizieren, die im nächsten Schritt in einem vollständigen Paarvergleich einer Ähnlichkeitsbewertung unterzogen wurden. Dadurch wurde die Durchführung einer Faktorenanalyse möglich, die ergab, dass zwei Faktoren etwa 50% der Varianz sowie 75% der Kommunalität erklären können. Der erste Faktor enthält Deskriptoren bezüglich Komfort die unter das Cluster Wohlbefinden, Entspannung und Linderung fallen. Zusätzlich weisen Deskriptoren die der Ästhetik zugeordnet werden können, ebenso hohe Ladungen auf den Faktor Komfort auf. Der zweite Faktor, Diskomfort, enthielt überwiegend Beschreibungen aus den Clustern Schmerz, Müdigkeit und Biomechanik. Bubb (2003, S. 6) hielt hierfür zusammenfassend fest, dass Komfort und Diskomfort zwei zueinander orthogonale Größen sind. Diskomfort sind demnach Aspekte des Erleidens, die mittels psychophysischer Methoden objektivierbar sind (Bubb et al. 2015, S. 148). Komfort hingegen, beinhaltet Aspekte des Gefallens und der Ästhetik (Bubb 2003, S. 6). Bubb (2003, S. 6) gibt weiterhin an, dass auch der Bedienkomfort unter dem Komfort-/Diskomfort-Modell zu verstehen ist und im Zusammenhang einer zunehmenden Perfektionierung von Produkten an Bedeutung gewinnt. Um verschiedene Zusammenhänge und Abstufungen des Komfortempfindens abzubilden, werden unter anderem sogenannte Komfortpyramiden verwendet.

In Anlehnung an die Bedürfnispyramide von Maslow (1943) zeigt die Komfortpyramide von Krist (1993) auf, welche Aspekte für den Nutzer relevant sind und mit welcher Priorität (vgl. Bild 4). Der unterste Aspekt ist hierbei stets von größter Wichtigkeit. Erst wenn dieser zufriedenstellend erfüllt ist, und sei dies nur in der Wahrnehmung des Nutzers, gewinnt die nächst höhere Ebene an Bedeutung und rückt in den Fokus. Die Fortschritte im Automobilbau haben zur Folge, dass selbst in der Spitze der Pyramide,

also bezüglich Anthropometrie, die Ansprüche der Nutzer an den Fahrerplatz erfüllt werden. Über die reine Funktionalität und Mindestanforderungen hinaus gebe es das Bedürfnis nach einer Produktgestaltung, die den Eindruck von Behaglichkeit oder Komfort erzeugt, wie in der Pyramide von Bubb (1995) dargestellt. Darüber hinaus könne der Komfort noch weiter gesteigert werden, wenn zusätzlich der Eindruck von Luxus beim Nutzer entsteht. Das Fernbleiben eines Eindruckes von Luxus führt nach diesem Modell folglich zu einer Diskomfortzunahme. Glohr (2018) spricht hierbei von Wertigkeit, unter deren Bedingung es zur Erzeugung einer Markenidentität im System der Bedienelemente kommen kann (vgl. Bild 4). Funktionalität und Rückmeldung werden auch in diesem Modell als wichtige Mindestanforderungen aufgezählt. Der Aspekt der Rückmeldung beschreibt die Zeitspanne zwischen der Eingangsinformation am Stellteil und der Reaktion des Systems und hat als Mindestanforderung eine besondere Relevanz. Diese Zeitspanne dürfe übrigens 200 ms nicht überschreiten, da es sonst zur Desorientiertheit des Nutzers kommt, wenn der Bezug zur eigenen Handlung verloren geht (Bubb et al. 2015, S. 296).

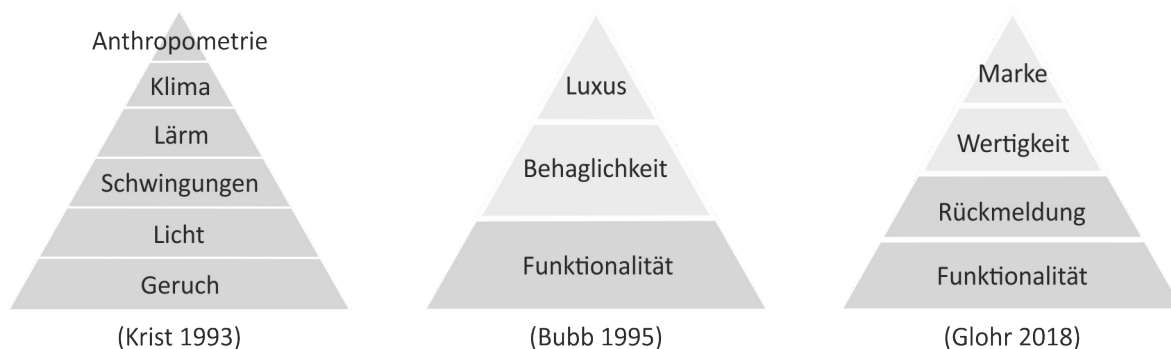


Bild 4: Unterschiedliche Komfortmodelle im Vergleich. Mit hellerer Graustufe markiert sind diejenigen Aspekte, die über die Ergonomie hinausgehen

3.2 Zur Wertigkeit und Wertanmutung

Anguelov (2009) untersuchte den Zusammenhang zwischen den technischen Eigenschaften eines Bedienelementes und dem subjektiv erlebbaren Wertigkeitserlebnis bei seiner Betätigung. Für die Erfassung der Urteile der Probanden bezüglich der Wertigkeit von Tastern und Drehschaltern setzte der Autor eine bipolare und verbale 7-stufige Likert-Skala mit den Polen „sehr minderwertig“ bis „sehr hochwertig“ ein (Anguelov 2009, S. 76–77). Es gelang Wertebereiche für Messgrößen wie Raddurchmesser, Rastpositionsanzahl und Drehmomentverlauf zu ermitteln, die sich günstig auf die haptische Wertanmutung bei Drehschaltern auswirken. Mit der Parametrisierung von handbetätigten Bedienelementen beschäftigen sich eine Vielzahl weiterer Autoren (vgl. Hampel 2011; Glohr 2018; Winterholler 2019; Reisinger 2009; Kühner 2013; Paulig et al. 2011; Spingler 2008).

Paulig et al. (2011) verfolgte einen methodischen Ansatz mit Hilfe eines Drehstellersimulators und einem vollständigen Paarvergleich. Dabei wurden zunächst drei technische Faktoren mit je drei Ausprägungen parametrisiert und anschließend systematisch variiert. Der Einfluss dieser Variation sollte auf das subjektive Bedingefühl ermittelt werden. Mit geeigneter statistischer Auswertung wie einer Conjoint-Analyse gelang es, aus den resultierten Präferenzdaten Ergebnisse zu ermitteln. Diese beschreiben, welcher Faktor für die Präferenzurteile am bedeutendsten ist, sowie welche Ausprägung innerhalb des Faktors sich am günstigsten auf das Bedingefühl auswirkt.

Glohr (2018) konnte zeigen, dass es bei der Beschreibung und Bewertung der Wertigkeit von Bedienelementen keinen Unterschied machte, ob den Probanden die Marke des Automobilherstellers bekannt ist oder nicht. Der kraftbezogene Parameter der Drehmomentamplitude sei laut Autor ein geeigneter Differenzierungsansatz bei rotatorische Bedienelementen zur Erzeugung einer haptischen Markenidentität (Glohr 2018, S. 140). Schmid (2006) postuliert in diesem Zusammenhang den internen und externen Konsistenzfaktor, welche Angaben zur Bediensignatur und Markendifferenzierung

machen. Umgangssprachlich wird dabei oftmals bei Automobilhersteller von einer einheitlichen Bedienphilosophie gesprochen.

Was bei den vorangegangenen Autoren mit dem Begriff Wertigkeit beschrieben wurde, umschreibt Spingler (2008) als kundenrelevante Qualitätsanmutung oder *Perceived Quality* und betont deren Bedeutung für den Produktentstehungsprozess. *Perceived Quality* soll dabei nicht auf einen Faktor oder Parameter reduziert werden, sondern als Wechselwirkung verschiedener Aspekte und folglich laut Autor „ganzheitlich“ erfasst werden. Als relevante Anforderungen benennt der Autor für die visuelle Qualität bspw. Spaltmaße, Versatz, Glanzgrad, Farbe, Narbung und visuelle Harmonie. Die haptische Qualität untergliedert sich in Kraft-Weg- sowie Drehmoment-Drehwinkel-Verlauf, Reibung, Führungsspiel, Schalter Harmonie und Nutzstereotypen. Hinsichtlich der taktilen Qualität werden unter anderem Elastizität, Haftfähigkeit, Komponentensteifigkeit, Reibung, Rauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit angegeben. (Spingler 2008)

Perceived Quality					
Technische Qualität				Design	
Visuelle Qualität	Haptische Qualität	Klangqualität	Geruch	Interior	Exterior

Bild 5: Unterteilung der Perceived Quality nach Spingler (2008) sowie die Konzentration des Vorhabens

Der Begriff Wertanmutung bedarf weiterer Recherche und ist bisher nur unzureichend definiert. Auch was die Wortherkunft betrifft, scheint diese bisher nicht abschließend geklärt (Anguelov 2009, S. 8). Kluge Etymologisches Wörterbuch gibt an, dass Anmut vor dem 14. Jahrhundert aus dem mittelhochdeutschen *anemuot* entstammt, mit der Bedeutung „was in dem Sinn (Mut) kommt, Verlangen“ sowie aus *anmuoten* „begehren“ (Kluge und Seebold 1995). Der Duden (2020a) beschreibt die Bedeutungen als „gefühlsmäßiges, unbestimmtes Eindruckserlebnis“ und „Zumutung“. Im Dorsch, Lexikon der Psychologie, wird Anmutung beschrieben als „die Weise, wie Wahrnehmung und Vorstellungen emotional beeindrucken, Gefühle auslösen“ (Dorsch 1982).

Wertanmutung könnte folglich ein erster unspezifischer und gefühlsmäßiger Eindruck als Reaktion auf die vermutete Wertigkeit des präsentierten Reizes, dem Produkt, sein. Dieser Eindruck ergibt sich aus der Sinneswahrnehmung, im Falle des Bedienablaufs visuell, haptisch und akustisch, und deren Bewertung, bedingt durch die Erfahrung und Erwartung des Nutzers. Für die Steuerung einer optimierten Wertigkeit und folglich der Beeinflussung der Wertanmutung als Erlebnis ist neben einem technischen Verständnis, insbesondere grundlegendes Verständnis von (1) psychophysischen Zusammenhängen wie Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen erforderlich. Darüber hinaus sollen (2) Nutzeranalysen kundenrelevante Anforderungen und Kriterien klären. Im gezielten (3) psychologischen Experiment sollen optimale Wertebereiche der relevanten Kriterien ermittelt werden, um anschließend die so gewonnenen Erkenntnisse in (4) Spezifikationen für die technische Gestaltung zu überführen.

4 Konzeptbaukasten für Nutzeranalysen des Fahrzeugcockpits in PKW

4.1 Untersuchungsgegenstände und Versuchsaufbau

Als eine Problemstellung innerhalb der Komfortforschung stellt sich heraus, dass oftmals eine Vielzahl an relevanten Faktoren unerfasst bleiben. Bedeutenden Einfluss auf das Erleben von (Dis-)Komfort haben bspw. die Umgebung und der Kontext, sowie die an den Probanden gestellte Aufgabe. Weiterhin sollte insbesondere das Nutzerverhalten aufgenommen werden, um Faktoren wie Haltung, Bewegung, Bediendauer und Störeinflüsse untersuchen zu können. Die Angabe dieser Faktoren ermöglichen eine differenziertere Bewertung und den Vergleich der Ergebnisse, was in Folge zu einem gesteigerten Erkenntnisgewinn führen könnte. (Smulders und Vink, 2021)

Die Inhalte aus der vorangegangenen Literaturrecherche geben Hinweise auf bisher ermittelte Aspekte zur Komfortoptimierung (vgl. Tabelle 1). Um dem ganzheitlichen Ansatz zur wahrnehmungsbasierten Nutzeranalyse von Realfahrzeugen nachzukommen, werden in der zweiten Spalte der Tabelle eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungsgegenstände genannt. Außerdem sind die untergliedernden Teilaspekte aufgelistet, die es konkret zu Untersuchen gilt. Zum Beispiel wird für das Verhalten unter anderem die Bediendauer und die Greifart gelistet, sowie die Möglichkeiten der Erfassung per Beobachtung oder Bild- und Videoaufnahmen.

Eine Gliederung innerhalb des Baukastens erfolgt nach dem UASW-System (Schmid 2003), welches auf einer Abstraktionsebene den Nutzer (U) im System aus Anzeiger (A), Stellteil (S) und Wirkteil (W) bzw. Wirkung einordnet.

Tabelle 1: Konzeptbaukasten für Nutzeranalysen des Fahrzeugcockpits im Pkw

UASW-System	Untersuchungsgegenstand	Teilaspekte	Operationalisierung
S, W	Bedienkräfte und -akustik	Kraft-Weg-Verlauf bzw. Drehmoment-Drehwinkel, Lautstärke, Tonhöhe, Schärfe	Messrobotiksysteme mit Sechschachs-Kraft-Moment-Sensor, Binaurales Kunstkopf-Messsystem (Anguelov 2009)
U, S	Verhalten	Bediendauer und -winkel, Schulterablösungen, Greifart, Blickbewegungen	Beobachtung, Eye-Tracker Bild- und Videoaufnahmen, Tracking und Bewegungsanalyse
U	Erfahrung und Präferenzen	Erfahrung Kindheit/Elternhaus Fahrzeugbesitz und -nutzung, Fahrleistung, Zeitgeist (Bubb 2003), automobiltechnische Kenntnisse	Abfrage, Demo- & psychografischer Fragebogen
U	Gebrauchstauglichkeit (engl. Usability)	ISO 9241-11:2019, Workload, Akzeptanz, Effektivität und Effizienz, Usability Aspekte nach Nielsen (1994)	Befragung, Interview, Thinking-Aloud, Expertenevaluation, Versuchsleiterbewertung, Fragebogen (SUS, TAM), Reaktionszeit, Bediendauer und -frequenz (Time-to-Complete), Anzahl (Fehl-)Bedienungen, Blickbewegung
U	Aspekte des Gefallen	User Experience, Komfort, Wertigkeit, Wertanmutung, Klang, Visuelle Qualität, Haptik, Taktilität (Spingler 2008)	Interview, Thinking-out-loud, Fragebogen (Likert-, Guttman-, Thurstone-Skalierung, UEQ, AttrakDiff), Paarvergleich, Unfolding-Analyse, Semantisches Differential, Expertenevaluation
S, W	Material	Gewicht, Massenträgheit, Wärmekapazität, Steifigkeit, Oberfläche	Klimaprüfung, Bewitterungsprüfung, statische Festigkeit
S	Konstruktion	Maße, Form, Spiel, Toleranz, Reibung, Dämpfung, Verriegelung, Eingabeform, Bewegungsart	+/- Toleranz, Versatz, Fugenplan, CAD-Daten, Störgeräuschanalyse, Belastungstest

Aufzubringende Kräfte, sowie die Bedien- und Betätigung an sich, sind maßgeblich von den anthropometrischen Größen des Nutzers abhängig und sollen folglich ebenfalls erhoben werden. Neben der Körpergröße sind dies auch Sitzhöhe und Sitztiefe. Weitere zu bestimmende Körpermaße sind Innenbein-, Rumpf-, Arm-, Oberarm-, Unterarm- und die Handlänge. Um der externen Validität, insbesondere den demografischen Gegebenheiten Sorge zu tragen, wird eine Stichprobengröße von

ausreichender Repräsentativität gewählt. Hierzu müssen systematisch auch ältere Teilnehmer akquiriert werden, denn so zeigt sich, dass bei privaten Neuwagenkäufen in Deutschland das Durchschnittsalter bei etwa 53 Jahren liegt (Statista 2018).

Für einen Versuchsaufbau mit vergleichbaren Bedingungen bei Nutzeranalysen mit Realfahrzeugen soll der Einsatz eines Zelts sorgen, da hierdurch äußere Einflüsse auf die Versuchsperson minimiert werden. Außerdem soll die Verhüllung des Exteriors und Neutralisierung von Bild- und Schriftzeichen angewendet werden (vgl. Bild 6). Der Einfluss der Marke sowie deren Erwartung seitens der Probanden sollen so kontrolliert werden. Die herstellerunabhängige Untersuchung von Fahrzeugen wird somit möglich sein. Für konstante Bedingungen hinsichtlich der Sicht- und Erkennbarkeit werden Leuchtmittel im Zelt sowie im Fahrzeuginnenraum eingesetzt. Für die Aufzeichnung des Verhaltens ist der Fahrzeuginnenraum mit Kameras ausgerüstet. Die Kameras sind an festgelegten Markierungen der Scheibe Fahrer, B-Säule Beifahrer und dem Dachhimmel montiert. Bei der Instruktion der Probanden werden zum einen *intuitive UseCases* betrachtet, bei denen nach Anweisung eine natürliche und nur einmal ausgeführte Bedienung auslöst wird. Zum anderen werden *gezielte UseCases* betrachtet, bei denen der Proband das Bedienelement frei und mehrfach betätigt.



Bild 6: Exmpl. Versuchsanordnung zur Durchführung von Nutzeranalysen unter quasi Laborbedingungen

4.2 Ausblick

Unter Zuhilfenahme des Konzeptbaukastens konnte eine Auswahl der zu untersuchenden Teilaspekte getroffen werden. Hinsichtlich der technischen Machbarkeit zeigte sich die Versuchsanordnung als realisierbar und erste Pre-Tests sind erfolgreich verlaufen. Bei der Durchführung des Versuchs muss eine Dauer von einer Stunde nicht überschritten werden. Die Nutzeranalysen zum Eindruck von Komfort und Wertigkeit können als integraler Teil der Entwicklung im Technischen Design verstanden werden. Künftig sollen auch hybride, adaptive Interfacesysteme am IKTD unter Zuhilfenahme des Baukastens analysiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse des Versuchsaufbaus sollten auch hilfreich sein, sofern im Zusammenhang des autonomen Fahrens nicht mehr der Fahrerarbeitsplatz, sondern Passagierplätze zu untersuchen sind.

Literatur

- | | |
|-----------------------|--|
| Anguelov 2009 | ANGUELOV, Nikolay: <i>Haptische und akustische Kenngrößen zur Objektivierung und Optimierung der Wertanmutung von Schaltern und Bedienfeldern für den Kfz-Innenraum</i> . TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2009. |
| Baumann und Lanz 1998 | BAUMANN, Konrad; LANZ, Herwig: <i>Mensch-Maschine-Schnittstellen elektronischer Geräte</i> . Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. |
| Berger und Beste 2020 | BERGER, Christoph; BESTE, Dieter: <i>Touchscreens werden als elektronische Geräte eingestuft</i> . https://bit.ly/38DOJ3z , 01.11.2020. |

- Bubb 2003 BUBB, Heiner: *Komfort und Diskomfort. Definition und Überblick*. In: *Ergonomie Aktuell* (2003), Nr. 4, S. 5-8.
- Bubb et al. 2015 Bubb, Heiner; Bengler, Klaus; Grünen, Rainer; Vollrath, Mark (Hrsg.): *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer, 2015.
- Bubb 1995 BUBB, Karl-Peter: *Komfort und Ergonomie in Kraftfahrzeugen*. Essen: Haus der Technik e.V., 1995.
- Bullinger 1994 BULLINGER, Hans-Jörg: *Ergonomie: Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1994.
- Desmet und Hekkert 2007 DESMET, Pieter; HEKKERT, Paul: *Framework of Product Experience*. In: *International Journal of Design 1* (2007), S. 57–66.
- Dorsch 1982 DORSCH, Friedrich: *Psychologisches Wörterbuch*. 10. Aufl. Bern: Huber, 1982.
- Duden 2020a DUDEN: *Anmutung*. <https://bit.ly/3pPBB1d>, 10.11.2020.
- Duden 2020b DUDEN: *Komfort*. <https://bit.ly/390xzx7>, 18.09.2020.
- ISO 9241-11 2019 ISO 9241-11 2019: Ergonomics of human-system interaction, Part: 11 Usability
- Esch 2013 ESCH, Franz-Rudolf: *Strategie und Technik des Automobilmarketing*. Wiesbaden: Springer, 2013.
- Glohr 2018 GLOHR, Tobias: *Untersuchungen zur markenspezifischen Betätigungshaptik und -akustik von Bedienelementen im Kraftfahrzeug*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2018.
- Götz 2007 GÖTZ, Matthias: *Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion*. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 2007.
- Grundwald 2017 GRUNDWALD, Martin: *Homo hapticus: Warum wir ohne Tastsinn nicht leben können*. München: Droemer, 2017.
- Hampel 2011 HAMPEL, Thomas: *Untersuchungen und Gestaltungshinweise für adaptive multifunktionale Stellteile mit aktiver haptischer Rückmeldung*. Universität Stuttgart, IKTD, Dissertation, 2011.
- Hap2u 2020 HAP2U: *Haptics Everywhere: A world of haptics*. <https://www.hap2u.net/>, 31.10.2020.
- Kluge und Seebold 1995 KLUGE, Friedrich; SEEBOLD, Elmar: *Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache*. 23. Aufl. Berlin: de Gruyter, 1995.
- Kosaka und Watanabe 1996 KOSAKA, Hiroaki; WATANABE, Kajiro: *Reaction Forces of Switches and Push Feeling*. In: *Automotive Design Advancements in Human Factors: Improving Drivers' Comfort and Performance*, SAE No. SP-1155 (1996), S. 169 – 174.
- Krist 1993 KRIST, Renate: *Modellierung des Sitzkomforts: Eine experimentelle Studie*. Katholische Universität Eichstätt, Dissertation, 1993.
- Kühner 2013 KÜHNER, Manuel: *Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen*. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 2013.
- Looze et al. 2003 LOOZE, Michiel P. de; KUIJT-EVERS, Lottie F. M.; VAN DIEEN, Jaap: *Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures*. In: *Ergonomics* 46 (2003), Nr. 10, S. 985–997.
- Mandel 2019 MANDEL, Roland: *Komfortmodell und Untersuchung zum Einfluss der Innenraumgeometrie auf die Wahrnehmung und Wirkung von Fahrzeugeigenschaften*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2019.

- Maslow 1943 MASLOW, A.: *A Theory of Human Motivation*. In: *Psychological Review* 1943 (1943), Nr. 50, S. 370–396.
- Müller 2004 MÜLLER, Matthias: *Evaluationswerkzeuge für Bedienkonzepte von Fahrzeug-Cockpits*. Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Dissertation, 2004.
- Muntzinger 1986 MUNTZINGER, Werner F.: *Ergonomische Gestaltung von Rotationsstellteilen für grob- und sensomotorische Tätigkeiten*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1986.
- Nielesn 1994 NIELSEN, Jakob: *Enhancing the explanatory power of usability heuristics*. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (1994), S. 152-158.
- Paulig et al. 2011 PAULIG, Jörn; SCHMIDT, Gerrit; LEMMER, Karsten: *Wertigkeit haptisch erleben*. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (2011), VDI-Berichte, Nr. 2134.
- Reisinger 2009 REISINGER, Jörg: *Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen*. TU München, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation, 2009.
- Rühmann 1981 RÜHMANN, Heinzpeter: *Schnittstellen im Mensch-Maschine-Systemen*. In: Schmidtke, Heinz (Hrsg.): *Lehrbuch der Ergonomie*. 2. Aufl. München, Wien: Hanser, 1981, S. 351–362.
- Schmid 2003 SCHMID, Markus: *Benutzergerechte Gestaltung mechanischer Anzeiger mit Drehrichtungsinkompatibilität zwischen Stell- und Wirkteil*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenkonstruktion, Dissertation, 2003
- Schmid 2006 SCHMID, Markus: *Neuer Bewertungsansatz für Fahrzeugcockpits*. In: Maier, Thomas (Hrsg.): *Festschrift : 70. Geburtstag von Prof. Hartmut Seeger und 40 Jahre Technisches Design*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktions-technik und Technisches Design, 2006, S. 95-105.
- Smulders und Vink 2021 SMULDERS, Maxim; VINK, Peter: Human behaviour should be recorded in (dis)comfort research. In: *Work*. (2021), Nr. 68, S. 289–294.
- Spingler 2008 SPINGLER, Mark R.: Die methodische Erfassung human wahrgenommener Qualitätsaspekte. In: *ATZ Automobiltech Zeitschrift* (2008), Nr. 2, S. 104–111.
- Statista 2020 STATISTA: *Durchschnittliches Alter von Neuwagenkäufern in Deutschland bis 2018*. <https://lmy.de/8bJgv>, 11.11.2020.
- Stecher 2016 STECHER, Michael (2016): *Gestensteuerung und ihr Nutzen im Nutzfahrzeug*. In: *Ergonomie Aktuell* (2016), S. 36–40.
- Tietz 2001 TIETZ, Werner: *Haptische Auslegung der Fahrzeuginnenausstattung bei AUDI*. In: Grunwald, Martin und Beyer, Lothar (Hrsg.): *Der bewegte Sinn*. Basel: Birkhäuser, 2001, S. 439-451.
- Ultraleap 2020 ULTRALEAP: *Digital worlds that feel human. World-leading hand tracking and haptics*. <https://www.ultraleap.com/>, 31.10.2020.
- Winterholler 2019 WINTERHOLLER, Johann: *Haptische Informationsübertragung von Drehmomentverläufen im Kontext einer Haupt- und Nebenaufgabe*. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Dissertation, 2019.
- Zeilingner 2005 ZEILINGNER, Simon (2005): *Aktive haptische Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen*. Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Dissertation, 2005.
- Zhang et al. 1996 ZHANG, Luian; HELANDER, Martin G.; DRURY, Colin G.: *Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting*. In: *Hum Factors* 38 (1996), S. 377–389.

Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern – die neue VDI 2424 - Richtlinie (deutsch)

Collaboration of engineers and industrial designers – the new VDI 2424 guideline (english)

Robert Watty¹, Thomas Maier², Gerhard Reichert³, Christian Zimmermann⁴

¹Technische Hochschule Ulm
Robert.Watty@thu.de

²Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design Stuttgart
Thomas.Maier@iktd.uni-stuttgart.de

³Hochschule für Gestaltung Schwäbisch Gmünd
Gerhard.Reichert@hfg-gmünd.de

⁴Ludwig-Maximilians-Universität München
modulor@gmx.net

Abstract (deutsch): Erfolgreiche Produkte sind heute zunehmend digitaler und komplexer und müssen sich in globalen Märkten von Konkurrenzprodukten erkennbar abheben. Damit steigt die Bedeutung interdisziplinärer Zusammenarbeit zur Gewährleistung der funktionalen Aspekte erheblich, andererseits stehen Nutzer und ihre Interaktion mit dem Produkt verstärkt im Mittelpunkt der Entwicklung. Letzteres ist Kernkompetenz der Industriedesigner, die neben einem attraktiven und erkennbaren Design auch für eine gute Bedienbarkeit sorgen. Die weitgehend überarbeitete VDI-Richtlinie 2424 "Industrial Design - User-Centered Design in the Product Development Process" rückt die intensive Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren aus unterschiedlichen Bereichen mit Industriedesignern in den Mittelpunkt stellt aktuelle Methoden, Werkzeuge und Prozesse zusammenfassend bereit. Ergänzt durch zahlreiche Praxisbeispiele bekommen so alle an der Produktentwicklung Beteiligten eine Handreichung für die Zusammenarbeit. Der Artikel gibt einen Überblick über die Rahmenbedingungen für die Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Designern und beschreibt die Vorteile, Ziele, Struktur und Inhalte der jetzt neuen VDI-2424-Richtlinie.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Produktentwicklung, Industriedesign, Entwicklungsprozess

Abstract (english): Successful products are increasingly digital and complex today and must significantly stand out from competing products in global markets. This increases the importance of interdisciplinary cooperation to ensure functional aspects, while on the other hand users and their interaction with the product are increasingly at the centre of product development.. The latter is the core competence of industrial designers, who, in addition to an attractive and recognizable design, also ensure good usability. The largely revised VDI guideline 2424 "Industrial Design - User-Centered Design in the Product Development Process" focuses on the intensive collaboration between engineers from different fields with industrial designers bringing up current methods, tools and processes. Numerous practical examples ensure that all those involved in product development receive an useful handout for cooperation. The article provides an overview of the boundary conditions for collaboration between engineers and designers and describes the benefits, objectives, structure and contents of the actual new VDI 2424 guideline.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Product development, industrial design, development process

1 Einleitung

Die meisten Produkte entstehen heute in interdisziplinärer Zusammenarbeit und erfolgreiche Produkte erfordern in allen Märkten neben funktionalen Aspekten insbesondere ansprechendes und wiedererkennbares Design und gute Bedienbarkeit. Industriedesign als schöpferische, nutzungsorientierte und integrative Gestaltung von Funktion und Form eines industriell hergestellten Produkts ist damit heute mehr als je zuvor zu einem maßgeblichen Faktor für die Qualität von Produkten, deren Wahrnehmbarkeit am Markt und damit auch für die Identität der Unternehmen und der Marken geworden.

Die Entwicklung solcher Produkte erfordert daher die intensive Zusammenarbeit von Ingenieuren unterschiedlicher Richtungen mit Industriedesignern und ein wechselseitiges Verständnis für Aufgaben und Tätigkeiten von Ingenieuren und Industriedesignern. In den 1980er Jahren wurde so auch eine VDI/VDE-Richtlinie 2424 «Industrial Design – Grundlagen, Begriffe, Wirkungsweise» zusammen mit dem VDE (Verband der Elektrotechnik) erstellt, um die Zusammenarbeit von Ingenieuren und Industrial Designern bei der Produktentwicklung zu unterstützen und verbessern. Diese Richtlinie wurde in den letzten Jahren überarbeitet, um die Erkenntnisse zu neuen Methoden, Werkzeugen und Prozessen der letzten 30 Jahre erweitert und befindet sich aktuell im „Gründruck“. Der Beitrag beschreibt zunächst einige Aspekte zur historischen Entwicklung der Tätigkeit von Ingenieuren und Designern sowie ihre heutzutage wieder stärker zusammenwachsenden Aufgaben im Rahmen der Produktentwicklung und die daraus resultierenden Anforderungen an die Zusammenarbeit. Danach werden die Zielsetzung, der Aufbau und die Inhalte der neuen Richtlinie VDI 2424 „Industriedesign“ beschrieben. Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse aus der Erarbeitung der Richtlinie zusammengefasst.

2 Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern

Die Tätigkeit von Ingenieuren und Industrie Designern hat historisch gesehen gemeinsame Wurzeln, deren Aufspaltung nach Schneider (2008) vor allem im Kontext der fortschreitenden Industrialisierung begann. Gingen vor über 200 Jahren zunächst die Technikwissenschaften aus den Handwerkskünsten hervor, so vereinte der Ingenieur bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts noch eine Vielzahl von heute differenzierten Berufen in sich, denn er war sowohl für funktionale und fertigungstechnische als auch optische und somit insbesondere auch ästhetische Merkmale des Produktes zuständig, wie Frick (1996) beschreibt.

Im Zuge der Industrialisierung seit dem späten 18. Jahrhundert entwickelte sich mit dem Beginn des bürgerlichen Zeitalters ein neuer Berufsstand. Die «mechanischen Künste» bestanden nach Selle (2007) zunächst noch in der unzertrennlichen Einheit von ästhetischer und technischer Kompetenz, gemäß des universellen Bildungsanspruches eines «Künstler-Ingenieurs». Erst der Übergang zur Massenproduktion und die Sicht von Individuen als Konsumenten führte zu einer Trennung primär technischer und primär ästhetischer Kompetenz, wie sie auch in der Differenzierung des Berufsbildes des Baumeisters hin zum Architekten und Bauingenieurs ablesbar wird.

Heute steht bei der Entwicklung neuer Produkte neben der Funktion der Mensch im Zentrum ihrer Gestaltung. Ingenieure unterschiedlicher Richtungen setzen gewünschte Funktionen um und integrieren sie aus technischer Sicht. Das Industriedesign ist dafür zuständig, dass Produkte von den Nutzern bestmöglich genutzt werden können und ihre vorgesehene Wirkung entfalten.

Damit werden neben technologischen auch psychologische, physiologische und soziale Aspekte adressiert, um den Nutzen und die Attraktivität eines Produkts zu gewährleisten und auch divergierende Interessen verschiedener Stakeholder, wie z. B. der Nutzer oder des Servicepersonals, in einem Produkt zu erfüllen. Ein erfolgreicher Produktentwicklungsprozess erfordert einen Abstimmungsprozess aller an der Produktentstehung beteiligten Disziplinen, die Integration wesentlicher Aspekte zu Funktion, Form und Wirkung des Produkts und damit die intensive

Zusammenarbeit von Ingenieuren und Industriedesignern, die von der VDI 2424 unterstützt werden soll.

3 Handlungsrahmen und Nutzen der Richtlinie für Ingenieure und Designer

3.1 Zielsetzung der Richtlinie

Den Rahmen bzw. den roten Faden der Richtlinie bildet der Entwicklungs- und Gestaltungsprozess mit allen in den Produktentstehungsprozessen organisatorisch und operativ involvierten Abteilungen und Personen, wie z. B. Industriedesignern, Ingenieuren und Produktmanagern, und den entsprechenden Schnittstellen des Bereichs Industriedesign zu den Produktentstehungsphasen.

Zentrale Zielsetzung ist dabei:

- Der Mensch wird in den Mittelpunkt der Produktgestaltung gestellt
- Industriedesign wird als Begriff und Prozess definiert und die Kernkompetenzen von Industriedesignern werden genannt.
- Ziele, Aktivitäten und Methoden des Industriedesigns werden als integraler Bestandteil des Produktentstehungsprozesses in Anlehnung an VDI 2221 (2019) dargestellt.
- Checklisten und Beispiele für die Umsetzung in der Praxis werden ergänzend aufgeführt.

3.2 Schlüsselbegriffe

Als zentraler Inhalt der Richtlinie ist **Industriedesign** als „*das Entwerfen, Entwickeln und Gestalten der Wirkung der Schnittstelle Produkt-Mensch (menschzentriertes Entwickeln). Industriedesign berücksichtigt daher neben technischen Aspekten insbesondere die psychologischen, physiologischen und sozialen Bedürfnisse des Menschen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Diese umfassen unter anderem eine einfache Bedienbarkeit, Sicherheit und Qualität der Produktnutzung ebenso wie die Sichtbarkeit, Erkennbarkeit und Attraktivität des Produkts sowie ökologische und ökonomische Gestaltungsfaktoren.*“ In VDI 2424 (2020) definiert. Damit ist Industriedesign umfassender als bloßes „Styling“ und geht über die bloße künstlerische Gestaltung eines Produktes weit hinaus.

Als **Produkte** und damit Zielobjekte des Industriedesign kommen sowohl Gegenstände wie physische Objekte als auch digitale Artefakte, Dienstleistungen und sogar noch mehr verallgemeinert Wissen, Konzepte, Ideen, Rechte, Normen oder Vorgehensweisen und eine Kombination dieser Aspekte in Frage. Sie alle haben einen **Produktnutzen**, also eine durch den Nutzer vorgenommene Einschätzung ihres Wertes, der meist in Form von Funktionen realisiert wird, die von diesem in technischen, aber auch in auf den Menschen ausgerichteten psychologischen, physiologischen oder sozialen Zielsetzungen wahrgenommen werden.

3.3 Nutzen der Richtlinie

Im Mittelpunkt der Gestaltung steht der Mensch, Abbildung 1. Zweck von Industriedesigns ist es, Produkte und Dienstleistungen so zu entwerfen und zu gestalten, dass sie von ihren Nutzern insbesondere einfach, sicher und eindeutig genutzt werden können. Dazu müssen neben den Käufern und Nutzern die unterschiedlichen Interessen diverser Interessengruppen in einem Produkt berücksichtigt werden. Industriedesign integriert daher, ergänzend zu seiner Kernkompetenz Gestaltung, im Produktentstehungsprozess die beteiligten z. B. soziokulturellen Systeme im Umfeld, aber auch im Laufe des Produktlebenszyklus beteiligte Disziplinen und Stakeholder, um Funktion, Form und Wirkung des Produkts schnittpunktartig zu optimieren.

Über die Wahrnehmung in ihrer Form, Struktur, Farbe, Materialität, Bedeutung usw. interagieren Produkte mit dem Menschen in sozialen, kulturellen, technischen, ökologischen und ökonomischen

Systemen. Industriedesigner gestalten diese Produkte zielgerichtet, um die beabsichtigte Kommunikation zwischen Nutzer, Produkt und Umgebung sowie den Gebrauchswert und die Gebrauchstauglichkeit (engl. Usability) inklusive aller damit verbundener Services zu optimieren.

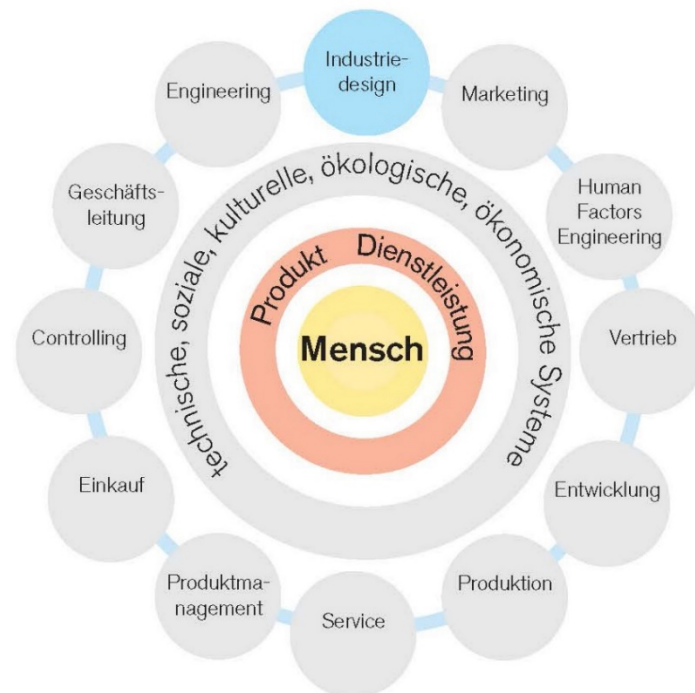


Abbildung. 1: Der Mensch im Mittelpunkt der Produktgestaltung

Industriedesign kann auf diese Weise zusätzlich unter Einsatz diverser Gestaltungsfaktoren eine emotionale Bindung zwischen Nutzer und Produkt erzeugen, so dass diese in der Regel sorgfältiger und länger genutzt werden, und tragen somit auch zu einer größeren Nachhaltigkeit und Unternehmensakzeptanz bei.

Industriedesigner besitzen in der Regel eine hohe Empathie, die ihnen einen holistischen, übergreifenden Blick auf Produktziele, wie z. B. Nutzerbedürfnisse und Nutzungserleben, ermöglicht. Eine rechtzeitige bzw. frühzeitige Einbindung von Industriedesign im Produktentstehungsprozess trägt daher maßgeblich bei, teilweise heterogene Nutzungsanforderungen verschiedener Stakeholder zu vereinen bzw. in Balance zu bringen.

Das Human-Factors-Engineering, auch Ingenieurpsychologie genannt, sorgt unter Anwendung von Informationen über physikalische und psychische Eigenschaften nach ergonomischen und kognitiven Kriterien besonders für die sichere sowie menschen- und gesundheitsgerechte Entwicklung und Gestaltung von Produkten und Arbeitssystemen.

Indem den Kunden schon vor der eigentlichen Nutzung erste inhaltlich und visuelle Botschaften vermittelt werden, steigert Industriedesign die wahrgenommene Qualität eines Produkts. Auf den übersättigten mee-too Märkten können so über die Erkennbarkeit (corporate design) sowohl die Qualität und Leistungsfähigkeit eines Produktes und Produktsortiment gesteigert als auch seine Wiedererkennbarkeit aufgrund eines prägnanten Designs (Markenproduktsprache) vermittelt werden. Für Unternehmen wird auf diese Weise auch die für sie essentielle langfristige Kundenbindung durch positive Erfahrungen ihrer Käufer und Kunden und das resultierte Vertrauen in das Produkt und/oder der Marke ermöglicht. Damit werden Wirtschaftlichkeit und Wert von professionell gestalteten Produkten gesteigert.

Die Mitverantwortung des Industriedesigns muss auch gegenüber der Gesellschaft mittels eines "Dreiklangs ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeit" erfüllt werden. Den Nutzen für die Gesellschaft hat der bekannte Gestalter Dieter Rams (1994) treffend beschrieben "Das gestaltete Produkt soll auch der Gemeinschaft dienen und nutzen, nicht nur dem einzelnen Verwender und dem einzelnen Hersteller".

Mit einer systematischen Designstrategie werden auch die Ziele und Leitlinien des Corporate Design im Sinne einer umfassenden, einheitlichen Produktgestaltung und Erscheinungsbildes unterstützt. Eine Designstrategie beinhaltet die Beschreibung von Grundsätzen (Designvision, -mission und – Positionierung) und die Anwendung dieser Gestaltungsrichtlinien erleichtert internen Mitarbeitern wie externen Dienstleistern die konsistente und homogene Umsetzung der Designstrategie auf alle Bereiche und sorgen somit für ein einheitliches Erscheinungsbild bzw. ein Corporate Product Design des Unternehmens

4 Aufbau und Inhalt der VDI 2424

Das Industriedesign als schöpferische, nutzungsorientierte und integrative Gestaltung von Funktion und Form eines industriell hergestellten Produkts ist heute mehr als je zuvor zu einem maßgeblichen Faktor für die Qualität von Produkten, deren Wahrnehmbarkeit am Markt und damit auch für die Identität der Unternehmen und der Marken geworden. Die überarbeitete Richtlinie 2424 hat sich daher zum Ziel gemacht, das Verständnis zum Design bzw. dem Design als integralem Bestandteil des Produktentwicklungsprozesses und als strategischen Treiber der Innovation im Unternehmen zu fördern. So entsteht Nutzen nicht nur für die Nutzer und/oder Kunden, sondern auch für die Unternehmen, welche von Differenzierung zum Wettbewerb, erkennbarer Identität (corporate identity) und Kundenbindung auch wirtschaftlich profitieren. Entsprechend richtet sich die VDI 2424 an alle Stakeholder die am Produktentwicklungsprozess beteiligt sind und soll diese darin unterstützen, die Aspekte von Engineering und Industriedesign zu berücksichtigen, wechselseitiges Verständnis zu fördern und beides bei der Produktentwicklung zu integrieren.

Die Richtlinie behandelt die wesentlichen Bezüge und Schnittstellen des Bereichs Industriedesign zu den Produktentstehungsphasen im Produktlebenszyklus und bietet darüber hinaus einen Überblick über das Thema Industriedesign mit seinen vielfältigen Aspekten. Dazu berücksichtigt sie folgende Aspekte:

- Abschnitt 1 definiert den Handlungsrahmen der Richtlinie und zeigt die Bandbreite des Themas.
- Abschnitt 2 definiert und erläutert die Schlüsselbegriffe sowie gängige Begriffe und Abkürzungen.
- Abschnitt 3 stellt den Kern der Tätigkeit Industriedesign und den Nutzen für Anwender dar. Zudem wird Industriedesign im Kontext zu weiteren Disziplinen dargestellt, die den Nutzer/Menschen im Fokus haben.
- Abschnitt 4 zeigt die Integration des Industriedesigns in den Produktentstehungsprozess anhand der parallel dargestellten Aktivitäten im Design- und Engineering-Prozess als Basis für eine frühzeitige Nutzerintegration.
- Abschnitt 5 gibt einen Überblick über die wichtigsten Methoden und Werkzeuge des Industriedesigns, um es wirksam einzusetzen.
- Abschnitt 6 gibt Hinweise für die Designentwicklung und Umsetzung im Rahmen rechtlicher Grundlagen und Normen.

Der Anhang erläutert anhand von Beispielen die Umsetzung von Industriedesign im Produktentstehungsprozess, teilweise auch über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts.

4.1 Integration des Industriedesigns in den Produktentstehungsprozess

Im Abschnitt 4 der neuen VDI-Richtlinie wird die Integration des Industriedesigns in den Produktentstehungsprozess explizit aufgezeigt, Abbildung 2. Der Produktentstehungsprozess orientiert sich dabei an der VDI 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung“ (2019). Neu ist die parallele Darstellung der Aktivitäten im Design- und Engineering-Prozess sowie die Zusammenarbeit mit weiteren beteiligten Abteilungen bzw. Personen.

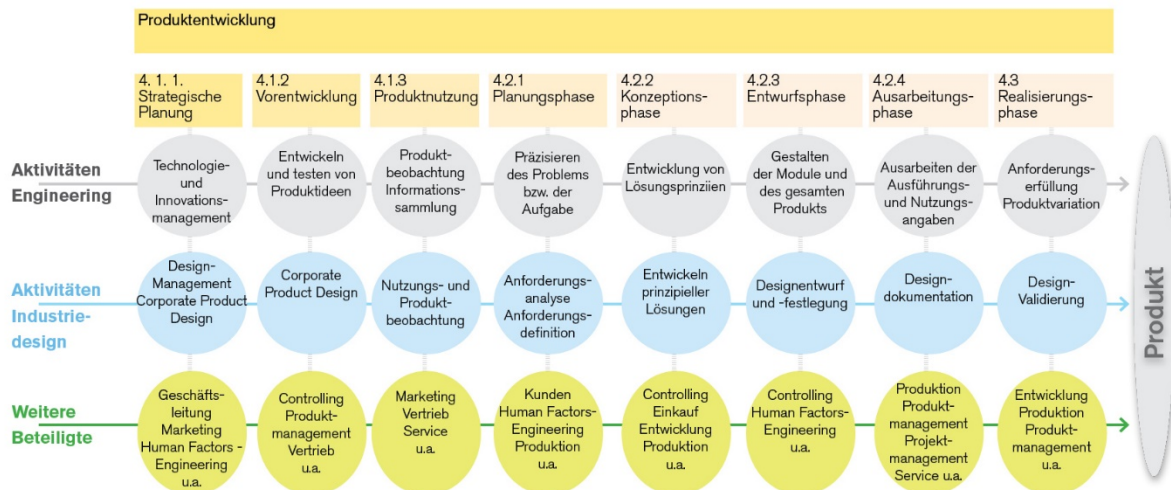


Abbildung 2: Produktentwicklung - Aktivitäten Industriedesign und Engineering

Auch die Querschnitts- und Begleitprozesse sind neu hinzugekommen, so sind der reinen Produktentwicklung nun die strategische Planung bzw. die Produktstrategie-Entwicklung und die Vorentwicklung vorangestellt. Damit wird die Realität vom KMU bis zum Großunternehmen besser abgebildet. Der Fokus des Vorgehens liegt auf der frühzeitigen Nutzerintegration, beginnend bei der Situationsanalyse, über den Benchmark bis zum ersten Designkonzept. Die Phasen ‚Betrieb und Nutzung‘ sowie ‚Produktrealisierung bzw. Produktion‘ wurden ebenfalls in den Gesamtkontext zeitlich nach der Produktentwicklung in die Richtlinie integriert. Hier erfolgen sowohl eine intensive Nutzungs- und Produktbeobachtung sowie eine Design-Validierung.

Sinn und Zweck ist die Verdeutlichung der interdisziplinären Kooperation zwischen dem Engineering und dem Design bereits in frühen Phasen der Produktentstehung und in den späten Phasen der Fertigung und des Produktgebrauchs. Nur so kann heute eine erfolgreiche Produktentwicklung implementiert und forciert werden.

4.2 Struktur des gemeinsamen Produktentstehungsprozesses

Der reine Prozess der Produktentwicklung besteht nach wie vor aus den vier Phasen Planung, Konzeption, Entwurf und Detaillierung bzw. Ausarbeitung, die hier kurz beschrieben werden sollen: In der Planungsphase geht es primär um die Festlegung der Anforderungen, welche zunächst in einem Lastenheft und dann in einem Pflichtenheft fixiert werden. Diese Phase ist essentiell, denn hier werden neben den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen auch bereits alle Design-Anforderungen festgelegt. Zu den Design-Anforderungen gehören die genaue Spezifikation des Nutzers, d. h. seine demo-, geographischen und psychographischen Merkmale, wie z. B. Einstellungen und Werthaltungen, sowie die wichtigen Mensch-Produkt-Anforderungen der Betätigung und Benutzung sowie der Sichtbarkeit und Erkennbarkeit.

Die Konzeptphase ist charakterisiert durch die Ermittlung von Funktionen und Strukturen, die zu mehreren Lösungsprinzipien führt, die dann bewertet werden, um daraus eine finale Lösung zu extrahieren. Das Design leistet hierbei einen wichtigen Beitrag von der Ideenfindung bis zur Überprüfung der Usability und der Marktakzeptanz in Zusammenarbeit mit spezialisierten Abteilungen. Der Aufbau der Produktgestalt wird final festgelegt.

In der Entwurfsphase schreitet die Konkretisierung des Produkts fort. So erfolgt u. a. die Generierung und Gestaltung von Modulen über Schnittstellen und der Designentwurf und mit abschließendem Design-Freeze in der Formgebung. Hierbei wird in der Regel auch mit einem Styleguide begonnen, der die Design- bzw. Gestaltungsprinzipien festhält.

In der Ausarbeitungsphase erfolgt die Detaillierung des Produkts. Diese Phase ist sehr arbeitsintensiv und beinhaltet beim Industriedesign insbesondere die Farbgebung, Oberflächen- und Grafikgestaltung. Damit wird das komplette Erscheinungsbild des Produktes sichtbar und es können

daraus Nutzungserfahrungen abgeleitet werden. Währenddessen erstellt das Engineering die vollständige Produktdokumentation mit allen dafür notwendigen Informationen und Unterlagen für nachgeordnete Bereiche für die Nutzung bzw. Bedienung des Produkts.

4.3 Methodeneinsatz

Ein integraler Bestandteil der Produktentwicklung sind Methoden, die in den jeweiligen Phasen des Produktentwicklungsprozesses eingesetzt werden. Geeignete Methoden unterstützen den systematischen Entwicklungsprozess und verbessern die Qualität der Ergebnisse. In der Richtlinie VDI 2424 werden allgemein anwendbare und spezifische Methoden zur Stimulation von kreativen Prozessen aufgeführt, die sich in der frühen Phase der Produktentwicklung z. B. eignen, um Suchfelder, Suchrichtungen und Probleme aufzufinden, sie zu präzisieren, die Ideenfindung in einem Zeitrahmen zu strukturieren und zu unterstützen, aber auch um (Denk-)Blockaden zu reduzieren.

Ingenieure und Designer nutzen teilweise ähnliche Methoden, die sich dennoch durch eine jeweils spezifische fachliche Perspektive unterscheiden können. So kann eine Technologie-Roadmap des Designers eine Technologie-Roadmap des Ingenieurs nicht ersetzen. Sie kann die Technologie-Roadmap des Ingenieurs aber um wichtige Aspekte des Anwender- und Nutzungsbezugs bzw. der Wahrnehmung und des Erlebens von Technologien ergänzen. Teilweise werden also identische Methoden getrennt in Engineering und Industriedesign angewendet. Bei manchen Vorgehensweisen ist es aber auch erforderlich, dass die Methoden für beide Bereiche gemeinsam Anwendung finden, da die Aufgaben aufgrund enger Abhängigkeiten oft nur schwer voneinander abzugrenzen sind.

Zu beachten ist, dass die Bedeutung der Methoden und ihre Auswahl von der Komplexität des geplanten Produktes sowie von der erforderlichen Organisationsstruktur (wie Zeit, Ressourcen, Kenntnisse, Beteiligte, vgl. dazu die Kontextfaktoren in VDI 2221 Blatt 2 (2019) abhängen.

Die folgenden Darstellungen einiger ausgewählter Methoden sind entsprechend den Phasen des zuvor in Abschnitt 3 beschriebenen Produktentwicklungsprozesses strukturiert. Oftmals können einzelne Methoden jedoch auch durchaus in verschiedenen Phasen bzw. übergreifend eingesetzt werden. In diesem Fall sind sie der Phase zugeordnet, in der sie besonders relevant erscheinen.

4.4 Konkretisierung in der Anwendung

Einen Exkurs zum Technischen Design stellt das an diese Struktur angelehnte Ablaufschema in Abbildung 3 dar. Es präzisiert nochmals die Prozesse der VDI 2221 und der VDI 2424 in den vier Phasen der Produktentwicklung. Im Fokus des Technischen Designs steht dabei der sog. Gebrauchswert, der vom Nutzwert und den Kosten abhängig ist und insbesondere das Human Factors Engineering integrativ berücksichtigt.

Am Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design an der Universität Stuttgart untersuchen Maier (2020) und Schmid (2017) die fachlichen Grundlagen des Designs technischer Produkte zu dessen Eingliederung in die methodische Produktentwicklung. Unter dem Design eines technischen Produkts wurde und wird derjenige Teilnutzwert seiner Produktgestalt verstanden, der dessen Betätigungs- und Benutzbarkeit sowie dessen Sicht- und Erkennbarkeit beinhaltet. Insofern ist es nur konsequent, dass man sich dort mit der Usability, dem Technischen Interface Design und der Designmethodik intensiv befasst. Die Angliederung an das Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) ist deshalb folgerichtig und stellt eine ideale Symbiose zur methodischen Produktentwicklung dar.

Betrachtet man das Ablaufschema in Abbildung 3, so wird die Produktgestalt zu Beginn in die drei Teilgestalten Funktionsgestalt (Fu), Interfacegestalt (If) und Tragwerkgestalt (Tw) in der rechten Spur untergliedert [1] | 2]. Die Funktionsgestalt besteht dabei aus allen relevanten Funktionsbaugruppen und –modulen einer Produktgestalt. Die Interfacegestalt bezeichnet im Wesentlichen die Mensch-Maschine-Schnittstelle, d.h. die Art und Anzahl der Stellteile, deren Anordnung auf einem Tragwerk und alle Kontaktflächen [1]. Die Tragwerkgestalt beinhaltet das Tragwerk der Maschine mit allen Verkleidungsbaugruppen bzw. –modulen. Diese drei Teilgestalten stehen während einer Produktentwicklung immer im engen Kontext zueinander und beeinflussen sich teilweise gegenseitig.

EINGLIEDERUNG DES DESIGNS IN DIE PRODUKTENTWICKLUNG (1)

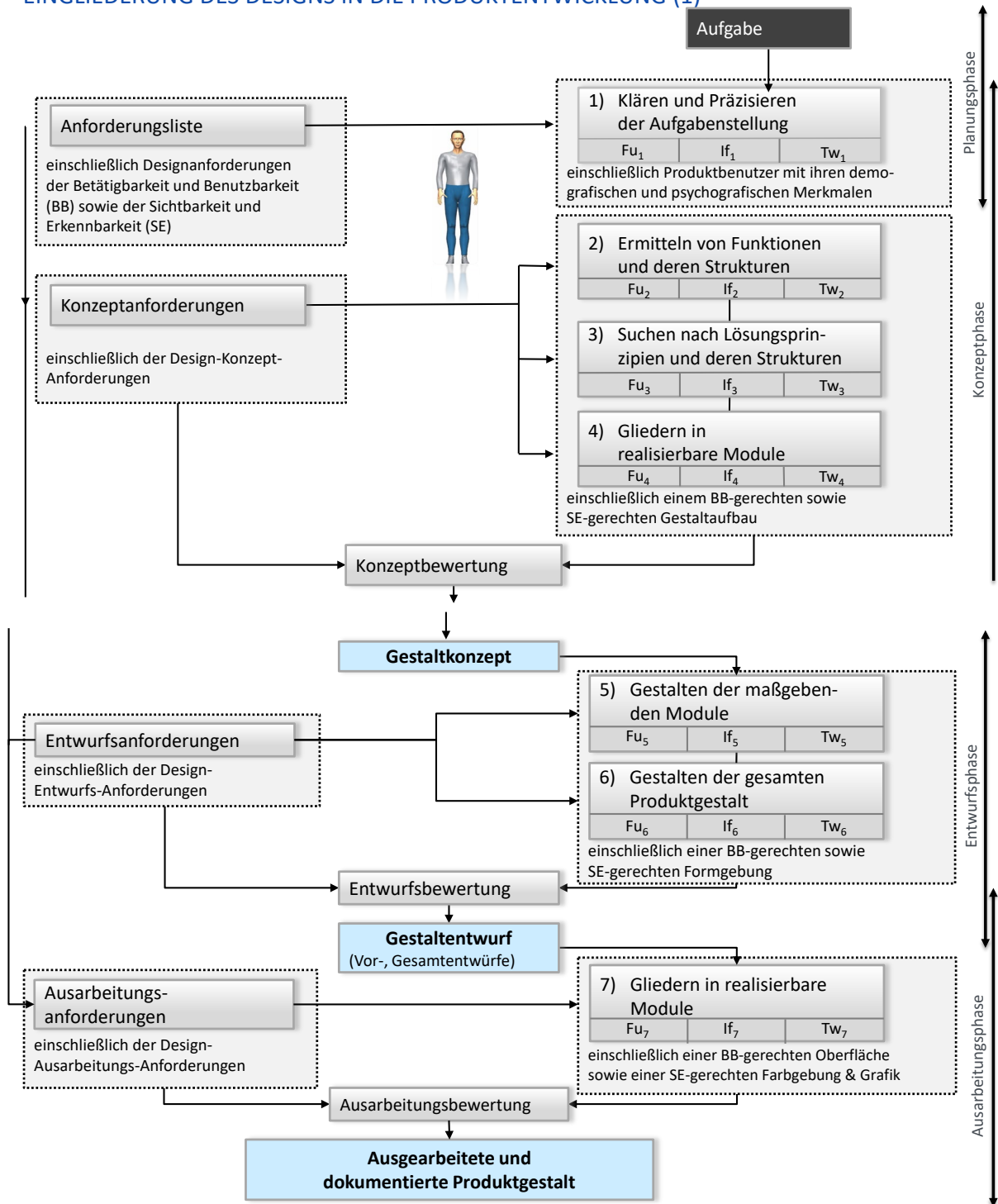


Abbildung 3: Eingliederung des Design in den Produktentwicklungsprozess

In diesem Ablaufschema werden drei vertikale Spuren mit 4 horizontalen Phasen bzw. Arbeitsschritten kombiniert. Ausgehend von der Aufgabe werden die Planungs-, die Konzept-, die Entwurfs- und die Ausarbeitungsphase überlappend und realitätsnah bearbeitet und die Arbeitsumfänge in der rechten vertikalen Spur dezidiert beschrieben. Dazu zählen u.a. die Prozessschritte 1), 'Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung' bis 7), 'Gliedern in realisierbare Module', die iterativ, also ggf. mit Rücksprüngen durchlaufen werden. Die linke vertikale Spur führt als Basis die generierte Anforderungsliste auf und wird durch die phasenspezifischen Anforderungen erweitert, welche im Entwicklungsablauf immer

weiter detailliert werden. Demgegenüber sind auf der mittleren vertikalen Spur die Bewertungen am Ende jeder Phase sowie die Gestaltkonkretisierungen vom Gestaltkonzept bis zur fertig ausgearbeiteten Produktgestalt dokumentiert. Damit wird die Integration des Technischen Designs in den modernen Produktentwicklungsprozess strukturiert und einfach erklärt dargestellt.

4.5 Beispielhafte Umsetzung

Mittels der Darstellung erfolgreicher Projekten aus der Berufspraxis wird die frühzeitige Nutzerintegration und die Integration des Industriedesigns in den Produktentstehungsprozess in der neuen VDI 2424 erläutert und anschaulich gemacht. Hierzu werden Projekte aus unterschiedlichen Produktbereichen wie z. B. Haushalt und Industrie, erläutert und kompakt die einzelnen Phasen des Produktentwicklungsprozesses aufgezeigt. Abbildung 4 zeigt beispielhaften im Überblick den Design- und Produktentwicklungsprozess der Neukonzipierung eines Trinkverschlusses für Sportflaschen.

<p>Allgemeine Informationen zum Projekt</p> <p>Allgemeine Informationen zum Projekt Neukonzipierung eines Trinkverschlusses für Sportflaschen.</p> <p>Der innovative DrinkClean-Verschluss ist benutzerorientiert für ein hygienisches Trinken. Einfach den drehbaren Trinkstutzen nach oben in die Drink-Position schwenken, danach in die Clean-Verschluss-Position zurückdrehen.</p> <p>Drinkclean ist die Vereinigung von Ästhetik, Funktionalität und Materialeinsatz.</p> <p>Die nachfüllbare drinkclean Flasche wird qualitativ geprüft gemäß DIN EN 12321-1 aus umweltfreundlichen und lebenslang tauglichen Kunststoff hergestellt.</p>	<p>Branche/Marktumfeld/ Nutzer</p> <p>ADOMIA ist leistungsfähiger Spezialist für die Entwicklung, Konstruktion, Produktion und Veredelung von Kunststoffprodukten in mehreren Geschäftsfeldern.</p> <p>Robuste wiederverwendbare Sportflasche aus Kunststoff lebensmitteltauglich, spülmaschinengeeignet, garantiert schadstofffrei ohne Phthalate als Weichmacher, frei von Bisphenol-A, geschmacks- und geruchsneutral.</p> <p>Desweiteren entspricht die Sportflasche drinkclean u. a. folgenden Richtlinien: UFG 6, 831, Abs. 1, Schweizerpatentschrift DIN V 53160 1+2</p>	<p>Résumé</p> <p>Die Usability der Sportflasche konnte signifikant durch das hygienische Verschlusskonzept verbessert werden.</p> <p>Der Trinkbereich bleibt sauber - frei von Verleerstaub und Dreckspritzer die z. B. beim Radfahren in der Stadt oder durchs Gelände entstehen.</p> <p>Auszeichnung der Trinkflasche u. a. GOOD DESIGN Award, FOCUS Design Gold, Tech-Innovation Award, Eurotoke Award, Product of the year pro-k.</p>
<p>Abb. Phasen und Aufgaben des Designs & Projektbeispiele</p> <p>Strategieentwicklung → Verentwicklung → Entwicklung-Planung → Entwicklung-Konzept → Entwicklung-Entwurf → Entwicklung-Detailierung/Ausarbeitung → Serienfertigung/Produktion → Betrieb und Nutzung</p> <p>1 Anforderung Lastenheft für neue Sporttrinkflasche 2 Konzept, Idee, Prinzipkombinationen 3 Entwurf 4 Konstruktion 5 Produktion 6 Marketing, Vertrieb, Schutzrechte</p> <p>Planung von Usability-Maßnahmen, Durchführung, Dokumentation und Führen einer Gebrauchtauglichkeitsakte nach ISO EN 62366</p>		
<p>1</p> <p>Anforderung</p> <p>Lastenheft für die neue Sporttrinkflasche: - neuartige innovative Mehrweg-Trinkflasche - vorhandene Flasche muss übernommen werden - nur der Deckel mit dem Trinkverschluss (Saugstutzen) darf verändert werden - Vorgabe: Vorkammierte Flasche und das Gewinde sind vorgegeben</p>	<p>2</p> <p>Konzept, Idee, Prinzipkombinationen</p> <p>- Hauptfunktion: Kundennutzen = leichte Bedienung bzw. einfache Handhabung und Hygiene - Teilfunktion und Aufgabe: Wie kann der Trinkstutzen vor Schmutz geschützt werden und gleichzeitig einfach bedient werden? - Innovatives aber auch einfaches Wirkprinzip: mittels Schwenken des Trinkstutzens in einen „Schutzbereich“ wird die Hygiene erhöht zudem wird durch das Schwenken der Wasser bzw. Getränsedurchfluss geöffnet oder geschlossen. Schließen und Öffnen des Durchflusses mittels des Prinzips eines Absperrventils</p>	<p>3</p> <p>Abb. Umsetzung der Konzepte in 3D Daten</p> <p>Entwurf</p> <p>- klare glattflächige Deckelform - minimalistisches Design - glatte, plane und/oder gespannte Flächen - die Länge des Trinkstutzens wird durch den Durchmesser der Flasche begrenzt (Drehung 180°) - Schließen und Öffnen des Durchflusses mittels des Prinzips eines Absperrventils</p> <p>Drehung des Trinkstutzens in den Schutzbereich = Durchfluß gestoppt Drehung des Trinkstutzens in die Trinkposition = Durchfluß offen</p> <p>4 5</p> <p>4. Konstruktion</p> <p>Berechnungen, Prototyp, Werkzeugkonstruktion. Die finalen Proportionen, Linienführungen und Details wurden in Abhängigkeit mit den Teilfunktionen (siehe 2. Konzept festgelegt bzw. formalästhetisch proportional abgeleitet. In dem letzten Entwicklungsschritt wurden von der Entwicklungsabteilung der Firma Adoma die spritzgusstechnischen Details gelöst und die Werkzeugdaten mit Einformungsschritten, Schruppfraße usw. werkzeugausgereicht konstruiert.</p> <p>5. Produktion</p> <p>Mit den ersten pressefertigen Bauteilen wurden Funktionstests durchgeführt. Nach den erfolgreichen Tests wurde die Oberfläche bzw. Narbung der Kunststoffoberfläche definiert.</p> <p>6</p> <p>Marketing, Vertrieb, Schutzrechte:</p> <p>Die Vorteile (USP) des neuen hygienischen Konzeptes wurden in einem prägnanten Satz kommuniziert.</p> <p>Einfach den drehbaren Trinkstutzen nach oben in die Trinkposition schwenken, danach in die Clean-Verschlussposition zurückdrehen. drinkclean – schon der Produktname sollte auf das „saubere Trinken“ hinweisen.</p> <p>Mittels entsprechender Produktfotos wurde die einfache Bedienung und der Hygienevorteil leicht nachvollziehbar herausgestellt. Über entsprechende Kommunikationsformen (Internat, Messe, Design Awards, ...) wurde drinkclean beworben. Notwendige Schutzrechte wurden fiktiv angemeldet.</p>

Abbildung 4: Beispielhafter Produktentwicklungsprozess

5 Fazit

In den letzten Jahren wurde die VDI-Richtlinie VDI 2424 „Industriedesign“ einer intensiven Überarbeitung unterzogen. Neue Entwicklungen der Technik, veränderte Strukturen und Prioritäten in den Unternehmen, aber auch gesellschaftliche Veränderungen ließen eine Anpassung nach über 30 Jahren nötig werden.

Entstanden ist eine neu strukturierte und um zahlreiche Beispiele ergänzte Richtlinie, die den Entwicklungsprozess und die Zusammenarbeit von Ingenieuren und Industriedesignern darstellt. Dabei erweist sich Industriedesign als Schnittstelle und besitzt damit moderierendes Potential für die sehr vielfältigen, bisweilen konfligierenden Anforderungen und Interessen aller während des gesamten Produktlebenszyklus Beteiligten. Die Abgrenzung zu den beschränkten Interessen, welche z. B. das Styling prägen, tritt deutlich hervor. Ebenso musste ein erweiterter Begriff des Produkts als

Gestaltungsziel umrissen werden, das nun stärker als bisher die Entwicklung der Digitalisierung reflektiert und auch strukturell-konzeptuelle, nicht direkt materialisierte Entwicklungsleistungen umfasst. Neue Arbeitsbereiche, die vor 30 Jahren nur in zaghaften Ansätzen in Erscheinung traten, werden integriert: beispielsweise erweitert das Human Factors Engineering bzw. die Ingenieurpsychologie den Umfang der klassischen Ergonomie um cognitiv-ergonomische Anteile, die bei hoher Komplexität der Bedienung und Benutzung für möglichst einfache, selbstverständlich wirkende Handhabung ausschlaggebend sind.

Ebenso deutlich wurde die Notwendigkeit, technische Gestaltung sehr früh in die Produktplanung und -entwicklung einzubeziehen, um der heutigen, vielfach komplexer gewordenen Produktentwicklung mit ihren ebenso umfangreichen wie unumgänglichen Interdependenzen gerecht zu werden. Die in der Richtlinie dargestellten Ablauf- und Strukturschemata geben auf kompakte Weise einen idealisch geordneten Überblick über diese Komplexitäten und ordnen die Vielfalt sinnvoll in Zusammenhängen. Für beide Berufsgruppen, Ingenieure wie Designer, entstand so ein Leitfaden, der das wechselseitige Verständnis der Aufgaben und Kompetenzen fördert und so die Zusammenarbeit unterstützt, um sowohl funktionale und technologische als auch gestalterische und ergonomische Aspekte zu integrieren und so Produkte zu entwickeln, die für alle Stakeholder, also den Nutzer, das Unternehmen und auch die Gesellschaft, einen Mehrwert bieten.

6 Literatur

Buch:

- | | |
|----------------|---|
| Schmid 2017 | SCHMID, M, MAIER, T : <i>Technisches Interface Design – Anforderungen, Bewertung und Gestaltung</i> . Berlin: Springer Vieweg, 2017. |
| Frick 1996 | FRICK, R.: <i>Erzeugnisqualität und Design : zu Inhalt und Organisation polydisziplinärer Entwicklungsarbeit</i> . 1. Aufl., Berlin: Verl. Technik, 1996. |
| Schneider 2008 | SCHNEIDER, B.: <i>Design- Eine Einführung : Entwurf im sozialen, kulturellen und wirtschaftlichen Kontext</i> . Basel: Birkhäuser Verlag, 2008. |
| Rams 1994 | RAMS, D.: <i>Die leise Ordnung der Dinge</i> . Göttingen: Steidl Gerhard Verlag , 1994 |
| Selle 2007 | SELLE, G. 2007. <i>Geschichte des Design in Deutschland</i> . 2. Aufl., Frankfurt, M.: Campus-Verl. |

Hochschulschrift (z. B. Dissertation):

- | | |
|------------|---|
| Maier 2020 | MAIER, T., SCHMID, M.: <i>IDeEn Kompakt – Manuskript zur Vorlesung Technisches Design</i> . Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Online-Version vom 19.10.2020. |
|------------|---|

Norm (z. B. DIN-Norm oder VDI-Richtlinie):

- | | |
|--------------|---|
| VDI 2221(1) | VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (HRSG.): <i>VDI 2221 Blatt 1: Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung</i> . Berlin: Beuth Verlag, 2019 |
| VDI 2221 (2) | VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (HRSG.): <i>VDI 2221 Blatt 2 Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse</i> . Berlin: Beuth Verlag, 2019. |
| VDI 2424 | VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (HRSG.): <i>VDI 2424: Industriedesign - Nutzerzentrierte Gestaltung im Produktentstehungsprozess</i> . Düsseldorf: VDI Verlag, 2020 (Entwurf) |

Integration von Sensoren in das Exterieur-Design automatisierter/autonomer Fahrzeuge

Integration of Sensors in the exterior design of automated/autonomous vehicles

Lutz Fischer¹, Daniel Holder¹, Stephan Krogmann, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design,
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Stuttgart
lutz.fischer@iktd.uni-stuttgart.de
daniel.holder@iktd.uni-stuttgart.de
st117144@stud.uni-stuttgart.de
thomas.maier@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract (deutsch):

Sicherheits- und Automatisierungsfunktionen im Fahrzeug erfordern heute eine Vielzahl von Sensoren. Mit ihnen werden Umgebungseinflüsse erfasst und die jeweilige Fahrfunktion geregelt. Viele dieser Sensoren müssen Anforderungen bezüglich Position und Funktionsbauraum erfüllen und beeinflussen so das Exterieur-Design. Mit zusätzlichen Funktionen aus dem Bereich des automatisierten und autonomen Fahrens wird sich die Sensoranzahl deutlich erhöhen. Im vorliegenden Beitrag wird die design-technische Integration von Sensoren in das Pkw-Exterieur-Design erstmalig methodisch und design-strategisch betrachtet. Aus dem aktuellen Stand der Sensortechnik werden Randbedingungen für die Positionierung der Sensoren abgeleitet. Im Anschluss werden Fahrzeuge und Fahrzeugkonzepte verschiedener Hersteller hinsichtlich realer Positionen untersucht. Aus der Analyse wird eine kumulierte Häufigkeitsverteilung abgeleitet, die als Grundlage für strategische Überlegungen zum Fahrzeugdesign und Gestaltungsempfehlungen mit Beispielen dient.

Keywords (deutsch): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Exterieur-Design, Sensorintegration, Designstrategie

Abstract (english):

Safety and automation functions in vehicles require a large number of sensors today. They are used to detect environmental influences and control the respective driving function. Many of these sensors have to meet requirements regarding position and functional installation space, thus influencing the exterior design. With additional functions from the field of automated and autonomous driving, the number of sensors will increase significantly. In this paper, the design-technical integration of sensors into the exterior design of passenger cars is considered methodically and strategically. Boundary conditions for the positioning of the sensors are derived from the current state of sensor technology. Subsequently, vehicles and vehicle concepts of different manufacturers are examined with regard to real positions. A cumulative position distribution is derived from the analysis, which serves as a basis for strategic considerations on vehicle design and design recommendations including examples.

Keywords (english): (Formatierung mit SSP_Abstract)

Exterior-design, sensorintegration, strategic design

1 Einleitung

Das wachsende Verkehrsaufkommen führt vielerorts zu einer Überlastung der Infrastruktur und einer Beeinträchtigung des Verkehrsflusses. Fahrzeugführer sind dadurch oft gestresst, negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit sind die Folge. Es wird angenommen, dass ca. 90 % aller Unfälle auf menschliches Versagen zurückgeführt werden können (Rudschies und Kroher 2019). Zur Entlastung des Fahrers werden Fahrassistenzsysteme (FAS) in Fahrzeugen eingesetzt. Bestimmte Verkehrssituationen können vom Fahrzeug erkannt werden und den Fahrer im Risikofall durch den Eingriff ins Fahrgeschehen oder Warnmeldungen in seiner Fahraufgabe unterstützen. Eine Entwicklung hin zu automatisierten und autonomen Fahrzeugen ist aus Gesichtspunkten der Fahrsicherheit der logische nächste Schritt. Die Einführung von Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen hat das Potential zur disruptiven Technologie und kann angefangen bei den Mobilitäts- und Transportkosten für Bürger und Wirtschaft, der Infrastruktur, der Verkehrssicherheit bis hin zur IT-Sicherheit viele Bereiche verändern (Esser und Kurte 2018). Zudem sind diese Systeme im Mischverkehr, in dem automatisierte Fahrzeuge und vom Menschen pilotierte Fahrzeuge gemeinsam vorkommen, von zentraler Bedeutung.

Fahrzeugseitig spielen bei der Realisierung von Sicherheits- und Automatisierungsfunktionen drei Bereiche eine wichtige Rolle: Aktorik, Sensorik und Steuerungssoftware. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Sensorik. Sensoren „ersetzen“ die Sinne des Menschen und dienen zur gesamtheitlichen Erfassung der Fahrzeugumgebung. Mit ihnen werden Umgebungseinflüsse erfasst, softwareseitig verarbeitet und als Steuergrößen an die Aktorik der jeweiligen Fahrfunktion weitergegeben. Bei der Anbringung der Sensoren müssen Anforderungen bezüglich Position und Funktionsbauraum erfüllt werden, um eine ausreichend hohe Genauigkeit zu garantieren. Mit zusätzlichen Funktionen beim automatisierten und autonomen Fahren wird sich die Sensoranzahl deutlich erhöhen. Bisher zeigen nur wenige Konzeptfahrzeuge der Automobilhersteller und Zulieferer den Versuch diese Randbedingungen der Sensoren im Sinne der Design-Technik-Konvergenz (DTK) ästhetisch in das Exterieur-Design zu integrieren.

Der vorliegende Beitrag wird die design-technische Integration von Sensoren in das Pkw-Exterieur-Design erstmalig methodisch und design-strategisch betrachten. Dadurch soll bei Entwicklern und Designern frühzeitig der Entwicklungsbedarf gerade auf gestalterischer Ebene aufgezeigt werden. So werden zukunftsweisende Technologietrends im Pkw-Bereich oftmals Jahre im Voraus im Advanced Design aufgegriffen, neue Designthemen entwickelt und Schlüsseltechnologien strategisch eingebunden. Im Beitrag werden zunächst aus dem aktuellen Stand der Sensortechnik Randbedingungen für die Positionierung der Sensoren abgeleitet. Im Anschluss werden Fahrzeuge und Fahrzeugkonzepte verschiedener Hersteller hinsichtlich der Sensorpositionen untersucht. Aus der Analyse wird eine kumulierte Häufigkeitsverteilung abgeleitet, die als Grundlage für strategische Überlegungen zum Fahrzeugdesign und zu Gestaltungsempfehlungen anhand von Beispielen dient. Im Weiteren wird untersucht, welche Teilgestalten des Fahrzeugs durch die Anbringung der Sensoren beeinflusst werden. Auf diese Weise wird die Auswirkung auf die Exterieurgestalt präzisiert und es lassen sich zielgerichtete Integrationsstrategien für unterschiedliche Sensorarten ableiten.

2 Stand der Sensortechnik

Für den Wandel hin zu hochautomatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen ist es entscheidend, die Wahrnehmungsqualität und die Intelligenz des menschlichen Fahrers adäquat zu ersetzen. Dieser kann die von seinen Sinnen aufgenommenen Informationen überlagern, sich an Witterungsbedingungen anpassen und das Verkehrsgeschehen aufgrund seiner Erfahrung vorhersagen (Ritz 2018, S. 31). Beim Wandel vom klassischen, pilotierenden Fahrer hin zum passiven Beifahrer müssen diese Sinne vom Fahrzeugsystem ersetzt und idealerweise übertroffen werden. So zeigen z. B. elektromagnetische Wellen oder Laserpulse unter schlechten Licht- und Witterungsverhältnissen nur eine geringfügige, unbedeutende Abschwächung. Sensoren unterliegen auch keiner Müdigkeit oder Unaufmerksamkeit

bei langen monotonen Fahrten. Im Folgenden werden die dafür notwendigen Sensoren (vgl. Bild 1) sowie ihre technischen Randbedingungen und bauraumbedingten Restriktionen vorgestellt. Antennenmodule zur Navigation, Ortung und Kommunikation des Fahrzeugs mit der Infrastruktur (Car-2-X) wurden nicht betrachtet, da Antennen heute bereits vielfach nicht sichtbar integriert werden können.

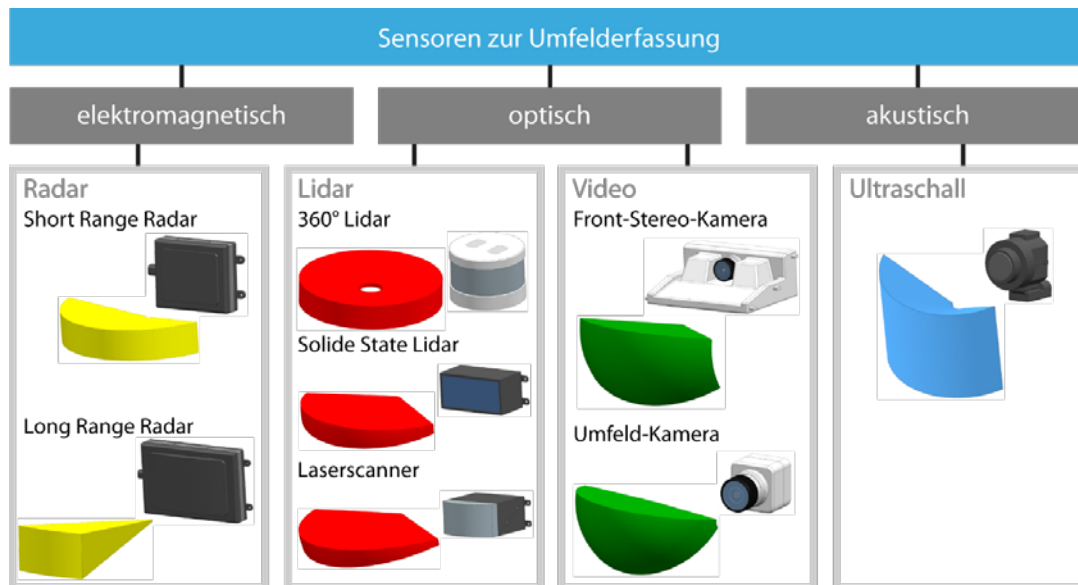


Bild 1: Übersicht verwendete Sensoren zur Umfelderkennung

2.1 Radarsensoren

Radare („Radio detecting and ranging“) nutzen zur Entfernungsmessung elektromagnetische Wellen, die von Objekten mit einer ausreichenden Dichte, wie z. B. Metall, Glas oder Beton, zurückgeworfen werden. Das Aussenden der Radiowellen erfolgt mit rampenförmig modulierter Frequenz, sodass aus den Signalen der reflektierten Radiowellen, eingefangen in einer separaten Empfangseinheit, direkt Abstand und Geschwindigkeit eines vorrausfahrenden Objekts mit Hilfe des Doppler-Effekts berechnet werden können. In der automobilen Radartechnik wird hauptsächlich die indirekte Laufzeitmessung nach dem FMCW-Verfahren (frequently modulated continuous wave) angewendet. Um darüber hinaus den Winkel des Objektes zu detektieren, werden mindestens zwei Radarkeulen ausgesendet und die Amplituden der empfangenen Signale verglichen. (Reif 2010, S. 135 f)

Winner (2015) erklärt, dass in der Automobilanwendung Radarsensoren in Short-Range-Radare (SRR) und Long-Range-Radare (LRR) unterschieden werden. SRR haben ein breites Sichtfeld (ca. 170°) bei einer geringeren Reichweite (20 – 50 m, Frequenz 24 GHz). LRR zeichnen sich durch eine hohe Reichweite (ca. 250 m, Frequenz 77 – 79 GHz) und einen vergleichsweise schmalen Erfassungsbereich (ca. 25°) aus. Diese Attribute sind optimal für das frühzeitige Detektieren von Fahrzeugen in großen Entfernungen und bei hohen Geschwindigkeiten. Ein ausreichend großer vertikaler Sichtbereich ist notwendig, da sonst auf hügeligen Straßen oder bei Nickbewegungen Fahrzeuge teilweise erst spät oder gar nicht detektiert werden. Die Technik ist sehr ausgereift und robust, sie ist allwettertauglich und kann auch elektrisch nichtleitende Materialien durchdringen (KTI 2018). Das ermöglicht die Unterbringung der Sensoren hinter lackierten Verkleidungsteilen. Pfeiffer (2009) betont im Kontext der Auswirkungen von Verkleidungsteilen im Automobilbereich, sog. Radomen, dass die Verkleidungen eine ausreichend große und möglichst plane Oberfläche aufweisen müssen, um Beugungseffekte zu vermeiden. Außerdem haben Vertiefungen und Längsstreben einen negativen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Sensors. Dünne Heizdrähte, die horizontal hinter oder innerhalb des Radoms integriert sind, schützen vor Vereisung, ohne die Sensorleistung negativ zu beeinflussen. Metallische Verdeckungen und Lacke sind geeignet, sofern sie eine Mindestdicke nicht überschreiten. Sehr dünne Schichten (< 1 µm) sind für elektromagnetische Wellen durchlässig und werden eingesetzt, um z. B. metallische Strukturen auf Kunststoffoberflächen nachzubilden. So ist es möglich

Radarsensoren hinter einem Markenlogo oder dem Kühlergrill zu verstecken, ohne die Sensorperformance entscheidend zu beeinträchtigen.

2.2 Lidar

Lidar, in Anlehnung an Radar ist ein Akronym und bedeutet „Light detecting and ranging“. Im Gegensatz zur Radartechnik, werden bei Lidarsensoren Laserstrahlen verwendet. Sie werden hier daher zu den optischen Systemen gezählt. Die Anwendung im Straßenverkehr verlangt eine Limitierung der Wellenlängen auf nicht sichtbares Licht und für den Menschen nicht schädliche Frequenzen (KTI 2018, S. 12). Die Strahlen besitzen in der Atmosphäre nahezu Lichtgeschwindigkeit und eignen sich damit ebenfalls für die Laufzeitmessung (Gotzig und Geduld 2015, S. 318). Dafür werden Lidarsensoren mit einer separaten Empfangs- und Sendeeinheit ausgeführt, die sich meist durch mehrere Empfangs- und Sendedioden auszeichnen. Die Sendedioden emittieren über ein Spiegelsystem in regelmäßigen Abständen Laserpulse, die von Objekten mit hoher Dichte reflektiert und von den Empfangsdioden aufgenommen werden. Die empfangenen Signale werden verstärkt, digitalisiert und durch einen Mikrokontroller ausgewertet, sodass eine dreidimensionale Karte der Umgebung entsteht (Kernhof et al. 2018, S. 30). Lidarsensoren weisen eine höhere Auflösung als Radarsensoren auf und detektieren dadurch zuverlässiger kleine Objekte, wie Fußgänger oder Fahrradfahrer (Ritz 2018, S.45). Allerdings sind die emittierten Lichtstrahlen anfällig für die Ablenkung oder Reflexion an Wassertropfen in der Luft. An der Intensität des reflektierten Pulses kann zwar erkannt werden, ob es sich um ein hartes oder weiches Objekt handelt, dennoch wird die Reichweite von Lidarsensoren bei schlechten Witterungsbedingungen abgeschwächt (Gotzig und Geduld 2015, S. 319). Prinzip bedingt können sie außerdem nicht hinter lichtundurchlässigen, z. B. metallischen Abdeckungen verborgen werden. Möglich ist die Platzierung hinter lichtdurchlässigen Flächen aus Glas oder Kunststoff. Grobe Verschmutzungen im Arbeitsfeld des Sensors sind zu vermeiden, da sie sich negativ auf die Sensorleistung und Reichweite auswirken (KTI 2018, S. 11). Zum Schutz der Sensoren vor kritischen Bauteiltemperaturen muss außerdem eine Kühlfunktion vorgesehen werden.

Lidarsensoren werden nach dem Abtastverfahren unterschieden. Bei sog. Laserscannern wird der gesamte Sensor bzw. der Spiegel des Sensors permanent rotiert, wodurch ein großer Bereich gescannt wird. Diese Systeme benötigen einen großen Bauraum und sind durch die hohe Anzahl an rotierenden Teilen sehr teuer (Koch 2018, S. 78). Wesentlich günstiger und kompakter sind Solid-State-Lidarsensoren, bei denen die Lichtstrahlen über Halbleiterkomponenten abgelenkt werden. Zu diesem Prinzip gehören die Optical-Phased-Array Systeme sowie Sensoren, in denen sog. MEMS (Microelectromechanical systems) Mikrospiegel zur Strahlablenkung eingesetzt werden. Vorteile der Solid-State-Technik liegen in der geringen Baugröße und der hohen Robustheit bei geringeren Kosten (All-Electronics 2017). Trotz deutlicher Fortschritte bei der Bauraumreduktion der Sensoren in den letzten Jahren ist die Größe und damit die Möglichkeit zur Integration dieser Sensorart durch die optisch-physikalischen Grenzen für eine ausreichende Leistung limitiert.

2.3 Kamerabasierte Systeme

In Kraftfahrzeugen werden optische Systeme vielfach eingesetzt. Im Innenraum kommen sie bei der Müdigkeitserkennung oder Gestensteuerung zum Einsatz. Beim Fahrzeugexterieur werden Monokameras mit großem horizontalem Sichtfeld für die Nahfeldererkennung und Parkassistentenfunktionen sowie Stereokameras zur räumlichen Objekterkennung für Fahrassistentensysteme wie Spurhalte- und Kreuzungsassistenten eingesetzt (Stiller et al. 2015, S. 387-391). Hauptbestandteile eines Kameramoduls für den Einsatz im Automobil sind die Optik, der elektronische Bildsensor und ein Infrarotfilter, der nur die sichtbaren Anteile des einfallenden Lichtspektrums durchlässt (Punke et al. 2015, S. 355). Die Optik besteht aus mehreren Linsen. Als Bildsensor haben sich CMOS (Complimentary metal-oxid semiconductor) Sensoren durchgesetzt, die durch aktive Pixel und einen integrierten Analog-Digital-Wandler die einfallende Lichtstrahlung direkt in digitale Signale umwandeln (Punke et al. 2015, S. 359). Die anschließende digitale Bildererkennung erfolgt über entsprechende Erkennungsalgorithmen. Die Wahrnehmung von Farbinformationen und die gezielte Objekterkennung stellen die größten Vorteile

von Kameras gegenüber Radar- und Lidarsensoren dar, da diese gar nicht bzw. nur begrenzt für diesen Zweck eingesetzt werden können. Reif (2010, S. 111) erläutert, dass bei Frontview-Kameras eine hohe Auflösung und ein hoher Dynamikumfang entscheidend sind. Punke et al. (2015, S. 348-358) präzisieren: Letzterer ist z. B. bei entgegenkommenden Fahrzeugen in der Nacht notwendig. Die Probleme von Kameras bei starker Sonneneinstrahlung, großem Rauschverhalten bei Nacht oder schlechten Witterungsbedingungen lassen sich dadurch nur bedingt lösen. Die Umfelderkennung muss unter diesen Bedingungen auf zusätzliche Informationen von Radar- oder Lidarsensoren zurückgreifen. Für die optimale Nutzung des Kamera-Sichtfeldes ist eine hohe zentrale Position zu berücksichtigen. Bei optischen Systemen zur Erfassung des Nahbereichs sind in der Regel mehrere Kameras um das Fahrzeug herum angebracht, deren Bilder anschließend zusammengefügt und dem Fahrer präsentiert werden (Punke et al. 2015, S. 352). Der erfasste, horizontale Sichtbereich liegt durch den Einsatz von Fisheye-Objektiven bei über 180°. Die Baugröße von Kamerasystemen ist heute sehr gering, sodass sie nahezu überall in die Fahrzeughülle integriert werden können. Prinzip bedingt müssen sie jedoch vor Staub, Streusalz und weiteren Verschmutzungen geschützt werden (KTI 2018, S. 14).

2.4 Ultraschall

Der Einsatz von Ultraschallsensoren zur Nahfeldererkennung um das Fahrzeug gehört seit vielen Jahren zum Stand der Technik. Aufgrund ihrer geringen Größe und dem niedrigen Preis werden sie mittlerweile in allen Fahrzeugklassen eingesetzt. Im Kontext des automatisierten Fahrens sind ihre Informationen vor allem für den Einparkprozess und die Erfassung von Totwinkelbereichen nicht zu ersetzen (Reif 2010, S. 152). KTI (2018, S. 5-7) beschreibt die Funktionsweise wie folgt: durch eine piezokeramisch angeregte Membran werden Ultraschallwellen, die außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsbereichs liegen, ausgesendet und von festen Objekten reflektiert. Die aufgenommenen Schwingungen werden von einer Piezokeramik als analoges Signal ausgegeben und von der Sensorelektronik in ein digitales Signal umgewandelt. Über das Laufzeitverfahren wird der Abstand zum reflektierenden Objekt ermittelt. Um Aussagen über den relativen Winkel von Hindernis zum Sensor zu treffen, wird eine Triangulation eingesetzt. Dafür werden mehrere Sensoren in geringen Abständen nebeneinander eingebaut. Einer dieser Sensoren sendet Schallpulse aus, die von den anderen empfangen werden. Durch die anschließende Signalauswertung können so genaue Angaben über Abstand, Winkel und Form des Hindernisses getroffen werden. Auf dem Markt erhältliche Sensoren verfügen über einen Messbereich von 0,15 bis 5,5 m bei einem horizontalen und vertikalen Sichtwinkel von 140 x 70°; dieser geringere vertikale Messbereich ist notwendig, um ein größeres Messrauschen und Scheinziele zu verhindern (Bosch 2020). Um eine fehlerfreie Funktion zu ermöglichen, ist eine Entkopplung der schwingenden Membran des Ultraschallsensors von der Einbauumgebung notwendig und die Sensoren müssen temperatur-, witterungs-, schwingungs- und feuchtigkeitsbeständig sein (Noll und Rapps 2015, S. 255). Das Funktionsprinzip erlaubt das Lackieren der sichtbaren Komponenten des Sensors.

3 Analyse von Positionskonzepten der Automobilhersteller

Im folgenden Abschnitt werden Lösungsansätze von Automobilherstellern und Zulieferern zur Integration von Sensoren in das Exterieur-Design von Pkw analysiert. Nutzfahrzeuge oder People Mover nach dem Minibus-Prinzip werden nicht betrachtet. Zunächst werden dazu einige Beispielfahrzeuge vorgestellt. Es folgt die Analyse und Darstellung der häufigsten Positionen von Forschungsfahrzeugen, um den aktuellen Stand der Forschung abzubilden. Abschließend werden Positionsfelder abgeleitet und bestehende Lösungskonzepte beschrieben.

3.1 Aktuelle Beispiele aus der Branche

Von den ersten medial präsenten „Gehversuchen“ autonomer Fahrzeuge bei der DARPA Grand Challenge 2004 und dem 2007 weltweit bekannt gewordenen „Junior“ VW Passat des Stanford

University Racing Teams haben sich die Versuchsfahrzeuge zur Erforschung des automatisierten Fahrens deutlich weiterentwickelt. Aus dem Forschungswettbewerb in der Wüste hat sich längst ein globaler Kampf um die Technologievorherrschaft entwickelt. Neue und etablierte Unternehmen, sowie staatliche Forschungseinrichtungen verschiedenster Branchen arbeiten unter Einsatz großer Ressourcen auf das Ziel hin, Passagiere und Waren autonom von A nach B zu bringen.

Bild 2 zeigt beispielhaft einige aktuelle Fahrzeuge aus der Serie, Versuchsträger aus der Forschung und Design-Visionen. Serienfahrzeuge zeigen den aktuellen Stand der Technik. Einige Teilfunktionen ermöglichen in bestimmten Situationen bereits das automatisierte Fahren (vgl. SAE Level 2 bis 3). Die Automatisierung nach Level 4 und 5 ist Gegenstand aktueller Forschung. Fahrzeuge wie der Waymo Chrysler Pacifica zeigen längst nicht mehr die zweckmäßigen Aufbauten aus Rahmenprofilen und einer Vielzahl angebrachter Sensoren. Die Technik ist oft bereits unter Abdeckungen versteckt, allerdings nur bedingt formal-ästhetisch in das Exterieur-Design integriert. Einen Ausblick auf das zukünftige Design von automatisierten und autonomen Fahrzeugen geben aktuell nur Konzeptfahrzeuge.

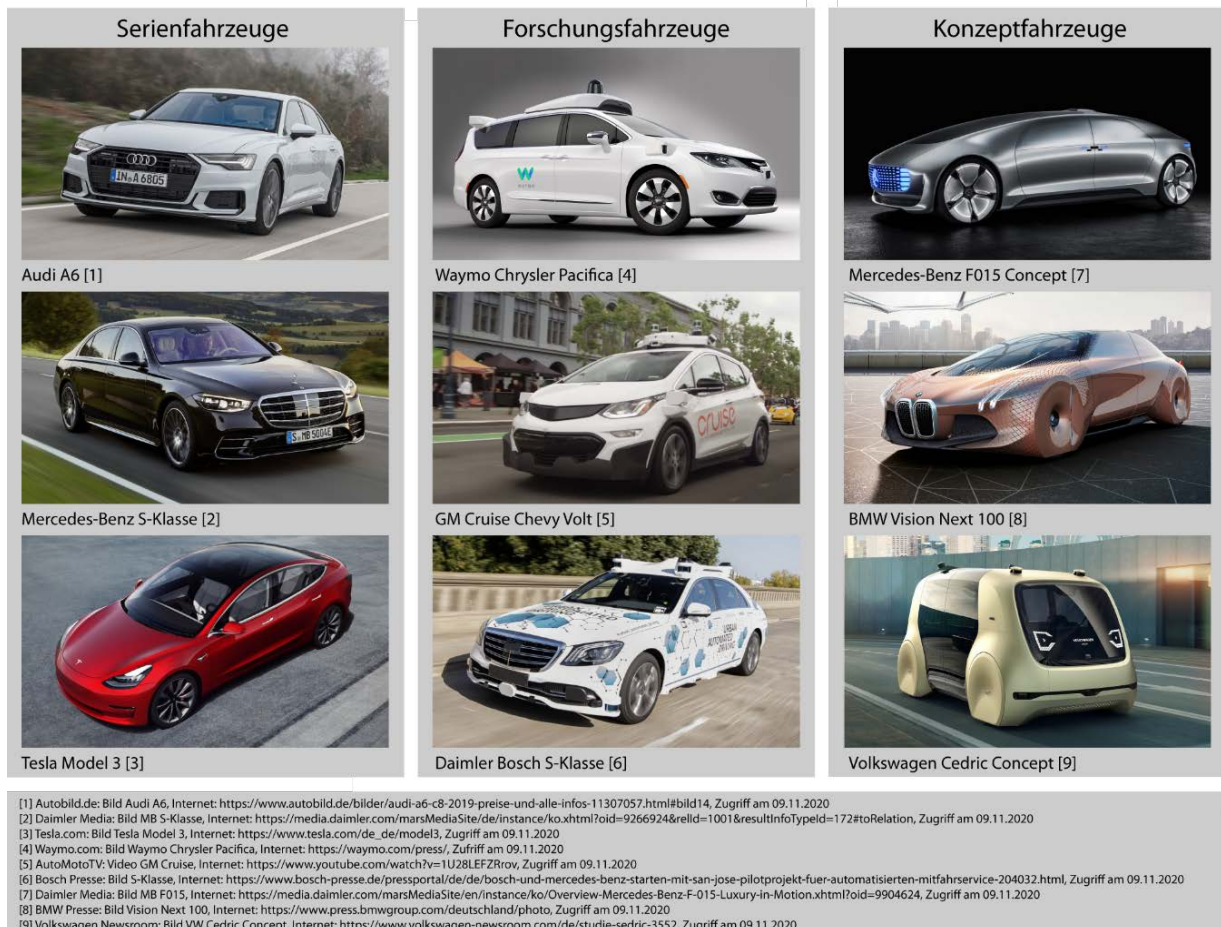


Bild 2: Beispielfahrzeuge verschiedener Automatisierungsstufen

3.2 Kumulierte Häufigkeitsverteilung

Für die folgende Analyse der häufigsten Positionen der Sensorarten im Exterieur wurden Informationen zu 18 Forschungs- und Konzeptfahrzeugen aus den letzten drei Jahren zusammengetragen und Bildmaterial gesichtet. Dazu zählten unter anderem z. B. der GM Cruise Chevrolet Volt, Waymo Chrysler Pacifica, Uber Volvo XC90, Aptiv BMW 5er, Argo AI Ford Fusion und Sony Vision S. Eine genaue Unterscheidung der Fahrzeuge nach Level der Automatisierung wurde aufgrund der Datenlage nicht vorgenommen. Alle betrachteten Fahrzeuge sollen mindestens nach SAE Level 4 automatisiert fahren können. Den Sensorarten wurde ein Farbschema zugeordnet und die Positionen der Sensoren wurden mit Hilfe der recherchierten Informationen auf ein abstraktes Standardfahrzeug übertragen und überlagert (vgl. Bild 3).

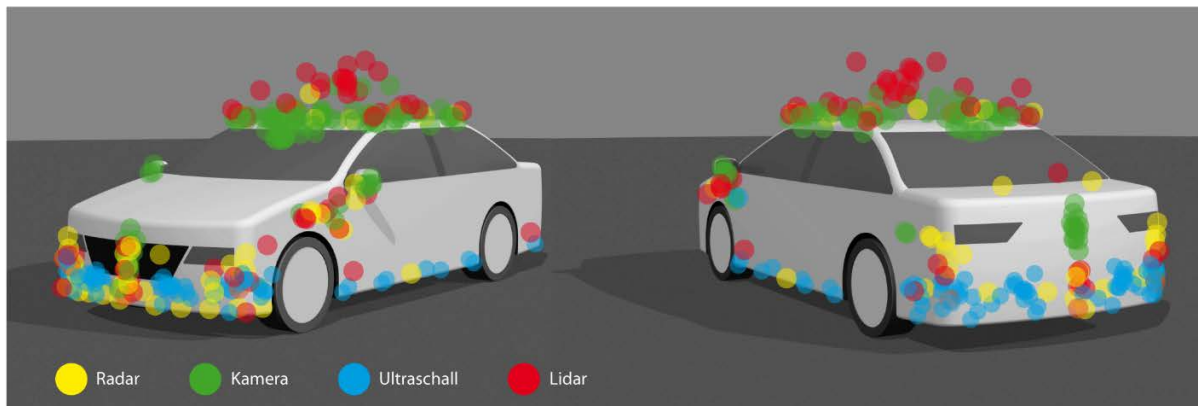


Bild 3: Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Sensorpositionen an Forschungs- und Konzeptfahrzeugen

Aus der Analyse konnten insgesamt 12 Cluster ermittelt werden, die die wichtigsten Sensorpositionen beinhalten. Bild 4 zeigt die Cluster in blau. Die Cluster sind symmetrisch zur Fahrzeugmittelebene. An Fahrzeugfront und -heck befinden sie sich zentral und auf den Ecken des Fahrzeugs. Am oberen Rand der Windschutzscheibe und auf bzw. über dem Dach konnten zwei weitere Cluster auf Basis der Positionsanalyse definiert werden. An den Fahrzeugseiten konnten Positionshäufungen an den Kotflügeln und Außenspiegeln ermittelt werden.

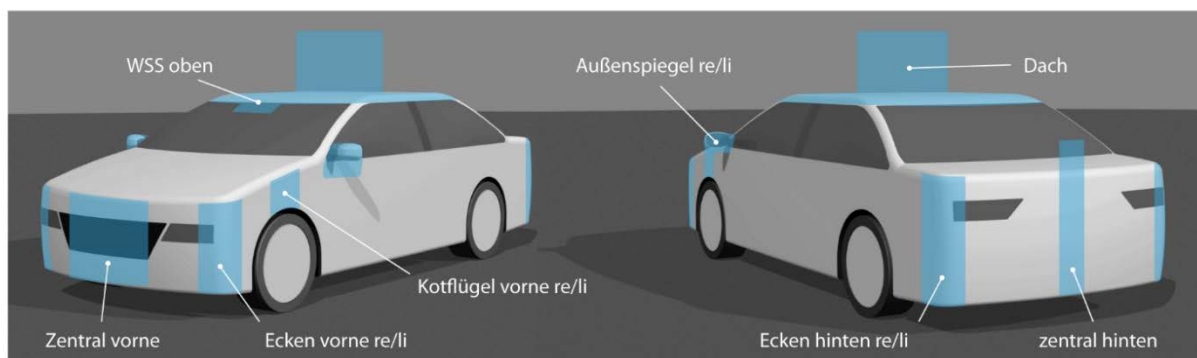


Bild 4: Ableitung von Sensorclustern

3.3 Vorherrschende Lösungskonzepte

Im Zuge der Analyse konnten viele verschiedene Integrationsmöglichkeiten für die einzelnen Sensorarten gesammelt werden. In diesem Abschnitt wird darauf eingegangen wo sich die Sensoren im Einzelnen befinden und wie sie ins Exterieur-Design integriert sind.

Radarsensoren müssen bezüglich ihrer Lage im Fahrzeug nach SRR und LRR unterschieden werden. SRR haben ein breites Sichtfeld bei einer geringeren Reichweite und werden deshalb häufig an den Fahrzeugecken in der Nähe der Scheinwerfer untergebracht, z. B. anstelle der Nebelleuchten, hinter Heck- oder Frontstoßfängern. LRR zeichnen sich durch eine hohe Reichweite und einen vergleichsweise schmalen Erfassungsbereich aus. Daher werden LRR heute fast ausschließlich mittig in der Fahrzeugfront eingesetzt. Bei einer zentralen Integration der Radarsensoren zwischen den Frontscheinwerfern ist die Chance für die Radarstrahlung hoch, auf eine gerade Fläche eines vorausfahrenden Fahrzeugs zu treffen, sodass ein großer Teil der emittierten Strahlung reflektiert und dieses dadurch sicher detektiert wird. Entweder werden sie im Kühlergrill hinter sogenannten Radomen, meist mit aufgedrucktem Markenlogo, oder unterhalb im Schwarzbereich der zentralen Kühlöffnungen verbaut. Die Position wird auch bei Forschungs- und Konzeptfahrzeugen verwendet.

Lidarsensoren befinden sich bei aktuellen Serienfahrzeugen ausschließlich in der Fahrzeugfront. Audi zeigte im aktuellen A6 zum ersten Mal den Einsatz von Lidar in der Großserie. Die Sensoren sind zentral im Schwarzbereich des Kühlergrills oder nahezu unsichtbar hinter lichtdurchlässigen Radomen verbaut. Der Einsatz von Lidarsensoren hinter der Windschutzscheibe im Bereich des Innenspiegels

wird in der Literatur beschrieben, findet allerdings aktuell keine Serienanwendung (Gotzig und Geduld 2015, S. 333). Forschungsfahrzeuge weisen deutlich mehr Lidarsensoren auf. Der bekannteste Einsatzort ist die exponierte Position der Sensoren oberhalb des Fahrzeugs auf einem Dachträger. Die hohe Position ermöglicht es, mit wenigen Sensoren den gesamten Bereich um das Fahrzeug zu scannen. Nachteilig an diesem Lösungskonzept ist jedoch, dass das Design des Fahrzeugs ästhetisch nachteilig verändert wird und sich die Aerodynamik verschlechtert. Fahrzeuge wie der Aptiv BMW 5er zeigen Lidarsensoren unterhalb der Außenspiegel oder auf dem Kotflügel. Der Sensortyp wird außerdem häufig auf den Ecken des Fahrzeugs, sowie zentral am Fahrzeugheck verbaut. Für diese Bereiche zeigen aktuelle Forschungsfahrzeuge keine Integration in das Exterieur-Design.

Da bei **Kamerasystemen** zur Objekterkennung ein scharfes Bild sehr wichtig ist, gelten hohe Anforderungen an die Sauberkeit (KTI 2018, S. 15). In Serienfahrzeugen werden Front-View-Kameras in der Regel hinter der Windschutzscheibe in die Rückspiegeleinheit integriert verbaut. Das Gehäuse vor dem Objektiv wird dunkel gefärbt, um Streulichteinflüsse zu vermeiden. Zusätzlich kann eine Streulichtblende zwischen Kameramodul und Windschutzscheibe zum Einsatz kommen (KTI-18, S.14). Der Bereich vor der Kamera wird von den Wischerblättern überstrichen, wodurch eine störungsfreie Sicht gewährleistet wird (Punke et al. 2015, S. 351 – 355). Zur Erfassung der Umgebung im Nahfeld werden in der Serie bis zu vier Umfeldkameras verbaut. In der Fahrzeugfront bietet sich eine Position in der Kühlermaske, an einem Radom, an. Im Fahrzeugheck werden die Kameras in Nummernschildnähe oder in der Heckklappe positioniert (KTI 2018, S. 15). Oft werden sie hier hinter Blenden verbaut und nur bei aktiver Funktion freigegeben, um sie vor Witterungseinflüssen zu schützen (KTI-18, S. 14). An den Fahrzeugseiten sind Kameras aktuell an der Unterseite des Außenspiegels, im Kotflügel hinter der Vorderachse oder vereinzelt in der B-Säulen-Blende positioniert. Bei Forschungsfahrzeugen sind häufig auch Kameras außerhalb der Fahrzeugsilhouette auf einem Dachträger positioniert. Hier werden leistungsstarke und deutlich größere Optiken verbaut, die so angeordnet sind, dass ein 360° Sichtfeld abgedeckt wird. Diese Kameras werden bisher nicht in das Design integriert.

Ultraschallsensoren gehören seit der Einführung von Parkassistenzsystemen zum Erscheinungsbild von Fahrzeugen. Je nach Fahrzeugklasse werden vier bis zwölf Ultraschallsensoren an Fahrzeugfront und -heck verbaut. Die Sensoren sind dabei meist in Kunststoffteile der Außenhaut integriert und in Wagenfarbe gehalten. Die Montage in den Stoßfängern erfolgt überwiegend durch eine eingeklebte oder angeschweißte Halterung, in die die Ultraschallsensoren eingesteckt werden. Von außen sind sie nur durch kleine, runde Fugen erkennbar. Nahezu alle untersuchten Fahrzeuge waren mit mindestens acht Ultraschallsensoren an den beschriebenen Positionen ausgestattet. Nach dem gleichen Prinzip wurden bei einzelnen zudem Sensoren in den Seitenschwellern untergebracht.

4 Methodischer Ansatz für die formale Integration von Sensoren

Im Folgenden wird auf Basis der Analyse methodisch hergeleitet, wie die Sensoren das Exterieurdesign beeinflussen. Anschließend werden zwei Designstrategien herausgearbeitet und anhand von Bildbeispielen belegt.

4.1 Die Exterieurgestalt unter dem Einfluss der Sensortechnik

Zur methodischen Untersuchung der Gestalteinflüsse wird die Definition nach Seeger (2014) genutzt: diese beinhaltet die Teilgestalten Aufbau (Au), Form (Fo), Farbe (Fa) und die Grafik (Gr). Die Teilgestalt Aufbau wird maßgeblich durch das Cluster „Dach“ beeinflusst. Lidarsensoren und Kamerasysteme sind hier die dominierenden Sensortypen. Prägnant sind oft Dachträgersysteme, die maßgeblich die Silhouette des Fahrzeugs verändern. Der Aufbau wird außerdem an Eck-Clustern beeinflusst. Hier ragen oft Lidar- und Radarsensoren deutlich aus der ursprünglichen Karosserie hervor.

Den größten Einfluss haben die Sensoren auf die Teilgestalt Form. An der Fahrzeugfront beeinflussen sie im Cluster „Zentral vorne“ die Größe von Karosserieöffnungen und Kühlergrill, an den „Ecken vorne

re/li“ wird die Pfeilung und Formgebung von Scheinwerfern beeinflusst. Im Dachcluster müssen sogar komplett neue Formelemente entwickelt werden. Sensoren in den seitlichen Clustern „Kotflügel re/li“ und „Außenspiegel re/li“ haben ebenfalls großen Einfluss auf die Exterieur-Formgebung. Linien aus der Fahrzeugfront werden hier aufgegriffen und bilden den Startpunkt für Characterlines, die maßgeblich das Design des Fahrzeugs prägen. Eine Unterbrechung der Linien oder funktionsbedingte Volumen in diesem Bereich haben erhebliche Auswirkungen auf die Seitenansicht. Aus dem Stand der Sensortechnik geht hervor, dass optische Systeme nicht hinter lackierten Bauteilen versteckt werden können. Hier wird der Einfluss auf die Teilgestalt Farbe besonders deutlich. Eine gelungene Integration in das Farbdesign des Fahrzeugs erscheint aktuell nur in Schwarzbereichen sinnvoll. Da diese aber insbesondere in den Clustern auf den Fahrzeugecken und Seiten aktuell kaum vertreten sind, entstehen auch hier neue Herausforderungen für das Design mit direkten Rückwirkungen auf die Form. Die Auswirkungen auf die Teilgestalt Grafik sind aktuell besonders im Bereich der Radome an der Fahrzeugfront zu beobachten. Das Einbringen eines Markenlogos in die Sensorabdeckung hat zu einem Anwachsen der Logos in der Front geführt. Für Grafikelemente wie z. B. fahrzeugspezifische Kennzeichnungen im Bereich der Kotflügel werden ebenfalls neue Designlösungen erforderlich sein.

4.2 Ableitung von Designstrategien für die Integration von Sensoren

Es wurde deutlich, dass es noch zahlreiche Fahrzeugbereiche gibt, wo die gestalterische Integration der Sensoren in die Exterieurgestalt nicht abschließend gelöst ist. Trotz der meist geringen Sensorgrößen verlangen die in Kapitel 2 beschriebenen technischen Randbedingungen zur Unterbringung in der Außenhaut und die steigende Anzahl der Sensoren, dass in fast allen Clustern neue gestalterische Ansätze gefunden werden müssen, um ebendiese Integration in die Formsprache zu ermöglichen. Dieser Teil des Corporate Designs wird in den Designabteilungen langfristig, weit vor Markteinführung und eingebettet in die Produktpalette und Fahrzeuggenerationen entwickelt. Die Gewährleistung des Neuigkeitsgrades, die fortlaufende Darstellung der Markenidentität und die Umsetzung funktionaler Vorgaben müssen dabei stets berücksichtigt werden. Insbesondere für sicherheitskritische Funktionen von automatisierten Fahrzeugen ist eine strategische Entwicklung des Designs sehr wichtig.

Aus der Analyse und den gestalterischen Lösungen wurden letztlich zwei Designstrategien abgeleitet: Die **additive Strategie** zur Sensorintegration verfolgt den Ansatz, die Designsprache des Fahrzeugs bzw. der Marke grundsätzlich nicht unter der Prämisse der Sensorintegration zu entwickeln. Die Strategie sieht vor, Sensoren in Formelementen unterzubringen, die das Design des Fahrzeugs additiv ergänzen. Diese Addition von Elementen wird vor allem in der Teilgestalt Aufbau sichtbar, z. B. durch die Hinzunahme eines Dachträgers. Aber auch die Abstraktionsebene Form wird z. B. durch Anbauten am Kotflügel beeinflusst (vgl. Bild 5).

Die **integrative Strategie** sieht vor, Sensoren vollständig in die Designsprache der Marke zu integrieren. Die Formgebung wird in den jeweiligen Clustern gezielt so entwickelt, dass sich die sichtbaren Flächen und Kanten der Sensoren harmonisch in das Designthema einfügen. Dadurch muss über alle Teilgestalten hinweg eine Integration stattfinden.

Aus beiden Strategien können Hersteller systematisch das Markendesign mit Ähnlichkeitsmerkmalen, im Sinne eines Corporate Designs für die gesamte Produktpalette weiterentwickeln. Auch die Kombination beider Strategien ist möglich. Je nach Positionscluster kann eine lokal unterschiedliche Strategie für die richtige Designlösung zielführend sein. Bezogen auf das Cluster aus Abschnitt 3.2 wird in Bild 5 zunächst qualitativ der Aufwand für die Integration der Sensoren in die Teilgestalt dargestellt. Je breiter der Teilbalken, desto bedeutender ist der Einfluss der Sensoren in dem Teilbereich auf die markierte Teilgestalt und desto schwieriger wird eine Integration. Es folgen Umsetzungsbeispiele für die additive Strategie (rechts) und den integrativen Ansatz (links) aus Serie (S), Konzeptstudien (K) und Visionen (V). Beispiele aus der Serie zeigen etablierte und in der Anwendung befindliche Designlösungen. Konzepte zeigen erste Ansätze einer Design-Technik-Konvergenz (DTK) für die nähere Zukunft. Visionen beleuchten das Thema vorwiegend aus gestalterischer Sicht und zeigen den Bedarf neuer Lösungen.

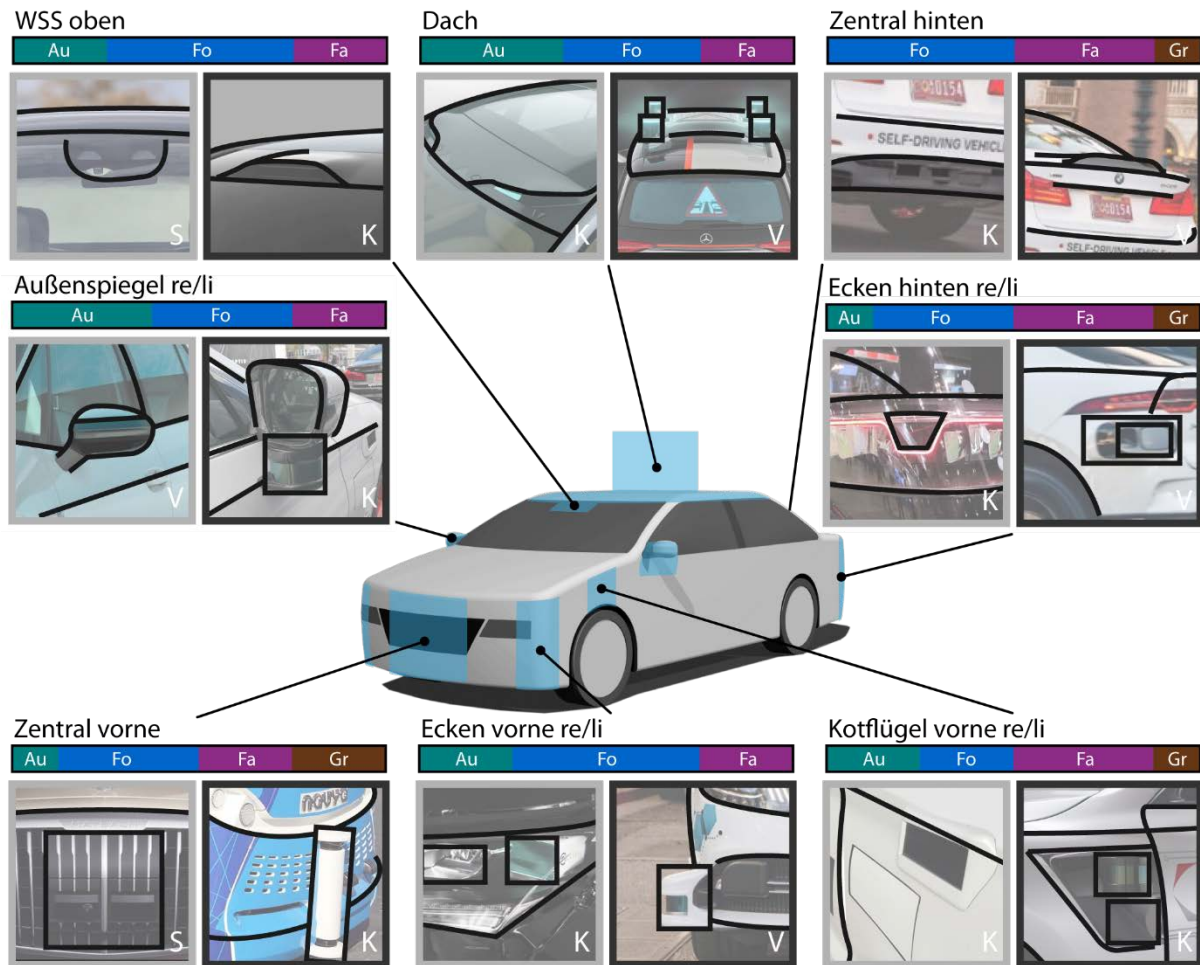


Bild 5: Integrationsbedarf und Gestaltungsbeispiele

5 Diskussion

Mit Hilfe der vorrausgegangenen Analyse konnten die unterschiedlichen Fahrzeuge hinsichtlich der Sensorpositionen und der Integration der Sensoren in das Fahrzeugdesign analysiert werden. Die wichtigsten Positionen wurden in Clustern zusammengefasst, die gleichzeitig die wesentlichen Gestaltungsräume für die Sensorintegration darstellen. Basierend darauf wurden zwei Strategien definiert, die sowohl jede für sich genommen, als auch als Mischform zum Ziel haben, die Sensoren zur Umfelderkennung im Sinne einer ästhetischen DTK ins Exterieur-Design zu integrieren. Anhand von Beispielen wurden clusterspezifisch Gestaltungsmöglichkeiten aufgezeigt. Im Folgenden werden die Ergebnisse und Strategien diskutiert und interpretiert.

Im Bereich der Sensortechnologie sind weitere Innovationen zu erwarten. Es kann sein, dass einige Sensoren dadurch kleiner und damit besser in das bestehende Design integrierbar werden. Allerdings sind alle Sensoren Prinzip bedingt an die Grenzen der Physik gebunden und können nicht beliebig ohne Performanceeinbußen und Kostenzuwachs miniaturisiert werden. Das Hauptargument für eine deutlich höhere Mindestanzahl von Sensoren gegenüber dem aktuellen Stand bei Serienfahrzeugen ist die Notwendigkeit, das Fahrzeugumfeld in einem deutlich größeren und detaillierteren Gesamtbild zu erfassen als bisher. Nur so können nach aktuellen Erkenntnissen ausreichend viele Informationen zur Regelung der automatisierten Fahrfunktionen bereitgestellt werden.

Da für den Stand der Forschung die Datenlage aufgrund der designspezifischen Themen nicht immer ausreichend ist, ergibt sich in Bezug auf die Positionsanalyse eine gewisse Unschärfe. Für die Definition der Cluster ist die Datenlage jedoch ausreichend, da Bauräume fahrzeugindividuell vergeben werden

und die Positionen der Sensoren aufeinander abgestimmt werden müssen, um Blindspots zu vermeiden.

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der entwickelten Designstrategien gegenübergestellt. Die Anwendung der additiven Strategie ermöglicht keine Designintegration im Sinn einer unsichtbaren Verschmelzung mit der geschlossenen Fahrzeugaußenhaut. Hinzugefügte Gestaltelemente sind deutlich erkennbar und können sogar dazu genutzt werden anderen Verkehrsteilnehmern die Fahrt im autonomen Modus oder auch die Güte der Sicherheitstechnik anzuzeigen. Einen wesentlichen Vorteil bietet die Strategie im DTK-Prozess, indem das eigentliche Exterieur-Design an sicherheitskritischen Bereichen wie Front und Heck nicht zusätzlich nach Vorgaben der Sensorik gestaltet werden muss. So kann die Designsprache der Grundform weitgehend unabhängig von der Sensorthematik gestaltet werden. Allerdings entstehen durch die additiven Gestaltelemente neue Wechselwirkungen mit Aerodynamik und Aeroakustik sowie Sicherheitsthemen, insbesondere beim Fußgängerschutz. Die entwickelten additiven Bauelemente können jedoch auf die gesamte Produktpalette angewendet werden, woraus sich Skalierungseffekte ergeben. Zudem kann auf die schnelle Entwicklung im Sensorbereich Rücksicht genommen werden und Sensoren können in der Fahrzeuglaufzeit angepasst werden.

Die integrative Strategie stellt den Gegenpol dazu dar. Das Vorgehen hat eine möglichst harmonische und unsichtbare Integration der Sensoren zum Ziel, ohne dabei die entwickelten Designmerkmale wie Linienführung negativ zu beeinflussen. Dafür müssen Sensorpositionen bereits sehr früh im Designprozess berücksichtigt werden. Designlösungen können hier fahrzeugindividuell erarbeitet werden, sodass harte Umbrüche in der Designsprache vermieden werden können. Anders als bei der additiven Strategie muss hier im DTK-Prozess die Funktion der Sensoren vollumfänglich berücksichtigt werden, wodurch die Wechselwirkungen zunehmen und Zielkonflikte entstehen.

Durch Mischformen beider Strategien je nach Sensorcluster können Vor- und Nachteile für die Integration gezielt gesteuert werden. Sogar eine markenspezifische Auslegung der Strategien z. B. in Form einer Funktionsbetonung durch mehr additive Gestaltelemente oder einer Ästhetikbetonung mit einer vollständig integrativen Lösung scheint möglich.

6 Fazit und Ausblick

Die Beobachtungen haben gezeigt, dass für einzelne Cluster, wie z. B. Zentral vorne und hinten, sowie WSS oben Ansätze, bereits zur formalästhetischen Sensorintegration zur Anwendung kommen. Hier können beispielhaft die 2020 vorgestellte neue Niere in BMW-Markendesign (BMW iX) oder das Opel Visor (Mokka-e Concept) genannt werden. Insbesondere für die Cluster an den Fahrzeugecken und auf dem Fahrzeugdach besteht jedoch deutliches Potential für eine bessere Integration in das Design. Eine gesamtheitliche Betrachtung unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitsmerkmalen ist bisher nur bedingt erkennbar, z. B. beim VW Cedric. Das zeigt, dass die Integration von Sensoren zur Umfelderkennung trotz der vermeintlich geringen Baugröße der Sensoren, das Potential hat, Designsprachen in Teilbereichen des Fahrzeugs und sogar gesamtheitlich maßgeblich zu beeinflussen. Es wurde gezeigt, dass eine strategische, frühzeitige Betrachtung der Einflüsse daher sehr wichtig ist.

Bisher gibt es keinerlei Untersuchungen, ob eine derartige Zurschaustellung von Sensoren für die Interaktion des Fahrzeugs mit anderen Verkehrsteilnehmern verwendet werden könnte. Dazu könnte die Übertragbarkeit der hier genannten Strategien auf das äußere HMI automatisierter Fahrzeuge (eHMI) untersucht werden. Auch die Untersuchungen zu Wechselwirkungen von Sensorpositionen mit der Fahrzeugaerodynamik/-aeroakustik oder zu Sicherheitsfunktionen, z. B. dem Fußgängerschutz, sollten eingehend betrachtet werden. Aufbauend auf diesem Beitrag sollen nachfolgend geometrische Gestaltungsmöglichkeiten unter dem Gesichtspunkt der DTK sowie semantischer und markenspezifische Aspekte erarbeitet werden.

Literatur

- All-Electronics 2017 ALL-ELECTRONICS.DE: *Was tut sich bei Solid-State-Sensoren*. Internet 06.06.2017, Verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/lidar-sensoren-automotive/> Zugriff am: 16.11.2020
- Bosch 2020 BOSCH-MOBILITY-SOLUTIONS.COM: *Ultrasonic Sensor*. Internet 09.30.2020, Verfügbar unter: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/construction-zone-assist/ultrasonic-sensor/> Zugriff am: 16.11.2020
- Esser und Kurte 2018 ESSER, Klaus; KURTE, Judith: *Autonomes Fahren – Aktueller Stand, Potentiale und Auswirkungsanalyse*, Studie im Auftrag des Deutschen Industrie- und Handelskammertages e.V. durchgeführt von KE-Consult, Köln, 2018.
- Gotzig und Geduld 2015 GOTZIG, Heinrich; GEDULD, Georg: *LIDAR-Sensorik*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015, S. 317-334
- Kernhof et al. 2018 KERNHOF, Jürgen; LEUCKFELD, Jan; TAVANO, Guiseppe: *LiDAR-Sensorsystem für automatisiertes und autonomes Fahren*. In: Tille, Thomas (Hrsg.): *Automobil-Sensorik 2*. Heidelberg: Springer Vieweg Verlag, 2018
- Koch 2018 KOCH, Alexander W.: *Forschung auf dem Gebiet der LiDAR-Scanner für das Einsatzgebiet autonomes Fahren*. In: Institut für wissenschaftliche Veröffentlichungen (IWV): Jahresmagazin Mess- und Sensortechnik 2017/2018, Lampertheim, 2018, S. 76-80
- KTI 2018 KTI.DE: *Sensoren für Fahrassistenzsysteme*. Internet 01.08.2018, Verfügbar unter: https://www.k-t-i.de/fileadmin/edit/user_upload/2018-08_TI_Sensoren_f%C3%BCr_FAS_V1.0.pdf Zugriff am 16.11.2020
- Noll und Rapps 2015 NOLL, Martin; RAPPS, Peter: *Ultraschallsensorik*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015, S. 243-258
- Pfeiffer 2009 PFEIFFER, Florian: *Analyse und Optimierung von Radomen für automobiler Radarsensoren*. Dissertation Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Technischen Universität München, 2009
- Punke et al. 2015 PUNKE, Martin; MENZEL, Stefan; WERTHESEN, Boris; STACHE, Nicolaj; HÖPFL, Maximilian: *Kamera-Hardware*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015, S. 347-368
- Reif 2010 REIF, Konrad: *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrassistenzsysteme*, Bosch Fachinformation Automobil. Plochingen: Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- Ritz 2018 RITZ, Johannes: *Mobilitätswende – autonome Autos erobern unsere Straßen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018
- Rudschies und Kroher 2019 RUDSCHIES, Wolfgang; KROHER, Thomas: *Autonomes Fahren: digital entspannt in die Zukunft*; Internet 19.03.2020, Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/aktuelle-technik/> Zugriff am 23.11.2020.
- Seeger 2014 SEEGER, Hartmut: *Basiswissen Transportation-Design: Anforderungen - Lösungen - Bewertungen*; 15 Vorlesungen und ein Anwendungsbeispiel, Springer Fachmedien, Wiesbaden. 2014
- Stiller et al. 2015 STILLER, Christoph; BACHMANN, Alexander; GEIGER, Andreas: *Maschinelles Sehen*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015, S. 369-393
- Winner 2015 WINNER, Hermann: *Radartechnik*. In: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrassistenzsysteme*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015, S. 259-316

Brücken schlagen zwischen Technik und Design in der Produktentwicklung – Erkenntnisse einer Metaanalyse über Heterogenität

Building bridges between engineering and industrial design in product development – findings from a meta-analysis on heterogeneity

Alexandra Göhring^{1,2}, Werner Engeln¹

¹Hochschule Pforzheim, HEED – Institut for Human Engineering & Empathic Design, Pforzheim

²TU Dresden, Professur für Technisches Design
alexandra.goehring@hs-pforzheim.de

Abstract (deutsch): Seit vielen Jahren wird in der Produktentwicklung auf interdisziplinäre, cross-funktionale Teams gesetzt, um den Herausforderungen und der Komplexität der Produktentwicklung gerecht werden zu können. In den Fokus rückt insbesondere die Zusammenarbeit der Ingenieurwissenschaften mit dem Industriedesign, da sie gemeinsam maßgeblich die Eigenschaften technischer Produkte bestimmen und damit auch den Erfolg des Produktes im Markt.

Aufbauend auf einer qualitativen Metaanalyse zur Zusammenarbeit in fachlich und funktional heterogenen Teams zeigt dieser Beitrag, wie wichtig es in Produktentwicklungsteams ist, Brücken zwischen den Disziplinen zu bauen. Wesentliche Ergebnisse der Metaanalyse zu Konflikten, Kommunikation, Kooperation und Wissensintegration in heterogenen Teams sowie der Produktentwicklungsbezug der Metaanalyse werden dargestellt. Es wird gezeigt, dass Brücken in Form von Wissen und Kompetenzen dazu beitragen können, die Zusammenarbeit an der Schnittstelle Technik-Industriedesign zu verbessern, indem sie das gegenseitige Verständnis fördern. Ein Ausblick auf die weitere Forschung schließt den Beitrag ab.

Keywords (deutsch): Produktentwicklung, Industriedesign, interdisziplinäre und cross-funktionale Zusammenarbeit, Wissensbrücken, Heterogenität

Abstract (english): For many years, interdisciplinary, cross-functional teams have been used in product development in order to meet the challenges and complexity of product development. The focus is particularly on the collaboration between engineering and industrial design, as they jointly determine the properties of technical products and thus also the success of the product in the market.

Building on a qualitative meta-analysis of collaboration in teams with educational and functional heterogeneity, this article shows how important it is in product development teams to build bridges between the disciplines. Essential results of the meta-analysis on conflicts, communication, cooperation and knowledge integration in heterogeneous teams as well as the product development relation of the meta-analysis are presented. It is shown that bridges in the form of shared knowledge and competencies can help improve collaboration between engineers and industrial designers by promoting mutual understanding. The article concludes with an outlook on further research.

Keywords (english): product development, industrial design, interdisciplinary and cross-functional cooperation, knowledge bridges, heterogeneity

1 Motivation und Problemstellung des Beitrags

Seit vielen Jahren wird in der Produktentwicklung auf interdisziplinäre, cross-funktionale Teams gesetzt, um den Herausforderungen wie globalisierten, individuellen Märkten und dem daraus entstehenden Innovationsdruck sowie einem hohen Kosten-, Qualitäts- und Zeitdruck gerecht werden zu können. Das führt auch zu einer steigenden Komplexität der Produkte und in den zugehörigen Entwicklungsprozessen. Die enge Verzahnung der an der Produktentwicklung beteiligten Disziplinen und Fachbereiche im Unternehmen ist daher zwingend notwendig. Sie führt zu Produktentwicklungs-Teams, die sowohl in fachlichen Merkmalen wie Wissen, Fähigkeiten, Kompetenzen und Expertisen als auch in ihrer funktionalen Zugehörigkeit zu getrennten Funktionsbereichen heterogen sind. In den Fokus rückt insbesondere die Zusammenarbeit der Ingenieurwissenschaften mit dem Industriedesign, da sie gemeinsam maßgeblich die Eigenschaften technischer Produkte bestimmen und damit auch den Erfolg des Produktes im Markt.

Dass diese Zusammenarbeit wichtig ist, zeigt sich auch in der aktualisierten Version der Richtlinie VDI 2221 und führte zu einer aktuell andauernden Überarbeitung der Richtlinie VDI/VDID 2424.

Dennoch wird sowohl in der Forschung als auch in der Praxis immer wieder von Problemen in der Zusammenarbeit und der Integration des Designs in den Produktentwicklungsprozess berichtet. Aufbauend auf einer qualitativen Metaanalyse zur Zusammenarbeit in fachlich und funktional heterogenen Teams wirft dieser Beitrag einen Blick auf den aktuellen Stand der Forschung zur Zusammenarbeit von Technik und Industriedesign in Produktentwicklungsteams und gibt einen Ausblick, wie diese durch gemeinsame „Brücken“ verbessert werden kann.

2 Erläuterung nachfolgend wichtiger Begriffe

2.1 Industriedesign und Technik

Nach wie vor gibt es im Diskurs um die Definition des Industriedesigns unterschiedliche Ansätze und Auffassungen. Oft wird Design auf den ästhetischen Aspekt beschränkt, ohne dass es die technisch-physikalische Funktionalität eines Produkts mitbestimmt (Hacker 2005, S. 290–291). In diesem Beitrag wird das Industriedesign als wichtiger Entwicklungspartner des Ingenieurwesens sowohl in der kreativen als auch der funktionalen Gestaltung verstanden (Vgl. Richtlinie VDI 2221). Kulturelle und soziale Anforderungen werden durch das Industriedesign in eine zeitgemäße Gestaltung übersetzt (Gatzky 2014, S. 133). Kurzgefasst nimmt es eine Vermittlungs-Rolle zwischen „Ästhetik, Sinn, Funktion und Marke“ (Goos 2020, S. 184) ein.

Im englischsprachigen Raum werden unter der interdisziplinären Disziplin „design“ hingegen alle Entwurfsdisziplinen zusammengefasst (Eckert und Schadewitz 2011, S. 244). Das sorgt im Vergleich zum deutschsprachigen Raum für eine deutlich geringere Trennschärfe zwischen dem Industriedesign und der technischen Konstruktion, die bei englischsprachiger Literatur zu beachten ist. Diese sprachliche Eigenheit steht im Kontrast zur US-amerikanischen Entstehungsgeschichte des Industriedesigns, bei der Design vor allem in Form eines nichttechnischen, marketinggetriebenen Stylings betrieben wurde, um Verkaufszahlen zu steigern (Meikle 2005).

Durch den Fokus des Industriedesigns (auch) auf nicht-technische Merkmale verläuft der Industriedesignprozess aus Sicht des Ingenieurwesens emotionaler und lateraler, was die Abstimmung und das Verständnis zwischen den beiden Disziplinen erschwert (Goos und Zang 2009). Hinzu kommt, dass oft nur eine indirekte Kommunikation zwischen den beiden Disziplinen über die Projektleitung stattfindet, insbesondere wenn eine der beiden Tätigkeiten durch externe Dienstleister übernommen oder an einem anderen Standort ausgeführt wird (Schade 2007, S. 234).

Die unterschiedliche Prägung der beiden Disziplinen und die unterschiedlichen Wissens- und Kompetenzprofile sind enorm wichtig und für die Entwicklung von komplexen Produkten unter den eingangs erläuterten Rahmenbedingungen unbedingt erforderlich. Wichtig ist, dass Vertreterinnen

und Vertreter beider Disziplinen von vorneherein eng zusammenarbeiten und das Industriedesign die Aufgabenstellung von Beginn an mitbestimmt (Richtlinie VDI 2221; Engeln 2019; Pahl et al. 2013). Allgemeingültige Integrationsmethoden, die die bekannten Problematiken der Zusammenarbeit und systematischen Integration des Industriedesigns lösen, sind zwar in der Theorie vorhanden und werden in der Forschung bearbeitet (u.a. Götz und Maier 2006; Peters 2004; Goos und Zang 2009). Dennoch führt die Schnittstelle Technik-Industriedesign in der Praxis immer wieder zu Problemen in der Zusammenarbeit, was zu ungeplanten Anpassungsprozessen, Diskussionen und Konflikten führt (Goos und Zang 2009, S. 5). Eine genauere Betrachtung der Schnittstelle Technik-Industriedesign ist daher nötig, um so vermeidbare Reibungsverluste in der Praxis zu minimieren.

2.2 Fachliche und funktionale Heterogenität

Die Unterschiede in Prägung, Wissen und Kompetenzen von Ingenieurinnen und Ingenieuren im Vergleich zu Industriedesignerinnen und Industriedesignern definieren bei der Zusammenarbeit in Produktentwicklungsteams einen gewissen Grad an Heterogenität. Heterogenität, auch als Diversity bezeichnet, ist ein viel erforschtes Themengebiet, in dem seit den 1990er-Jahren unterschiedlichste Heterogenitätsmerkmale und deren Auswirkungen auf Teams untersucht werden.

Im Kontext der Produktentwicklung spielen vor allem die Heterogenität in Bezug auf den fachlichen Hintergrund sowie die funktionale Zugehörigkeit, die beide hochgradig aufgaben-/berufsbezogen sind (Jackson et al. 1995), eine wesentliche Rolle. Demografische Merkmale wie Alter, Geschlecht, Herkunft, Werte etc. sollen an dieser Stelle ausgeblendet werden, da sie nur eine niedrige Berufsbezogenheit aufweisen (ebd.) Die fachliche und funktionale Heterogenität können wie folgt voneinander abgegrenzt werden: Die fachliche Heterogenität beschreibt Unterschiede der Teammitglieder im Bildungs- und Erfahrungshintergrund und somit hinsichtlich fachbezogener Fähigkeiten, Kompetenzen, und Expertisen sowie Fachwissen. Sie bezieht sich auf die Zugehörigkeit der Teammitglieder zu unterschiedlichen Disziplinen und Berufsgruppen und ist wenig sichtbar. Die funktionale Heterogenität bezieht sich auf die unterschiedliche Zugehörigkeit der Teammitglieder zu feststellbaren und getrennten Funktionsbereichen (bspw. Abteilungen) innerhalb des Unternehmens und bezüglich deren Ziele, Prozesse, Methoden und Werkzeuge.

Im Hinblick auf die Produktentwicklung kann die funktionale Heterogenität mit dem geläufigen Begriff Cross-Funktionalität gleichgesetzt werden, während fachliche Heterogenität in enger Verbindung zur Interdisziplinarität steht (Gebert 2004).

3 Qualitative Metaanalyse zur fachlichen und funktionalen Heterogenität

Ziel der Metaanalyse ist es, Untersuchungen zu fachlich und funktional heterogenen Teams daraufhin zu analysieren, ob zu bestimmten Parametern eine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann bzw. welche Parameter und Zusammenhänge überhaupt untersucht werden.

Ein Blick in die Management-Literatur zeigt einerseits Vorteile wie ein höheres Kreativitätspotenzial, eine flexiblere Lösungssuche oder mehr Offenheit für Ideen und externen Input (Comelli et al. 2014). Auf der anderen Seite gehen mit ihr auch ein höheres Konfliktpotenzial (Pelled et al. 1999), Uneinigkeiten (Lovelace et al. 2001) und Probleme in der Zusammenarbeit einher. Eine einheitliche Aussage, wann sich Heterogenität in Arbeitsteams positiv bzw. negativ auswirkt, lässt sich auf den ersten Blick nicht treffen.

Die systematische Gegenüberstellung von Ergebnissen verschiedener Studien soll daher zeigen, ob die beschriebenen Ambivalenzen tatsächlich vorhanden sind oder nicht. Zudem soll untersucht werden, ob die bisher durchgeführten Untersuchungen Aussagen im Spezifischen zur Zusammenarbeit zwischen Technik und Industriedesign zulassen bzw. wo noch Lücken vorhanden sind, die anhand weiterer eigener Untersuchungen geschlossen werden können.

3.1 Methodik der Metaanalyse

In der qualitativen Metaanalyse wurden insgesamt 27 Studien zur fachlichen und funktionalen Heterogenität analysiert und der darin beschriebene Einfluss auf Arbeitsteams untersucht. Dabei wurden deutsch- und englischsprachige Veröffentlichungen in Journals und Tagungen im Fachgebiet der Arbeits- und Organisationswissenschaften, der Arbeitspsychologie und dem strategischen Management identifiziert. Der Veröffentlichungszeitraum umfasst die Jahre 1990 bis 2020, da in den 1990er-Jahren viel Grundlagenforschung stattfand, die heute noch referenziert wird. Es fand bewusst keine Beschränkung auf Untersuchungen im Produktentwicklungsumfeld statt, um auch wichtige Erkenntnisse abseits der Schnittstelle Technik-Industriedesign zu gewinnen.

Neben Feld-, Labor- und Datenstudien wurden ebenfalls Metaanalysen berücksichtigt. Zwar wurden auch qualitative und explorative Untersuchungen beachtet, bspw. in Form relevanter Dissertationen, der Hauptfokus lag jedoch auf quantitativen Studien, in denen die Heterogenität gemessen und ihr Einfluss auf Team-Parameter untersucht wird. Die folgenden Parameter wurden als Untersuchungsgegenstand der Studien identifiziert:

- Team-Leistung (Qualität und Quantität; wahrgenommene und tatsächliche Leistung; Einhaltung von Zeitplänen, Budget- und technischen Qualitätsvorgaben)
- Innovation und Kreativität
- Sach-/Aufgabenkonflikte und emotionale Konflikte
- Zusammenarbeit und Kooperation
- Zusammenhalt und (soziale) Integration
- interne und externe Kommunikation
- Informationsnutzung und –integration
- weitere Moderationseffekte wie bspw. Aufgabenkomplexität, Teamgröße, Projektdauer, Unternehmensgröße, Alter und Geschlecht der Teammitglieder

Um die Übertragbarkeit auf die Produktentwicklung zu ermöglichen, beschränkt sich die Metaanalyse auf sogenannte „lower-level“-Teams, da hier am ehesten die interdisziplinäre, cross-funktionale Zusammenarbeit in Produktentwicklungsteams mit der Schnittstelle Technik-Industriedesign abgebildet wird. Reine Top-Management-Team-Untersuchungen wurden ausgeklammert.

3.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die für die Produktentwicklung relevantesten Ergebnisse umrissen. Eine ausführliche Übersicht über die identifizierten Untersuchungen sowie eine systematische Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Göhring (2020) zu finden.

3.2.1 Konflikte

Während sich in Bezug auf die Innovativität kein eindeutiger Zusammenhang feststellen lässt und auch in Bezug auf die Leistung keine eindeutige Aussage getroffen werden kann, zeichnet sich bei den Konflikten ein eindeutigeres Bild ab. So löst aufgabenbezogene Heterogenität in der Regel Sachkonflikte aus. Das gilt übergreifend für die fachliche als auch die funktionale Heterogenität, die in den Untersuchungen aufgrund fehlender Daten nicht immer zweifelsfrei abgegrenzt werden kann. Diese Konflikte beziehen sich auf die zu lösende Aufgabe und sind förderlich für den Austausch auf professioneller Ebene, ohne dabei zwischenmenschliche, emotionale Konflikte auszulösen (Jehn 1994). Sachkonflikte sind naheliegend und sozusagen als positive Reibung im Team gewollt, was auch auf die Produktentwicklung und deren Schnittstelle Technik-Industriedesign zutrifft. Durch diese substantiellen Konflikte wird die Problemstellung tiefergehender diskutiert, wodurch bessere Ergebnisse und indirekt auch eine bessere Teamleistung erreicht wird.

3.2.2 Kommunikation

Auch in der Kommunikation heterogener Teams lassen sich zwei gegenläufige Effekte feststellen: Zum einen steigt in funktional heterogenen Teams die externe Kommunikation, es findet also mehr Kommunikation mit Personen außerhalb des Teams statt. Das lässt sich vor allem auf die bessere Vernetzung der Teammitglieder in ihren jeweiligen Funktionsbereichen zurückführen, wodurch das externe Netzwerk eher zu Rate gezogen wird (Keller 2001; Ancona und Caldwell 1992). Diese hohe externe Kommunikation wirkt sich positiv auf die Team-Leistung aus, hat jedoch negative Auswirkungen auf den Zusammenhalt innerhalb des Teams.

Als zweiter Effekt ist eine Verschlechterung sowohl der Quantität als auch der Qualität der internen Kommunikation in funktional und allgemein aufgabenbezogen heterogenen Teams erkennbar. Das deutet darauf hin, dass die Vertreterinnen und Vertreter unterschiedlicher Funktionsbereiche nicht ausreichend miteinander kommunizieren, wobei die Gründe dafür vielfältig sein können und weiter untersucht werden müssen. Die interne Kommunikation scheint sich jedoch positiv auf den Zusammenhalt eines Teams auszuwirken (Keller 2001), da wichtige Netzwerke, Verbindungen und Beziehungen der Teammitglieder durch interne Kommunikation entstehen. Durch diese indirekte Mediation von interner Kommunikation zwischen Heterogenität und Zusammenhalt lassen sich auch die immer wieder im Zusammenhang mit der Produktentwicklung geschilderten Koordinations- und Kooperationsprobleme an der Schnittstelle Technik-Industriedesign erklären.

3.2.3 Kooperation

Die explizite, direkte Untersuchung des Zusammenhangs von Kooperation und Heterogenität findet in den Untersuchungen auf qualitativer Ebene statt, vor allem in deutschsprachigen Untersuchungen. Die Autorinnen und Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass in fachlich und funktional heterogenen Teams Kooperationsprobleme allgegenwärtig sind (Gebert 2004; Steinheider und Legrady 2001; Schade 2007). Es wird jedoch auch immer wieder betont, dass durch richtige Strategien und Interventionen Kooperationsprobleme überwunden werden können und so die Heterogenität gewinnbringend genutzt werden kann.

3.2.4 Wissens- und Informationsintegration

In lediglich zwei Studien wird explizit die Informations- und Wissensintegration untersucht, davon einmal im Zusammenhang mit der funktionalen (Steinheider und Legrady 2001) und einmal mit der fachlichen Heterogenität (Dahlin et al. 2005). In beiden Fällen ist der Zusammenhang signifikant negativ. Die Zusammenführung der Informationen und letztlich des Wissens der Teammitglieder ist in heterogenen Teams also schlechter als in homogenen Teams.

Partielles Wissen auszutauschen ist jedoch die Basis für ein gemeinsames Verständnis von Inhalten, Produkten und Betriebsmitteln (Steinheider und Legrady 2001). Die Wissensintegration ist der Ausgangspunkt, damit Kommunikation und Koordination gelingen können und ein gemeinsames Verständnis von Begriffen und Zusammenhängen geschaffen wird (ebd.). Die Metastudie zeigt, dass fachlich heterogene Teams weniger in der Lage sind, Themen innerhalb von Problemen miteinander zu verbinden, da diese Verbindungen Kenntnisse über alle relevanten Inhaltsbereiche erfordern (Dahlin et al. 2005). Bei fachlichen heterogenen Teams ist dieses Wissen jedoch verteilt und muss erst überbrückt werden (ebd.).

3.2.5 Nichtlineare Zusammenhänge

In den Untersuchungen lassen sich an einigen Stellen kurvenförmige Zusammenhänge zwischen der fachlichen und/oder funktionalen Heterogenität und den Parametern erkennen. So beschreiben Ihl und Graf (2019) eine mittlere Wissensheterogenität als Optimum für das Generieren von Neuheit. Eine höhere Wissensvielfalt geht also nicht automatisch mit einer höheren Neuheit einher, sondern diese nimmt im Gegenteil mit zunehmender Heterogenität wieder ab. Auch Curşeu et al. (2012)

beschreiben nichtlineare Zusammenhänge zwischen fachlicher Heterogenität und der Reichweite des externen Netzwerks. Bei Dahlin et al. (2005) nimmt zwar die Integration von Informationen mit zunehmender fachlicher Heterogenität ab, jedoch gibt es sowohl bei der Tiefe als auch der Reichweite der Informationsnutzung einen umgekehrt U-förmigen Zusammenhang, mit einem Optimum bei einer moderaten fachlichen Heterogenität. Webber und Donahue (2001) erklären sich ihre Ergebnisse ebenfalls damit, dass eventuell ein U-förmiger Zusammenhang zwischen Heterogenität und Kohäsion besteht, auch wenn sie diesen nicht beweisen können. Bei Hoisl et al. (2014) findet sich ein kurvenförmiger Einfluss von Wissensüberschneidung auf die Teamleistung. Eine mittlere Wissensüberschneidung ist demnach besser als eine sehr niedrige oder hohe. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass nicht immer ein Maximum oder auch Minimum an Heterogenität erstrebenswert ist, sondern je nach Aufgabe, Ziel und Problematik eines Teams auch ein moderates Level das Optimum darstellen kann.

3.2.6 Fazit

Allgemein lässt sich sagen, dass die Auswirkungen von fachlicher und funktionaler Heterogenität komplex sind und viele Wechselwirkungen zwischen den Effekten auftreten. Hinzu kommen Moderations- und Mediationeffekte, die die Zusammenstellung und Steuerung eines Teams, auch in der Produktentwicklung, noch komplexer machen. Die Metaanalyse bestätigt, dass Heterogenität nicht grundsätzlich positiv oder negativ bewertet werden kann. Sie zeigt jedoch auch, dass bezüglich der in Bild 1 dargestellten Parameter durchaus Konsens besteht. Einige der eingangs erwähnten Parameter werden nur in einzelnen Studien untersucht, wodurch nicht zu jedem eine belastbare Aussage getroffen werden kann.

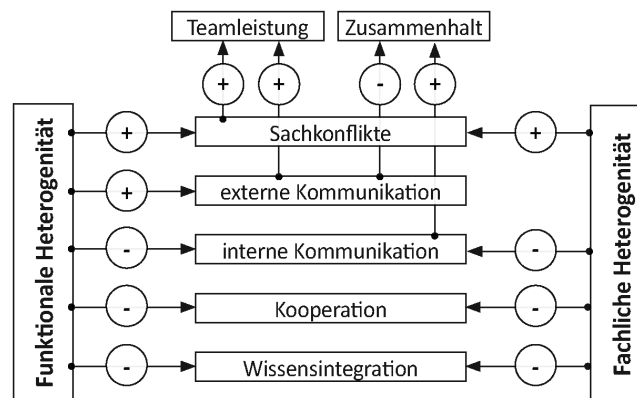


Bild 1: Übersicht der festgestellten linearen Effekte der funktionalen bzw. fachlichen Teamheterogenität

Die Ergebnisse zeigen, wie schwierig es ist, die richtige fachliche und funktionale Teamzusammensetzung zu wählen und wie unterschiedlich sich eine aufgabenbedingt zwingend vorhandene Heterogenität auf das Team auswirkt. So kann es sein, dass sich durch die Veränderung in einem Produktentwicklungsteam, bspw. durch eine fachliche Nachschulung der Teammitglieder, die Heterogenität verändert und dadurch eine Variable stark verbessert, eine andere jedoch stark verschlechtert wird. Die in der Literatur beschriebene Ambivalenz der Team-Heterogenität bestätigt sich mit dieser Metaanalyse, für einzelne Parameter (s. Bild 1) kann jedoch eine klarere Aussage getroffen werden.

3.3 Produktentwicklungsbezug und Übertragbarkeit auf die Produktentwicklung

Die im Rahmen der Metaanalyse betrachteten Untersuchungen beinhalten keine großangelegten, quantitativen Studien im deutschsprachigen oder europäischen Raum zur fachlichen und funktionalen Heterogenität in der Produktentwicklung, in der die Schnittstelle Technik-

Industriedesign betrachtet wird. Hier ist also eine Forschungslücke erkennbar, auch wenn durchaus qualitative oder explorative Betrachtungen vorhanden sind.

Feith (2014) nähert sich der Thematik bspw. auf sprachwissenschaftlicher Ebene. Schade (2007) betrachtet mithilfe von qualitativen Expert:inneninterviews die Veränderungen der Anforderungen an das Industriedesign und dessen Schnittstelle mit der Technik im Rahmen der globalen Wertschöpfung. In der Studie von Hoisl et al. (2014), die die Zusammenarbeit in Formel-1-Teams untersucht, wird Design als beteiligte Disziplin zumindest erwähnt, auch wenn unklar bleibt, wie Design hier verstanden werden kann. Und auch Nakata und Im (2010) erwähnen das Industriedesign als beteiligte Disziplin in ihrer Studie im US-amerikanischen Raum, ohne jedoch weiter auf die Schnittstelle einzugehen. Die meisten Produktentwicklungsstudien der Metaanalyse untersuchen vorrangig Hochtechnologie-Branchen wie Elektronik, Informationstechnik oder Kommunikationstechnik, in denen die Schnittstelle zum Industriedesign keine oder nur eine geringe Rolle spielt.

Auch bei den quantitativen Studien im US-amerikanischen Raum werden keine Teams mit expliziter Beteiligung des Industriedesigns betrachtet. Wie bereits beschrieben, ist die Differenzierung zwischen der technischen Konstruktion eines Produkts und dem Industriedesign im englischsprachigen Raum nicht immer trennscharf und Begriffe werden uneinheitlich verwendet. In den Untersuchungen wird daher meist nicht klar, welche Disziplinen untersucht werden und ob das Industriedesign mitinbegriffen ist. Hinzu kommt, dass die US-amerikanische Produktentwicklung im Vergleich zur deutschen einen geringeren Fokus auf technische Detaillierung und dafür einen größeren Schwerpunkt auf die marketinggetriebene Produkteinführung legt (Simpson et al. 2002). Wie eingangs beschrieben, könnte dies auf die marketing-getriebene Entstehungsgeschichte des US-amerikanischen Industriedesigns zurückzuführen sein. Es ist daher fraglich und weiter zu überprüfen, inwiefern die Ergebnisse aus dem US-amerikanischen Raum direkt auf die deutsche Produktentwicklung übertragbar sind.

Davon unabhängig ist, dass die in den Ergebnissen beschriebenen Probleme bezüglich interner Kommunikation, Kooperation und Wissensintegration auch in der Praxis für die Schnittstelle Technik-Industriedesign beschrieben werden und dass für die Betrachtung von fachlicher und funktionaler Heterogenität in der deutschen Produktentwicklung an der Schnittstelle Technik-Industriedesign eine Forschungslücke vorhanden ist.

4 Brücken in der interdisziplinären, cross-funktionalen Produktentwicklung

Sowohl in den untersuchten Studien als auch in der darüber hinausreichenden Literatur werden immer wieder Brücken verschiedenster Art beschrieben, die die negativen Effekte der Heterogenität abmildern. Brücken betonen die Gemeinsamkeiten, anstatt nur die Unterschiede zu sehen (Mannix und Neale 2005, S. 46). Genannte Möglichkeiten zum Brückenschlag sind bspw. eine gemeinsame Unternehmenskultur, gemeinsame Ziele (Mannix und Neale 2005, S. 45), Dialoggruppen (Keller 2001, S. 554) oder eine gemeinsame Team-Identität (Gebert 2004, S. 425).

Da es sich bei der Produktentwicklung um eine Wissensarbeit handelt, bei der Spezialistinnen und Spezialisten verschiedener Disziplinen ihr Fachwissen zusammenbringen (Engeln 2019, S. 168), sind auch „Wissensbrücken“ für die interdisziplinäre, cross-funktionale Produktentwicklung ein wichtiges Thema.

4.1 Wissensheterogenität und Wissensüberschneidung

Zunächst ist es wichtig, die Wissensheterogenität bzw. –vielfalt von der Wissensüberschneidung abzugrenzen. Wissensheterogenität und Wissensüberschneidung sind keine zwei entgegengesetzte, sich einander ausschließende Zustände, sondern zumindest teilweise voneinander unabhängige Parameter (Hoisl et al. 2014; Ihl und Graf 2019). Ein Team kann sowohl insgesamt eine hohe Wissensheterogenität besitzen und dennoch zwischen den Teammitgliedern große Überschneidungen des vorhandenen Wissens aufweisen. Die Wissensheterogenität und deren

Vorteile müssen also nicht zugunsten einer Wissensüberschneidung „geopfert“ werden. Vielmehr gilt es, das Team so zusammenzustellen, dass durch eine ausreichende Wissensheterogenität und Wissensbreite die komplexe Produktentwicklung beherrschbar gemacht wird und dabei ausreichend Wissensüberschneidung vorhanden ist, um die Zusammenarbeit zielgerichtet zu gestalten.

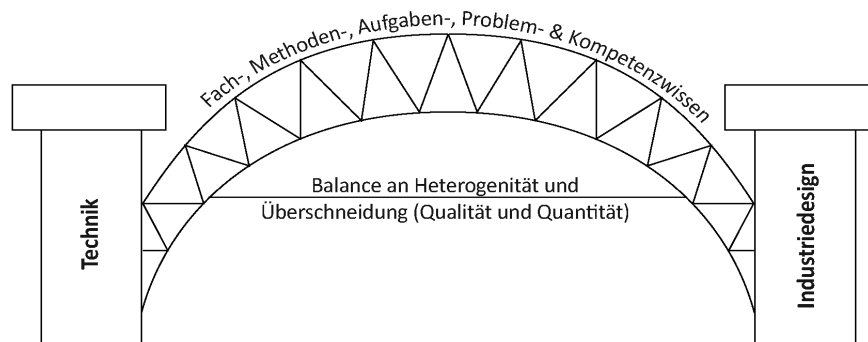


Bild 2: Brücke zwischen Technik und Design in Form von Wissensüberschneidung und –heterogenität

Wie in Bild 2 dargestellt ist, gibt es mehrere Wissensarten, die in der richtigen Balance von Heterogenität und Überschneidung als Brücke zwischen den Disziplinen dienen können. Dabei ist nicht nur die Menge der Überschneidung für eine funktionierende Überbrückung wichtig, sondern auch die qualitativen Eigenschaften der Überschneidung (Han et al. 2018, S. 259). Bei einer Untersuchung der Zusammenarbeit zweier Firmen zeigte sich bspw., dass nur die Überschneidung qualitativ hochwertigen Wissens (bspw. Technologiewissen) eine positive Korrelation mit der Leistung hatte und sich dessen fehlende Überschneidung negativ auf die Leistung auswirkte (ebd.).

4.2 Fach- und Methodenwissen

Eine für diesen Zweck zu beachtende Wissensart ist das individuelle Fach- und Methodenwissen der Teammitglieder (Taylor und Greve 2006; Ihl und Graf 2019). Indem es überbrückt und übersetzt wird, kann die in heterogenen Teams erschwerte Wissensintegration verbessert werden (Cronin und Weingart 2007). Zumindest in einigen Bereichen müssen die Teammitglieder ähnliches oder kompatibles Wissen besitzen und auch verwenden, um ihre Aktivitäten zu koordinieren und zu steuern (Cannon-Bowers und Salas 2001). Die Zusammenarbeit gelingt dann am besten, wenn das zur Kommunikation nötige gemeinsame Wissen und das exklusive Fachwissen im Gleichgewicht sind (Berliant und Fujita 2011).

Das Fachwissen einer Person prägt außerdem immer auch dessen Fachsprache (Feith 2014). Durch unterschiedliche Fachbegriffe, die von Vertreterinnen und Vertretern einer anderen Disziplin nicht verstanden oder anders gedeutet werden, wird die Zusammenarbeit und Kooperation erschwert. Es ist jedoch nicht nötig und auch nicht erstrebenswert, dass das Fachwissen in den beiden Bereichen identisch ist. Vielmehr ist es wichtig, sich mit dem Fach- und Methodenwissen der jeweils anderen Disziplin auseinanderzusetzen und ein gewisses Maß an Metawissen zu besitzen.

4.3 Aufgaben-, Problem- und Kompetenzwissen

Auch ein Verständnis über die Kompetenzen und Ausbildungsinhalte der jeweils anderen Disziplin ist wichtig für eine reibungsfreie Zusammenarbeit (Gatzky 2014). Dass im Industriedesign und dem Ingenieurwesen unterschiedliche Gestaltungskompetenzen vorhanden sind, ist ein essentieller Grund für die interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Produktentwicklung. Es geht also nicht darum, diese Gestaltungskompetenzen einander anzugleichen, sondern darum, die Gestaltungskompetenzen der anderen Disziplinvertreterinnen und –vertreter zu verstehen, nachzuvollziehen und zu übersetzen, um Prozessschritte, Entscheidungen und Produkteigenschaften objektiv diskutieren zu können.

Durch das fachspezifische Wissen der Vertreterinnen und Vertreter einer Disziplin entstehen zudem bei der Bearbeitung einer gemeinsamen Aufgabe in der Kognition der Teammitglieder unterschiedliche Problemdarstellungen (Cronin und Weingart 2007). Es entstehen sogenannte „representational gaps“ (ebd.). Werden diese Lücken in der Problemdarstellung nicht geschlossen, kann keine Zusammenarbeit erfolgen bzw. sie ist nicht konfliktfrei möglich (ebd.). Wenn ein Team jedoch über gemeinsames Problem- und Aufgabenwissen verfügt, können Koordinierungskosten reduziert werden, da weniger Missverständnisse auftreten (Hoopes und Postrel 1999).

So ist es für Industriedesignerinnen und Industriedesigner bspw. wichtig zu verstehen, dass die ingenieurwissenschaftliche Arbeit gewissen technologischen, naturwissenschaftlichen und gesetzlichen Einschränkungen unterliegt, dass Normen und Richtlinien einzuhalten sind und dass oft auch Restriktionen durch das eigene Unternehmen oder Nutzerinnen und Nutzer gegeben sind, die allesamt die Gestaltung einschränken. Auf der anderen Seite muss den Ingenieurinnen und Ingenieuren bewusst sein, dass im Design diese Einschränkungen nicht bekannt sind oder zugunsten der Kreativität zunächst bewusst ausgeblendet werden, wodurch sich Industriedesignerinnen und Industriedesigner besser auf die Nutzerinnen und Nutzer konzentrieren können, auch wenn nicht alle Lösungen später umsetzbar sind. Mit diesem gegenseitigen Wissen kann die interne Kommunikation und die Kooperation verbessert werden, da viele Missverständnisse gar nicht erst entstehen.

Diesen Ansatz macht sich bspw. das technische Design zunutze. Da bereits in der Ausbildung die Aufgabengebiete, Zuständigkeiten und Grenzen sowohl des Industriedesigns als auch der Ingenieurwissenschaften sowie die Schnittstellen kennengelernt werden, erhöht sich das Verständnis füreinander.

5 Fazit und Ausblick

In der Metaanalyse wurde gezeigt, dass in fachlich und funktional heterogenen Teams vor allem eine schlechte interne Kommunikation sowie Probleme bei der Kooperation und bei der Wissens- und Informationsintegration auftreten. Da die Parameter sich wesentlich auf die Teamleistung auswirken, ist es erstrebenswert, diese negativen Einflüsse zu verringern. Kapitel 4 zeigt auf, dass Wissens- und Kompetenzbrücken die genannten Parameter und dadurch die Zusammenarbeit und Teamleistung verbessern können. Bild 3 verdeutlicht diese Annahme, die im vorliegenden Beitrag hergeleitet und begründet wurde.

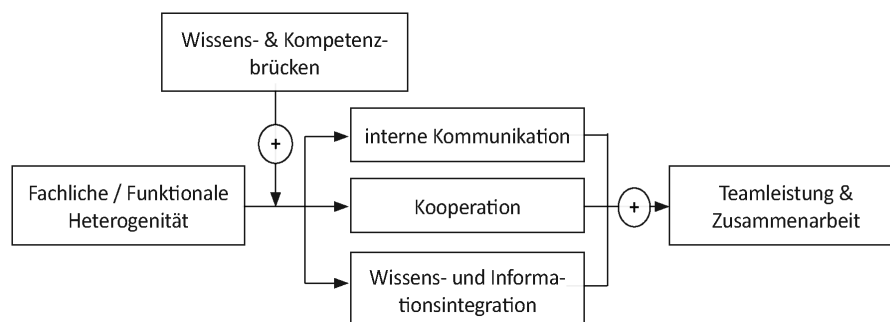


Bild 3: Erwartete Auswirkung von Wissens- und Kompetenzbrücken

Auch wenn, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, eine direkte und vollumfängliche Übertragung aller Ergebnisse auf die deutsche Produktentwicklung mit der Schnittstelle Technik-Industriedesign zumindest fraglich ist, zeigt die Praxis, dass die Problemlage auch hier vorhanden ist. Wirklich greifbare Ergebnisse zum spezifischen Thema Technik-Industriedesign, ob Wissensbrücken die Zusammenarbeit verbessern können und wie diese ggf. qualitativ und quantitativ gestaltet sein müssen, sind aktuell jedoch nicht vorhanden.

Die Erkenntnisse der Metaanalyse sowie die Vermutung, dass durch Wissensbrücken die Zusammenarbeit in der Produktentwicklung verbessert werden kann, müssen nun für die besagte Schnittstelle überprüft werden. Wie bereits beschrieben, sind die Zusammenhänge der Team-

Heterogenität zu komplex, als dass allgemeingültige Aussagen für alle Teamarten und alle Parameter getroffen werden können. Daher ist es nötig, das Untersuchungsfeld zu fokussieren. Den Auftakt dieser weiterführenden Forschung bildet eine Analyse der Wissens- und Kompetenzprofile im Industriedesign sowie dem Ingenieurwesen mit einem Fokus auf den Maschinenbau. Darauf aufbauend wird eine Befragung von Studierenden sowie Absolventinnen und Absolventen der beiden Disziplinen durchgeführt, um zum einen den subjektiven Ist-Zustand der vorhandenen Kompetenzen und des Fachwissens abzufragen und zum anderen auch gegenseitige Erwartungen, Fremdeinschätzungen und möglicherweise Fehleinschätzungen feststellen zu können. Mithilfe dieser Ergebnisse sollen weitere Aussagen über den Brückenschlag zwischen Technik und Industriedesign in der Produktentwicklung getroffen und ein konkretes Studiendesign zur Validierung der Erkenntnisse entwickelt werden.

Literatur

- Ancona 1992 ANCONA, Deborah Gladstein ; CALDWELL, David F.: *Demography and Design : Predictors of New Product Team Performance*. In: *Organization Science* 3 (1992), Nr. 3, S. 321–341
- Bender et al. 2021 BENDER, Beate et al. 2021: *Gestaltungsrichtlinien*. In: BENDER, Beate; GERICKE, Kilian (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg; Springer Vieweg, 2021, S. 567–828
- Berliant und Fujita 2011 BERLIANT, Marcus; FUJITA, Masahisa: *The dynamics of knowledge diversity and economic growth*. In: *Southern Economic Journal* 77 (2011), Nr. 4, S. 856–884
- Cannon-Bowers und Salas 2001 CANNON-BOWERS, Janis A.; SALAS, Eduardo: *Reflections on shared cognition*. In: *Journal of Organizational Behavior: The International Journal of Industrial, Occupational and Organizational Psychology and Behavior* 22 (2001), Nr. 2, S. 195–202
- Comelli und Rosenstiel 2014 COMELLI, Gerhard; ROSENSTIEL, Lutz.; NERDINGER, Friedemann. W.: *Führung durch Motivation : Mitarbeiter für die Ziele des Unternehmens gewinnen*. 5. Aufl. München : Vahlen, 2014
- Cronin und Weingart 2007 CRONIN, Matthew; WEINGART, Laurie R.: *Representational gaps, information processing, and conflict in functionally diverse teams*. In: *Academy of management review* 32 (2007), Nr. 3, S. 761–773
- Curşeu et al. 2012 CURŞEU, Petru L.; RAAB, Jörg; HAN, Jing; LOENEN, Aukje: *Educational diversity and group effectiveness : A social network perspective*. In: *Journal of Managerial Psychology* 27 (2012), Nr. 6, S. 576–594
- Dahlin et al. 2005 DAHLIN, Kristina B.; WEINGART, Laurie R.; HINDS, Pamela J.: *Team diversity and information use*. In: *Academy of Management Journal* 48 (2005), Nr. 6, S. 1107–1123
- Eckert und Schadewitz 2011 ECKERT, Claudia; SCHADEWITZ, Nicole: *Disziplinen der Produktentwicklung aus der Perspektive des angelsächsischen Raums*. In: BANSE, Gerhard (Hrsg.): *Wissenschaft im Kontext : Inter- und Transdisziplinarität in Theorie und Praxis*. 1. Aufl. Berlin : trafo-Wiss.-Verl., 2011 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften Berlin, 27), S. 243–254
- Engeln 2019 ENGELN, Werner: *Produktentwicklung : Herausforderungen, Organisation, Prozesse, Methoden und Projekte*. 1. Auflage. Essen : Vulkan Verlag, 2019

- Feith 2014 FEITH, Alexandra: *Zur Fachkommunikation interdisziplinärer Teams in der Produktentwicklung*. Darmstadt, Technische Universität. Dissertation. 2014.
- Gatzky 2014 GATZKY, Thomas: Industriedesign. In: VAJNA, Sándor (Hrsg.): *Integrated Design Engineering : Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung*. Berlin : Springer Vieweg, 2014, S. 133–166
- Gebert 2004 GEBERT, Diether: *Durch diversity zu mehr Teaminnovativität? : Ein vorläufiges Resümee der empirischen Forschung sowie Konsequenzen für das diversity Management*. In: *Die Betriebswirtschaft* 64 (2004), Nr. 4, S. 412–430
- Göhring 2020 GÖHRING, Alexandra: Auswirkungen fachlicher und funktionaler Heterogenität auf Arbeitsteams – eine Metaanalyse. In: KRZYWINSKI, Jens; WOELFEL, Christian (Hrsg.): *Design Research 2020 · Kolloquium Technisches Design Dresden*. Neuerscheinung : TUDpress, 2020 (Reihe Technisches Design, 14), S. 99–135
- Goos 2020 GOOS, Jürgen: Produktdesign als wichtiges Element der Produktentwicklung. In: ENGELN, Werner (Hrsg.): *Methoden der Produktentwicklung*. 3. Aufl. Essen : Vulkan Verlag, 2020, S. 183–187
- Goos und Zang 2009 GOOS, Jürgen; ZANG, Rupert: *Lösungen für eine neuartige Integration von Produktdesign in den Produktentwicklungsprozess für die Investitionsgüterbranche : Abschlussbericht, Stiftung Industrieforschung*. Pforzheim, 2009
- Götz et al. 2006 GÖTZ, Annika; MAIER, Thomas: Design for Humans – Differenzierung und Integration von Konstruktion und Technischem Design in der Produktentwicklung. In: *DFX 2006: Proceedings of the 17th Symposium on Design for X, Neukirchen/Erlangen, Germany, 12.-13.10. 2006*, 2006, S. 115–122
- Hacker 2005 HACKER, Winfried: Aufgabendienlichkeit von Produkten zwischen Konstruktion und Design. In: REESE, Jens (Hrsg.): *Der Ingenieur und seine Designer : Entwurf technischer Produkte im Spannungsfeld zwischen Konstruktion und Design*. Berlin : Springer, 2005 (VDI-Buch), S. 289–295
- Han et al. 2018 HAN, John; JO, Gil S.; KANG, Jina: *Is high-quality knowledge always beneficial? Knowledge overlap and innovation performance in technological mergers and acquisitions*. In: *Journal of Management & Organization* 24 (2018), Nr. 2, S. 258–278
- Hoisl et al. 2014 HOISL, Karin; GRUBER, Marc; CONTI, Annamaria: Knowledge diversity & knowledge overlap in R&D teams : Evidence from the Formula 1 motorsport industry. In: *Paper present at DRUID Society Conference, 2014*, S. 16–18
- Hoopes und Postrel 1999 HOOPES, David G.; POSTREL, Steven: *Shared knowledge, "glitches," and product development performance*. In: *Strategic Management Journal* 20 (1999), Nr. 9, S. 837–865
- Ihl und Graf 2019 IHL, Christoph; GRAF, Dimitri: Contingent Effects of Team Knowledge Diversity on Novelty in Management Research, Bd. 2019. In: *Academy of Management Proceedings*, 2019, S. 18636
- Jackson et al. 1995 JACKSON, Susan E.; MAY, Karen E.; WHITNEY, Kristina: *Understanding the dynamics of diversity in decision-making teams*. In: *Team effectiveness and decision making in organizations* (1995), S. 204–261

- Jehn 1994 JEHN, Karen A.: *Enhancing effectiveness : An investigation of advantages and disadvantages of value-based intragroup conflict*. In: *International Journal of Conflict Management* (1994), S. 223–238
- Keller 2001 KELLER, Robert T.: *Cross-functional project groups in research and new product development : Diversity, communications, job stress, and outcomes*. In: *Academy of Management Journal* 44 (2001), Nr. 3, S. 547–555
- Lovelace et al. 2001 LOVELACE, Kay; SHAPIRO, Debra L.; WEINGART, Laurie R.: *Maximizing cross-functional new product teams' innovativeness and constraint adherence : A conflict communications perspective*. In: *Academy of Management Journal* 44 (2001), Nr. 4, S. 779–793
- Mannix und Neale 2005 MANNIX, Elizabeth; NEALE, Margaret A.: *What differences make a difference? The promise and reality of diverse teams in organizations*. In: *Psychological science in the public interest* 6 (2005), Nr. 2, S. 31–55
- Meikle 2005 MEIKLE, JEFFREY L.: *Design in the USA*. Oxford : Oxford University Press, 2005 (Oxford History of Art)
- Nakata und Im 2010 NAKATA, Cheryl; IM, Subin: *Spurring cross-functional integration for higher new product performance : A group effectiveness perspective*. In: *Journal of Product Innovation Management* 27 (2010), Nr. 4, S. 554–571
- Pelled et al. 1999 PELLED, Lisa Hope; EISENHARDT, Kathleen M. ; XIN, Katherine R.: *Exploring the Black Box : An Analysis of Work Group Diversity, Conflict, and Performance*. In: *Administrative Science Quarterly* 44 (1999), Nr. 1, S. 1–28
- Peters 2004 PETERS, Sascha: *Modell zur Beschreibung der kreativen Prozesse im Design unter Berücksichtigung der ingenieurtechnischen Semantik*. Universität Duisburg-Essen. Dissertation. 2004
- VDI 2221 Blatt 1 2019 Richtlinie VDI 2221. November 2019. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Modell der Produktentwicklung. Blatt 1*
- Schade 2007 SCHADE, Susanne: *Auswirkungen globaler Wertschöpfung auf deutsches Industrie-und Produktdesign unter besonderer Betrachtung der Schnittstelle Design und Konstruktion/Entwicklung*. Universität Duisburg-Essen. Dissertation. 2007
- Simpson et al. 2002 SIMPSON, James T.; KOLLMANNBERGER, Christine; SCHMALEN, Helmut; BERKOWITZ, David: *New product development in German and US technology firms*. In: *European journal of innovation management* 5 (2002), Nr. 4, S. 194–207
- Steinheider und Legrady 2001 STEINHEIDER, Brigitte; LEGRADY, George: *Kooperation in interdisziplinären Teams in Forschung, Produktentwicklung und Kunst*, Bd. 55. In: GAWRON, Wolf-Rüdiger; RIEDEWALD, Günter; JAUS, Eckard; DÜRRE, Roland; OBERQUELLE, Horst; OPPERMANN, Reinhard; KRAUSE, Jürgen (Hrsg.): *Mensch & Computer 2001*. Stuttgart : Vieweg+Teubner Verlag, 2001 (Berichte des German Chapter of the ACM), S. 37–46
- Taylor und Greve 2006 TAYLOR, Alva; GREVE, Henrich R.: *Superman or the fantastic four? Knowledge combination and experience in innovative teams*. In: *Academy of Management Journal* 49 (2006), Nr. 4, S. 723–740
- Webber und Donahue 2001 WEBBER, Sheila Simsarian; DONAHUE, Lisa M.: *Impact of highly and less job-related diversity on work group cohesion and performance : A meta-analysis*. In: *Journal of Management* 27 (2001), Nr. 2, S. 141–162

Untersuchung zu Betrachtungsmethode und salienten Formmerkmalen bei visuellen Ähnlichkeitsbewertungen

Investigation of the viewing method and salient shape features in visual similarity ratings

Matthias Sebastian Fischer¹, Stefan Weißer¹, Thomas Maier¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design,
Forschungs- und Lehrgebiet Technisches Design, Stuttgart, Deutschland

matthias.fischer@iktd.uni-stuttgart.de

st165180@stud.uni-stuttgart.de

thomas.maier@iktd.uni-stuttgart.de

Abstract: Visuelle Ähnlichkeit ist elementar wichtig für die Markenzuordnung von technischen Produkten. Dieser Beitrag untersucht dafür, ob zwei unterschiedliche Betrachtungsmethoden (simultan und sequenziell) und der Einsatz von identischen salienten (bzw. nicht-salienten) Formmerkmalen Einfluss auf den wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad bei Paarvergleichen hat. Dafür wurde eine Online-Studie (n = 134) mit dem Produktbeispiel Toaster durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der wahrgenommene Ähnlichkeitsgrad bei simultaner und sequenzieller Betrachtungsabfolge unterscheidet. Tendenziell wird bei sequenzieller Betrachtungsabfolge die Ähnlichkeit höher als bei simultaner Betrachtungsabfolge bewertet. Die Existenz von identischen salienten Formmerkmalen führt nicht zu einer höheren Ähnlichkeit im Vergleich zu identischen nicht-salienten Formmerkmalen.

Keywords:

Visuelle Ähnlichkeitsbewertung, Betrachtungsmethode, Saliente Formmerkmale, Corporate Product Design

Abstract : Visual similarity is elementary important for the brand allocation of technical products. This paper examines whether two different viewing methods (simultaneous and sequential) and the use of identical salient (or non-salient) shape features, have an influence on the perceived degree of similarity in pair comparisons. Therefore, an online study (n = 134) with the product example Toaster was conducted. The results show that the perceived degree of similarity differs in simultaneous and sequential viewing sequences. The similarity tends to be rated higher for sequential viewing sequences than for simultaneous viewing sequences. The existence of identical salient shape features does not lead to a higher similarity compared to identical non-salient shape features.

Keywords:

Visual Similarity Evaluation, Viewing Method, Salient Shape Features, Corporate Product Design

1 Einleitung

Durch die große Produktauswahl auf dem globalen Markt werden Produktvergleiche zunehmend wichtiger. Neben dem Vergleich technischer Daten wird dabei (meist unbewusst) die visuelle Ähnlichkeit von Produkten bewertet. Dabei steht die Produktwirkung (Semantik) und Markenzuordnung im Fokus. Durch die Markenzuordnung können positive Erfahrungen oder Kenntnisse über Produkte einer Marke auf weitere Produkte dieser Marke übertragen werden (Kreuzbauer und Malter 2005). Zu einer Marke werden Produkte durch eine ausreichend große visuelle Ähnlichkeit zugeordnet. Im Produktdesign wird dafür auch der Begriff „Corporate Product Design“ verwendet (Watty et al. 2019).

Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Produktähnlichkeit mittels ähnlicher Formen existieren, werden aber nur selten durch Probandenstudien validiert (Fischer et al. 2020). Wenn Ähnlichkeitsstudien durchgeführt werden, ist deren Ablauf zur visuellen Ähnlichkeitsbestimmung relevant, um Studienergebnisse zu vergleichen und zu interpretieren. Meist werden die Produkte paarweise verglichen und ein Ähnlichkeitsgrad ermittelt. Dabei ist von Interesse, inwiefern der ermittelte Ähnlichkeitsgrad von der Betrachtungsmethode abhängt. Bei paarweisen Vergleichen ist die zeitgleiche Betrachtung (Simultanvergleich) und die zeitlich nacheinander erfolgende Betrachtung (Sequenziellvergleich) anwendbar und soll in diesem Beitrag untersucht werden.

Bei der Ausprägung von Formen im Corporate Product Design konzentrieren sich die meisten Forschungen auf einzelne aufmerksamkeitsstarke (saliente) Produktmerkmale. Beim Pkw gehören dazu beispielsweise die Konturen der Scheinwerfer und des Kühlergrills (Keaveney et al. 2012). Diese Merkmale werden in ihren unterschiedlichen Ausprägungen miteinander verglichen. Bisherige Studien betrachten dabei aber nicht, inwiefern sich einzelne Merkmale der Formgestalt bezüglich ihrer Salienz unterscheiden bzw. abstufen lassen. Die Salienz ist nur für die Ermittlung der Produktmerkmale relevant. Ob zwei Produkte mit einem ähnlichen Merkmal mit hoher Salienz im Vergleich zu zwei Produkten mit einem ähnlichen Merkmal mit niedriger Salienz eine andere Ähnlichkeitsbewertung erhalten, wurde bisher nicht betrachtet und soll untersucht werden.

Für die Untersuchung des Einflusses der Betrachtungsmethode und der Formmerkmals-salienz wird eine Online-Studie mit dem Produktbeispiel Toaster durchgeführt, ausgewertet und anschließend diskutiert.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die Formulierung der Forschungshypothesen und die Studie aufgezeigt.

2.1 Formgestalt im Produktdesign

Seeger (2005) teilt die Produktgestalt in Aufbau, Form, Farbe und Grafik ein (siehe Bild 1). Diese können allerdings nur bedingt unabhängig voneinander betrachtet werden.



Bild 1: Aufbau, Form, Farbe und Grafik am Beispiel einer Kaffeetasse nach Holder et al. (2019)

Der Aufbau beschreibt die Anordnung des Produkts aus Grundkörpern analog zu Biederman (1987) (z. B. Zylinder, Kegel, Quader). Diese Grundkörper werden von Flächen überspannt, welche die Teilgestalt Form abbilden. Hier kann der Einsatz von planaren Flächen bis hin zu Freiformflächen

stattfinden. Die Farbe ordnet dem Produkt einen Farbwert inklusive Reflexionsgrad zu. Die Teilgestalt Grafik beinhaltet Logos, Symbole und Buchstaben.

2.2 Betrachtungsmethoden bei visuellen Ähnlichkeitsbewertungen

Ähnlichkeitsbewertungen durch menschliche Betrachtungen entsprechen gefühlsmäßigen bzw. subjektiven Beurteilungen. Diese Vergleiche basieren auf dem Wahrnehmungserlebnis des Betrachters und erfolgen immer mit mindestens zwei Objekten (Brunswig 1910). Vogt (1972) unterteilt Verfahren zur Ähnlichkeitsbewertung in direkte und indirekte Verfahren. Bei direkten Verfahren werden Objekte in einem Paarvergleich mittels einer Skala (z. B. Ordinalskala) verglichen, was in einem Ähnlichkeitsgrad resultiert (Vogt 1972). Zu den indirekten Verfahren zählen unter anderem der Tripelvergleich und das Bilden von direkten Rangfolgen (Vogt 1972).

Nach Brunswig (1910) wird bei der Betrachtungsabfolge zudem zwischen Simultanvergleich und Sequenziellvergleich (auch Sukzessivvergleich) unterschieden:

- Simultanvergleich - zeitgleiche Darstellung der Objekte
- Sequenziellvergleich - zeitlich getrennte Darstellung der Objekte

Bei visuellen Vergleichen sind beide Abfolgen möglich, während bei dem Vergleich von zwei Tönen nur der sequenzielle Vergleich möglich ist. Bei der sequenziellen Betrachtungsabfolge ist der Vergleich nur durch das Gedächtnisbild möglich (Brunswig 1910). Da der Mensch die Aufmerksamkeit den Vergleichsobjekten nicht gleichzeitig zuwenden kann, kann der Simultanvergleich als Abfolge mehrerer Sequenziellvergleiche beschrieben werden (Brunswig 1910).

Psychologische Forschungen zu Betrachtungsabfolgen (simultan & sequenziell) orientieren sich bei visuellen Paarvergleichen vor allem auf die Beantwortung einer nominalen Skala mit den Antwortmöglichkeiten „gleich“ und „unterschiedlich“ (Farell 1985). Der Fokus liegt auf der Beantwortungszeit bei unterschiedlichen Betrachtungsabfolgen (Beispiele: Palmer (1978), Gur und Hilgard (1975)). Vorher gelabelte Paare müssen dabei möglichst schnell als „gleich/ungleich“ kategorisiert werden. Palmer (1978) beobachtete zudem, dass bei Simultanvergleichen doppelt so viele falsche „gleich/unterschiedlich“-Antworten gemacht wurden, wie bei Sequenziellvergleichen. In der Regel werden dabei 2D-Strichmodelle für die Vergleiche eingesetzt.

Rensink (2002) differenziert zwischen Änderung und Unterschied/Ähnlichkeit. Änderung beschreibt dabei eine Umgestaltung über die Zeit, während Unterschied sich auf einen Mangel an Ähnlichkeit der Strukturen bezieht. Der Effekt, dass bei der zeitlichen Abfolge von Szenen nicht alle Änderungen wahrgenommen werden, wird Veränderungsblindheit genannt (Rensink 2002).

Hinsichtlich von Produktbetrachtungen sind Studienbeispiele mit simultaner Betrachtungsabfolge für die Bestimmung des Ähnlichkeitsgrads bekannt (z. B.: Maier (1993), Schreiner et al. (2017)).

2.3 Saliente Merkmale

Die menschliche Aufmerksamkeit kann bewusst durch Absichten und Ziele (z. B. Suche nach Autoschlüssel) oder unfreiwillig durch auffällige Reize gelenkt werden (Anderson et al. 2011). Physikalische Eigenschaften (oder sensorische Merkmale), welche die Aufmerksamkeit bei einem Objekt erregen, werden auch Stimulussalienz genannt (Goldstein 2015). Für Analysen, welche Regionen in einer visuellen Szene salient sind, wird mit Salienzkarten gearbeitet (Parkhurst et al. 2002). Parkhurst et al. (2002) verwenden dabei die Faktoren Farbe, Helligkeit und Orientierung in der Szene für die Berechnung der Salienzkarte. Für die Messung visueller Salienzen wird in der Regel auf Fixationsdaten menschlicher Augenbewegungen zurückgegriffen (Seo und Milanfar 2009).

Nach Tversky (1977) wird bei einem paarweisen Vergleich das salientere Objekt häufiger als Referenzobjekt für die Ähnlichkeitsbewertung genommen, als das weniger saliente Objekt.

Ostrosi et al. (2019) betont die Wichtigkeit von salienten Merkmalen für die Markenzuordnung und untersucht dazu die Geometrie in Form von Charakterlinien von Fahrzeugen. Orbay et al. (2015)

verwendet eine stufenweise Abstrahierung von 3D-Modellen, um die salienten Formmerkmale für die Markenzuordnung zu ermitteln.

3 Forschungslücke und Hypothesen

Nach Kapitel 2.2 werden bei der subjektiven Ähnlichkeitsbewertung zwei Betrachtungsabfolgen (simultan & sequenziell) angewendet. Studien mit beiden Betrachtungsabfolgen haben bisher nicht den Einfluss auf den wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad von zwei Objekten behandelt. Demgegenüber wurden Studien mit realen Produkten bisher meist nur als Simultanvergleich durchgeführt. Unterschiede bei der Bewertung sind aufgrund der Beobachtung von Palmer (1978) (mehr falsche Antworten bei simultaner Betrachtung) und der Veränderungsblindheit zu erwarten. Dies führt zu der ersten Hypothese:

- H1₀: Bei simultaner und sequenzieller Betrachtungsabfolge ist der wahrgenommene Ähnlichkeitsgrad von zwei Produkten nicht unterschiedlich (Nullhypothese).
- H1: Bei simultaner und sequenzieller Betrachtungsabfolge ist der wahrgenommene Ähnlichkeitsgrad von zwei Produkten unterschiedlich.

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, lenken saliente Merkmale die Aufmerksamkeit auf sich und werden dadurch als Referenzobjekte der Ähnlichkeitsbewertung verwendet. Forschungen zu Markenähnlichkeit fokussieren sich auf saliente Merkmale. Allerdings werden dabei nur das Vorhandensein und die geometrische Merkmalsdifferenz untersucht. Inwiefern diese Merkmale unterschiedlich stark die Aufmerksamkeit erregen und dies Auswirkungen auf den wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad hat, wird dabei nicht betrachtet. Dies führt zu der zweiten Hypothese:

- H2₀: Identische saliente Formmerkmale führen nicht zu einem unterschiedlich wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad im Kontrast zu identischen nicht-salienten Formmerkmalen (Nullhypothese).
- H2: Identische saliente Formmerkmale führen zu einem unterschiedlich wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad im Kontrast zu identischen nicht-salienten Formmerkmalen.

4 Versuchsaufbau

Dieses Kapitel beschreibt die Auswahl und Erstellung von Reizmustern und den Studienablauf.

4.1 Reizmuster

Für eine eindeutige und schnelle Erkennung des Produktes soll dieses über eine einfache Produktgestalt verfügen und den Studienteilnehmern bekannt sein. Zudem soll die Produktwirkung möglichst nicht durch Assoziation mit bestehenden Marken oder Modeartikeln beeinflusst werden. Da der Fokus auf Formmerkmalen liegt, muss die Teilgestalt Form über einen ausreichenden gestalterischen Freiheitsgrad verfügen und ein Produktmerkmal muss salient (bzw. nicht-salient) gestaltbar sein. Diese Anforderungen erfüllt der Toaster. Dieser kann anhand der Toasterschlitze eindeutig identifiziert werden. Bei gleichem, quaderförmigem Aufbau kann zudem die Außengestalt in der Form variiert werden. Die Bedienelemente dienen als unterschiedlich salientes Merkmal. Weitere funktionale oder gestalterische Elemente, welche Störfaktoren in der Bewertung bedeuten könnten, sind am Toaster nicht erforderlich. Für eine konsistente Darstellung aller Reizmuster ist der Einsatz realer Produkte nicht möglich. Stattdessen werden eigene Toastermodelle erstellt.

Die Außengestalt des quaderförmigen Grundkörpers (L x B x H: 260 x 160 x 180 mm) wird durch konvexe und konkave Flächen mit identischer Krümmung variiert (Seiten: R750, vorne/hinten: R500) und identisch an den Kanten verrundet (R10). Die Bedienelemente (Schlitten und Timer) befinden sich bei allen Reizmustern an der identischen Stelle. Grafikelemente werden nicht verwendet und die Farbe ist einheitlich grau.

Nach Kapitel 2.3 sind für die Salienzkarte die Faktoren Farbe, Helligkeit und Orientierungen in der Szene relevant. Farb- und Helligkeitsunterschiede entstehen in der Teilgestalt Form durch Reflektion von Licht an Flächen und Kanten. Die Orientierungen sind ebenfalls von der Kantengestaltung abhängig. Die nicht-salienten Bedienelemente werden daher klein und mit einer geringen Anzahl an Flächen und Kanten reduziert gestaltet. Für mehr Reflektionen der salienten Bedienelemente werden diese größer und mit einer höheren Anzahl an Flächen und Kanten (mit weiteren Orientierungen) komplexer modelliert. Die vier resultierenden Reizmuster werden in Parallelprojektion gerendert und sind in Bild 2 dargestellt.

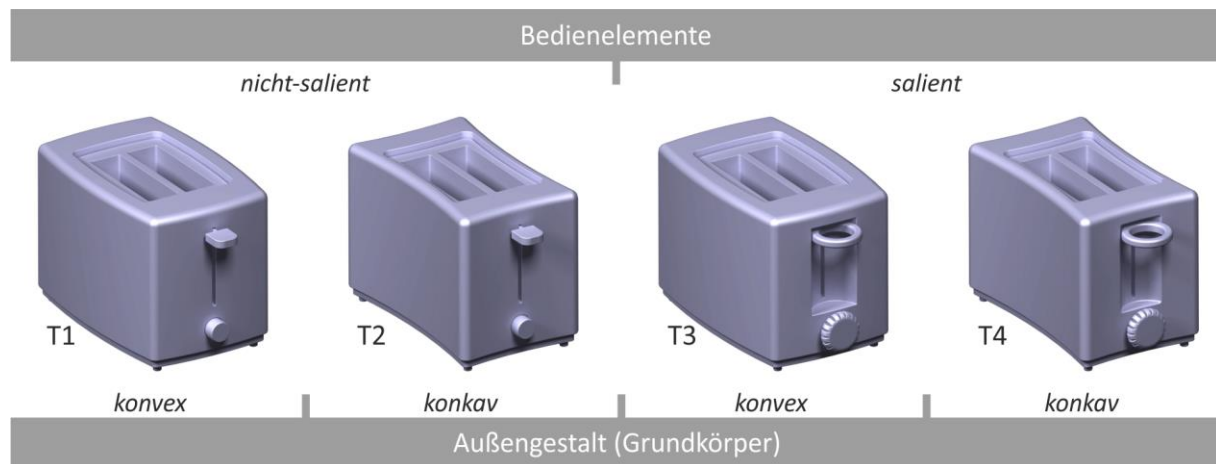


Bild 2: Reizmuster des Toasters für die Studie

4.2 Studienablauf

Der Studienablauf gliedert sich in drei Teile. Der erste Teil dient der Bestätigung der gestalteten salienten (und nicht-salienten) Bedienelemente. Dabei sollen die Teilnehmer bei den Produktpaarungen T1 & T3, T2 & T4, T1 & T2, T2 & T3 jeweils den auffälligeren Toaster auswählen. Hier besteht die Möglichkeit mit „weiß nicht“ bei Unentschlossenheit zu wählen. Die Paarungen mit gleicher Außengestalt (T1 & T3, T2 & T4) dienen dabei zum Nachweis der salienten Merkmale, da hier nur die Bedienelemente variiert werden. Zudem werden durch den ersten Teil bereits alle Reizmuster den Teilnehmern vorgestellt. Dadurch können Decken- und Boden-Effekte in der nachfolgenden Ähnlichkeitsbewertung vermieden werden (Döring und Bortz 2016).

Der zweite Teil der Studie ist der Hauptteil der Umfrage. Hier werden alle möglichen Produktpaarungen einmal simultan und einmal sequenziell von den Teilnehmern bezüglich der Ähnlichkeit, bewertet. Dazu wird eine 7-stufige Rating-Skala mit den Endbeschriftungen „total unähnlich“ und total ähnlich“ verwendet. Bei simultaner Betrachtungsabfolge befindet sich die Skala direkt unter den Reizmustern, während diese bei sequenzieller Betrachtungsabfolge nach den Reizmustern auf einer weiteren Seite erscheint.

Im dritten Teil der Studie wird abgefragt, ob die Bedienelemente oder die Außengestalt relevanter bei der Ähnlichkeitsbewertung sind. Dazu werden die Produktpaarungen mit unterschiedlichem Bedienelement und zugleich unterschiedlicher Außengestalt als Beispiel verwendet (T1 & T4, T2 & T3). Bewertet wird anhand einer 5-stufigen Ratingskala mit den Endbeschriftungen „Bedienelement“ und „Außengestalt“. Analog zum ersten Teil kann zudem die „weiß nicht“-Option gewählt werden.

Innerhalb aller drei Studienteile wird die Reihenfolge der Produktpaarungen und deren Darstellungsreihenfolge (links – rechts bzw. erstes – zweites Reizmuster) komplett randomisiert. Ein Zurückkehren zu vorigen Seiten ist in der gesamten Studie nicht möglich. Die Erhebung der Daten findet mittels einer Online-Studie statt. Der Studienablauf ist in Bild 3 visualisiert.

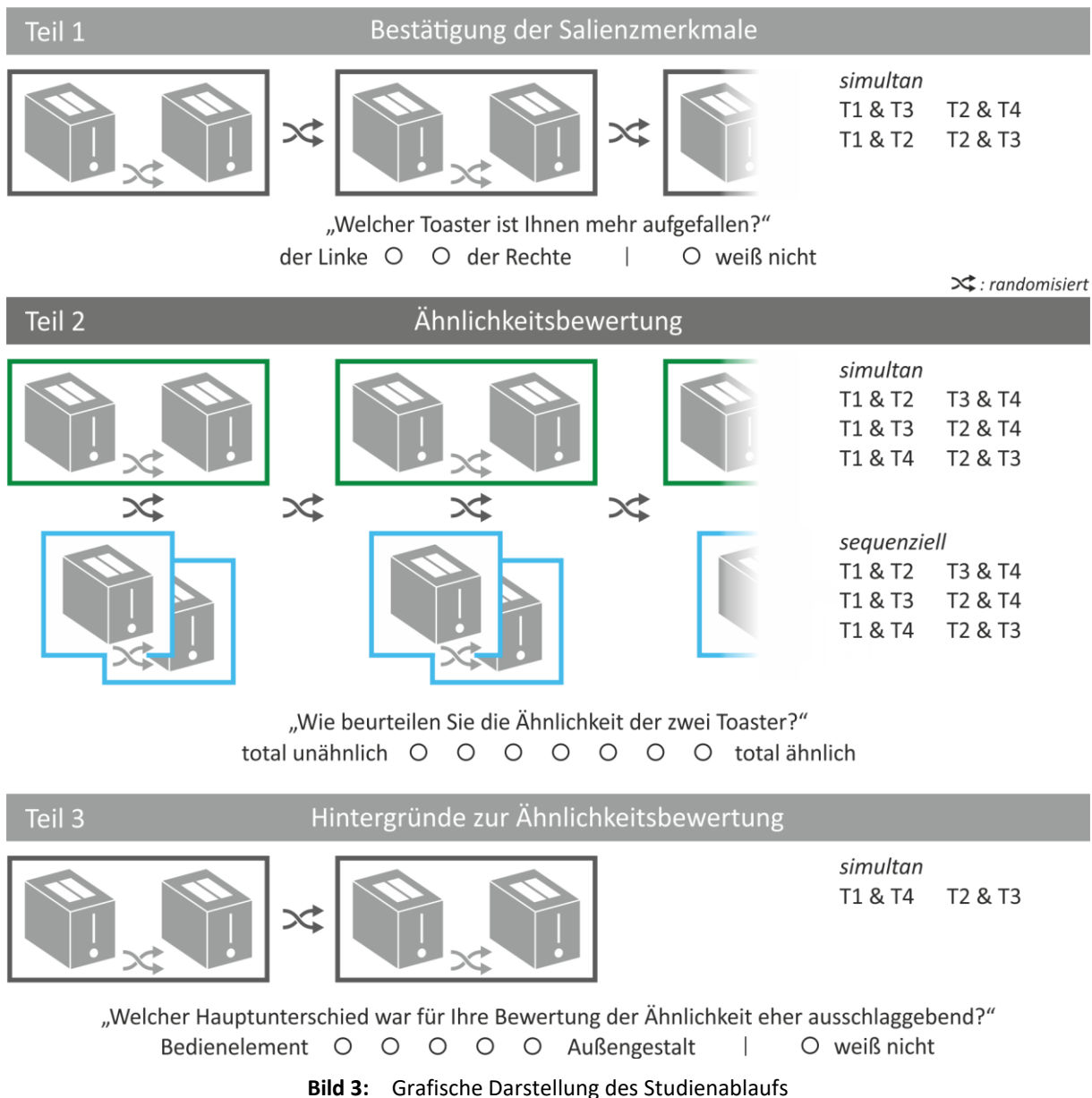


Bild 3: Grafische Darstellung des Studienablaufs

5 Studienergebnisse

In diesem Kapitel werden Auswertungen und Ergebnisse der drei Studienteile beschrieben. Statistische Auswertungen wurden mit der Software „IBM SPSS Statistics 27“ durchgeführt. Die angewendeten Ratingskalen werden dabei als intervallskaliert angesehen (vgl. Döring und Bortz (2016)). Das Signifikanzniveau wird auf $p < 0,05$ festgelegt.

Die Online-Studie fand im Jahr 2020 in den Kalenderwochen 19 und 20 statt. Sie hatte 134 Teilnehmer im Alter zwischen 19 und 64 Jahren ($M = 23,5$; $SD = 10,21$). 53 Teilnehmer waren weiblich und 81 männlich. 128 Teilnehmer bearbeiteten die Umfrage in deutscher Sprache, während sechs diese in Englisch bearbeiteten. Als Anreiz zur Teilnahme wurden zwei Amazon Gutscheine im Wert von insgesamt 30 € unter allen Teilnehmern verlost.

5.1 Bestätigung der Salienzmerkmale (Studie – Teil 1)

Im ersten Studienteil werden alle unentschlossenen Teilnehmer von der Auswertung ausgeschlossen. Alle Teilnehmer mit mindestens einer „weiß nicht“-Antwort werden nicht berücksichtigt, was zu 121 auswertbaren Datensätzen führt.

Für die Untersuchung der nominalskalierten Daten wird der Chi-Quadrat (χ^2)-Anpassungstest angewendet. Dieser untersucht, ob sich die vorliegende Häufigkeitsverteilung von einer erwarteten Häufigkeitsverteilung unterscheidet. Die Nullhypothese lautet:

- Die Produkte werden zu gleichen Anteilen (50%-50%-Verteilung) als auffällig (salient) wahrgenommen.

Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt. Für die Produktpaare T1 & T3, T2 & T4 und T2 & T3 muss diese Nullhypothese verworfen werden. Bei diesen Paarungen werden die Toaster mit den salient gestalteten Bedienelementen demnach als signifikant auffälliger bewertet. Bei dem Produktpaar mit gleichen Bedienelementen (T1 & T2) muss die Nullhypothese angenommen werden. Die Häufigkeitsverteilung unterscheidet sich dort nicht signifikant von der 50%-50%-Verteilung.

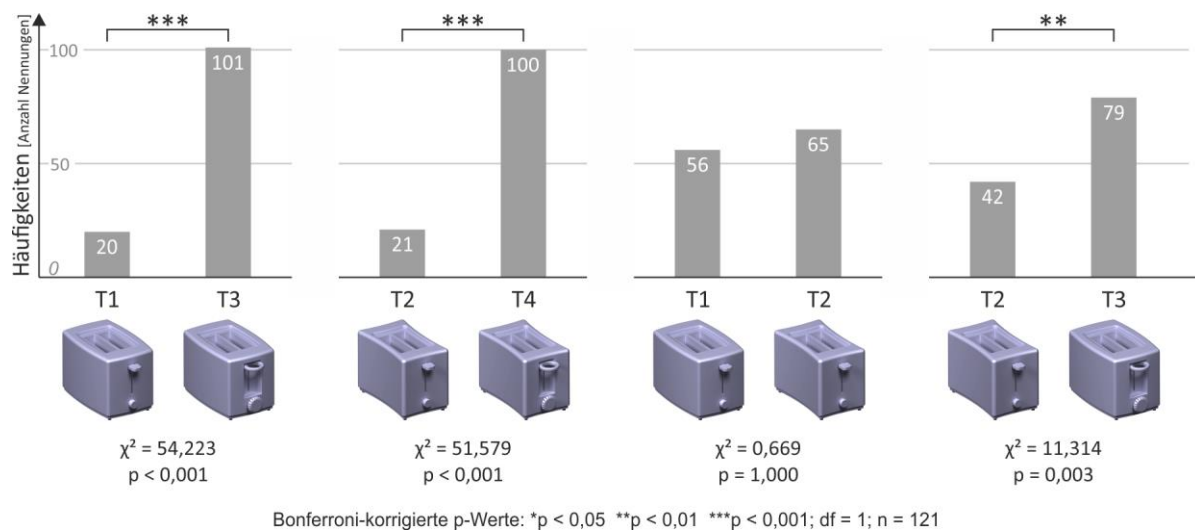


Bild 4: Häufigkeitsverteilung und Chi-Quadrat-Anpassungstest des ersten Studienteils zur Auffälligkeit der Reizmuster

5.2 Ähnlichkeitsbewertung (Studie – Teil 2)

Die Ergebnisse des Hauptteiles der Studie sind mittels Boxplots in Bild 5 dargestellt.

Für die Auswertung der Ähnlichkeitsbewertung wird eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt. Die abhängige Variable ist die bewertete Ähnlichkeit. Die erste unabhängige Variable ist die Betrachtungsmethode (zwei Stufen: Simultane und sequenzielle Betrachtungsabfolge), während die Produktpaarung (sechs Stufen: alle möglichen Produktpaarungen) die zweite unabhängige Variable darstellt. Die Ergebnisse der ANOVA befinden sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Haupt- und Interaktionseffekte der zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung

Faktor	F	p-Wert	η^2	Korrektur
Betrachtungsmethode	(1; 133) = 20,780	< 0,001 ***	0,135	-
Produktpaarung	(3,460; 460,155) = 160,544	< 0,001 ***	0,547	Greenhouse-Geisser
Betrachtungsmethode* Formpaarung	(4,648; 618,139) = 2,126	0,066	-	Greenhouse-Geisser

*p < 0,05 **p < 0,01 ***p < 0,001

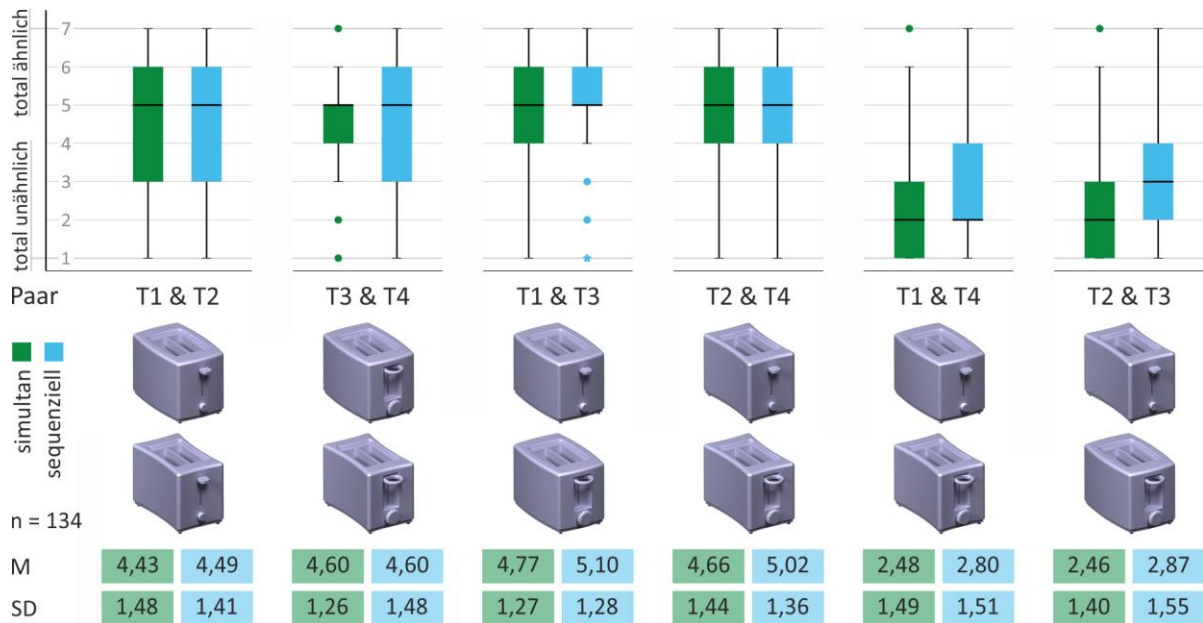


Bild 5: Boxplots, Mittelwerte und Standardabweichungen der Ähnlichkeitsbewertungen

Nach Tabelle 1 liegt ein signifikanter Haupteffekt bei der Betrachtungsmethode vor. Demnach muss die Nullhypothese H_{10} verworfen und die Hypothese H_1 angenommen werden. Der Haupteffekt der Produktpaare ist ebenfalls signifikant, während der Interaktionseffekt nicht signifikant ist. In Tabelle 2 ist der Post-hoc Test der ANOVA mit allen paarweisen Vergleichen der Produktpaare aufgelistet.

Tabelle 2: Post-hoc Test (paarweiser Vergleich der Produktpaare) der zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung

Paar		Mittelwert-differenz	Std.-Fehler	p-Wert	95%-CI	
T1 & T2	T3 & T4	- 0,134	0,089	1,000	- 0,402	0,133
	T1 & T3	- 0,470	0,142	0,018 *	- 0,894	- 0,046
	T2 & T4	- 0,377	0,142	0,132	- 0,800	0,047
	T1 & T4	1,825	0,123	< 0,001 ***	1,458	2,192
	T2 & T3	1,795	0,122	< 0,001 ***	1,430	2,160
T3 & T4	T1 & T3	- 0,366	0,129	0,155	- 0,722	0,050
	T2 & T4	- 0,243	0,132	1,000	- 0,638	0,153
	T1 & T4	1,959	0,128	< 0,001 ***	1,575	2,343
	T2 & T3	1,929	0,128	< 0,001 ***	1,548	2,310
T1 & T3	T2 & T4	0,093	0,082	1,000	- 0,151	0,338
	T1 & T4	2,295	0,125	< 0,001 ***	1,921	2,669
	T2 & T3	2,265	0,117	< 0,001 ***	1,915	2,615
T2 & T4	T1 & T4	2,201	0,119	< 0,001 ***	1,846	2,557
	T2 & T3	2,172	0,116	< 0,001 ***	1,824	2,520
T1 & T4	T2 & T3	0,030	0,083	1,000	- 0,278	0,218

Bonferroni-korrigierte p-Werte: * $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ *** $p < 0,001$

Nach Tabelle 2 unterscheidet sich die wahrgenommene Ähnlichkeit des Produktpaars T1 & T2 nicht signifikant von dem Produktpaar T3 & T4. Somit kann die Nullhypothese H_{20} nicht verworfen werden.

5.3 Hintergründe zur Ähnlichkeitsbewertung (Studie – Teil 3)

Analog zu Kapitel 5.1 werden alle Teilnehmer mit mindestens einer „weiß nicht“-Antwort nicht berücksichtigt, was zu 129 auswertbaren Datensätzen führt. Um Abweichungen von der neutralen Mitte zu untersuchen, werden zwei Einstichproben-t-Tests mit anschließender Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Die Nullhypothese lautet:

- Der Mittelwert der Bewertungen entspricht der neutralen Mitte.

Weder bei T1 & T4 ($t(129) = 1,016$; $p = 0,623$) noch bei T2 & T3 ($t(129) = 2,046$; $p = 0,0857$) ist der Unterschied zur neutralen Mitte signifikant. Die Nullhypothese kann daher nicht verworfen werden. Die Häufigkeitsverteilung ist in Bild 6 dargestellt.

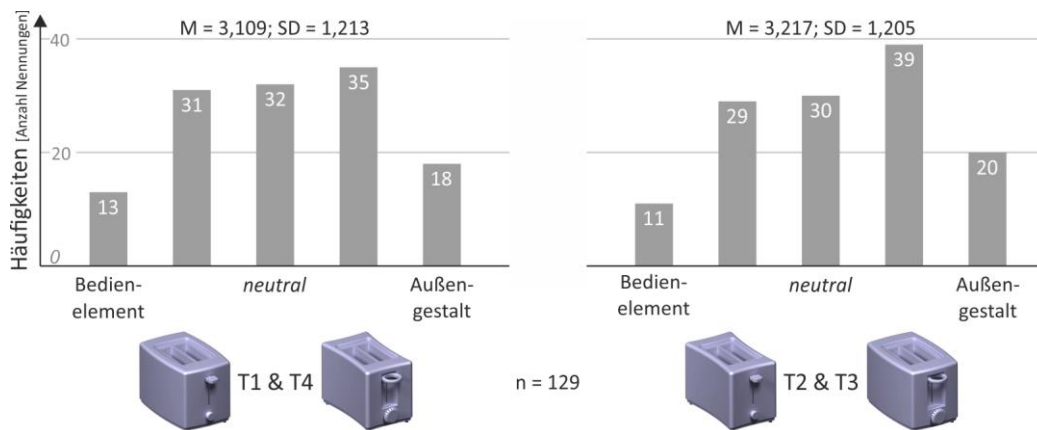


Bild 6: Häufigkeitsverteilung der Relevanz von Bedienelement und Außengestalt für die Ähnlichkeitsbewertung

6 Diskussion

Mit dem ersten Teil der Studie wurde nachgewiesen, dass die gestalteten Bedienelemente bei identischer Außengestalt (T1 & T3, T2 & T4) unterschiedlich stark salient sind. Die beiden weiteren Auffälligkeitsvergleiche widersprechen dem nicht. Bei gleichen nicht-salienten Bedienelementen (T1 & T2) weicht die Häufigkeitsverteilung nicht signifikant von der 50%-50%-Verteilung ab. Zudem ist bei dem gemischten Vergleich (T2 & T3) der Toaster mit dem salienten Bedienelement signifikant auffälliger. Allerdings können aus den Ergebnissen keine Rückschlüsse auf die fehlenden Vergleiche (T3 & T4, T1 & T4) geschlossen werden. Die Frage, ob ein konkaver Toaster mehr Aufmerksamkeit als ein konvexer Toaster erregt, bleibt unbeantwortet.

Da der Interaktionseffekt bei der Ähnlichkeitsbewertung nicht signifikant ist, besteht keine Wechselwirkung zwischen der Betrachtungsmethode und den Produktpaarungen. Die Haupteffekte von Betrachtungsmethode und Produktpaarung sind jeweils signifikant. Bei der Betrachtungsmethode kann anhand der Mittelwerte (siehe Bild 5) zudem eine Tendenz der höheren Ähnlichkeitswerte bei sequenzieller Betrachtungsabfolge beobachtet werden. Demnach müssen Produkte die simultan wahrgenommen werden ähnlicher gestaltet sein, um den gleichen wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad wie bei einer sequentiellen Betrachtung zu erhalten. Für die Veränderungsblindheit nach Rensink (2002) würde das eine Veränderungsblindheit der Unterschiede und nicht der Ähnlichkeiten bedeuten. Allerdings könnte dies auch auf die Betrachtungsmotivation mit der Frage nach der „Ähnlichkeit“ gegenüber der „Unterschiedlichkeit“ zurückzuführen sein (vgl. Boa et al. (2015)). Zudem ist zu beobachten, dass die Mittelwerte bei den Paarungen mit identischen Bedienelementen (T1 & T2, T3 & T4) sich zwischen den Betrachtungsabfolgen nicht, oder nur geringfügig, unterscheiden. Dies widerspricht einer kompletten Anhebung des Ähnlichkeitsniveaus

durch die Betrachtungsmethode und weist auf eine Verzerrung des Ähnlichkeitsgrads hin. Dadurch sollte die Hypothese H1 zukünftig differenzierter untersucht werden.

Bei den Produktpaaren ist weniger der Haupteffekt, sondern der Post-hoc Test (siehe Tabelle 2) der paarweisen Vergleiche von Bedeutung. Zwischen den relevanten Paarungen für die Hypothese H2 (T1 & T2, T3 & T4) konnte kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Demnach hat die Salienz der Bedienelemente keine Auswirkung auf die Ähnlichkeitsbewertung, sofern die Salienz jeweils in gleicher Weise ausgeprägt ist. Zudem weisen die Paarungen mit unterschiedlichen Bedienelementen und gleichzeitig unterschiedlicher Außengestalt (T1 & T4, T2 & T3) die niedrigsten Ähnlichkeitswerte auf (siehe Bild 5). Diese unterscheiden sich signifikant bezüglich der wahrgenommenen Ähnlichkeit von allen anderen Paarungen (siehe Tabelle 2). Die höchste Ähnlichkeitsbewertung hat die Paarung T1 & T3 (konvexe Außengestalt) erhalten. Dies könnte auf reale Toaster zurückzuführen sein, welche tendenziell eher eine konvexe als eine konkave Außengestalt besitzen.

Der dritte Studienteil zeigt weiterhin auf, dass für die Ähnlichkeitsbewertung die Bedienelemente und die Außengestalt einen vergleichbaren Einfluss haben. Tendenzuell ist hier eher die Außengestalt für die Ähnlichkeitsbewertung relevant (siehe Bild 6). Salienzunterschiede in Formmerkmalen (Bedienelemente) haben bei diesen Reizmustern keine größere Auswirkung auf die Ähnlichkeit als die globale Außengestalt. Mögliche Salienzunterschiede der Außengestaltvarianten wurden nicht untersucht.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Forschung zur Betrachtungsmethode und salienten Formmerkmalen bei visuellen Ähnlichkeitsvergleichen wurde am Produktbeispiel des Toasters mittels einer Online-Studie (n = 134) durchgeführt. Dabei wurde ermittelt, dass sich der Ähnlichkeitsgrad bei Produkten zwischen simultaner und sequenzieller Betrachtungsabfolge signifikant unterscheidet. Tendenzuell wird bei sequenzieller Betrachtungsabfolge die Ähnlichkeit höher bewertet als bei simultaner Betrachtung, was einer Veränderungsblindheit bezüglich der Unterschiede entspricht. Allerdings wurde keine komplette Anhebung des Ähnlichkeitsniveaus, sondern vielmehr eine Verzerrung zu tendenziell höheren Ähnlichkeiten beobachtet. Dies betont die Relevanz, bei der Studienplanung den Faktor der Betrachtungsmethode zu berücksichtigen und die Vergleichbarkeit des Ähnlichkeitsgrads von Studien mit unterschiedlicher Betrachtungsmethode kritisch zu beurteilen. Auch bedeutet es, dass simultan dargestellte Produkte ähnlicher gestaltet sein müssen, um den gleichen wahrgenommenen Ähnlichkeitsgrad zu erhalten wie sequentiell dargestellte Produkte. Die Anhebung des Ähnlichkeitsniveaus sollte anhand einer Folgestudie mit mehr Variationen der Produkte differenzierter untersucht und verifiziert werden.

Die Bedienelemente konnten gezielt bezüglich der Salienz gestaltet werden. Bei unterschiedlicher Ausprägung des salienten Formmerkmals (Bedienelement) konnte kein signifikanter Unterschied zwischen identischen nicht-salienten und identischen salienten Merkmalen in der Ähnlichkeitsbewertung beobachtet werden. Der Einfluss salienter Formmerkmale wurde in der Untersuchung nur anhand einer Produktkombination (T1 & T3 mit T2 & T4) mit zwei Salienzstufen untersucht. Weiterer Forschungsbedarf besteht hier bezüglich zusätzlicher Salienzabstufungen. Weiterhin sollte hier auch die Übertragung von salienten Formmerkmalen zwischen zwei Produkten mit unterschiedlichem Aufbau analysiert werden (z. B.: Toaster – Handrührgerät). Zuletzt könnte der Einsatz von Eye-Tracking-Systemen analog zu Boa et al. (2015) objektive Daten für die Intensität salienter Merkmale liefern.

Danksagung

Wir möchten allen Teilnehmern der Studie für die Unterstützung dieser Forschung danken.

Literatur

- Anderson et al. 2011 ANDERSON, Brian A.; LAURENT, Patryk A.; YANTIS, Steven: *Value-driven attentional capture*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (2011), Nr. 25, S. 10367-10371.
- Biederman 1987 BIEDERMAN, Irving: *Recognition-by-components: a theory of human image understanding*. In: *Psychological Review* 94 (1987), Nr. 2, S. 115-147
- Boa et al. 2015 BOA, Duncan; RANSCOMBE, Charlie; HICKS, Ben: *Determining the Similarity of Products Using Pairwise Comparisons and Eye Tracking*. In: Weber, Christian; Husung, Stephan; Cascini, Gaetano; Cantamessa, Marco; Marjanovic, Dorian; Rotini, Federico (Hrsg.): *The 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15); 27th - 30th July 2015, Politecnico di Milano, Italy*. Glasgow: Design Society, 2015 (DS / Design Society, 80,5), S. 225-234.
- Brunswig 1910 BRUNSWIG, Alfred: *Das Vergleichen und die Relationserkenntnis*. Leipzig, Berlin: B. G. Teubner, 1910.
- Döring und Bortz 2016 DÖRING, Nicola; BORTZ, Jürgen: *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. 5., vollst. überarb., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2016.
- Farell 1985 FARELL, Bart: "Same"-"different" judgments: A review of current controversies in perceptual comparisons. In: *Psychological Bulletin* 98 (1985), Nr. 3, S. 419-456.
- Fischer et al. 2020 FISCHER, Matthias Sebastian; HOLDER, Daniel; MAIER, Thomas: *Evaluating Similarities in Visual Product Appearance for Brand Affiliation*. In: Fukuda, Shuichi (Hrsg.): *Advances in Intelligent Systems and Computing : Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Affective and Pleasurable Design, July 24-28, 2019, Washington D.C., USA*. Cham: Springer, 2020 (Advances in Intelligent Systems and Computing, 952), S. 3-12.
- Goldstein 2015 GOLDSTEIN, E. Bruce: *Wahrnehmungspsychologie : Der Grundkurs*. 9. Auflage. Gegenfurtner, Karl R. (Hrsg.). Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- Gur und Hilgard 1975 GUR, Ruben C.; HILGARD, Ernest R.: *Visual imagery and the discrimination of differences between altered pictures simultaneously and successively presented*. In: *British Journal of Psychology* 66 (1975), Nr. 3, S. 341-345.
- Holder et al. 2019 HOLDER, Daniel; INKERMANN, David; KRASTEVA, Petia; VIETOR, Thomas; MAIER, Thomas: *Integrated Product Gestalt Design Method for the Analysis and Definition of Interface Elements*. In: Bagnara, Sebastiano; Tartaglia, Riccardo; Albolino, Sara; Alexander, Thomas ; Fujita, Yushi (Hrsg.): *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018) : Volume VII: Ergonomics in Design, Design for All, Activity Theories for Work Analysis and Design, Affective Design*. Cham: Springer International Publishing, 2019 (Advances in Intelligent Systems and Computing, 824), S. 888-897.
- Keaveney et al. 2012 KEAVENEY, Susan M.; HERRMANN, Andreas; BEFURT, Rene; LANDWEHR, Jan R.: *The Eyes Have It: How a Car's Face Influences Consumer Categorization and Evaluation of Product Line Extensions*. In: *Psychology & Marketing* 29 (2012), Nr. 1, S. 36-51.

- Kreuzbauer und Malter 2005 KREUZBAUER, Robert; MALTER, Alan J.: *Embodied Cognition and New Product Design: Changing Product Form to Influence Brand Categorization*. In: *Journal of Product Innovation Management* 22 (2005), Nr. 2, S. 165-176.
- Maier 1993 MAIER, Thomas: *Gleichteile und Ähnlichkeitsermittlung von Produktprogrammen*. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebebau, Dissertation, 1993.
- Orbay et al. 2015 ORBAY, Gunay; FU, Luoting; KARA, Levent Burak: *Deciphering the Influence of Product Shape on Consumer Judgments Through Geometric Abstraction*. In: *Journal of Mechanical Design* 137 (2015), Nr. 8, S. 081103.
- Ostrosi et al. 2019 OSTROSI, Egon; BLUNTZER, Jean-Bernard; ZHANG, Zaifang; STJEPANDIĆ, Josip: *Car style-holon recognition in computer-aided design*. In: *Journal of Computational Design and Engineering* 6 (2019), Nr. 4, S. 719-738.
- Palmer 1978 PALMER, Stephen E.: *Structural aspects of visual similarity*. In: *Memory & Cognition* 6 (1978), Nr. 2, S. 91-97.
- Parkhurst et al. 2002 PARKHURST, Derrick; LAW, Klinton; NIEBUR, Ernst: *Modeling the role of salience in the allocation of overt visual attention*. In: *Vision Research* 42 (2002), Nr. 1, S. 107-123.
- Rensink 2002 RENSINK, Ronald A.: *Change Detection*. In: *Annual Review of Psychology* 53 (2002), S. 245-277.
- Schreiner et al. 2017 SCHREINER, Thomas F.; FANDRICH, Thomas; HEITMANN, Mark; TALKE, Katrin: *A Novel Approach for Predicting and Understanding Consumers' Sense of Design Similarity*. In: *Journal of Product Innovation Management* 34 (2017), Nr. 6, S. 790-820.
- Seeger 2005 SEEGER, Hartmut: *Design technischer Produkte, Produktprogramme und –systeme : Industrial Design Engineering*. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- Seo und Milanfar 2009 SEO, Hae J.; MILANFAR, Peyman: *Static and space-time visual saliency detection by self-resemblance*. In: *Journal of Vision* 9 (2009), Nr. 12, S. 15.1-27.
- Tversky 1977 TVERSKY, Amos: *Features of Similarity*. In: *Psychological Review* 84 (1977), Nr. 4, S. 327-352.
- Vogt 1972 VOGT, Irmgard: *Zur Psychologie der Ähnlichkeit : Problemheuristische und experimentelle Untersuchungen*. Meisenheim am Glan: Verlag Anton Hain, 1972.
- Watty et al. 2019 WATTY, Robert; ZIMMERMANN, Christian; REICHERT, Gerhard: *Zusammenarbeit von Ingenieuren und Designern – die überarbeitete VDI/VDE-Richtlinie 2424*. In: Stelzer, Ralph H.; Krzywinski, Jens (Hrsg.): *Entwerfen Entwickeln Erleben in Produktentwicklung und Design 2019*. Dresden: TUDpress, 2019, S. 181-194.

Ermittlung von Potentialen zur Personalisierung von Produkten Identification of Potentials for the Personalization of Products

Manfred Dangelmaier^{1,2}, Lesley-Ann Mathis¹, Daniel Ziegler², Anette Weisbecker^{1,2}

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Stuttgart
manfred.dangelmaier@iat.uni-stuttgart.de
lesley-ann.mathis@iat.uni-stuttgart.de
anette.weisbecker@iat.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer IAO, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart
manfred.dangelmaier@iao.fraunhofer.de
daniel.ziegler@iao.fraunhofer.de
anette.weisbecker@iao.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Individualisierung gilt als Megatrend in postmodernen Gesellschaften. Die Märkte reagieren mit der Individualisierung von Produkten. Viele Ansätze scheitern jedoch, nachdem bereits beträchtliche Summen investiert wurden. Der Beitrag stellt deshalb eine nutzenorientierte Methode zur Ermittlung von Potentialen für die Personalisierung von Produkten vor. Sie begleitet das Produkt von der Wiege bis zur Bahre (Product Journey), um die Nutzer zu identifizieren und anschließend die Nutzer auf ihrer User Journey, um die Produkterfahrungen zu ermitteln. Aus diesen wird eine Menge von Ideen zur Personalisierung abgeleitet, die mit dem zugehörigen Nutzen das Personalisierungspotential repräsentieren. Zudem wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis für den Hersteller bzw. Provider abgeschätzt. Die Methode wurde von Einzelpersonen und Teams im Rahmen von Präsenzworkshops und Online-Veranstaltungen für Beispiele aus den Bereichen Mobilität, Bauwirtschaft und Dienstleistungen erprobt und hat sich dort bewährt. Der Lernaufwand ist gering. Der Personaleinsatz pro Analyse beträgt ca. 150 Stunden. Die Methode soll anhand konkreter Unternehmensbeispiele in der industriellen Praxis weiter evaluiert werden.

Keywords:

Produktentwicklung, Mass Personalization, Potentiale, Product Journey, User Journey

Abstract (english): Individualization is considered a megatrend in postmodern societies. The markets react with the individualization of products. However, many approaches fail after considerable sums have already been invested. Therefore, this paper presents a benefit-oriented method to identify potentials for the personalization of products. It accompanies the product from the cradle to the grave (product journey) to identify the users. It then travels with the users on their user journeys to observe the product experience. From these observations, a set of ideas for personalization is derived, which together with the associated benefits represent the personalization potential. In addition, the benefit-cost ratio for the manufacturer or service provider is estimated. The method has been tested by individuals and teams in face-to-face workshops and online events for examples from the mobility, construction and services sectors and has proven to be successful. The learning effort is low. The personnel input per analysis amounts to approx. 150 hours. The method is to be further evaluated using concrete use cases in industrial practice.

Keywords (english):

Product development, Mass Personalization, Potentials, Product Journey, User Journey

1 Problemstellung

Individualisierung gilt als stabiler Megatrend und als bestimmend für postmoderne Gesellschaften. „Selbstbestimmungsorientierte Werte erhalten von nahezu allen Befragten eine hohe Wertschätzung ..., was darauf hindeutet, dass sich der Wunsch nach einem individuellen Lebensstil über alle Schichten hinweg inzwischen fest etabliert hat“ (Hornik et al., S. 50). Die Märkte reagieren darauf mit der Individualisierung von Produkten. Der Mehrwert beim Kunden ist somit einer der Hauptmotivatoren für die Individualisierung bzw. Personalisierung von Produkten. Unter Personalisierung verstehen wir dabei allgemein die Verwendung von Informationen über den Nutzer zur Festlegung oder Veränderung von Produktattributen.

In der klassischen Produktpersonalisierung durch Mass Customization steht der Gedanke der Differenzierung als Marktstrategie im Mittelpunkt (Piller 2006). Mass Customization passt das Produkt an Kundenbedürfnisse zur Zeit der Kaufentscheidung an. Änderungen der Nutzerbedürfnisse im Produktlebenszyklus werden typischerweise nicht antizipiert. Deshalb benutzen wir den Begriff der Mass Personalization (abweichend z.B. von Reiß und Koser 2004), wie er bei Hämmerl und Dangelmaier (2018) und Held et al. (2018) verwendet wird. Er bezeichnet hier die Weiterentwicklung der Mass Customization unter veränderten Randbedingungen der heutigen Produktentstehung. Mass Personalization berücksichtigt dabei technologische, gesellschaftliche und Markttrends wie nachhaltige Produktnutzung, Share Economy, Prosumertum, additive Fertigung, lernende Systeme, Konnektivität und Big Data. Ferner stellt sie die radikale Nutzerzentrierung und den Nutzen für alle Anwender über den gesamten Lebenszyklus einer Produktinstanz in den Mittelpunkt (Hämmerl und Dangelmaier 2018; Held et al. 2018) und nutzt die Kostenvorteile von Massenfertigung und automatisierten End-to-End-Prozessen.

Bevor Entscheidungen zur Personalisierung getroffen werden, ist eine Potenzialanalyse für das strategische Portfoliomanagement erforderlich. Dieser Punkt wird bisher in der Literatur nicht adressiert. Gesucht wird daher eine Methode bzw. ein Werkzeug, um Potentiale für die Personalisierung von Produkten mit geringem Aufwand zu ermitteln. Die Methode soll folgenden Anforderungen genügen:

- Einsetzbar im Portfoliomanagement oder Innovationsmanagement und in frühen Phasen der Produktentwicklung,
- Eignung für Neuentwicklungen und die Weiterentwicklung von Produkten,
- Eignung für physische Produkte, Software und Dienstleistungen,
- geringer Aufwand an Zeit und kostengünstig,
- einfach in der Anwendung (nicht komplex oder kompliziert),
- geringer Lernaufwand und Rückgriff auf verbreitet Bekanntes,
- Eignung für die Zusammenarbeit am gleichen Ort und örtlich verteilter Teams.

2 Stand der Forschung

In der Produktentwicklung wurde das Thema Personalisierung in der Vergangenheit wenig beachtet. So enthält das Handbuch zur Produktentwicklung (Lindemann 2016) zwar ein Kapitel zur ergonomischen Produktgestaltung, aber nicht zur Personalisierung von Produkten.

Existierende Methoden zur Personalisierung in der Produktentstehung verfolgen meist einen prozessorientierten Ansatz. Der Fokus liegt auf einem linearen Vorgehen, indem zuerst Anforderungen an das Produkt systematisch erhoben werden und dann in einer entsprechenden Produktpassung münden (z.B. Baumberger 2007; Kaneko et al. 2018; Lindemann et al. 2006). Die

Sinnhaftigkeit der Produktpassungen sowie das Kosten-Nutzen Verhältnis stehen bei diesen Verfahren jedoch im Hintergrund. Existierende Methoden zur Personalisierung setzen somit spät im Entwicklungsprozess ein. Sie sind aufwändig und auf Mass Customization herkömmlicher Prägung zugeschnitten.

Früher setzt das Innovationsmanagement an. In der Entwicklung innovativer Produkte spielt das Erkennen von Potenzialen neuer Technologien in frühen Phasen eine entscheidende Rolle, um den Bedürfnissen des Marktes und der Nutzer gerecht zu werden (Ardilio und Laib 2008). Um Innovationspotentiale zu erkennen, wird häufig die Szenariotechnik eingesetzt (Spath et al. 2010). Ziel ist es, Entwicklungsmöglichkeiten durch Zukunftsbilder aufzuzeigen und durch das Identifizieren von Einflussfaktoren neue Handlungsfelder abzuleiten. Für die oben erwähnten Anforderungen an eine Methode zur Ermittlung von Personalisierungspotentialen in frühen Phasen ist sie aber wenig geeignet, da die Personalisierung als Entwicklungsziel bereits festgelegt ist und der Ansatz der Szenariotechnik zu umfassend erscheint.

Jüngere Ansätze im Innovationsmanagement hingegen legen den Fokus auf Interaktion und Kundenzentrierung im Produktentwicklungsprozess. Als Beispiele seien hier Methoden wie Design Thinking oder Empathy Maps genannt, die den Nutzer aktiv in den Anpassungsprozess miteinbinden und somit den Erfolg von Neuentwicklungen sicherstellen sollen (Schoblik et al. 2020). Somit zeigt sich in neueren Ansätzen eine Verschiebung von analytischen hin zu partizipativen Methoden, mit Fokus auf der Nutzersicht.

Die Nutzersicht wird insbesondere im Usability und Customer Experience Engineering vertreten. Hier haben sich Verfahren zur Modellierung des Kundenerlebens etabliert. Customer Journeys sind ein etabliertes Instrument zur Modellierung des Kundenerlebnisses („Customer Experience“), das seine Wurzeln vor allem im Service Engineering hat (Stickdorn und Schneider 2011) und auch im Marketing verwendet wird (Janson 2012; Keller und Ott 2019; Theobald und Jentschke 2020). Sie betrachten, welche verschiedenen Berührungspunkte Kunden über einen bestimmten Zeitraum hinweg mit dem Angebot eines Unternehmens haben, wobei der betrachtete Zeitraum stark variieren kann (Følstad und Kvale 2018, S. 208). Customer Journey Maps können verwendet werden, um den erhobenen oder vermuteten Ist-Stand eines existierenden Angebots zu analysieren oder um den Soll-Zustand eines anzupassenden oder neu zu schaffenden Produkts oder Dienstes zu gestalten (Følstad und Kvale 2018, S. 209–211). Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass Kunden und Nutzer die gleiche Person und über den betrachteten Zeitraum hinweg identisch sind. Personen, die gegebenenfalls in anderen als der Kundenrolle mit dem Angebot in Kontakt kommen, werden häufig nicht berücksichtigt. Der gelegentlich benutzte Begriff „User Journey“ wird überwiegend als Synonym verstanden (Følstad und Kvale 2018, S. 201–203), könnte aber im praktischen Sprachgebrauch darauf hindeuten, dass auch andere Gruppen von Nutzenden und ihr Nutzungserleben („User Experience“) betrachtet werden.

Über den Business-to-Consumer-Bereich hinaus kann Customer Journey Mapping in angepasster Form auch für industrielle Produkt-Service-Systeme angewandt werden (West et al. 2020). Die betrachteten Beschaffungsentscheidungen und -vorgänge im Business-to-Business-Umfeld zeichnen sich insbesondere durch die Beteiligung mehrerer unterschiedlicher Stakeholder aus. West et al. (2020) betonen daher die Notwendigkeit alle relevanten Akteure vor dem eigentlichen Mapping-Prozess zu identifizieren. Der Fokus auf den Beschaffungsvorgang hat allerdings zur Folge, dass Nutzer in den beschriebenen Fallstudien nicht berücksichtigt wurden.

Es liegen also verwertbare Ansätze und Komponenten für die Problemstellung vor, aber keine integrierte Methode und kein Werkzeug, das die funktionellen und prozeduralen Anforderungen im vollen Umfang erfüllt.

3 Ansatz und Ableitung der Methode

Menschen würden gerne personalisierte Produkte verwenden (z.B. Epsilon 2018), wie auch eine beispielhafte Umfrage unter Seminarteilnehmern im Rahmen des Leistungszentrums Mass Personalisation illustriert (Bild 1). Sie sind auch bereit dafür mehr Geld auszugeben. Das ist der Grundgedanke der Differenzierung durch Mass Customization, wie Piller sie beschreibt (Piller 2006). Diese generelle Bereitschaft spiegelt sich jedoch nicht immer im Kauf- und Nutzungsverhalten wider. Entweder fehlt ein echtes Käuferbedürfnis, das durch Personalisierung gedeckt wird oder der monetäre Aufwand oder der Zeitaufwand und/oder die Entscheidungslast sind zu hoch. Personalisierte Produktvarianten wandern dann in eine Marktnische oder scheitern.

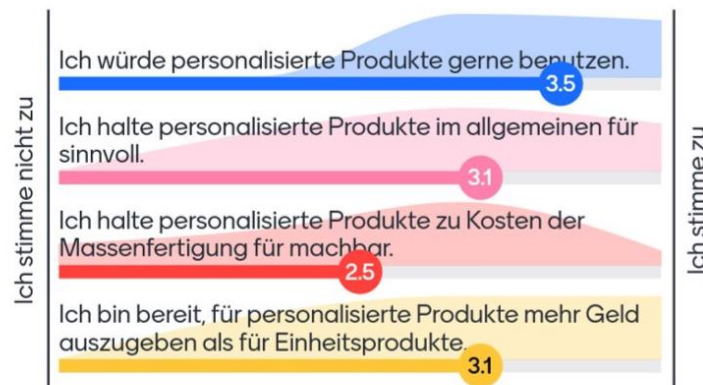


Bild 1: Einschätzungen von Seminarteilnehmern zur Personalisierung (N=19)

Nutzen wird meist als Maß für die Fähigkeit von Produkten verstanden, Bedürfnisse zu befriedigen (Kirchgeorg 2018). Wir folgen dieser Sicht und setzen darauf, Personalisierungsoptionen eines Produktes zu finden, die Bedürfnisse von Kunden bzw. Nutzern besser befriedigen als der Ist-Zustand. Der Begriff des Bedürfnisses ist dabei nicht auf bestimmte Arten beschränkt und schließt funktionale, ökonomische sowie prozessorale Nutzenaspekte ebenso ein wie emotionale und soziale.

Unter dem Potential verstehen wir eine Menge von Entwicklungsmöglichkeiten für ein Produkt. Sie werden ausgedrückt durch die Menge der Entwicklungsoptionen, die Benutzerbedürfnisse besser erfüllen und damit einen Mehrwert liefern. Das Personalisierungspotential in einer Produktentwicklung besteht in unserem Sinne also aus einer Menge von Personalisierungsoptionen mit den zusätzlich erfüllbaren Bedürfnissen bzw. ihrem Mehrwert für den Kunden oder Nutzer.

In der nutzerzentrierten Lebenszyklusbetrachtung, die in der Mass Personalization nach dem Stuttgarter Modell verfolgt wird, geht man von wechselnden Benutzern und veränderlichen Bedürfnissen aus. Bedürfnisse sind also personenabhängig, zeitabhängig und situationsabhängig. Der Nutzerbegriff kann je nach Anwendungsfall weit gefasst sein. Er kann „Endanwender“ des Produkts ebenso umfassen, wie Werker in der Fertigung, Instandhalter oder Recycler. Es handelt sich also nicht nur um Nutzer in der Kundenrolle. Es können natürliche Personen wie Max Mustermann sein oder auch Körperschaften wie eine Betreiberfirma.

Die Erfüllung von Bedürfnissen geschieht durch Interaktion zwischen Nutzer und Produkt an den Touchpoints (Bild 2). Der Begriff der Interaktion ist bei uns ebenfalls weit gefasst. Er schließt verschiedene Nutzungssituationen ebenso ein wie das Produkterleben im Marketing, den Kauf und die Veräußerung oder Entsorgung eines Produktes.

Weg vom Erstkontakt mit dem Produkt bis zum Nutzungsende, und betrachten dort die Interaktionen mit dem Produkt, um Ideen zur Personalisierung zu finden. Diese Reise nennen wir User Journey, in Übereinstimmung der Sprechweisen von Marketing und Usability bzw. User Experience Engineering. Bild 3 zeigt die Vorgehensweise schematisch.

4 Methode und Werkzeug für die Potentialanalyse

Basierend auf diesem Ansatz wurde ein Werkzeug für die Potentialanalyse für kleine und mittlere Teams entwickelt. Es besteht im Wesentlichen aus einer einfachen Vorgehensweise nach Bild 4 und aus den Schemata für die Product und User Journey, die sowohl in Präsenzworkshops als auch in der digitalen Zusammenarbeit synchron oder asynchron verwendet werden können. Das Vorgehen für Product und User Journey wird im Folgenden schrittweise beschrieben.

Die Auswahl eines interdisziplinären Teams ist für die Durchführung der Methode zu empfehlen, um alle relevanten Aspekte abzudecken. Mindestens sind Personen erforderlich, die einen Einblick in den Produktweg über die Lebensdauer haben und Kenntnisse zur Nutzererfahrung aufweisen. Teilnehmer können aus dem Marketing/Vertrieb, dem Portfolio- oder Produktmanagement, dem Design und der Produktentwicklung und aus der Produktion stammen. Ferner sind Repräsentanten der Nutzer hilfreich.

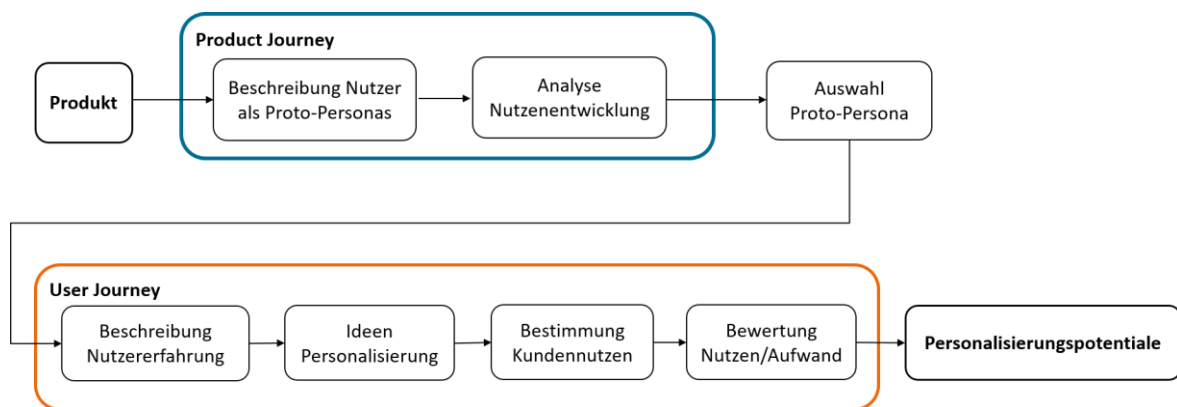


Bild 4: Vorgehen zur Ermittlung von Personalisierungspotenzialen

Zuerst werden in der Product Journey gemeinsam Nutzergruppen identifiziert, denen das Produkt in seiner Lebenszeit begegnet. Dafür werden Personas genutzt, die einen Nutzer und dessen Ziele beschreiben (Cooper 1999). Wegen der schnellen Umsetzbarkeit im Rahmen von Workshops greifen wir auf Proto-Personas zurück (Gotthelf 2012). Sie entstehen in Brainstorming-Workshops (Gotthelf 2012) und werden in unserem Fall minimalistisch durch eine Kombination aus Vor- und Nachnamen beschrieben. Der Nachname steht für eine Eigenschaft oder Tätigkeit des Nutzers (z.B. Peter Pendler). Der Vorname dient der Benennung und um die Persona als Person wahrzunehmen. Die Proto-Personas werden im Schema der Product Journey entlang der horizontalen Achse als Nutzer aufgetragen (siehe Bild 5). Man folgt dabei der Lebensdauer des Produkts.

Im nächsten Schritt erfolgt eine Priorisierung der Proto-Personas hinsichtlich ihrer Repräsentativität für die relevanten Zielgruppen, für die Ideen zur Personalisierung gefunden werden sollen. Anschließend wird der Verlauf der Nutzenentwicklung pro Nutzer analysiert und der erlebte Nutzen durch die Positionierung der Personas auf der vertikalen Achse dargestellt. Je nach Produkt kann der Graph auch den Verlauf der Wertschöpfung oder Wertentwicklung abbilden (z.B. bei Immobilien).

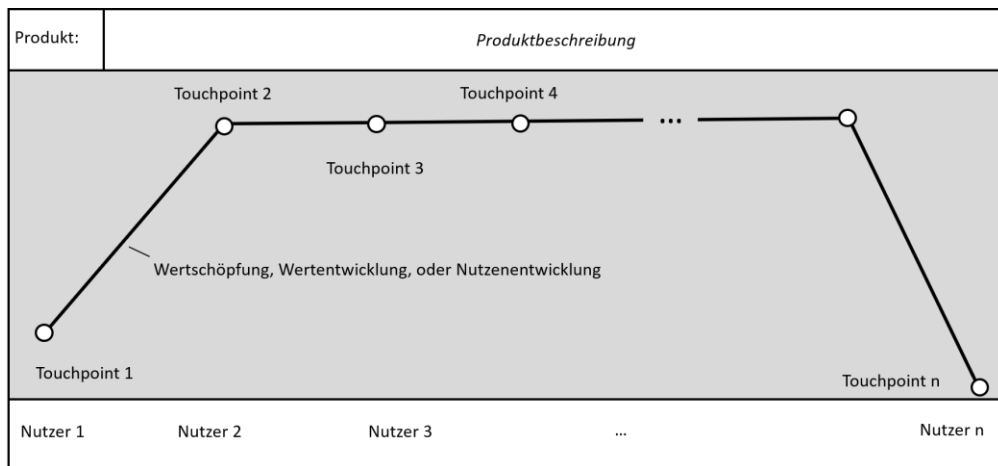


Bild 5: Schema für die Product Journey

Die Stationen der User Journey werden benannt und entlang der horizontalen Achse im zeitlichen Verlauf aufgetragen, während die vertikale Achse das Nutzungserleben („User Experience“) quantifiziert. Aus der Betrachtung der Interaktionen im Ist-Zustand identifiziert man Vorschläge zur Verbesserung des Nutzererlebnisses und spezifiziert Optionen der Personalisierung. Nicht alle Ideen zur Verbesserung des Nutzererlebnisses haben mit Personalisierung zu tun, liefern aber weitere Entwicklungspotentiale. Für jeden Vorschlag zur Personalisierung wird der Kundennutzen (Mehrwert bzw. das erfüllte Bedürfnis aus Nutzersicht) ermittelt. Anschließend wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis aus Sicht des Unternehmens abgeschätzt und in einem einfachen Fall qualitativ mit Plus oder Minus bewertet. Die Menge der Personalisierungsvorschläge mit Kundennutzen und einem günstig bewerteten Kosten-Nutzenverhältnis repräsentiert das Personalisierungspotential.

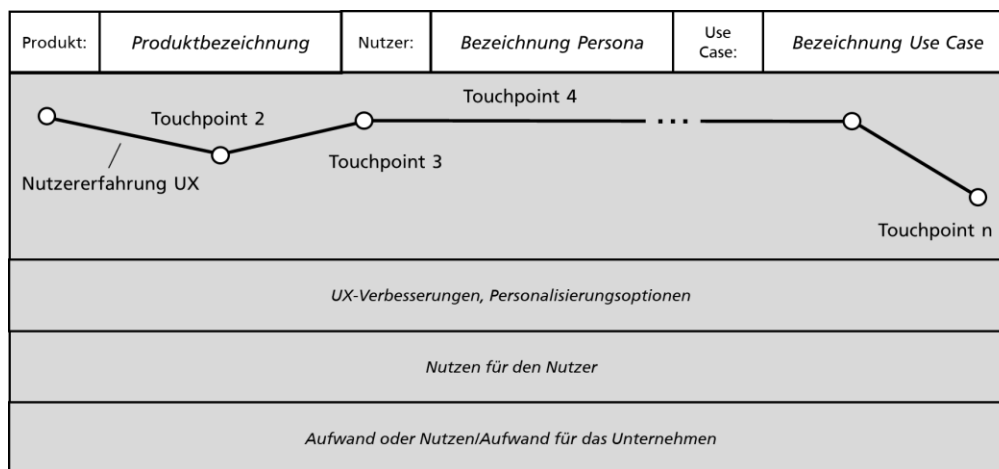


Bild 6: Schema für die User Journey

5 Beispiel und Erprobung

Die Methode zur Potentialanalyse mit Product und User Journey wurde anhand dreier generischer bzw. fiktiver Produkte erprobt:

- Dienstleistung Hotelübernachtung,
- Wohn- und Geschäftsgebäude und
- Elektro-Tretroller im Sharing-Betrieb (E-Tretroller).

Da ein Großteil der Erprobung nach Beginn der COVID-19-Pandemie durchgeführt wurde, ist die Methode auch für digitale Formate ausgelegt. Die Erprobungen fanden innerhalb des Projektteams als Präsenzworkshops und Online-Veranstaltungen statt und wurden mehrfach mit externen Teilnehmern online durchgeführt. Die Verwendung der Schemata, die im Rahmen der Methode entwickelt wurden, ermöglichen in virtuellen Workshops ein kollaboratives Bearbeiten der jeweiligen Journey sowie eine schnelle Visualisierung. Im Folgenden wird das Beispiel „Elektro-Tretroller“ beschrieben, das iterativ mit verschiedenen Nutzern analysiert wurde, um die Anwendbarkeit der Methode zu demonstrieren.

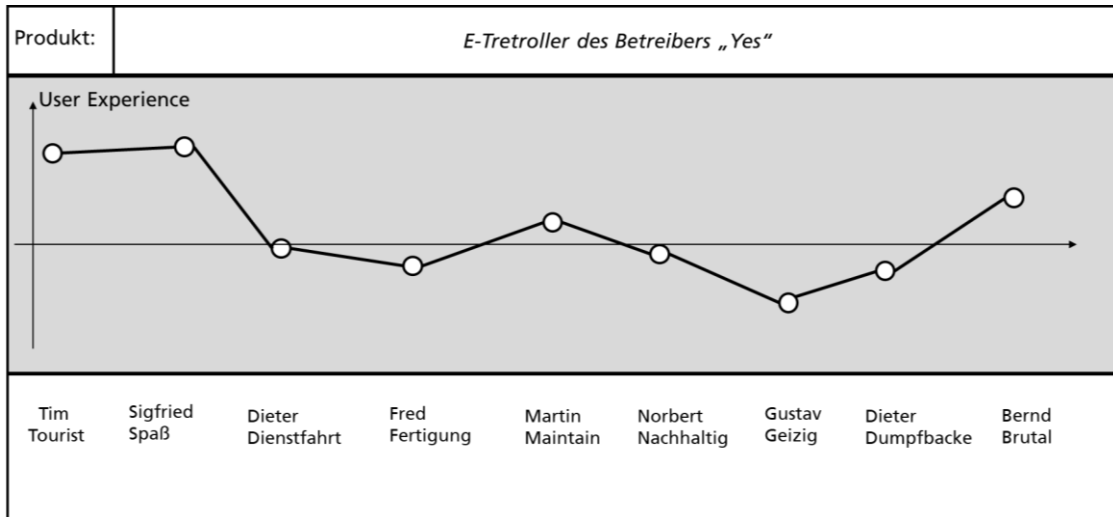


Bild 7: Beispiel Product Journey E-Tretroller

Der E-Tretroller wurde als Produktbeispiel in externen Erprobungen eingesetzt, da es für Teilnehmer gut zugänglich ist und als neues Mobilitätskonzept in jüngster Zeit häufig das Stadtbild prägt. Ausgangspunkt dieses Beispiels ist ein Scooter-Betreiber, der E-Tretroller im Sharing-Verfahren bereitstellt. Diese können vom Nutzer mit Hilfe einer App gemietet werden, indem er oder sie für Zeit und Strecke der Fahrt zahlt. Im Zuge der Product Journey wurden gemeinsam mit den externen Teilnehmern Proto-Personas für den Lebenszyklus des E-Tretrollers identifiziert (siehe Bild 7). Der Verlauf des Graphen beschreibt die eingeschätzte Qualität der User Experience. Als priorisierte Zielgruppen des E-Tretrollers wurden in einem Fall z. B. die Proto-Personas „Tim Tourist“ und „Dieter Dienstfahrt“ ausgewählt. Für das Beispiel „Tim Tourist“ zeigt Bild 8 die User Journey für den Use Case „Sightseeing in Berlin“, beginnend beim Erstkontakt mit dem Produkt bis zur Inbetriebnahme.

Produkt:	E-Tretroller		Nutzer:	Tim Tourist	Use Case:	Sightseeing Berlin
<p>Webrecherche/ Touristikinfo</p> <p>Hotelrezeption</p> <p>Download App</p> <p>Roller buchen</p> <p>Roller finden</p> <p>Inbetriebnahme</p>						
Personalisierungs- optionen	QR Codes an POIs	Personalisierte Flyer für „Rides“	Streckeninfo mit POIs	Verfügbarkeitsanzeige	Personalisierte Zahlung und Bestätigung	Individuelle Voreinstellung (Lenker, Bremse)
	Lokalisierte Werbung aufs Handy oder Werbetafeln	Personalisierte Preise	User-History in App	Navigationshilfe	Bestätigung	Individuelle Einstellungsempfehlungen
Nutzen/ Aufwand Nutzer	Persönliche Ansprache	Kombinierte Eintritte	Preis- und Vorteilsvergleich	Bringservice	Rollerverteilung nach Nutzerprofilen	
	Sorgenfreiheit	Preisvorteil (Mehr)-Erlebnis, UX	Übersichtlichkeit/ Transparenz	Komfort	Transparenz	Komfort
	Komfort/ Belastungsreduzierung		Kommunikation	Sicherheit	Einfachheit	Sicherheit
			Verfügbarkeit	Sorgenfreiheit	Preisvorteil	
	+	s.o.	s.o.	s.o.	++	s.o.

Bild 8: Beispiel User Journey E-Tretroller 1: Tim Tourist

Beispielhaft sei die Station „Roller buchen“ auf der User Journey genannt, die im Beispiel bereits von einem hochwertigen Nutzungserlebnis ausgeht. Personalisierungsoptionen liegen beispielsweise in einem personalisierten Zahlungsvorgang und Bestätigung der Buchung, die auf Seiten des Nutzers zu einem Preisvorteil, mehr Transparenz und Einfachheit führen und aufgrund des günstig bewerteten Nutzen-Kosten Verhältnis somit als mögliche Personalisierungspotenziale aus dem Beispiel hervorgehen.

Als weiteres Beispiel für eine User Journey ist in Bild 9 die User Journey der Proto-Persona „Dieter Dienstfahrt“ dargestellt, die für den Use Case „Weg zum Bahnhof“ analysiert wurde. Personalisierungspotenziale wurden hier beispielsweise für das Anmieten des Rollers identifiziert, bei dem eine personalisierte Kommunikation mit dem Nutzer mit Hilfe von Pop-up-Benachrichtigungen der Betreiber-App das Nutzungserlebnis zusätzlich verbessern können. Diese führen seitens des Nutzers zur mehr Effizienz und Komfort, sind aber aus Unternehmenssicht überschaubar im Aufwand.

Produkt:	E-Tretroller			Nutzer:	Dieter Dienstfahrt		Use Case:	Weg zum Bahnhof		
Nutzen/ Nutzen für Aufwand Nutzer	Hyperpersonalisierung	Tarifvorschlag	Pop-up proposal (kalenderbasiert, location-based)	Fußgänger-Navigation	Pop-up and confirm	Begrüßung Ansprache Info aufs Ohr (Ladezustand, Zeit)	Navigation mit Gehwegwarnung	Abstelltipps	Good-bye	
	Info-begrenzung	Kostenoptimierung	Erinnerung Effizienz	Schnelles Finden	Komfort Effizienz	Beruhigung Stressreduzierung	Schneller Sicherheit Bußgeldvermeidung	Ordnung, Kommunen-Betreiber-nutzen	Wertschätzung, UX	
	-	+	++	+	++	-	+	++	++	

Bild 9: Beispiel User Journey E-Tretroller 2: Dieter Dienstfahrt

Hinsichtlich des zeitlichen Aufwands zeigte sich, dass eine Product Journey ebenso wie eine User Journey mit 1,5 Stunden Dauer anzusetzen ist. Bei einer einfachen Potentialanalyse kann man von 5 Personas (Nielsen 2020) ausgehen. Damit ergibt sich neben dem Aufwand für die Vorbereitung durch den Veranstalter und den Moderator ein Zeitaufwand von 6 Sitzungen je 1,5 Stunden, was 9 Stunden pro Teilnehmer und bei 5 Teilnehmern somit 45 Stunden Personaleinsatz für die Teilnehmer bedeutet. Bei methodischer und inhaltlicher Vertrautheit des Veranstalters bzw. Moderators sind 2 Wochen Arbeitszeit für Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung anzusetzen. Realistischerweise lässt sich damit eine Analyse innerhalb eines Monats bestreiten, mit einem Personaleinsatz von 150 Stunden. Dies trifft bei guter Verfügbarkeit der Teilnehmer zu und setzt bei verteilten Teams oder unter Pandemiebedingungen die digitale Durchführung voraus.

6 Diskussion und Ausblick

Die vorgestellte Methode zielt auf die Identifizierung von Personalisierungslösungen ab, die einen Nutzen begründen. Sie kombiniert radikale Nutzerzentrierung, Lebenszyklusorientierung und die Suche nach dem Nutzen für den Kunden bzw. Anwender des Produkts, ohne das Nutzen-Kosten-Verhältnis für den Hersteller bzw. Betreiber außer Betracht zu lassen. Sie eignet sich somit für die

Ermittlung von Personalisierungspotenzialen in frühen Phasen der Produktinnovation und Produktentwicklung.

Die Methode wurde an Beispielen aus dem Bereich Mobilität, Bauwirtschaft und Dienstleistung erprobt und die Anwendbarkeit bei physischen Produkten und Dienstleistungen belegt. Aus der Anwendung auf das für die Teilnehmer fiktive E-Tretroller-Beispiel wird deutlich, dass die Methode sich auch auf Neuentwicklungen anwenden lässt, wenn zumindest eine grundsätzliche Produktidee existiert, für die eine Product Journey aufgestellt werden kann. Bei der Weiterentwicklung existierender Produkte kann dagegen auf Erfahrungen oder Marktforschungsergebnisse zurückgegriffen werden.

Die Erprobungen mit externen Teilnehmern bestätigen die Anwendbarkeit der Methode in Workshops sowie einen angemessenen Lernaufwand. Dies ist insbesondere vor dem Umstand zu bewerten, dass die Erprobungen sowohl in Präsenzworkshops als auch in Online-Formaten mit eingeschränkten Interaktionsmöglichkeiten durchgeführt wurden.

Im Rahmen dieses Beitrags wurden ausgewählte Beispiele aus der Erprobung präsentiert. In der Praxis können wenige Proto-Personas ausreichen, wenn eine oder wenige Nutzergruppen im Fokus stehen und die für diese identifizierten Nutzenpotenziale den absehbaren Personalisierungsaufwand bereits rechtfertigen. Um den Gesamtumfang an Personalisierungspotenzialen für ein Produkt zu bestimmen, sollten dagegen mehrere User Journeys für alle relevanten Nutzergruppen erstellt werden, wodurch der Durchführungsaufwand steigt.

Um die Methode an unterschiedliche Ausgangssituationen anzupassen, gibt es Skalierungsmöglichkeiten. In einem iterativ-inkrementellen Vorgehen kann es sinnvoll sein, mit einer groben Product Journey und wenigen User Journeys zu beginnen, um bestehende Annahmen zu strukturieren. In weiteren Iterationen können zuvor gewonnene Erkenntnisse genutzt werden, um diese weiter zu detaillieren oder weitere relevante Nutzergruppen zu betrachten. Der Aufwand pro Iteration kann auf diese Weise geringgehalten werden. Umgekehrt können z. B. Proto-Personas leicht durch detailliertere Ansätze ersetzt oder eine vorgelagerte empirische Nutzerforschung ergänzt werden. Die Methode bietet somit die notwendige Flexibilität, um an spezifische Anforderungen von Unternehmen angepasst zu werden und eventuell bereits vorliegende Erkenntnisse weiterzuverwenden. In der geplanten weiteren Erprobung anhand konkreter Unternehmensbeispiele soll die Methode auf diese Weise weiterentwickelt und validiert werden.

Das bisherige Vorgehen berücksichtigt den Personalisierungsnutzen für den Nutzer, nicht jedoch seinen dafür notwendigen Aufwand. Im Sinne einer radikal nutzerzentrierten Methode sollte daher für die Weiterentwicklung der Methode betrachtet werden, wie der Aufwand auch im Nutzen-Kosten Verhältnis berücksichtigt werden kann. Beispielsweise stellt sich die Frage, welche personenbezogenen Daten benötigt würden und inwiefern Nutzer bereit wären, diese zur Verfügung zu stellen. Die Bereitschaft, persönliche Angaben zu machen ist dabei wiederum auch von der konkreten Art des Personalisierungsnutzens abhängig (Wadle et al. 2019). Die mit der hier vorgestellten Methode identifizierten Personalisierungspotenziale können dazu beitragen, diese Fragestellungen an konkreten Beispielen und damit realistischer zu untersuchen.

Literatur

- Ardilio und Laib 2008 ARDILIO, Antonio; LAIB, Stefanie: Technologiepotenzialanalyse - Vorgehensweise zur Identifikation von Entwicklungspotenzialen neuer Technologien. In: Bullinger, Hans-Georg (Hrsg.): Fokus Technologie. Chancen erkennen, Leistungen entwickeln. München: Hanser, 2008, S.175-217.

- Baumberger 2007 BAUMBERGER, Georg Christoph: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. Technische Universität München, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Dissertation, 2007.
- Cooper 1999 COOPER, Alan: The inmates are running the asylum. Indianapolis, Ind.: Sams, 1999.
- Ellen MacArthur Foundation 2019 ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: Product Journey Mapping. URL <https://www.circulardesignguide.com/post/product-lifecycle-mapping>. – Aktualisierungsdatum: 2019 – Überprüfungsdatum 06.11.2020.
- Epsilon 2018 EPSILON: New Epsilon research indicates 80% of consumers are more likely to make a purchase when brands offer personalized experiences. URL: <https://us.epsilon.com/pressroom/new-epsilon-research-indicates-80-of-consumers-are-more-likely-to-make-a-purchase-when-brands-offer-personalized-experiences>. Aktualisierungsdatum: 09.01.2018 – Überprüfungsdatum 21.03.2021.
- Følstad und Kvale 2018 FØLSTAD, Asbjørn; KVALE, Knut: Customer journeys: a systematic literature review. In: Journal of Service Theory and Practice 28 (2018), Nr. 2, S. 196–227.
- Gotthelf 2012 GOTTHELF, Jeff: Using Proto-Personas for Executive Alignment. URL <https://uxmag.com/articles/using-proto-personas-for-executive-alignment> – Überprüfungsdatum 06.11.2020.
- Hämmerl und Dangelmaier 2018 HÄMMERL, Robert; DANGELMAIER, Manfred: Mass Personalization und die Erfolgsfaktoren nach dem Stuttgarter Modell. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018), Nr. 11, S. 730–733.
- Held et al. 2018 HELD, Michael; WEHNER, Daniel; HÄMMERL, Robert; DANGELMAIER, Manfred; BRIEM, Ann-Kathrin; REIFF, Colin; WULLE, Frederik: Personalization in the automotive and building sector – research program of the High-Performance Center »Mass Personalization« in Stuttgart. In: Proceedings of the 8th International Conference on Mass Customization and Personalization–Community of Europe (MCP-CE 2018). Novi Sad, Serbia: 2018.
- Hornik et al. 2020 HORNIK, Anna; KLOSE, Georg; STEHNKEN, Thomas; SPALTHOFF, Florian; GLOCKNER, Holger; GRÜNWARD, Christian; BONIN, Daniel; SACHS, Julian: Zukunft von Wertvorstellungen der Menschen in unserem Land. URL https://www.vorausschau.de/files/BMBF_Foresight_Wertestudie_Langfassung.pdf – Überprüfungsdatum 02.12.2020.
- Janson 2012 JANSON, Andreas: Der Kunde im Fokus: Das Konzept der Customer Journey. 1. Auflage, digitale Originalausgabe. München: Grin Verlag, 2012.
- Kaneko et al. 2018 KANEKO, Kazuki; KISHITA, Yusuke; UMEDA, Yasushi: Toward Developing a Design Method of Personalization: Proposal of a Personalization Procedure. In: Procedia CIRP 69 (2018), S. 740–745.
- Keller und Ott 2019 KELLER, Bernhard (Hrsg.); OTT, Cirk Sören (Hrsg.): Touchpoint Management: Entlang der Customer Journey erfolgreich agieren. 2. Auflage. Freiburg, München, Stuttgart: Haufe Group, 2019.
- Kirchgeorg 2018 KIRCHGEORG, Manfred; Gabler Wirtschaftslexikon. URL <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kundennutzen->

- 39021/version-262440. – Aktualisierungsdatum: 15.02.2018 – Überprüfungsdatum 20.12.2020.
- Lindemann 2016 LINDEMANN, Udo (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, 2016.
- Lindemann et al. 2006 LINDEMANN, Udo; REICHWALD, Ralf; ZÄH, Michael F.: Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer, 2006 (VDI-Buch).
- Nielsen und Landauer 1993 NIELSEN, Jakob; LANDAUER, Thomas K.: A mathematical model of the finding of usability problems. In: Arnold, Bert; Van der Veer, Gerrit; White, Ted (Hrsg.): Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '93. New York, USA: ACM Press, 1993, S. 206–213.
- Nielsen 2020 NIELSEN, Jakob: Why You Only Need to Test with 5 Users. URL <https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/>. Aktualisierungsdatum: 18.03.2020 – Überprüfungsdatum 02.12.2020.
- Piller 2006 PILLER, Frank Thomas: Mass customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2006 (Gabler Edition Wissenschaft).
- Reiß und Koser 2004 REISS, Michael; Koser Martin. From Mass Customization to Mass Personalization A New Competitive Strategy in E-Business. In: Bensberg, Frank; vom Brocke, Jan; Schultz, Martin (Hrsg.): Trendberichte zum Controlling. Physica, Heidelberg, 2004.
- Spath et al. 2010 SPATH, Dieter (Hrsg.), SCHIMPF, Sven; LANG-KOETZ, Claus: Technologiemonitoring: Technologien identifizieren, beobachten und bewerten. Stuttgart: Fraunhofer IAO, 2010.
- Schoblik et al. 2020 SCHOBLIK, Johanna; KÖLMEL, Bernhard; BULANDER, Rebecca; RICHTER, Alexander; WAIDELICH, Lukas: Methoden des kundenzentrierten Innovationsmanagements als Basis der personalisierten Produkt-/Servicegestaltung, Bd. 17. In: Dialogmarketing Perspektiven 2019/2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 1–19.
- Stickdorn und Schneider 2011 STICKDORN, Marc; SCHNEIDER, Jakob: This is service design thinking : Basics, tools, cases. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011.
- Theobald und Jentschke 2020 THEOBALD, Elke; JENTSCHKE, Mirjam: Kundenzentriertes Markenmanagement: Effektive Markenführung entlang der Customer Experience Journey. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Gabler, 2020 (Springer eBook Collection).
- Wadle et al. 2019 WADLE, Lisa-Marie; MARTIN, Noemi; ZIEGLER, Daniel: Privacy and Personalization: The Trade-off between Data Disclosure and Personalization Benefit. In: Papadopoulos, George Angelos; Samaras, George; Weibelzahl, Stephan; Jannach, Dietmar; Santos, Olga C. (Hrsg.): Adjunct Publication of the 27th Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization - UMAP'19 Adjunct. New York, USA: ACM Press, 2019, S. 319–324.
- West et al. 2020 WEST, Shaun; STOLL, Oliver; ØSTERLUND, Marika; CSERNETZKY, Petra Müller; KEIDERLING, Felix; KOWALKOWSKI, Christian: Adjusting customer journey mapping for application in industrial product-service systems. In: International Journal of Business Environment 11 (2020), Nr. 3, S. 275–297

Corporate Coworking – ein Entwurf für die Erprobung neuer Formen der Zusammenarbeit in Industrieunternehmen

Corporate Coworking – a concept to explore new ways of collaboration in industrial companies

Eva Höfer¹, Jens Krzywinski²

¹Robert Bosch GmbH, 71272 Renningen

Eva.Hoefler@de.bosch.com

²TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 01219 Dresden

jens.krzywinski@tu-dresden.de

Abstract (deutsch): Unsere bisherige Arbeit unterliegt durch die im Frühjahr 2020 in Europa angekommene COVID-19-Pandemie radikalen Veränderungen. War das Arbeiten im Homeoffice bisher für viele Mitarbeitende in Unternehmen eine Möglichkeit des gezielten Rückzugs, wurde es in kürzester Zeit zur temporären Pflicht. Für Unternehmen stellt sich, insbesondere in Bezug auf Arbeitsweisen und Unternehmensstandorte, die Frage nach einem „neuen Normalzustand“. Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben macht es sich zum Ziel, Corporate Coworking als potenzielle neue Möglichkeit der Zusammenarbeit von Mitarbeitenden an Unternehmensstandorten zu erproben. Neben einem Rückblick in die Entwicklung von Coworking steht der Entwurf eines internen Corporate Coworking-Ökosystems im Fokus. Es wird beschrieben, welchen Einfluss die COVID-19-Pandemie auf das Forschungsvorhaben hat und wie Anpassungen umgesetzt wurden. Abschließend folgt eine Darstellung erster Nutzungszahlen und ein Ausblick auf nächste Schritte des Vorhabens. Langfristig soll das hier vorgestellte Forschungsvorhaben Unternehmen dabei unterstützen, ihr nutzerzentriertes Arbeitsökosystem der Zukunft mit den eigenen Mitarbeitenden selbst zu gestalten.

Keywords (deutsch):

Corporate Coworking, Designforschung, Innovationsmanagement, Zusammenarbeit

Abstract (english): The COVID-19-Pandemic, which started in spring 2020 in Europe, changed the way we work radically. While working from home used to be a possibility of focused retreat for employees, it quickly became a temporary obligation. For companies, the question of a „new normal state“ arises especially with regard to working methods and company locations. The presented research approach aims to explore corporate coworking as a potential new way of collaboration at companies. Besides a review of the development of coworking, the focus is on the design of a corporate coworking ecosystem. It will be described how the COVID-19 pandemic affects the research approach and how adaptations have been implemented. Finally, a presentation of first usage results and an outlook on next steps in the project follows. In long-term, the research project can help companies to design their company-specific user-centered work-ecosystem for the future with their own employees.

Keywords (english):

Corporate Coworking, Design Research, Innovation Management, Collaboration

1 Wandel unserer Arbeit

Die eigene Arbeit überwiegend physisch anwesend an einem Unternehmensstandort auszuüben, war bis zu Beginn des Jahres 2020 für die meisten Innovations- und Wissensarbeitenden normal (Bauer et al. 2020a). Durch die COVID-19-Pandemie und die daraus folgenden Einschränkungen zur Verhinderung einer Verbreitung, wurde dieser bis dahin als „normal“ geltende Zustand aufgelöst. Zum Schutz der Mitarbeitenden werden Meetings, Workshops, Gespräche und andere bisher meist in Präsenz durchgeführte Kommunikationsformate nun überwiegend durch digitale Formate ersetzt. Wo möglich, ist das Arbeiten im Homeoffice oder auch mobiles Arbeiten, über Lockdown-Phasen hinaus, in den Vordergrund gerückt (Bauer et al. 2020b). So erscheint ein Wendepunkt der bisherigen Arbeitsweise wahrscheinlich. Ob ein überwiegend digitales Zusammenarbeiten die Begegnung von Menschen an ihrem Arbeitsplatz und die Interaktion vor Ort jedoch ersetzen kann, bleibt fraglich. In diesem Zuge werden in Unternehmen vielerorts verschiedene Szenarien für die Gestaltung eines zukünftigen Normalzustands erarbeitet. Um optimale Bedingungen für Mitarbeitende bei der Umsetzung von Innovationen zu gewährleisten, war die Weiterentwicklung von Arbeitsweisen und Arbeitsorten bereits vor der COVID-19-Pandemie in vielen Industrieunternehmen ein fester Themenbestandteil. Begriffe wie „New Work“ werden in diesem Zuge durch die Bezeichnungen wie „New Normal“ oder auch „Next Normal“ ergänzt.

Um die eigene Wettbewerbsfähigkeit trotz radikaler Veränderungen zu erhalten, wird es für Unternehmen in der aktuellen Zeit von großer Bedeutung sein, ein besonderes Maß an Flexibilität, Reaktionsfähigkeit und Schnelligkeit bei der Anpassung von Arbeitsumgebungen zu gewährleisten. Dies wird durch eine aktuelle Prognose der OECD (2020) deutlich, welche beschreibt, dass die Wirtschaft unter den gegebenen Umständen nicht wieder zu einem Normalbetrieb zurückkehren kann. Eine vielerorts schnelle Umsetzung von Konzepten für Hygiene- und Abstandsregelungen zur Gewährleistung der Sicherheit der Mitarbeitenden an ihrem Arbeitsplatz scheint ein erster und wichtiger Schritt. Es bleibt jedoch die Frage, welche weiteren Maßnahmen und Anpassungen an die veränderten Arbeitsbedingungen notwendig sind, um die Innovationskraft von Unternehmen zu erhalten. Im Hinblick auf diese schnellen Veränderungen und vielen Unsicherheiten stehen Unternehmen vor großen Herausforderungen.

Das in diesem Beitrag beschriebene Forschungsvorhaben stellt einen Entwurf einer möglichen Neugestaltung der Zusammenarbeit von Mitarbeitenden an Unternehmensstandorten vor. Im weiteren Verlauf des Vorhabens sollen dessen Eigenschaften und Auswirkungen auf Mitarbeitende bei der Erarbeitung von Innovationsaktivitäten erprobt werden. Da dieses Vorhaben aus der Designforschung heraus entsteht, wird die Gestaltung von disziplinübergreifender Zusammenarbeit als ganzheitliches, nutzerzentriertes Ökosystem betrachtet. Dieses soll Mitarbeitende unterstützen und befähigen, Innovationen zu entwickeln. Auch Peschl und Fundneider (2016) beschreiben, dass Innovation nicht „gemacht“, sondern nur „ermöglicht“ werden kann. Dies wird darauf zurückgeführt, dass alle Formen von Wissens- und Innovationsprozessen auf kognitiven Prozessen beruhen, die niemals isoliert, sondern nur im Zusammenspiel von Raum, Organisation und sozialen Strukturen betrachtet werden können.

Für die weitere Forschungsarbeit stehen folgende, übergeordnete Fragen im Fokus:

- Wie kann eine neue Gestaltung von Zusammenarbeit an Unternehmensstandorten in einer aktuellen, durch Unsicherheiten geprägten Zeit aussehen?
- Wie kann die Zusammenarbeit an Unternehmensstandorten in einem zukünftigen, nutzerzentrierten Arbeits-Ökosystem gestaltet werden, um Mitarbeitende bei der Arbeit an Innovationsaktivitäten zu unterstützen?

- Welchen Einfluss hat eine neugestaltete Zusammenarbeit an Unternehmensstandorten auf die Arbeit von Mitarbeitenden, insbesondere bei deren Arbeit an Innovationsaktivitäten?

Um sich diesen Fragestellungen anzunähern, wird im Folgenden das Thema Coworking, bzw. die Entstehung sogenannter Coworking Spaces und deren Einfluss auf die Transformation von traditionellen Arbeitsweisen beleuchtet.

1.1 Coworking

Weltweit entstehen durch die Veränderung von Umwelt und fortschreitender technischer Entwicklungen stets neue Arbeitsphänomene. Eines dieser Phänomene stellt Coworking bzw. das Arbeiten in Coworking Spaces dar. Diese Orte sind einerseits Räumlichkeiten, die geteilte Arbeitsplätze und Infrastruktur anbieten. Sie werden häufig von Selbstständigen, Startups und Wissensarbeitenden genutzt (Mehl 2017; Cabral und van Winden 2016; Gandini 2015). Außerdem bieten viele Coworking Anbieter durch die gezielte Förderung einer Coworking-Gemeinschaft Nutzenden die Möglichkeit, Wissen auf beruflicher und privater Ebene miteinander zu teilen (Mehl 2017; Bauer 2017; German Coworking Federation 2019).

In der Coworking-Literatur wird das Jahr 2005 signifikant als Geburtsstunde von Coworking genannt (Josef 2019; Cabral und van Winden 2016; Gandini 2015). Zu diesem Zeitpunkt wurde von Brad Neuberg, das „the spiral muse“-Coworking Space in San Francisco gegründet. Seit 2005 bis Anfang 2020 wuchs die Anzahl solcher Arbeitsorte stetig (Cabral und van Winden 2016; Gandini 2015). Carsten Foertsch, Gründer von „deskmag“, einem etablierten online Coworking-Portal und -Magazin, prognostizierte für 2020 eine Anzahl von 26.000 Coworking Spaces und 2.7 Millionen Coworking Space-Mitgliedern weltweit (Foertsch 2019). Welche Auswirkungen die COVID-19-Pandemie auf diese Zahlen ausübt, kann noch nicht abschließend bewertet werden. Neben der Gründung des ersten Coworking Space etabliert Neuberg auch den Begriff „Coworking“ in der Schreibweise ohne Bindestrich. Hierbei differenziert er zwischen „Coworking“ als unabhängiges Arbeiten in einer Gemeinschaft mit geteilter Infrastruktur und „Co-working“ als das gemeinsame Arbeiten an einem Thema (Fost 2008).

Die Definition von Coworking Spaces geht in der Literatur über einen reinen Raumanbieter hinaus. „Echtes Coworking“ definiert sich über folgende Coworking-Grundwerte: Zusammenarbeit, Gemeinschaft, Offenheit, Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit (Schürmann 2013) Diesen Werten folgen weitere in der Literatur aufgeführte Eigenschaften von Coworking (Josef und Back 2019; Mehl 2017; Moriset 2013; Schürmann 2013):

Coworking Spaces ...

- ... bieten mietbare, flexible Arbeitsplätze
- ... ermöglichen das Teilen von Infrastruktur und Arbeitsplatz gegen Gebühr
- ... motivieren, Wissen mit anderen Nutzenden zu teilen
- ... unterstützen soziale Strukturen
- ... sind hierarchiefreie Orte, da Nutzende voneinander unabhängig arbeiten
- ... fördern ein Netzwerk für Wissensaustausch, Innovation und Weiterbildung
- ... stellen ein integriertes, auf die Bedürfnisse von Gründenden, Kreativ- und Wissensarbeitenden ausgelegtes Business- und Arbeitsmodell zur Verfügung
- ... ermöglichen es Nutzenden, voneinander unabhängig, Seite an Seite oder gemeinschaftlich zusammen zu arbeiten
- ... sind auch für unternehmensübergreifende Gruppen nutzbar, die für eine bestimmte Zeit zusammen an einem Projekt arbeiten

Zusätzlich zu „echten Coworking Spaces“ entwickeln sich außerdem sogenannte „Hybride Coworking Modelle“ (Gauger und Pfnür 2019). Bei Betreibenden dieser Art von Coworking-Modellen ist die Anzahl an mietbaren Einzelbüros im Verhältnis zu mietbaren geteilten Arbeitsbereichen höher. Darüber hinaus liegt der Schwerpunkt solcher Spaces nicht auf der Einhaltung der fünf Coworking-Grundwerte. Deutlich wird dies unter anderem an verhältnismäßig teuren Mitgliedschaften, die dem Coworking-Wert der Zugänglichkeit widersprechen (Werther 2019). Josef (2019) unterteilt die bisherige Entwicklung in drei Phasen. Im Zeitraum von 2005 bis 2010 wurde Coworking meist aus Zweckgründen betrieben. Dem schließt sich von 2010 bis 2015 die Phase der Professionalisierung von Coworking und somit das Entwickeln von Coworking-Geschäftsmodellen durch Betreibende an. Ab 2015 beginnt mit Corporate Coworking die Auseinandersetzung von Unternehmen mit Coworking. In diesem Zusammenhang wird das steigende Interesse von Unternehmen als ausschlaggebend für das anhaltend konstante Wachstum (bis 2019) von Coworking genannt (Josef 2019).

2 Corporate Coworking

Erste Definitionen von Coworking im Zusammenhang mit Unternehmen sind unter anderem bei Schürmann (2013) zu finden. Er beschreibt dieses Phänomen als „Corporate Powered Coworking“. Eine weitere Begriffsdefinition in Form des „Corporate-Coworking“ folgt durch Mehl (2017). Sie beschreibt dieses Phänomen als nahezu unerforscht. Das Fraunhofer IAO prägt mit der Studie „Coworking – Innovationstreiber für Unternehmen?“ den Begriff des „Corporate Coworking“ in der Schreibweise ohne Bindestrich. Fokus dieser Studie ist die Frage, ob Coworking Unternehmen bei der Entwicklung von Innovationen unterstützen kann (Bauer 2017). Für die weitere Beschreibung von Coworking aus Unternehmenssicht wird die Bezeichnung „Corporate Coworking“ übernommen. Josef (2019) weist ebenfalls auf eine vorhandene Forschungslücke im Hinblick auf Corporate Coworking hin und beschreibt dieses Phänomen als, in der normalen Coworking-Forschung, wenig betrachtete Thematik. Im Rahmen ihrer Forschung beschreibt sie fünf verschiedene Nutzungsszenarien:

1. Coworking für spezielle Rollen/Teams
2. ... als alternativer Arbeitsort
3. ... für Externe in eigenen Räumlichkeiten
4. ... anstelle eines eigenen Büros
5. ... als Geschäftszweig

Eine weitere Differenzierung erfolgt bei der oben genannten Studie von Bauer (2017). Hier werden neun potenzielle Corporate Coworking-Modelle mit ihren möglichen Chancen und Risiken für Unternehmen beleuchtet. Das „Interne Corporate Coworking Space“ ist eines dieser Modelle. Hierbei wird die Möglichkeit beschrieben, dass Unternehmen in ihren eigenen Räumlichkeiten Coworking Space-ähnliche Orte für ihre Mitarbeitenden schaffen. Arbeitsplätze können hier temporär durch Mitarbeitende unterschiedlicher Fachbereiche des Unternehmens genutzt und die vorhandene Infrastruktur geteilt werden. Die Studie enthält eine Befragung von Führungskräften in Unternehmen zur Einschätzung möglicher Chancen und Risiken dieses Modells. Als größte Risiken wurden eine Ablenkung von eigentlichen Aufgaben und eine mögliche Ablehnung des Space von den Mitarbeitenden genannt. Die größten Chancen wurden einem verbesserten Informationsaustausch mit bereichsfremden Mitarbeitenden und der Entwicklung neuer bereichsübergreifender Ideen zugesprochen. Auch die Faktoren des konzentrierten Rückzugs, der besseren Motivation von Mitarbeitenden und der Zugewinn von internem Know-how wurden als große Potenziale gesehen. Bauer (2017) bezeichnet dieses Modell auf Grundlage der durchgeführten Befragung einerseits als potenzielles Tool zur Initiierung kulturellen Wandels. Andererseits kann der Wunsch nach einer Förderung des fachbereichsübergreifenden Austauschs für Unternehmen eine Motivation darstellen, einen solchen Ort bei sich zu etablieren. Als kritisch wird betrachtet, ob ein interner Coworking Space in einem Unternehmen dasselbe Potenzial entfalten kann wie außerhalb eines Unternehmens. Eine

mögliche Herausforderung liegt ebenfalls darin, eine ähnliche, „innovative“ Atmosphäre und Kultur in einem unternehmenseigenen Coworking Space zu schaffen (Bauer 2017).

Eine systematische Literaturanalyse zur Identifizierung möglicher Corporate Coworking-Formen wurde von Gauger und Pfnür (2019) durchgeführt. In diesem Rahmen werden die Beweggründe zur Nutzung herkömmlicher Coworking Spaces dargestellt (Bild 1). Hieraus leiten sie Handlungsempfehlungen und Umsetzungsmöglichkeiten für Unternehmen ab: Einmietung, Untervermietung/Ideenschmiede und Kooperation (s. Bild 1 – Spalte: Modelle für Corporate Coworking Spaces).

Perspektive	Gründe für die Arbeit in Coworking Spaces	Erfolgsfaktoren von Coworking Spaces	Abgeleitete Empfehlungen für unternehmenseigene Arbeitsflächen
Kategorie	Nutzerperspektive	Betreiberperspektive	Unternehmensperspektive
Gemeinschaft	Hoffnung auf soziale Interaktionen, Netzwerken, Austausch	Bereitstellen von Community Manager, Netzwerkveranstaltungen, Pitches, Fortbildungen	Etablierung eines Feel-Good-Managers, Sozial- und Freizeiträume für soziale Interaktion und Gespräche schaffen, Netzwerkveranstaltungen etablieren
Kollaboration	Hoffnung auf Wissensaustausch, Feedback, Zusammenarbeit	Community-Apps, Boards, Steckbriefe, hohe Diversität an Mieter sicherstellen	Eigene Community-Apps/Kollaborationsplattform einführen, Mitarbeitersteckbriefe
Innovation	Kollektive Ideengenerierung, Nutzung inspirierender Flächen, Profitieren von Diversität	Hohe Diversität an Mietern, Bereitstellen von agilen Flächen wie Design-Thinking-Räumen	Innovative Raumkonzepte erschaffen, Flächen auch für externe Nutzer öffnen, um Wissens- und Ideenaustausch über Diversität zu fördern
Produktivität	Nutzung vorhandener Services/Dienstleistungen, Zusammensetzung der Flächen, geringere Fahrtstrecken	Zentrale Standorte, A- und B-Lagen, mehrere Standorte in verschiedenen Städten, auf Nutzerbedürfnisse ausgerichtete Flächensammensetzung	Flächensammensetzung evaluieren, für jede Art von Arbeit entsprechende Flächen zur Verfügung stellen, unterstützende Dienstleistungen anbieten
Flexibilität	Zeitlich flexible und unverbindliche Nutzung, kurze Laufzeiten, örtliche Unabhängigkeit	kurzfristige Mietverträge, Pay-per-use, Angebot von standortungebundenen Mitgliedschaften	Professionellen Betreiber einsetzen, Vertrauensarbeit anbieten, zeitliche Verfügbarkeit der Büroflächen ausweiten

Modelle für Corporate Coworking Spaces

1. Einmietung: Unternehmen mieten Arbeitsplätze in bestehendem Coworking Space
2. Untervermietung/Ideenschmiede: Unternehmen eröffnen eigenen Coworking-ähnlichen Space
3. Kooperation: Unternehmen beauftragen externen Coworking-Betreiber für eigene Räumlichkeiten

Bild 1: Nutzungsgründe von Coworking Spaces und Handlungsempfehlungen für Unternehmen. (Gauger und Pfnür, 2019, S. 13)

Um den Erfolg einzelner Modelle wissenschaftlich bewerten zu können, sollten aus Perspektive der Verfassenden weitere Untersuchungen folgen, die mit oder in Unternehmen selbst durchgeführt werden. Die genannten Beschreibungen potenzieller Modelle können hierbei richtungsweisend für die Auswahl geeigneter Modelle und weiterer Untersuchungen sein.

2.1 Rahmenbedingungen des Forschungsvorhabens

Mit dem Fokus auf das Ziel der Förderung von disziplinübergreifender Zusammenarbeit an Unternehmensstandorten für den Erhalt von Innovationskraft in Unternehmen wird im weiteren Verlauf das Modell des „Internen Corporate Coworking Space“ genauer betrachtet. Durch eine Kooperation mit einem Industrieunternehmen können die bisher vorhandene Modellbeschreibung und ihre potenziellen Chancen und Risiken genauer evaluiert werden. Hierfür wird ein anwendbarer Entwurf eines Corporate Coworking Space gestaltet. In den folgenden Kapiteln wird dieser Entwurf mit seinen Elementen vorgestellt. Das hier beschriebene Forschungsvorhaben kann dadurch einen Beitrag zur bisher in geringem Umfang vorhandenen Corporate Coworking-Forschung leisten (Josef 2019; Mehl 2017).

Die Erprobung findet exemplarisch am Campus für Forschung und Vorausbildung der Robert Bosch GmbH in Renningen statt. Von den insgesamt rund 400.000 Mitarbeitenden des Unternehmens arbeiten etwa 1900 in Renningen. Der Aufbau des Standorts erinnert mit den dort ansässigen verschiedenen Fachbereichen und wissenschaftlichen Disziplinen an einen Universitäts-Campus. Die Vielfalt der dort angesiedelten Disziplinen stellt eine Besonderheit dieses Ortes dar.

3 Entwurf eines Corporate Coworking Space-Ökosystems

Basierend auf den von Gauger und Pfnür (2019) gebildeten Kategorien in Bild 1 wird in Tabelle 1 ein Entwurf eines internen Corporate Coworking Space-Ökosystems beschrieben. Diesem folgt eine Beschreibung des räumlichen Aufbaus.

Tabelle 1: Entwurfsbeschreibung eines internen Corporate Coworking Space-Ökosystems (Kategorien nach Gauger und Pfnür (2019))

Kategorie	Entwurfsbeschreibung des internen Corporate Coworking Space-Ökosystems
Gemeinschaft	Interne Corporate Coworking-Fläche für alle Mitarbeitenden am Standort; abteilungs- und fachbereichsübergreifende Zusammenarbeit möglich; Erprobung von Coworking-Elementen mit Integration der Mitarbeitenden im Unternehmen; Community-Manager:in als Ansprechpartner:in vor Ort
Kollaboration	Begleitende Online Community im Social-Intranet; analoges Community Board (Eintragung von Mitarbeitenden mit Thema, Expertise und Zeitraum der Buchung; Veranstaltungskalender) Community- und Feedback-Wand
Innovation	Übertragung von Coworking Space-Architektur; Einladen von Mitarbeitenden aus anderen firmeninternen Standorten möglich (Unterstützung des Austausches mit Geschäftsbereichen, insbesondere bei der Entwicklung von Innovationsaktivitäten); für Mitarbeitende als Plattform nutzbar, um Ideen zur Weiterentwicklung von Zusammenarbeit einbringen zu können; Etablierung der fünf Coworking-Grundwerte (Zusammenarbeit, Gemeinschaft, Offenheit, Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit)
Produktivität	Unterschiedlich ausgestattete Arbeitsplätze für verschiedene Arbeitsphasen; planbare Zusammenarbeit; begleitende Untersuchungen, welchen Einfluss dies auf die Zusammenarbeit hat
Flexibilität	Flexibles Raumkonzept, anpassbar an vielfältige Nutzungsbedürfnisse; verschiedene Arbeitsbereiche mit Rolltoren abtrennbar; 16 buchbare und voll ausgestattete Arbeitsplätze mit Tischen auf Rollen (Fix-Desk-Arbeitsplätze); 18 nicht buchbare Arbeitsplätze (Hot-Desk-Arbeitsplätze); Stromversorgung von der Decke und an den Seitenwänden; ca. vier weitere, flexibel einsetzbare Zusatztische; keine Kosten für die Buchung; Beitrag der Mitarbeitenden – eigenes Wissen mit der Community teilen; Buchung über bestehendes Raumbuchungs-Tool; Buchung min. 1 Tag bis max. 30 Tage

3.1 Umsetzung im Unternehmen

Dem vorgestellten Raumkonzept wurden zum einen Erkenntnisse aus der Coworking-Literatur zugrunde gelegt, andererseits wurden Mitarbeitende in den Entwicklungsprozess miteinbezogen. Im Rahmen zweier Workshops wurden Mitarbeitende eingeladen, ihre Ideen und Bedürfnisse in der Entwurfsphase einzubringen. Hierdurch konnte zusätzlich ein Kennenlernen der Corporate Coworking Space-Betreibenden und den zukünftigen potenziellen Nutzenden ermöglicht werden. Die Vorbereitungen wurden durch eine Exkursion der Verfasserin in ein externes Coworking Space ergänzt, um Impulse des echten Coworking in den Entwurf integrieren zu können. Anschließend wurden die Anforderungen in Form eines Lastenheftes, das beschreibt, welche Bereiche in welcher Form im Corporate Coworking Space vorhanden sein sollten, in einem Projektteam weiterbearbeitet. Das Projektteam bestand aus dem internen Facility Management (Bauleitung), einem externen

Architekturbüro (architektonischer Entwurf (Architekturbüro Scope Stuttgart)) und der Verfasserin dieses Beitrags (Designforschung – Erarbeitung der Strategie und des Ökosystems). Um für die spätere Etablierung im Unternehmen eine Identifikation und Sichtbarkeit des Entwurfs für Mitarbeitende zu gewährleisten, erhielt das Projekt den Namen „X-Change Lab“. Dieser wurde aus der vorherigen Nutzung als Werkstatt und Labor (Lab) und der zukünftigen Nutzung als Ort des Austauschs (Exchange) abgeleitet.

3.2 Raumkonzept

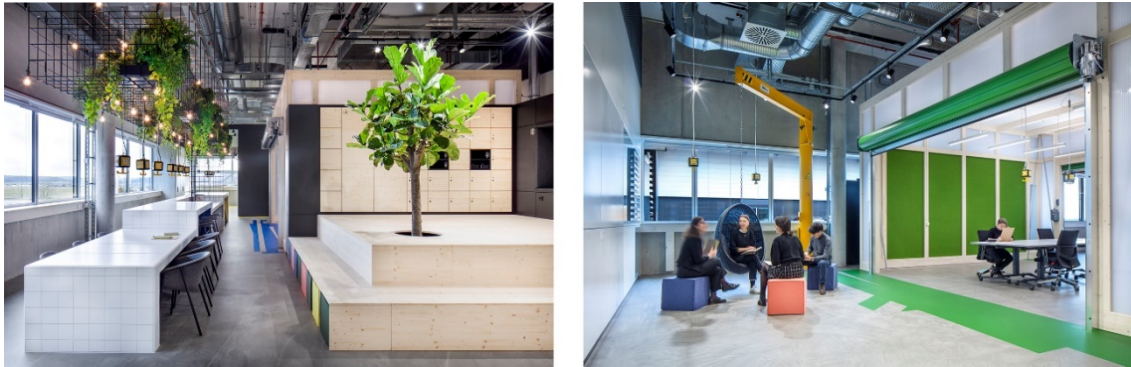


Bild 2: Ansicht X-Change Lab Corporate Coworking Space (Fotograf Markus Guhl)

Wie in Bild 2 (links) und Bild 3 sichtbar, bietet der X-Change Lab-Entwurf den Mitarbeitenden einen mit Schließfächern und Garderobe ausgestatteten, offenen „Welcome-Bereich“. Den zentralen Mittelpunkt des Space bildet die Theke mit Hot-Desk-Arbeitsplätzen für spontanes Arbeiten ohne vorherige Buchung. In der Theke ist zudem eine Kaffee- und Teeküche integriert. Um diesen Mittelpunkt herum sind drei farblich (blau, grün und gelb) gekennzeichnete Räume angeordnet (s. Bild 3). Diese, auch „Cubes“ genannten, Bereiche bieten buchbare Hot-Desk-Arbeitsplätze. Jeder dieser Arbeitsplätze ist mit technischem Equipment ausgestattet (Monitor, Tastatur, Maus, Dockingstation), sodass lediglich der eigene Laptop mitgebracht werden muss. Ein Arbeitsplatz kann von Mitarbeitenden des Standorts Rentingen gebucht werden. Es ist außerdem möglich, Mitarbeitende anderer firmeninterner Standorte und Geschäftsbereiche zur Zusammenarbeit einzuladen. Um, ähnlich wie in Coworking Spaces die Vernetzung unterschiedlicher Personen zu fördern, wird die Buchung zunächst auf mindestens einen bis max. 30 Tage festgelegt. Die Buchung erfolgt unter Angabe des Themas, an dem gearbeitet wird. Das ermöglicht die Identifikation von Zusammenarbeitspotenzialen durch das Community-Management.

Zusätzlich zu den Arbeitsplätzen steht den Mitarbeitenden ein Präsentations- und Workshop-Bereich (Bild 2 rechts) mit flexiblem Monitor und beschreibbaren, magnetischen Wänden zu Verfügung. Dieser kann in Absprache mit anderen Mitarbeitenden ohne Buchung genutzt werden. Die drei vorhandenen „Cubes“ (Hot-Desk-Arbeitsbereiche) sind mit Rolltoren versehen. Das ermöglicht eine Separation in Teilbereiche und somit das Herstellen einer Laborsituation für die Erprobung einzelner aktivitätsbasierter Arbeitsszenarien. Mitarbeitende können beispielsweise in einem Bereich zu Austausch und Kommunikation zusammenkommen, während Mitarbeitende in einem anderen Bereich durch das Schließen der Rolltore fokussiert an einem Thema arbeiten können. Die Abtrennung einzelner Bereiche erlaubt es außerdem, an sensiblen bzw. vertraulichen Innovationsaktivitäten zu arbeiten. Um die Kommunikation unterschiedlicher Mitarbeitender zu fördern und die Sichtbarkeit in verschiedene Bereiche zu gewährleisten, sind die Rolltore in der Ausgangssituation geöffnet.

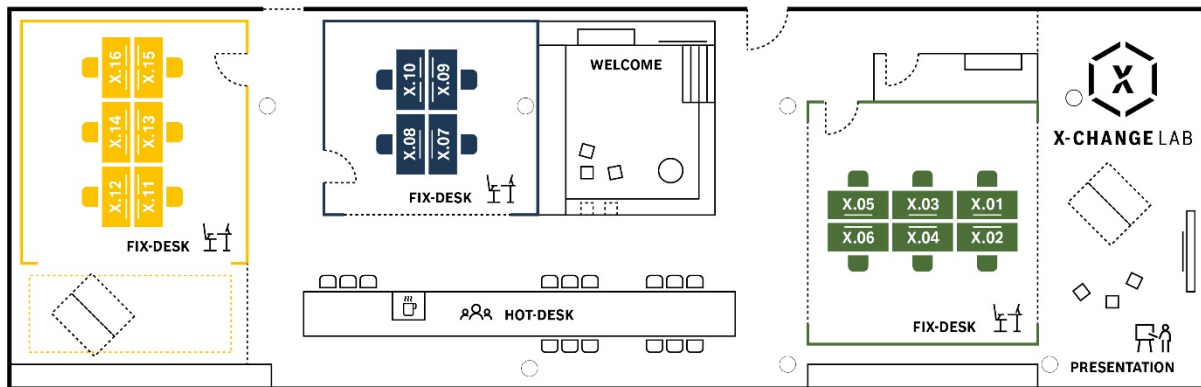


Bild 3: Raumkonzept X-Change Lab

3.3 Einflüsse der COVID-19-Pandemie auf Konzept und Umsetzung

Die im Frühjahr 2020 aufkommende COVID-19-Pandemie erforderte einige Anpassungen im Projekt. Der geplante Eröffnungstermin Ende März 2020 musste auf Juli 2020 verschoben werden. Elemente im Raum konnten durch deren Flexibilität an das im Unternehmen geltende Hygiene- und Abstandskonzept angepasst werden. Hieraus ergibt sich eine neue COVID-19-Pandemie-bedingte Aufteilung der Arbeitsplätze im Raum (Bild 4). Um eine möglichst sichere Nutzung zu gewährleisten, wurden die flexiblen Arbeitsplätze mit 1,5 Meter Abstand zueinander angeordnet. Die Anzahl der buchbaren Fix-Desk-Plätze wurde auf 15 Stück verringert. Die Anzahl der Hot-Desk-Plätze wurde auf fünf Stück reduziert. Dies ermöglicht eine durchgängige Nutzung des Coworking Space seit der Eröffnung.

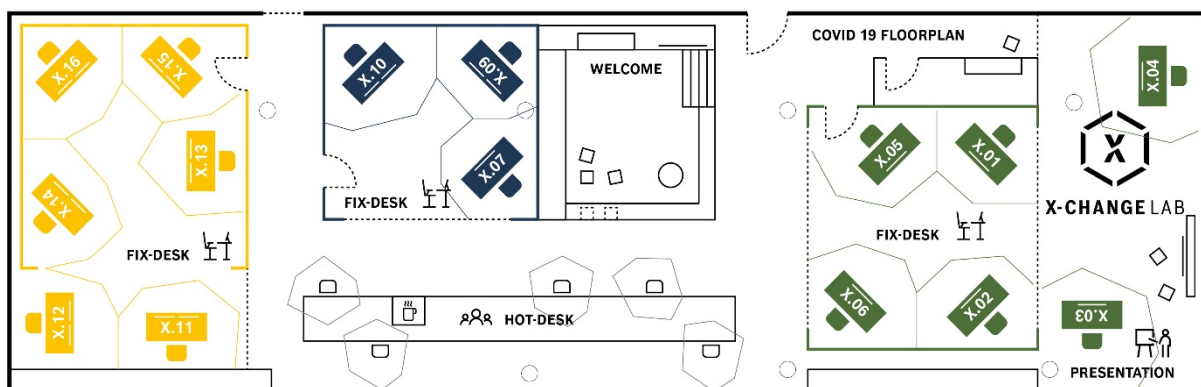


Bild 4: X-Change Lab-Raumkonzept nach COVID-19-Pandemie-Hygieneauflagen

Die von Bauer (2017) genannten Risiken (s. Kapitel 2) beschreiben die mögliche Schwierigkeit einer erfolgreichen Etablierung eines internen Corporate Coworking Space innerhalb eines Unternehmens. Diese potenzielle Hürde wurde pandemiebedingt, insbesondere durch die verringerte Anwesenheit von Mitarbeitenden am Unternehmensstandort, vergrößert. Bezugnehmend auf die vorausgegangene Literaturrecherche und eine mehrmonatige Exkursion in ein urbanes Coworking Space wurden die folgenden, in Tabelle 2 dargestellten, Corporate Coworking Tools in das Konzept integriert. Die Tabelle verdeutlicht, welche Tools ursprünglich geplant waren (Spalte Konzept) und welche Tools, COVID-19-Pandemie-bedingt, bis dato umgesetzt werden konnten (Spalte „COVID-19-Pandemie-bedingte Umsetzung“).

Tabelle 2: Bisherige Umsetzung der geplanten Corporate Coworking-Tools

Corporate Coworking-Tools	Zweck	Konzept	COVID-19-Pandemiebedingte Umsetzung
Corporate Community-Manager:in	Ansprechpartner:in vor Ort; Empfang neuer Interessent:innen; Einweisung zu Konzept, Raum und Community (Onboarding)	Community-Manager:in täglich anwesend	Community-Manager:in bis auf Lockdown-Phasen weitestgehend täglich anwesend
Analoges Community-Board (X-Change Board)	Kalender- und Veranstaltungs-Übersicht; Buchungsübersicht als Vernetzungsmöglichkeit durch Eintragen der Mitarbeitenden von Zeitraum, Thema und Expertise	Mehrtägige Buchung; selbstständiges Eintragen	Wenig Nutzung, da Mitarbeitende meistens nur einen Tag vor Ort sind/einen Tag buchen
Formelle und informelle Veranstaltungen	Bilden einer Community durch, z.B. Community-Frühstück, Mittagessen oder thematische Austausch-Treffen etc.	Regelmäßige Veranstaltungen	Keine größeren Veranstaltungen möglich. Stattdessen: Welcome-Touren (Vorstellen von Raum und Konzept. Max. 5 Teilnehmende)
Online-Community im sozialen Intranet	Informationen zu Konzept, Raum und Buchung; Online-Community; Werbung	Zur Eröffnung online	Wie geplant
Plattform zur partizipativen Weiterentwicklung des Corporate Coworking Space	Gemeinsame Weiterentwicklung von Arbeitsformaten und Angeboten im Raum durch Ideen von Mitarbeitenden	Regelmäßige Gespräche mit Mitarbeitenden	Vereinzelte Gespräche
Community- und Feedback-Wand	Wandfläche und Polaroid-Kamera mit Platz für Mitarbeitende, sich den anderen vorzustellen und Feedback zum X-Change Lab zu geben	Identifikation von Mitarbeitenden als Community-Mitglied durch Nutzung über mehrere Tage und Wochen	Wenig Nutzung da, Mitarbeitende meistens einzelne Tage vor Ort sind
Mitgliedsbeitrag: Wissen teilen	Teilen des eigenen Wissens mit der Community statt eines monetären Beitrags	Umsetzung in entsprechenden Veranstaltungsformaten	Bisher keine Veranstaltungen möglich

3.4 Aktuelle Nutzung

Seit der Eröffnung des X-Change Lab im Juli 2020 wurden 276 Fix-Desk-Arbeitsplatz Buchungen erfasst (Zeitraum 01.07.2020-15.11.2020). Insgesamt wurde an 55 unterschiedlichen Themen gearbeitet. In

der folgenden Darstellung (Bild 5) wird die durchschnittliche Gesamtauslastung und die monatliche Auslastung der 15 aktuell buchbaren Arbeitsplätze dargestellt.

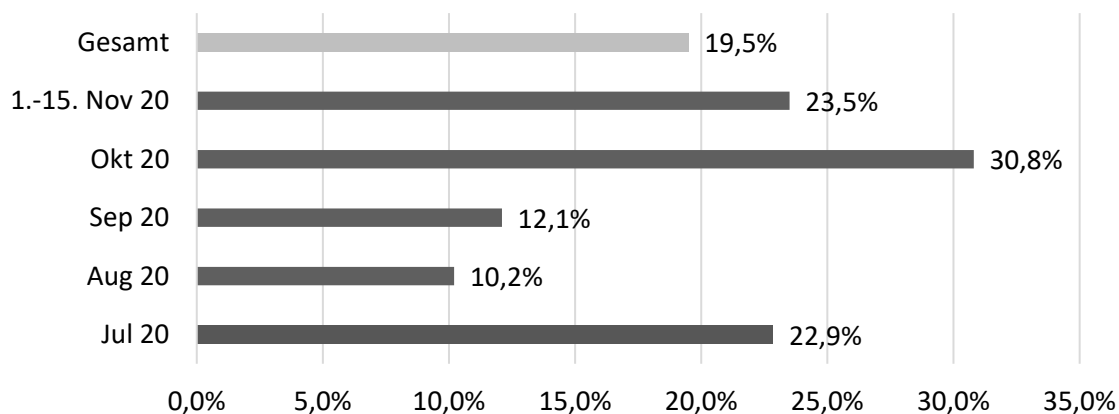


Bild 5: Bisherige Auslastung der 15 Fix-Desk-Arbeitsplätze seit Eröffnung in Prozent (1.7.-15.11.2020)

In Bild 6 ist sichtbar wie hoch der Anteil an Mitarbeitenden war, die wiederholte Buchungen getätigt haben. In den 4,5 Monaten seit Eröffnung haben insgesamt 76,1% der Nutzenden einmal gebucht. Wiederholte Buchungen gab es bei insgesamt 23,9% der Nutzenden (2 x 15,9%, 3 x 4,5%, 4 x 3,5%). Insgesamt war der Standort selbst im erfassten Zeitraum nur zu rund 33% ausgelastet. Anhand der Daten lässt sich ableiten, dass Mitarbeitende trotz der angespannten COVID-19-Pandemie-Situation Interesse am Arbeiten in einer Coworking ähnlichen Umgebung haben.

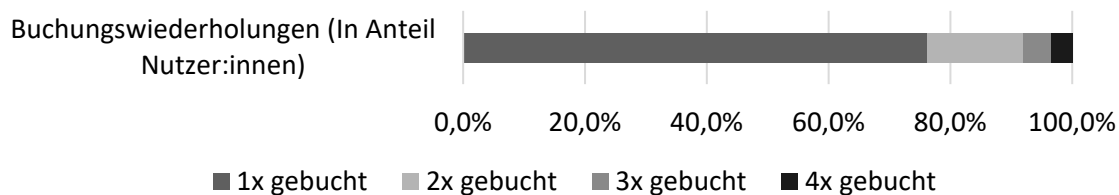


Bild 6: Anzahl der der Personen die wiederholt gebucht haben in Prozent Zeitraum (1.7.-15.11.2020)

Die in Bild 5 und 6 gezeigten Daten spiegeln ein erstes Belegungsbild wider. Eine genaue Erfassung, wie viele Mitarbeitende spontan für Gespräche, Welcome-Touren oder zum Arbeiten an nicht buchbaren Arbeitsplätzen im X-Change Lab anwesend waren, wurde nicht durchgeführt.

4 Ausblick

Um genauere Erkenntnisse über Corporate Coworking Spaces zu erlangen, bedarf es detaillierter Untersuchungen über die Nutzung solcher Spaces und deren Elementen. Zum einen ist hierfür eine Untersuchung der Nutzungserfahrungen von Mitarbeitenden im X-Change Lab geplant. Des Weiteren wird eine Untersuchung weiterer, in anderen Unternehmen existierender, Corporate Coworking Space Ansätze durchgeführt. Für die Untersuchungen stehen folgende Fragen im Mittelpunkt:

1. Wie und aus welchen Gründen nutzen Mitarbeitende einen Corporate Coworking Space und welche Erfahrungen machen sie bei dessen Nutzung?
2. Wie bewerten Mitarbeitende vorhandene Corporate Coworking-Tools wie beispielsweise Veranstaltungen, Community-Management, Angebote und Regeln etc.?
3. Welche Zukunftsszenarien und Handlungsempfehlungen für die Gestaltung neuer Arbeitsumgebungen lassen sich (insbesondere in der Zeit nach der COVID-19-Pandemie) aus dem Prototyp X-Change Lab ableiten?

Trotz der COVID-19-Pandemie und deren Auswirkungen gibt es seitens Betreibenden und Verbänden von Coworking Spaces positive Einschätzungen zur weiteren Entwicklung von Coworking. Laut Tobias Kollewe, Präsident des Bundesverbandes Coworking Spaces Deutschland, könne sich die Post-COVID-19-Zeit, trotz vereinzelter Schließungen von Spaces, positiv auf die Zukunft von Coworking auswirken. Unternehmen hätten Erfahrungen sammeln können, wie Mitarbeitende ihre Arbeit auch unabhängig von ihrem herkömmlichen Büro-Arbeitsplatz verrichten können. Ein weiterer Aspekt sei außerdem die mögliche Kosteneinsparung für Unternehmen bei der Anmietung von Coworking-Arbeitsplätzen (in herkömmlichen, regulären Coworking Spaces) im Vergleich zu Arbeitsplätzen im eigenen Unternehmen (Geißler 2020). Doch nicht nur für reguläre Coworking Spaces und deren Betreiber könnten die COVID-19-Pandemie-Auswirkungen eine Chance darstellen. Durch die aktuell vermehrte Arbeit im Homeoffice ergeben sich interessante Parallelen von Angestellten zu Nutzenden regulärer Coworking Spaces. Einer der Beweggründe, Coworking Spaces zu nutzen, ist die Gemeinschaft und die soziale Interaktion vor Ort (Gauger und Pfnür 2019).

Durch das vermehrte Arbeiten von Angestellten im Homeoffice sind nun nichtmehr nur Selbstständige, Startups und Gründer von einer sozialen Isolation bei ihrer Arbeit im Homeoffice betroffen, sondern auch Mitarbeitende in Unternehmen. Ebenso sind viele Angestellte nun freier in der Wahl von Arbeitsort und -zeit (Bauer et al. 2020b). Diese Flexibilität verbindet sie nun mit den häufig selbstständig tätigen Nutzenden regulärer Coworking Spaces. Aus dieser Sichtweise kann von einer Steigerung der Relevanz des hier vorgestellten Forschungsvorhabens durch die COVID-19-Pandemie gesprochen werden. Für Unternehmen könnte Coworking möglicherweise von einem bisherigen Zusatzangebot zu einem neuen Standort-Arbeitsmodell werden. Das von Bauer et al. (2020b) identifizierte, durch die COVID-19-Pandemie gesteigerte, Bedürfnis nach einem erkennbaren Gegenwert für die Entscheidung von Mitarbeitenden, zukünftig an einem Unternehmensstandort zu arbeiten, könnte durch die entstehende, planbare Zusammenarbeit und Begegnung im Corporate Coworking-Arbeitsmodell bedient werden. Der hier vorgestellte Entwurf ermöglicht es Unternehmen außerdem, trotz einer Krisensituation, bei der Neugestaltung von Arbeitsweisen selbst aktiv zu werden. So können neue Wege der Zusammenarbeit im eigenen Unternehmen mit den eigenen Mitarbeitenden gestaltet und erprobt werden.

Literatur

- Bauer et al. 2020a BAUER, Wilhelm (Hrsg.); RIEDEL, Oliver (Hrsg.); RIEF, Stefan (Hrsg.); HOFMANN, Josephine (Mitarb.); PIELE, Alexander (Mitarb.); PIELE, Christian (Mitarb.): *Arbeiten in der Corona-Pandemie – auf dem Weg zum New Normal : Studie des Fraunhofer IAO in Kooperation mit der Deutschen Gesellschaft für Personalführung e.V., 2020*
- Bauer et al. 2020b BAUER, Wilhelm (Hrsg.); RIEDEL, Oliver (Hrsg.); WEISBECKER, Anette (Hrsg.); BOCKSTAHLER, Milena (Mitarb.); JURECIC, Mitja (Mitarb.); RIEF, Stefan (Mitarb.): *Working from home experience. An empirical study from the user perspective during the Corona pandemic: Homeoffice Experience. Eine empirische Untersuchung aus Nutzersicht während der Corona-Pandemie.* Stuttgart, 2020
- Bauer 2017 BAUER, Wilhelm (Hrsg.); STEIFEL, Klaus-Peter (Mitarb.); RIEF, Stefan (Mitarb.): *Coworking - Innovationstreiber für Unternehmen: Coworking - Driver of Innovation for Companies.* Stuttgart : Fraunhofer Verlag, 2017
- Cabral und van Winden 2016 CABRAL, Victor; VAN WINDEN, Willem: *Coworking: An analysis of coworking strategies for interaction and innovation.* In: *International Journal of Knowledge-Based Development* 7 (2016), Nr. 4, S. 357–377

- Foertsch 2019 FOERTSCH, Carsten: *2019 Complete Coworking Forecast: 2019 Global Coworking Survey*. 2019
- Fost 2019 FOST, Dan: *They're Working on Their Own, Just Side by Side*. URL <https://www.nytimes.com/2008/02/20/business/businessspecial2/20cowork.html>. – Aktualisierungsdatum: 20.02.2008 – Überprüfungsdatum 22.11.2019
- Gandini 2015 GANDINI, Alessandro: *The rise of coworking spaces: A literature review*. In: *ephemera* 15 (2015), Nr. 1, S. 193
- Gauger und Pfnür 2019 GAUGER, Felix; PFNÜR, Andreas: *Coworking Spaces - Arbeitsräume zur Initiierung von Netzwerken*. In: *Führung + Organisation - zfo* Vol.89 (2019), Issue 1, S. 9–15. URL <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/110441/>
- Geißler 2020 GEIBLER, Jan: *Der Trend geht zum Büro auf Zeit*. URL <https://www.stuttgarterzeitung.de/inhalt.coworking-spaces-in-baden-wuerttemberg-der-trend-geht-zum-buero-auf-zeit.497950a0-3901-4449-a8b0-5f505ac06bca.html> – Überprüfungsdatum 14.11.2020
- German Coworking Federation 2019 GERMAN COWORKING FEDERATION: *German Coworking Federation*. URL <https://www.coworking-germany.org/ueber-uns> – Überprüfungsdatum 29.03.2019
- Josef und Back 2019 JOSEF, Barbara; BACK, Andrea: *Coworking aus Unternehmenssicht - Out of Office, into the Flow?* In: *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* (2019), 56(4), S. 780–794
- Josef 2019 JOSEF, Barbara: *Coworking from a Corporate Perspective: out of Office, into the Flow?* St. Gallen, University of St.Gallen, School of Management, Economics, Law, Social Sciences and International Affairs. Dissertation. 2019. URL [http://verdi.unisg.ch/www/edis.nsf/SysLkpByIdentifier/4952/\\$FILE/dis4952.pdf](http://verdi.unisg.ch/www/edis.nsf/SysLkpByIdentifier/4952/$FILE/dis4952.pdf) – Überprüfungsdatum 18.03.2020
- Mehl 2017 MEHL, Julia: *Coworking Spaces als Form der Arbeitsorganisation*. Bayreuth, Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Strategisches Management und Organisation. Masterthesis. 2017. URL <https://www.grin.com/document/384645> – Überprüfungsdatum 29.03.2019
- Moriset 2013 MORISET, Bruno: *Building new places of the creative economy. The rise of coworking spaces*. In: *Territoire en Mouvement* (2013)
- OECD 2020 OECD: *OECD-Wirtschaftsausblick, Ausgabe 2020/1 (Kurzfassung)*. URL <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/e0331726-de> – Überprüfungsdatum 29.07.2020
- Peschl und Fundneider 2016 PESCHL, Markus F.; FUNDNEIDER, Thomas: *Büro als Treiber von Wissens- und Innovationsprozessen*. In: KLAFFKE, Martin (Hrsg.): *Arbeitsplatz der Zukunft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 31–56
- Schürmann 2013 SCHÜRMAN, Mathias: *Coworking Space: Geschäftsmodell für Entrepreneur und Wissensarbeiter*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2013
- Werther 2019 WERTHER, Simon: *Coworking-Szene im Aufbruch*. Coworking Monitor Deutschland mit Implikationen für Unternehmen. In: *Arbeit und Arbeitsrecht* 4/19 (2019), 74/4, S. 228–231. URL <https://www.arbeit-und-arbeitsrecht.de/ausgabe-419>

MatchUT: Matching bedürfnisbasierter Nutzeranforderungen und Bewertung neuer Technologien aus Nutzersicht für einen UX-Fokus bei der Produktentwicklung

MatchUT: Matching Need-Based User Requirements and Technology Impacts to Create UX

Valeria Bopp-Bertenbreiter¹, Lena Rittger², Frederik Diederichs³

¹Universität Stuttgart, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Stuttgart
Valeria.Bopp-Bertenbreiter@iat.uni-stuttgart.de

²AUDI AG, 85045 Ingolstadt
Lena.Rittger@audi.de

Fraunhofer IAO, 70569 Stuttgart

³Frederik.Diederichs@iao.fraunhofer.de

Abstract (deutsch): Durch die zunehmende Automatisierung von Fahrfunktionen steigt die Bedeutung positiver User Experience (UX) im Fahrzeuginterieur. Hierzu wird das MatchUT-Modell von Rittger und Schrader (im Druck) vorgestellt, welches bedürfnisbasierte User-Anforderungen mit Technologie-Impacts matcht, um positive UX zu generieren. Der Beitrag untersucht die Erweiterung der bisherigen Methodik um den Ansatz "virtuelle kontextuelle Interviews und Fokusgruppen", welcher eine pandemiesichere Alternative zur Anforderungserhebung darstellt und die Erhebung im typischen Nutzungskontext erlaubt. Zudem prüft der Beitrag eine erweiterte Auswahl von psychologischen Bedürfnissen (Fronemann und Peissner, 2014), um hedonische Anforderungen für mögliche zukünftige Aktivitäten im Fahrzeuginterieur zu erheben. Die Methodik wird anhand der Use Cases "Gaming" und "Esports (zusammen) schauen" angewandt. Die erfolgreiche Durchführung (jeweils über 115 Anforderungen) sowie eine hohe Zufriedenheit der Teilnehmenden in der Nachbefragung deuten auf die Verwendbarkeit der Methodik hin. Im Ausblick wird ein Ansatz für die Erhebung und UX-Bewertung von Technologie-Impacts vorgestellt.

Keywords (deutsch):

MatchUT, Virtuelle kontextuelle Fokusgruppen, UX-Potenzial von Technologien, Bedürfnisbasierte UX-Entwicklung, Potenzialbewertung von Technologien

Abstract (english): As the automation of driving functions increases, positive user experience (UX) in vehicle interiors becomes more and more important. Hence, the MatchUT model of Rittger and Schrader (in print) is presented, which matches need-based user requirements with technology impacts to generate positive UX. The paper examines the extension of the existing methodology by the approach "virtual contextual interviews and focus groups", which represents a pandemic-proof alternative to elicit requirements in a typical usage context. In addition, the paper examines an extended selection of psychological needs (Fronemann and Peissner, 2014) to collect hedonic requirements for possible future activities in vehicle interiors. The methodology is applied for the use cases "Gaming" and "Watching esports (together)". The successful implementation (over 115 requirements per use case) and a high satisfaction of the participants in the post-study survey indicate that the method is feasible for MatchUT. In the outlook section, an approach for the collection and UX-evaluation of technology impacts is presented.

Keywords (english):

MatchUT, Virtual contextual focus groups, UX potential of technologies, Need-based UX development, potential assessment of technologies

1 Theoretical Background & Motivation

As automated driving frees the user from the driving task, the focus shifts to the user experience (UX) of non-driving related tasks (NDRT) inside the vehicle. 78% of so-called millennials value attractive experiences over material possession (Harris Poll 2014), falling in line with the results of van Boven and Gilovich (2003), who assume that humans value experiences over possessions. They reason that experiences may contribute to one's feeling of identity, are more likely to fulfil one's need of social connection, and overall, "make people happier" (van Boven and Gilovich 2003 p. 1193) than mere possessions. This so-called experiential advantage continued to appear in later work according to Gilovich and Gallo (2020), but only for disposable income.

Therefore, outstanding UX may even be the main unique selling proposition of future vehicles (Bengler 2017), also considering the possibility of shared mobility instead of traditional car ownership: An UX-optimized vehicle interior where users engage in desired NDRT might attract even more customers than just those looking for a trip from A to B.

But how can the inspiring positive UX that seems so crucial for the future success of today's car manufacturers be designed?

Hassenzahl et al. (2010) proposed the fulfilment of psychological needs as an important source of positive UX during the interaction with a product. They assume that the fulfilment of psychological needs while interacting with a system leads to positive affective responses. The user attributes the positive affect to the product/system, thus creating positive UX. Similarly, in a review of the original work from 2003, Gilovich and Gallo (2020) add that to understand how satisfaction is influenced by experiences or possession, "[t]he consumer's motives matter" (Gilovich and Gallo 2020 p. 29). Positive UX changes how users perceive and react to certain services or products, thus enhancing error tolerance and brand loyalty/product bonding (Fronemann and Peissner 2014). The latter might be of special interest to OEMs as automated driving might change the role of vehicle manufacturers to that of mobility providers. However, OEMs must also encompass the development engineering's technology-driven point of view to offer their customers new technologies and to not fall behind on potentially disruptive technology-driven innovations (McKinsey&Company 2016). Between these conflicting priorities, a method is needed that includes both perspectives as equals.

1.1 MatchUT: a working model to create positive UX, matching user requirements and technology impacts (Rittger and Schrader in press)

The MatchUT working model (see figure 1) describes a process to match User requirements with suitable Technologies (Rittger and Schrader in press) to create positive UX. The left side of the MatchUT model describes how user requirements are derived for use cases, at first independent of a technical solution. These user requirements can be either pragmatic or hedonic. MatchUT bases the latter on the psychological needs selected by Hassenzahl et al. (2010): Relatedness, Security, Competence, Popularity, Stimulation, Autonomy, and Physicalness. For example, for the user need Relatedness, one might always want to feel like they are in the same room as the dialogue partner during video calls with family members, independent of a specific app or technology used.



Figure 1: MatchUT working model, adapted from Rittger and Schrader (in press).

The other half of the model addresses the impacts technologies may have on the users, i.e., how the users perceive and experience the technologies. These impacts are described use case-independently, for example holography may always have the effect of shortening the interaction distance to the user and thus create a feeling of closeness to the content displayed. Describing user requirements independent of a technical solution and technology impacts independent of a specific use case allows developers to create a prioritized list of user requirements that may be fulfilled by choosing suitable solutions from a prioritized catalogue of technology impacts. This match is expected to create positive UX.

A first methodological implementation of the MatchUT model included the elicitation of requirements in 10-15-minute-long one-on-one interviews followed by discussions in focus groups. The number of requirements users contributed suggests that users are able to state their desired experience in a specific use case. Rittger and Schrader (in press) elicited requirements for 10 use cases. The resulting need profiles per use case, prioritized by frequency, suggest that different needs are dominant in different use cases. For example, the need of feeling in control and having calming routines ("Security") is much higher in work-associated use cases, while "Stimulation" seems like a driving motivator in leisure time use cases.

To derive impacts of technologies, Rittger and Schrader (in press) conducted workshops with experts for the respective technologies and asked them to describe how users might experience the technologies. Matching of requirements and impacts is currently done by development engineers, a more systematic approach will be discussed in the thesis surrounding this work.

1.2 MatchUT: optimization opportunities & research objectives

The selection of needs proposed by Hassenzahl et al. (2010) might lack substantial aspects (e.g., the competitive nature of some use cases in an unpublished workshop). Therefore, this paper is based on a broader set of psychological needs selected by Fronemann and Peissner (2014) from the same sources Hassenzahl and colleagues (2010) used (Reiss 2004; Sheldon et al. 2001), later extended to the 12 needs presented in the „needs fan“ (Hochschule der Medien et al. 2020). Since user needs have only been prioritized by frequency of requirements so far (Rittger and Schrader in press), quality-based methods (e.g., the Kano model, see Sauerwein et al. 1996) or importance ratings might support qualitative prioritization.

For this work, the following research objectives are proposed:

Research objective 1: Are the psychological user needs (Fronemann and Peissner 2014) relevant and suitable to elicit requirements qualitatively similar to Rittger and Schrader's (in press)?

The COVID-19 situation called for another approach than traditional focus groups, see chapter 2.2.

Research objective 2: Are virtual contextual interviews/focus groups a suitable method to elicit requirements, i.e., is the number and quality of requirements comparable to Rittger, Schrader (in press)?

2 Method: Virtual contextual focus groups & prioritization

Leisure activities resulted in requirements for all selected needs while leading to a high number of requirements for Stimulation and Relatedness (Rittger and Schrader in press), both very salient needs according to Hassenzahl et al. (2010). Therefore, leisure time use cases, such as watching esports or gaming, seem like a suitable starting point for validating and optimizing MatchUT. Furthermore, gaming and watching esports are activities with a rapidly growing number of users, indicating suitability as future vehicles NDRTs. In terms of numbers, the sum of users engaging in video games worldwide is projected to rise from 2.69 billion in 2020 to 3.07 billion in 2023 (Gough 2020b), while

the number of users watching esports at least occasionally worldwide is forecasted to rise from 495 million in 2020 to 646 million in 2023 (Gough 2020a).

2.1 Sample

The participants were recruited using the Fraunhofer database and the extended network of the authors. Potential participants received a link to an online pre-screening survey to find power users (=experience the use case at least weekly) for the use cases “Watching esports (together)” and “Gaming”. Demographic data was evaluated to create diverse focus groups in terms of age and gender, although connected through their common interest, as the participants should be selected in a way that they could “easily discuss this topic in normal, day-to-day interaction” (Morgan 1997 p. 7). Each focus group consisted of five participants (one of them female, with a variety of professional backgrounds), who received financial compensation for their participation. The focus group “Gaming” had an average age of 26.2 years ($SD = 6.49$, $range = 19-38$), “Watching esports (together)” an average age of 23.8 years ($SD = 2.93$, $range = 19-27$).

2.2 Procedure

Due to the COVID-19 pandemic, the interviews and focus groups were shifted from real-world meetings to virtual video conferences to ensure the participants’ safety and availability. This resulted in an advantage compared to the real-world, as the attendees participated in their usual temporal and spatial surroundings for the use case, thus ensuring a contextual approach.

Suitable participants received an e-mail containing the informed consent as well as an instruction (brief overview of interview and focus group).

Participants were also asked to propose dates for the virtual contextual interview that allowed them

- to have experienced the use case on the day before or on the same day as the interview,
- to participate in their usual surroundings for the use case (usual place and time),
- and to participate acoustically and visually (i.e., using a camera and headset).

These preconditions served to ensure a contextual setting as well as a more natural interview situation. Microsoft Teams was used as communication app in all interviews and focus groups.

2.2.1 Virtual contextual interviews

Rittger’s and Schrader’s (in press) one-on-one interviews aimed at deriving aspects and requirements important for a positive experience in the respective use case, as did the interviews in this work.

At the start of each half-structured interview, the experimenter introduced herself, asked the participant whether he or she agreed to be on first name terms for the interview and focus group (to create a more familiar atmosphere), and gave a short introduction. Before recording, the experimenter assured herself that the preconditions were met, and informed consent was given.

The experimenter started by asking more general questions to allow the participant to ease into the interview situation as well as to gain insights into the circumstances of the use case. The questions were loosely based on those proposed in the experience interview handbook (Burmester et al. 2014), as their experience interview’s goal is to reveal positive experiences in everyday work of their participants and is easily executable online (Zeiner et al. 2016). The questions were adapted to a leisure context, e.g. “What is fun about [the use case]?”. The experimenter then provided the experience template (by Zeiner et al. 2016) as an interactive template to collaborate on, although all participants chose to just narrate the aspects that made their experiences positive. Each interview lasted 40-70 minutes, depending on the number and depth of experiences the participants shared. The aspects leading to a positive experience were written down as requirements and assigned to the 12 needs defined in the needs fan (Hochschule der Medien et al. 2020). The moderator group had brainstormed two real-life examples for each need prior to the workshops to make them more accessible to the participants.

2.2.2 Virtual contextual focus groups

“Online focus groups” can be distinguished into two forms (Rolls et al. 2016): Synchronous – e.g., through group chats, discussion boards, or web conferences (Rolls et al. 2016) – and asynchronous – e.g., through discussion forums or email discussion (Brüggen and Willems 2009; Rolls et al. 2016). While sensitive topics might benefit from the anonymity that accompanies written focus groups (Brüggen and Willems 2009), the use cases discussed in this work were not expected to include very sensitive information. The face-to-face group discussion led to more requirements in the focus groups described by Rittger and Schrader (in press), reinstating that interaction of participants is a vital part of focus groups (Kitzinger 1994). Therefore, video calls seemed like a feasible methodology in this work:

After finding a date where the preconditions described in the interview procedure were met for all participants, the participants were invited to a virtual contextual focus group. At the beginning, after making sure that every participant was audible and visible, every attendee introduced themselves by stating the name, the location, and something connected to the use case, e.g., for gaming the games they currently liked to play, in order to create a friendly atmosphere despite the distance.

After the recording was started, the experimenter presented a definition of the needs surrounded by requirements via screen sharing (see figure 2), using the definitions by Hochschule der Medien et al. (2020). The participants then discussed whether any additional aspects were necessary to fulfil the need for the respective use case and were encouraged to brainstorm ideas to fulfil the user need. The group discussion started with the need that the most requirements in the interviews and continued until all needs had been discussed. Participants could request a relocation of any requirements they felt had been wrongly attributed to a need. Finally, the participants sketched the best possible surrounding/room for their respective use case as a team using Google Slides.

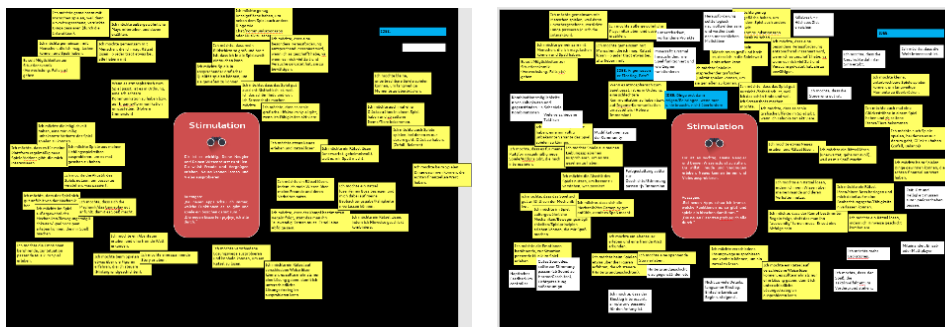


Figure 2: Example of interactive whiteboard for “Stimulation” for “Gaming”, before (left) and after (right) discussion. Requirements from the interviews in yellow, from the focus groups in white, design ideas in blue.

The participants then filled out a post-study questionnaire, asking them to prioritize each need for the respective use case on a verbal scale (“Very important”, “Important”, “Neutral”, “Unimportant”, and “Very unimportant”). The questionnaire further requested the participants to copy the requirements most important to them into the questionnaire, to write down what they liked best about the respective use case in their own words and what objects/surrounding they needed to have a good experience in the respective use case. The questionnaire also included verbal scales to express how content participants were with the virtual contextual interviews and focus groups (“Very satisfied”, “Satisfied”, “Neutral”, “Dissatisfied”, and “Very dissatisfied”) and text fields to enunciate anything particular satisfying or dissatisfying about the interview and focus group. In the end of each focus group, the experimenter debriefed the participants by explaining how the requirements fit into the MatchUT working model and thanked them for participating.

3 Results

3.1 Requirements derived in the virtual contextual interviews and focus groups (in numbers and in participants' own words)

The contextual virtual interviews and focus group for "Gaming" resulted in 163 requirements overall (131 in the interviews, 32 during group discussion). Similarly, for "Watching esports (together)" 117 requirements overall were derived (94 in the interviews, 23 during group discussion). Additionally, the post-study questionnaire asked participants to write down their 5-10 most important requirements for a great experience in the respective use case in free text fields (see table 1). All requirements were attributed to the needs by the experimenter; participants could change the attribution during group discussion if necessary. However, participants did not change any of the attributions.

Table 1: Attribution of requirements to the 12 user needs per use case (elicited in interviews + focus groups, number of design ideas participants came up with in the focus groups to fulfill the respective need) and corresponding free-text answers to "the 5-10 most important requirements to you in this use case."

	"GAMING"	"WATCHING ESPORTS (TOGETHER)"
User needs	Requirements (from interviews + focus groups), no. ideas: Associated free-text most important requirements (post-study)	Requirements (from interviews + focus groups), no. ideas: Associated free-text most important requirements (post-study)
Relatedness	21+8, 1 idea: "Play with others", "I want to be a member of Clans/Guilds", "enable relatedness for multiplayer", "Play with friends", "Friendly and helpful players"	22+0, 0 ideas: "Feeling of togetherness", "I want the stream to be simultaneous for everyone, so that nobody spoils and so that you can experience it together. (x2)", "I want to watch with friends who also watch/play the game"
Popularity	5+0, 6 ideas: "(Exhibit) prestige items"	3+6, 0 ideas: -
Influence	3+0, 7 ideas: -	3+3, 0 ideas: -
Autonomy	10+0, 5 ideas: "Free game decisions", "decision making options"	7+4, 0 ideas: "For tournaments, games should be uploaded individually so that I can watch exactly what I want to see.", "The possibility to determine the device you watch on yourself.", "watch while stream is running"
Security	17+2, 7 ideas: "Safe haven/possibility of retreat", "To be able to decide for yourself what is revealed about you (e.g., how good you are...)", "The right environment/at home at the usual spot (silence)", "Good quality Internet connection (disconnections lead to game interruption)"	6+8, 0 ideas: "If you missed something, you can rewind (like when you did something else).", "The accustomed platform (Twitch) should be the stream provider.", "jump back while stream is running", "I want to have an appropriate sound quality."
Competence	13+0, 7 ideas: "a good challenge", "Possibility to prove own skills (statistics, successes)", "Improvement of the own abilities", "Rewards for good cooperation within the group"	8+2, 3 ideas: "I want to see how a player survives unlikely situations through his skills.", x2: "The competence of the streamers/players must be either very high or very low.", "incentive to get something like betting"
Competition	7+0, 3 ideas: "Opportunities for competition/comparison"	3+3, 2 ideas: "Show points/ranks for something competitive", "competition"
Keeping the Meaningful	10+0, 8 ideas: "Collecting items and memories"	0+0, 4 ideas: "Witness iconic moments or watch them afterwards (highlights)."

Physical Well-being	2+1, 4 ideas: -	2+0, 3 ideas: -
Idealism	5+0, 3 ideas: -	3+0, 2 ideas: -
Stimulation	35+20, 2 ideas: “Good background story for single player [games]”, “Experiencing special moments (funny, exceptional)”, “Play without pressure, fool around”, “Good gameplay”, “Well elaborated games / great stories”, “Powerful computer/ good graphics”, “Good quality game”	35+1, 2 ideas: “a comeback mechanism to keep the game exciting.”, “[I want] to be thrilled”, Counted twice: “The competence of the streamers/players must be either very high or very low.”, “What you see must be entertaining”, “quality (sound and graphics)”, “I want the commentator to have a pleasant voice and to hype up the emotions well.”, “I want the commentators to really heat up the mood and help to support it so that the experience is even better.”, “I want to have good graphics when watching the stream, then it's more fun.”, “I want to relax when I watch the stream (a bit like watching TV).”
Self-realization	3+1, 4 ideas: -	1+0, 1 idea: -

3.2 Prioritization of the needs per use case: Subjective importance assessment

In a first approach to prioritize the needs in a user-centered way, the users were asked to rate the importance of the needs for the respective use case on a 5-point verbal scale in the post-study questionnaire. The use cases differed regarding the subjective importance of the needs (see figure 3). In general, the social needs of “Relatedness”, “Popularity” and “Influence” were one point less relevant for “Watching esports (together)” than for “Gaming” on the scale, while “Autonomy” was equivalent important for both use cases. “Security” was “very important” for “Watching esports (together)”, but only “important” for “Gaming”. “Competence” was rated as “very important” for both use cases. For “Competition”, the median rating was “neutral” for “Gaming”, while it seemed “important” for “Watching esports (together)”, but ratings of both use cases were rather widespread; thus, the importance of the need seems to depend on the person.

“Keeping the Meaningful”, “Physical Well-being”, “Idealism”, and “Self-realization” were all seen as “neutral” on median for both use cases, although participants were rather divided about it (interquartile ranges (IQR) of 1-2). “Stimulation” is considered as “very important” for both use cases unanimously (IQR = 0).

3.3 Evaluation of the method “virtual contextual interview and focus groups”

The post-study questionnaire included verbal rating scales for satisfaction and open text fields as an attempt to assess the method and to find optimization approaches. In both use cases, the rating of focus groups and interviews reached a *median* = 5 (“Very satisfying”). This was reflected in the open text field “What was particularly satisfying [...]?”: Participants liked the friendly and relaxed atmosphere (4x), the possibility to discuss calmly/to state their opinion (x4), and to discuss with others with similar interests. Participants also mentioned the one-on-one interview was more personal and that they liked the interactive conversation. Regarding the question “What was particularly unsatisfying[...]?”, two participants mentioned technical issues with Microsoft Teams at the beginning of the focus group “Gaming”, the resulting overtime bothered three participants. For “Watching esports (together)”, one participant mentioned “(interruption by others)”, while another stated “it was not immediately obvious how some topics influenced watching esports or streams.

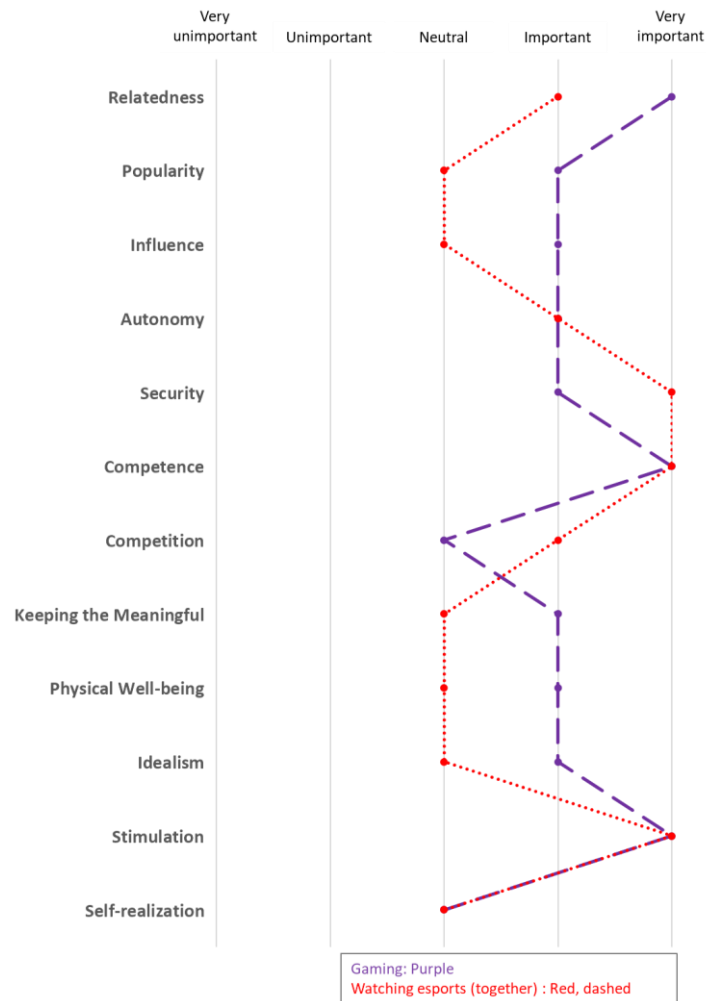


Figure 3: Median of the subjective post-study rating of the importance of the 12 user needs for the use cases “Gaming” (purple, dashed line) vs. “Watching esports (together)” (red, dotted line).

4 Discussion

4.1 Discussion of results: User needs

MatchUT as an approach to elicit hedonic requirements proved successful once more. Given the number and quality of requirements derived similar to the original work, the twelve user needs (Fronemann and Peissner 2014) seem as suitable as Hassenzahl and colleagues’ (2010) to elicit requirements for future NDRT use cases in the MatchUT model. In the enhanced selection of needs, some needs appeared to be more relevant than others in the assessed use cases: As could be expected for leisure use cases done out of intrinsic motivation, the fun- and curiosity-driven “Stimulation” need was of prime importance for both “Gaming” and “Watching esports (together)”, which was reflected in the subjective importance ratings (*median* = 5 for both use cases) as well as in the number of requirements elicited, and in the free text “most important requirement”-answers. “Competence” was rated just as subjectively important for both use cases and received some of the “most important requirements”-answers, although “Watching esports (together)” as rather passive use case was not expected to elicit this need. The rating does reflect the prior discussion, since participants stated feeling able to understand the game/tactics shown in the stream and watching high-skilled players and commentators was crucial to them. Therefore, “Competence” in this instance

might have a quality of “transferred” competence, even though participants stated that they watch esports/streams either for non-exhausting entertainment or to learn more about a game they watch and, most often, also play. “Relatedness” scored “very important” for “Gaming” and “important” for “Watching esports (together)” on the subjective importance scale and a substantial part of the most important requirements (free text) were reported for this need. Participants were satisfied with staying connected by audio only as “the voice transported enough emotion”. Participants did not want to see their friends in either use cases, so they could protect their privacy, i.e., “game/watch in a relaxed sloppy look”. Audio-only further provided the advantages “to get to know others without prejudices” and “no distraction”. For “Security”, the subjective importance ratings were vice versa. The significance of this need further presented itself in the number of “most important requirements”, namely as protected retreat for “Gaming” and being able to watch as one pleases for “Watching esports (together)”. “Autonomy” was “important” on the subjective importance scale, received a medium number of requirements during the interviews and focus groups, and some free text requirements. For “Competition”, subjective importance ratings were rather widespread, few requirements were elicited and there was only one free text requirement per use case. “Keeping the meaningful” was rated as “important” for “Gaming” and “neutral” for “Watching esports (together)”. This was somehow reflected in the number of requirements, but in the free text “most important requirements”, one requirement per use case was attributed to this need. “Physical Well-being”, “Idealism”, “Popularity”, and “Influence”, were rated as “important” for “Gaming” or “neutral” for “Watching esports (together)”. However, they elicited few requirements. Additionally, these needs were not mentioned in the “most important requirements”, except one requirement for “Popularity” for “Gaming”. Instead, participants came up with some design ideas for “Gaming”, which might be a starting point to work on innovations to fulfil these needs. In the discussion, participants stated neutrally rated “Self-Realization” does not seem relevant, because they wanted to feel free from the urge to self-optimize during leisure time.

Rittger and Schrader (in press) elicited requirements for the use case “Playing video games” in face-to-face focus groups, thus allowing the comparison to “Gaming” in this work. The distribution of requirements to underlying needs was nearly the same number wise, with some exceptions: Potentially, the one-on-one in-depth interviews as well as contextuality in this work helped to elicit more requirements for the two most salient needs, “Stimulation” (55 overall vs. 18 in Rittger and Schrader in press) and “Relatedness” (29 overall vs. 16 in Rittger and Schrader in press). These needs could have been more important to our participants due to the ongoing pandemic, as “Gaming” might serve as an opportunity to connect with friends online and to experience fun and novelty while being deprived of such opportunities in the real world. “Physical Well-being”, however, only elicited 3 requirements in our work compared to Rittger and Schrader’s 9, possibly due to the virtual environment. Lastly, the requirements from both works contain similar underlying themes; therefore, the virtual contextual method seems to enable remote requirement elicitation.

Overall, the method led to several requirements that serve as a starting point for a more generalizable approach, i.e., surveys. These requirements will be matched with technology impacts.

4.2 Lessons learned & limitations: How to optimize virtual contextual focus groups

Participants appeared to be content with the method, which is reflected in the interviews’ and focus groups’ satisfaction ratings, the number of requirements elicited, and participants’ engagement in discussion. Thus, virtual contextual interviews and focus groups were successful, provide a safe framework concerning participants’ health, and seem like a pandemic-safe alternative to traditional methods. The advantages of the virtual contextual approach include scheduling the virtual meetings in the usual temporal and spatial context of the use case for each participant. They further allow to bring together participants nationwide. Similar to Dos Santos Marques et al. (2020), another benefit of virtual focus groups is a lower inhibition to participate in general, because no transit time is required. Disadvantages of virtual focus groups may include the need to support participants who are unexperienced with the communication app, potential dropouts or difficulties because

participants lack commitment to virtual meetings (Dos Santos Marques et al. 2020). In this work, there were no dropouts. The interviews prior to the focus groups might have established a higher commitment than experienced by Dos Santos Marques et al. (2020). The participants in this work seemed able to use Microsoft Teams without issues after being told how to unmute themselves. Some extra attention was allocated to participants who could not find the links to the group calls at first. In the first focus group conducted, participants could not join the Microsoft Teams team without a Microsoft account at first. Therefore, the focus group had to be moved to a group call spontaneously, which resulted in overtime. As the second focus group also took a bit longer than expected, it might be useful to ask participants for 3 hours of their time and have a short break. A prioritization using the Kano method (Sauerwein et al. 1996) was not feasible, as participants would have had to answer too many questions. Instead, participants rated the needs on a verbal scale to assess subjective importance and wrote down the 5-10 requirements most important to them, thus providing user-based prioritization. The requirements could be further enhanced by conducting an online survey to generalize the requirements and then prioritizing them by presenting smaller numbers of requirements using the method proposed by Sauerwein et al. (1996).

5 Conclusion

The selection of needs (Fronemann and Peissner 2014) seems suitable to elicit requirements for future NDRT, but some needs were not as relevant for our use cases. Virtual contextual interviews and focus groups provides a suitable approach to elicit requirements not only for practical reasons (pandemic-safe) but also for methodological benefits because users participate in their usual context.

6 Outlook: How to elicit impacts of technologies

The next step is to match the requirements elicited in this work to technology impacts. Hence, different methodological approaches for the deduction of impacts (see figure 4) will be evaluated before a catalogue of technology impacts can be established.

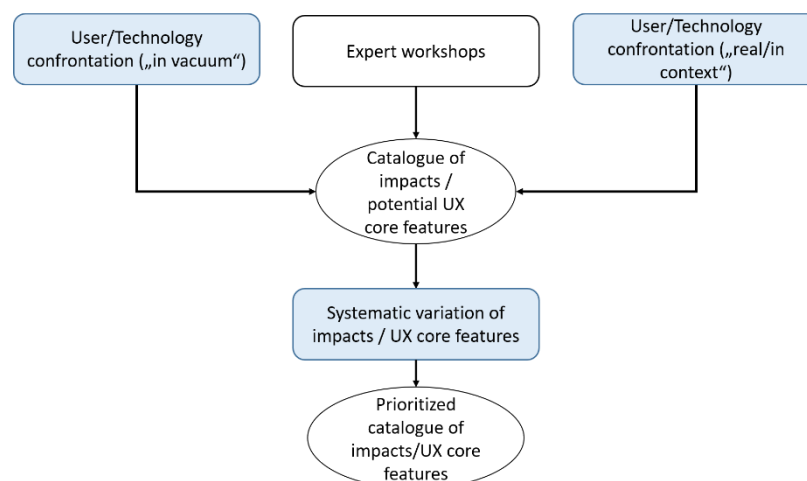


Figure 4: Working model of the I.M.P.A.C.T. (Investigating Multiple Perspectives on Awesome Current Technologies) method to assess the UX potential of prototypical technologies on the right side of MatchUT.

Rittger and Schrader (in press) described a method to characterize the impacts of technology on users by means of workshops where experts for the respective technologies illustrate impacts of technologies from the users' point of view. Since MatchUT emphasizes user experience, the point of view of users might also be integrated to form a method relying on multiple perspectives. Figure 4 depicts the working model of a process to assess the UX potential of technologies, involving both

- Gough 2020b
 GOUGH, Christina: Number of active video gamers worldwide from 2015 to 2023. URL <https://www.statista.com/statistics/748044/number-video-gamers-world/> – Last checked: 25.11.2020.
- Harris Poll 2014
 HARRIS POLL: Millennials - Fueling the Experience Economy. July 2014
- Hassenzahl et al. 2010
 HASSENZAHL, Marc; DIEFENBACH, Sarah; GÖRITZ, Anja: Needs, affect, and interactive products – Facets of user experience. In: Interacting with Computers 22 (2010), No. 5, p. 353–362.
- Hochschule der Medien et al. 2020
 HOCHSCHULE DER MEDIEN; UNIVERSITÄT STUTTGART; FRAUNHOFER IAO; BWCON; POINTS; SIC! SOFTWARE GMBH: Design4Experience - Bedürfnisfächer. URL <https://www.kompetenzzentrum-usability.digital/kos/WNetz?-art=File.download&id=1453&name=Bedu%26%23776%3Brfnisfa%26%23776%3Bcher.pdf>.
- Kitzinger 1994
 KITZINGER, Jenny: The methodology of Focus Groups: the importance of interaction between research participants. In: Sociology of Health and Illness 16 (1994), No. 1, p. 103–121.
- McKinsey&Company 2016
 MCKINSEY&COMPANY: Automotive revolution - perspective towards 2030: How the convergence of disruptive technology-driven trends could transform the auto industry. January 2016 (Advanced Industries)
- Morgan 1997
 MORGAN, David: Focus Groups as Qualitative Research. 2455 Teller Road, Thousand Oaks California 91320 United States of America: SAGE Publications, Inc, 1997.
- Reiss 2004
 REISS, Steven: Multifaceted Nature of Intrinsic Motivation: The Theory of 16 Basic Desires. Review of General Psychology, 8(3), 179-193. In: Review of General Psychology 8 (2004), No. 3, p. 179–193.
- Rittger and Schrader in press
 RITTGER, Lena; SCHRADER, Thorsten: Novel experiences and human centered development in the vehicle. In: RIENER, Andreas; MYOUNGHOON, J. (Eds.): User Experience Design in the Era of Automated Driving: Springer, in press (Studies in Computational Intelligence).
- Rolls et al. 2016
 ROLLS, Kaye; HANSEN, Margaret; JACKSON, Debra; ELLIOTT, Doug: Why We Belong - Exploring Membership of Healthcare Professionals in an Intensive Care Virtual Community Via Online Focus Groups: Rationale and Protocol. In: JMIR research protocols 5 (2016), No. 2, e99.
- Sauerwein et al. 1996
 SAUERWEIN, Elmar; BAILOM, Franz; MATZLER, Kurt; HINTERHUBER, Hans: The Kano Model: How to Delight Your Customers. In: International Working Seminar on Production Economics I (1996), No. 4, p. 313–327.
- Sheldon et al. 2001
 SHELDON, K. M.; ELLIOT, A. J.; KIM, Y.; KASSER, T.: What is satisfying about satisfying events? Testing 10 candidate psychological needs. In: Journal of personality and social psychology 80 (2001), No. 2, p. 325–339.
- van Boven and Gilovich 2003
 VAN BOVEN, Leaf; GILOVICH, Thomas: To do or to have? That is the question. In: Journal of personality and social psychology 85 (2003), No. 6, p. 1193–1202.
- Zeiner et al. 2016
 ZEINER, Katharina M.; LAIB, Magdalena; SCHIPPERT, Katharina; BURMESTER, Michael: Das Erlebnisinterview –Methode zum Verständnis positiver Erlebnisse. In: HESS, S.; FISCHER, H. (Eds.): Mensch und Computer 2016: Gesellschaft für Informatik e.V. und die German UPA e.V. 2016, 2016.

How to nudge a stressed driver to use automation?

Wie 'nudged' man einen gestressten Fahrer, die Kontrolle an die Automatisierung abzugeben?

Verena Lisa Kaschub¹, Simon Albrecht², Frederik Diederichs²

¹Universität Stuttgart, GSaME I Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart
verena.kaschub@gsame.uni-stuttgart.de

²Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart
simon.albrecht@iao.fraunhofer.de, frederik.diederichs@iao.fraunhofer.de

Abstract: Automated driving will offer safer driving. If level 4 automation is available, it will be recommendable to use it, especially for stressed or sleepy drivers. Still, the freedom of choice needs to be preserved, so it is likely that the use will depend on the driver's choice. Nudging elements can push/direct drivers towards specific options/outcomes. For a safe and voluntary transition into automated driving we used nudging principles for a holistic HMI strategy that was iteratively developed with 3x12 subject design in a driving simulator. Stress and sleepiness were induced as a realistic environment for the nudging HMI. The iterative development resulted in an HMI strategy with nudging and coherent multimodal HMI elements, composed by ambient light, seat vibration, sounds and driver state icons. The paper describes in a case study how the potential of nudging theory can be used to increase the likelihood of using automated driving.

Keywords: Nudging, HMI, highly automated driving, transition, stress

Abstract: Automatisiertes Fahren wird in der Zukunft ein sichereres Fahren ermöglichen. Wenn eine Level 4 Automatisierung verfügbar ist, ist es empfehlenswert in dieses zu wechseln, insbesondere für gestresste oder schläfrige Fahrer. Dennoch muss die Wahlfreiheit erhalten bleiben. Nudging-Elemente können Fahrer zu bestimmten Optionen bewegen/lenken. Für einen sicheren und freiwilligen Übergang zum automatisierten Fahren wurden Nudging-Prinzipien für eine ganzheitliche HMI-Strategie verwendet, die iterativ im 3x12 subject-design in einem Fahrsimulator entwickelt wurden. Stress und Schläfrigkeit wurden als realistische Umgebung für das Nudging HMI induziert. Die iterative Entwicklung führte zu einer HMI-Strategie mit Nudging-Elementen und kohärenten multimodalen HMI-Elementen, die sich aus Ambient-light, Sitzvibrationen, Sounds und Fahrerzustand-Icons zusammensetzen. Die Studie stellt dar, wie das Potenzial der Nudging-Theorie genutzt werden kann, um die Wahrscheinlichkeit der Nutzung automatisierten Fahrens zu erhöhen.

Keywords: Nudging, HMI, hoch-automatisiertes Fahren, Transition, Stress

1 Introduction

Driver assistance systems as well as automated functions are developed and implemented to assist the driver and provide safer traffic environment. They can assist manual driving and in higher levels of autonomy such as 'SAE level 4' automation can take over the driving task completely. Automated driving is developed to reduce accidents and hence will be safer than manual driving. Thus, when available, it should be activated by the driver. This is especially true when driver states or the environmental context increase risks of manual driving. However, what happens when drivers fail to act upon these recommendations assisting systems give them? Drivers seem to find assisting systems to not always be effective as they either switch them off or do not act upon the information provided (Twisk and Hair-Buijssen n.d.). That can result in completely disregarding the usage of the system. Moreover, there are circumstances when this might end up in a safety-critical situation or even major accidents. Future systems will be able to detect the driver state via a variety of parameters (e.g. physiological sensors). That could then indicate the ability of the driver to handle the current driving task.

According to Semmer et al. (2007) stress is the "anticipation of a situation that cannot be mastered using available resources", characterized by a feeling of strain and pressure. In this study, stress is defined by the amount of resources that are required by a set of concurrent tasks (Waard 1996). This could for example be a situation in which a driver is stressed due to appointments and time pressure that must be met and does not want to be disturbed by the system. In these situations, a solution must be found that attains the safest option – assistance of higher level of automation – while not overriding the driver and his/her intention. The question arises on how to motivate the driver to use automation without further elevating his/her stress levels. In the next section, a closer look will be taken on relevant aspects that are essential to delimit the research question.

1.1 Nudging

'Nudging is an umbrella term for deliberate and predictable methods of changing people's behavior by modifying the cues in the physical and/or social context in which they act. It uses cues to activate non conscious thought process involved in human decision-making' (Marchiori 2017). The concept of nudging might provide a suitable approach to cope with challenge of 'pushing/nudging' a driver into a safer state of automation. According to Thaler and Sunstein 'the nudging concept, adapted from behavioral science, relates to subconsciously pushing us to make a desired choice, without forcing us if we want to go a different way' (Thaler and Sunstein 2009). The importance in this case is to preserve the drivers' freedom and give them choices. That could successfully be achieved by applying relevant nudging measures. Nudging elements have the characteristics to be less intrusive and also have the ability to intervene earlier in a chain of events that could lead into safety-critical situations. The concept is already applied in digital areas such as interface design. The nudging approach provides a variety of principles that can be implemented to achieve a nudging measure (Meske and Potthoff 2017; Mirsch 2017; Weinmann 2016). For example, the principle of 'incentives' suggests making a stimulus more salient to increase its effectiveness (Weinmann 2016). Another principle is to provide feedback to users by mirroring their activities when they perform well and when their actions lead to mistakes (Weinmann 2016). Furthermore, 'framing' is another option for nudging where the perception is cued and framed through a targeted accentuation and therefore perceived differently (Mirsch 2017). 'Expecting errors' is another principle where the designer integrates the knowledge that errors might occur and handles these situations as forgiving as possible (Thaler and Sunstein 2009). The principles aforementioned are selected from the nudging approach and some of those might possess the ability to be integrated and combined with HMI elements to incorporate the nudging factor.

1.2 HMI (Human machine interface) guidelines

To create and develop an efficient and effective HMI for nudging, it is essential to investigate the current state of the art and principles that an HMI should comprise. In the following section, requirements are listed that provide a framework for a possible HMI strategy. These requirements are divided into main categories that include:

Multimodal: Multimodal HMI needs to be semantically, temporally and spatially congruent (Diaconescu 2011; Talsma 2010); No visual-only feedback; Multimodal take over request (TOR) is most requested/preferred in high urgency situations as it leads to faster response times (Bazilinsky 2018, Petermeijer 2017).

Visual: Visual warnings should be as generic as possible; textual information should be positioned at upper area (Reisemann and Spiegel 2002); Symbols over text (Kebeck et al. 1997); ICL (Instrument Cluster) notifications via pop-up; Colors red and yellow for warning notifications (Löcken 2016), ICL should be used to explain acoustic and tactile/haptic notifications (Kebeck et al. 1997); Placement of ICL congruent to drivers' visual line (Wittmann 2006); Ambient TOR (better recognition than with localized visual cues) (Borojeni 2016); ICL is essential visual element (Adell 2011).

Auditive: Acoustic warning should be synchronized with ICL; the use of auditory warning alone is useful but not satisfactory; Female voice was preferred (in high-level background noise) (Bazilinsky and de Winter 2015); an increase in speech rate results in a monotonic increase of perceived urgency and commandingness (Bazilinsky and de Winter 2015); beeps with shorter inter pulse intervals perceived as more urgent (Bazilinsky and de Winter 2015); for Complex situations (non-semantic/abstract warnings faster to process (Bate 1969; Naujoks 2016); Looming sounds (increase in intensity) useful due to being an intrinsic warning cue (Bach 2009).

Haptic: Vibrotactile warning is useful for getting driver back in the loop (Bazilinsky 2018; Petermeijer 2017); Tactile warning in combination with auditory leads to faster reactions (Cabral n.d.).

Others: Avoiding multiple use of HMI components; preference of type/modality depends on urgency of situation; providing directional information (Erp 2005; van Erp 2015); distributed warnings.

1.3 Research question

Current systems are not designed towards adapting the HMI strategy to the changing driver states. Today's HMI strategies incorporate principles and theories such as being multimodal, but they are not specifically directed and designed towards 'nudging' a driver. The driver is presented with an option, but not nudged to direct him/her towards choosing that option. Research on integrating ideas and principles derived from theory of 'nudging' with state-of-the-art HMI strategies is required to nudge the driver in a safer driving mode. Therefore, the following research question was established: *'How to design an HMI that nudges a stressed driver to use automation while also not elevating the stress level of the driver?'*

2 Method

2.1 HMI concept for nudging

Based on the HMI guidelines, an appropriate HMI strategy was developed illustrated in Figure 1. A set of different HMI elements was used to create a nudging HMI. The 'nudging' facet was based on the 'nudging principles' that were adapted to suit automotive context in designing hand over request (request the stressed driver to use automation) for automated driving. The following section outlines an overview of the experimental setup and integration. As proposed by the HMI guidelines, an HMI is most effective when its multimodal (Petermeijer 2017; Politis 2014). Therefore, the developed HMI strategy tries to divide the information into different channels described in detail in the next section.

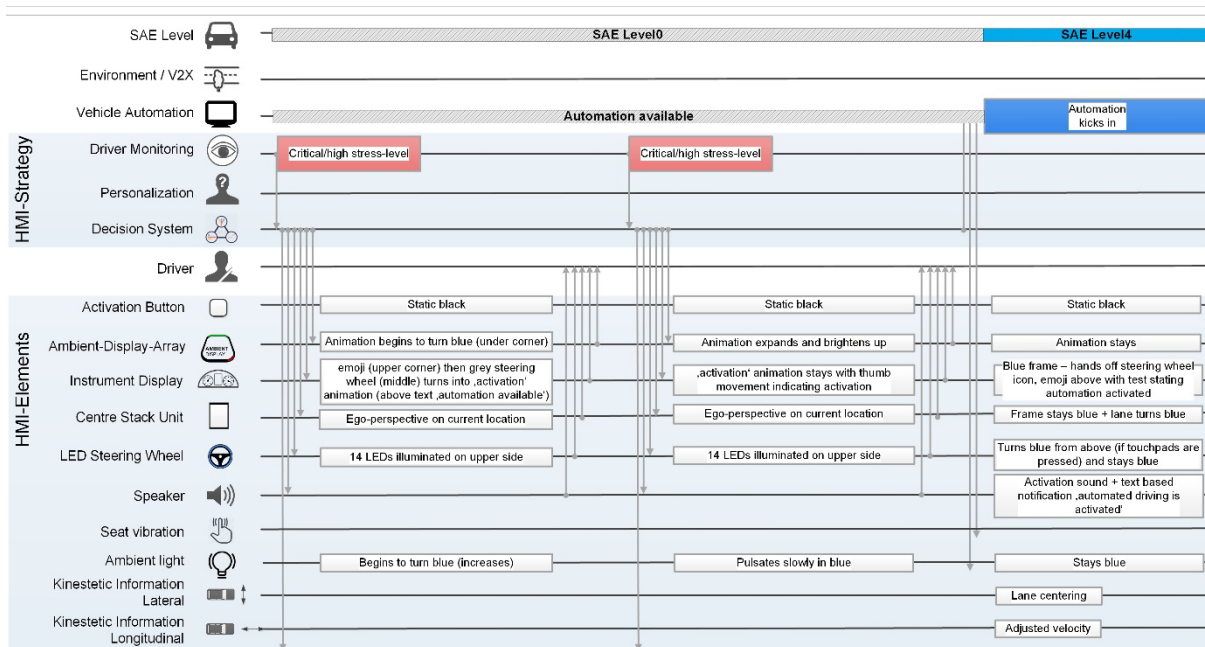


Fig. 1: Opening HMI strategy

Visual elements. A variety of visual elements was used to communicate the mode indication (automation available, automation activated) to drivers. For an **ambient light** component a LED strip was positioned to the foot well of the car along with an additional light source in the passenger seats to provide indirect lighting to illuminate the whole vehicle interior (Borojeni 2016). The mode indication “automation available” is communicated by illuminating the light sources with blue color and gradually increase its luminosity with slow pulsation effect.

Alike ambient light component, another visual element - **display array** located on dashboard – was used as mode indicator. When automation was available, the displays in the array began to light up in blue color and increased in luminosity over a given time. Besides, the light source on each display highlights an incremental filling effect (increase and decrease horizontally) to imitate the pulsation provided by the ambient light. It was tried to illuminate both light sources homogenously to achieve harmonious illumination in the interior (Diaconescu 2011; Talsma 2010). Both visual elements were controlled via a java application and integrated into driving simulation software, SILAB.

In comparison to those ‘indirect’ visual elements a zForce **steering wheel** (equipped with infrared sensors and a 360° LED strip) was used as one of the direct visual elements. The steering wheel was controlled by an external computer via Node.js and CANUSB and integrated to SILAB via UDP. The mode indication “automation available” was informed by illuminating the 14 LEDs in the upper part of the steering wheel rim with blue color, offering a visual signal located exactly in the driver’s field of view (Wittmann 2006). In order to accept the automation available request, the touchpad on the steering wheel was pressed for five seconds, which eventually started to illuminate the remaining LEDs on the steering wheel with blue color in an incremental fashion closing the 360° array of LEDs. After five seconds, the complete steering wheel LED was lit up in blue color to indicate the mode ‘automation activated’.

On the **instrument cluster** (ICL) pictorial mode indicators (icons with supporting texts) were used to mirror the steering wheel LED illumination behaviors according automated status indications (Adell et al. 2011). Besides that, the users were also presented with animated icons on the ICL to guide them during automation activation and deactivation procedures (Reisemann and Spiegel 2002). The current driver state sensed from the physiological indicators was also presented on the ICL (Figure 6) with the ADAS&ME emoji (Knauss 2018) positioned on the upper left corner of the cluster display (different emojis, representing each driver state). When automation was activated, a blue colored visual border was displayed surrounding the entire visual content in the display.

An additional display in the **center stack unit** was used to provide visual feedback to drivers about the vehicle location, its route and the section of the route that vehicle could utilize the automated functions. Additionally, on the left side of the display content, a pictorial view of ego car was displayed. When the driver activated automation, the color of the ego vehicle and the road ahead turned to blue (automation mode) from grey (manual mode) indicating the vehicle status. The right side of the display content includes a map with the route and a symbol “dot” to state the current location of the vehicle. The dot also changed its color code from grey to blue when automation was activated. Similar to ICL, the center stack display unit also presents the driver with blue colored visual border surrounding the display contents when the vehicle switches to automation mode.

The designed HMI concept continuously displayed visual feedback to the driver about vehicle mode and its status. Therefore, a specific **color palette** was selected with colors, *red* and *yellow* that implicate caution or direct to warnings (Löcken 2016) which could be applied for ‘Take-over requests’ (driver expected to resume manual control within give time). The color *green* should be used with caution due to its association with ‘everything is okay’ (Löcken 2016). Since blue is a cold and technical color it suits to display that the automation is in control of the vehicle (Dziennus et al. 2016; Löcken 2016). Therefore, all visual elements used and incorporated a blue tone as a color for automation.

Acoustic and haptic elements. Since the drivers’ visual channel was loaded with more information to draw attention, it was decided to restrict the **auditory** feedback/cues for the HMI concept. When automation was available, a looming and light sound was used to inform the driver via an intrinsic warning cue (Bach 2009). This cue was further synchronized with the information content on the ICL. The acoustic cues used were non semantic and abstract in nature to invoke faster response time from drivers in a complex and stressful situation (Bate 1969; Naujoks 2016). Additionally, a recorded female voice message with the content “Automation is now activated” is used in concurrence with acoustic cue when drivers activate automation (Bazilinsky and de Winter 2015). **Seat vibration** was used as a source of haptic feedback for drivers. When automation was available along with auditory cues, a ‘soft’ vibration was transferred to the driver seat to draw their attention. The combination of auditory cues with haptic feedback invokes faster reactions time from drivers (Carball n.d.).



Fig. 2: Integration and composition of HMI elements in driving simulator

Driving Simulator. The aforementioned HMI design was integrated in a high-fidelity static driving simulator (Figure 1) for assessment. The driving simulator was equipped with the driving simulator software SILAB (version 5) that could visualize simulation for personalized driving scenarios. The set of HMI elements was controlled during the transitions via UDP messages.

Nudging facet and HMI design-urgency levels. The principles outlined in the nudging approach were used to create the HMI framework. The concept of the pulsation of the ambient light as well as display array are based on the principle of ‘incentives’. Due to the pulsation, the stimulus becomes more salient (Weinmann 2016). The blue ambient dye of the interior itself is based on the ‘framing’ principle. The perception of the driver is cued to the blue environment to act upon this incentive (Mirsch 2017). Furthermore, the HMI strategy implicates that the driver will and can make errors (Thaler and Sunstein 2009). This was the reason for avoiding escalated warnings for drivers, irrespective of their interaction with the system, that occur when interacted in a different way. The driver is provided with the same

option as before when an error occurs. Moreover, feedback is presented to the driver through multiple channels. With the emoji shown in the ICL the driver receives direct feedback on his/her current state. This provides the option to trace back the intention of the system on why it is offering automation. The driver is provided with relevant feedback for all his intended actions, for example when he/she activates automation, LED illumination on the steering wheel provides direct visual feedbacks, followed by the center stack unit and ICL. This 'providing feedback' is another principle that belongs to the theory of nudging. All these aspects are implemented to try to achieve the nudging effect. Furthermore, based on the HMI strategy (Figure 1), two urgency levels were defined to draw the attention of unresponsive drivers.

2.2 Iterative user centered development

When developing a human machine interface, it is essential to incorporate the user in this process as early as possible and receive feedback (Boehm 1984). The 'nudging HMI concept' designed based on principles of nudging was tested by an iterative user-centered approach using a driving simulator tool. In total three iterations were carried out on the proposed HMI designs. After 7, 20 and 25 participants, the feedback was analyzed with a team of experts (HMI and UX experts) and was then incorporated in updated versions of the HMI. In total 35 participants took part in the study (16 male and 19 female). The mean age was 44.11 (SD = 13.66). The participants were selected based on their possession of a driver license and average yearly driven mileage (minimal 15,000km with a mean mileage of 20,240km). The experiment includes three different phases (introduction, simulator ride and HMI testing, and semi-structured interview). The total duration was approximately two hours.

2.3 Study set-up

Part 1 – Introduction. On welcoming the participants for the study, they were provided with documents on the objectives of the study, informed consent form and a document on data protection. The participants were only allowed to take part in the study after their prior approval. The study began by collecting data on participant demographics via a digital questionnaire. Subsequently, the participants were introduced to the study procedure and the cover story by the researcher. The cover story consisted of a short illustration of a persona that participants were requested to follow throughout the study. The persona includes that he/she is a CEO of a big company and is in a hurry to the airport to catch a flight. Therefore, he/she takes a rental car with driving assistance features that are not familiar. This persona denied participants a practice session with the driving simulator which induced the stress quotient even before the start of the driving task in the simulator. The participants were encouraged to adapt to this persona throughout the study.

Part 2 - Simulator ride. The second part of the study consisted of the simulator ride and testing the HMI design for different transitions (manual to automated and vice versa). This ride took approximately 60 minutes including a 10 minute break that was taken after the first 25 minutes. In the simulator, participants were made to carry out secondary tasks to induce the stress level medium and high. Furthermore, another task was designed in order to reduce the elevated stress of participants. In total three different tasks were used to induce stress. While driving manually the participants executed an auditive n-back task (one back) based on the study set up of Mehler and Reimer (2011). The numbers were generated with an artificial voice to exclude any influence of rhythmic pronunciation of the researcher. This task was applied four times for a duration of three to five minutes.

The second task required the driver to read 'email/text snippets' that were shown for 10 seconds on a tablet in the center stack unit. After each snippet, questions related to details of the email were presented to participants with a subset of four answer possibilities. The time to answer the questions was restricted in order to create time pressure, which in turn increased the stress level of the participants. If the participants were observed deviating from performing the secondary task, they

were reminded on its importance and also the cover story to draw their attention back towards the task. The emailing task was performed by the participants only during automated driving and the duration was approximately five minutes each session.

The third task was created to induce stress for participants while they were in the manual driving mode. During manual driving, the participants had to drive through a construction site and were asked to follow a truck in front of them with a constant speed and close distance to be able to read its registration number plate. In the simulation software, the truck was programmed to accelerate and brake randomly at varied intervals (the same with every participant). This scenario was applied only one time during the entire study.

A relaxation exercise (short autogenic training for 10 minutes) was performed by the participants during the 10-minute break session to reduce their stress level and also to have a relaxed driver state (underload) for subsequent driving task on a foggy highway with no distractors. During the transitions, the tasks were continued to hold on to the stress level. Only when the participant did not react or had issues comprehending and executing the transition the task was stopped and further advice was provided.

The study was controlled via the software tool 'iMotions'. A preset of various secondary tasks was established in iMotions. During the simulator ride, participants' driving behavior was captured via an in-vehicle camera and screened on a separate display port that helped the researcher to monitor them. The SSQ (simulator sickness questionnaire) was used on regular intervals to detect and prevent participants experience simulator sickness. Furthermore, the participants were asked to fill out the 'stress scale' and the 'Karolinska Sleepiness Scale' (KSS) (Sahid 2011) questionnaire presented at regular intervals via the tablet in the center tack. These questionnaires were applied to secure and evaluate the correct level of 'stress'.

All participants experienced the same driving scenarios and set up. In total three different transitions were presented to the driver. Two transitions from manual to automated, and one 'handover' specifically designed to fulfill the preconditions of a nudging HMI (used in medium and high level stress). The other version was designed for the 'no stress' level. Moreover, a non-critical TOR (take over request) was also included based on state-of-the-art systems to be able to switch between the modes (manual \leftrightarrow automated). In general, a learning effect was detectable during the transitions. Therefore, it was essential for participants to experience the transitions multiple times at regular intervals. This is the reason why the transitions were repeatedly presented to the participants.



Fig. 3: Set-up of the static driving simulator

Part 3 – semi-structured interview. This session was carried out after the completion of the simulator ride, aimed at collecting relevant feedback from participants on the various HMI designs. The baseline HMI-strategy described in the method section was used as a starting point. The participants were asked to sit on the driver seat of the simulator again and were presented with the different HMI designs used in the study. A different scenario was shown with the vehicle placed in a parking lot. This was done to not distract the driver from other external elements in the environment and the driving task.

Then, the HMI strategy was demonstrated again. Furthermore, the intention behind the strategy (nudging effect) was explained to the participant. Afterwards, each transition/strategy was separately shown to the participants. They were asked to aim their attention only to the different elements while staying at the parking lot.

In a semi-structured interview, the participants were asked a set of question and engaged in an interview. The questions rated the importance of the different HMI elements and addressed possible inconsistencies in the HMI strategy. The researcher took notes on every answer and input the participants gave. Questions were directed towards finding out which HMI element was most present/least present; which element presented the incitement the best/least; which elements were essential and which could be renounced. Furthermore, aspects such as inconsistencies in the strategy, feeling safe, the integration of the different elements, simplicity vs. complexity, pleasant vs. unpleasant were asked. The aim of this session was to collect feedback, comments from participants that were then used to refine the HMI concepts iteratively. For this entire session, the participant was constantly informed about HMI design and its final usage scenario in order to receive sufficient feedback from them. The session ended with an open question asking about any further input or ideas they would like to add to the concept.

3 Results

The HMI concept was evaluated from an iterative user-centered perspective and relevant measures were taken to refine it based on users' feedback. Furthermore, new elements were integrated based on users' requirements. Overall, the added 'nudging' elements were perceived by participants as not disturbing and a few participants claimed to have experienced a 'calming down' effect. Still, a variety of changes and adaptations were suggested. An overview of the changes in each iteration is presented in the following sections.

3.1 Iteration 1

In the first iteration, users described the Instrument Cluster (ICL) in combination with the steering wheel to be the most essential aspect for transitions. The visual information provided by the steering wheel in combination with further information on how to act in the ICL was positively noted by every participant. Some users missed feedback during the interaction with the steering wheel. The provided visual feedback was not sufficient and haptic feedback was suggested as an improvement. There was a technical limitation in integrating a haptic feedback with current setting of the simulator system and therefore disregarded. Additionally, the thumb movement in the activation animation in the ICL was not perceived as expected and seemed to be confusing for participants. The hand movement in the animation failed to replicate the intended movement of the user, which led to interruptions during activation. The expert decision was taken to modify the animation that exactly replicates the intended thumb movement. Besides that, visual changes were also carried on the steering wheel icon on the ICL to improve its visual acceptance (exact mirroring of LED movement).

Some participants commented on the display array and their confusion about its relevance. Others missed the presence of the display array and ambient in general. Due to this ambivalence, the expert decided to retain the current ambient light/display array setting and gather more feedback on it to be able to make a more grounded decision during the next iteration.

3.2 Iteration 2

The second iteration addressed the underlining limitation of the display array in combination with the ambient light elements. The ambient light was not recognized while the display array was too intrusive and distracting. Participants stated to be 'distracted by the meaning and intention' behind the display array. Therefore, it was decided to eliminate the display array element from the HMI concept and

therefore integrate an additional, not direct ambient light around the windshield. The windshield ambient light received the same set up as the other ambient light elements, so it functioned as an addition to the composition.

Another aspect that was critiqued by the users were the animations and elements used in the ICL. The description as well as the animation appeared to be too small to be visible during the transitions. Additionally, the color of the text characteristics lacked contrast and was difficult to read. The experts decided to increase the contrast and size up the text, emoji and animation by 20%. This iteration as well as the first iteration illustrated the importance of the combination between the steering wheel and the ICL. Usually, users perceived the changes in the steering wheel and then searched for more detailed information in the ICL.

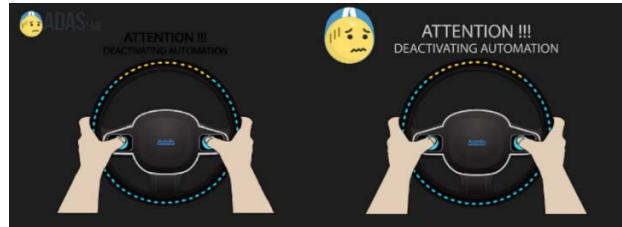


Fig. 4: Improvement of ICL – Iteration 2

3.3 Iteration 3

During the last iteration, it seemed that the ambient light still was not visible and sometimes was only registered when participants were directly confronted with it. The difference between the 'nudging' strategy and the 'no stress' strategy was not distinctively visible. Therefore, changes in the ambient light and steering wheel were executed. It was also decided to change the luminosity of the LEDs of the steering wheel and the ambient light. The luminosity was further increased during 'nudging' to make it more prominent in comparison to the general handover request. Moreover, it was decided to synchronize the LEDs - handover request on the steering wheel - to the pulsation effect of the ambient light. This means that the ambient light as well as the steering wheel pulsate within the same frequency.

3.4 Final HMI-strategy

The iterative user centered process resulted in a final HMI strategy that is illustrated in the figure. This strategy includes all changes and adaptations that were suggested by users during iterative testing. Further improvements on the HMI strategy was discussed in the next section (see section discussion).

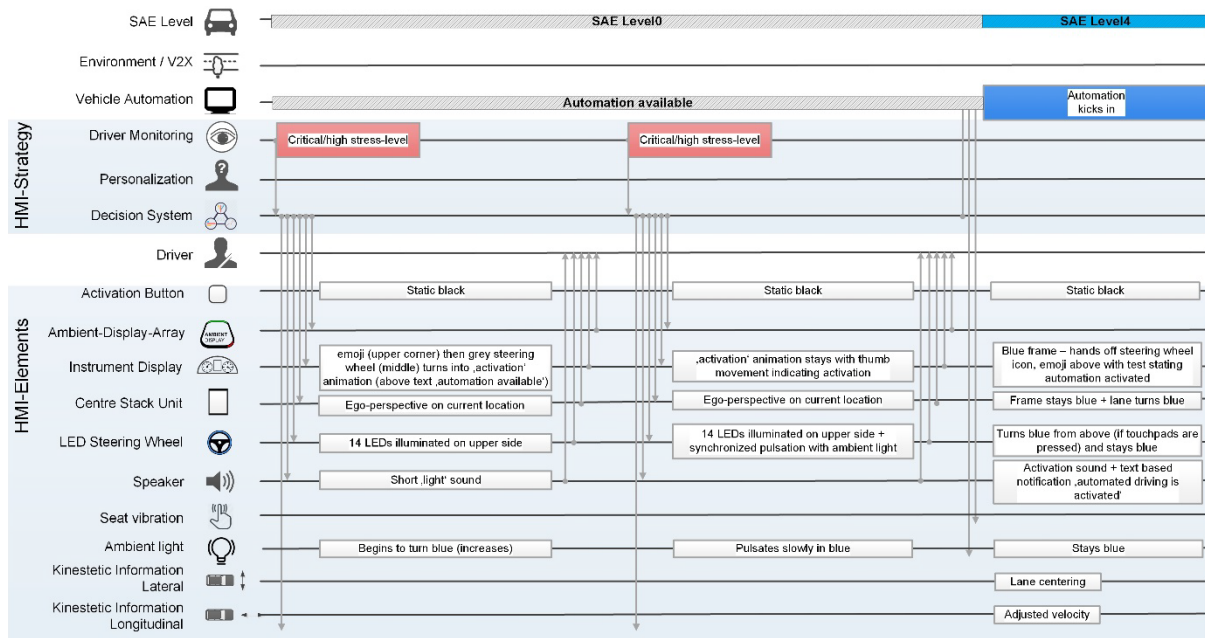


Fig. 5: Final HMI strategy

4 Discussion

In this explorative study a first concept for an HMI strategy that nudges the driver into automation was iteratively developed. The goal was to motivate the driver in a stressful situation to use automation to avoid any safety-critical situations. In general, it can be concluded that the designed HMI strategy was positively perceived by the users. The combination of visual cues from the LED steering wheel along with an instrument cluster was perceived as useful and essential. Participants noted that they are used to check the ICL for notifications and therefore directly checked the ICL when detecting a change with the steering wheel. Participants put the steering wheel or ICL first when asked what they cannot renounce and is most relevant to them. Although some participants perceived ambient light as relaxing with its slow pulsating frequency. Most of the participants had difficulties even detecting the presence of it.

After the different iterations, an improvement was detectable. However, the question remains if the ambient light plays a significant role in the HMI design. Would participants interact as ‘relaxed’ as they did in this study if the ambient light was disregarded from the HMI strategy? Moreover, would the intention be as easy and clearly visible without ambient light? In order to answer these questions, further studies are needed that compare a baseline strategy with an ambient light strategy. Due to the explorative and iterative nature of this study, there was a limitation to compare the ambient light with a baseline. Still it seems to be relevant to check the importance and effect of ambient light in this specific setting.

Another limitation in this study set up was the ‘replica’ of a possible biofeedback ambient light. Only a slow frequency of pulsation was implemented. Due to the scope and the framework of the study it was not feasible to integrate a direct connection between the ambient light elements and ECG sensors. Still studies suggest a positive effect of biofeedback ambient light that is based on heart rate and respiratory rate (Yu 2018). If implemented and evaluated in a future study this could also resolve the question asked above on the importance and role ambient light plays.

Another aspect that was not possible to integrate during the iterations but still seemed to be essential according to users’ input was ‘haptic’ feedback from the steering wheel. Users claimed to miss a haptic component of the steering wheel. During the handover, users were confused if the steering wheel acknowledged their input. Although a visual feedback was implemented (filling LEDs), the haptic element would complete the design. This further emphasizes the multimodal approach to use every

channel in an HMI strategy to be most effective. Any undesired information from the system lead to confusion, which could add stress and annoyance to the user, and therefore should be avoided. When the users do not accept and use the system, the intention of nudging them into automation would be obsolete. Therefore, a future iteration of the steering wheel hardware should incorporate this feedback and take into account possibilities to integrate haptic elements that can be used in HMI strategies.

References

- Adell et al. 2011 ADELL, EMELI ; VÁRHELYI, ANDRÁS ; FONTANA, MARIO DALLA: The effects of a driver assistance system for safe speed and safe distance – A real-life field study. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* Bd. 19, Pergamon (2011), Nr. 1, S. 145–155
- Bach et al. 2009 BACH, DOMINIK R. ; NEUHOFF, JOHN G. ; PERRIG, WALTER ; SEIFRITZ, ERICH: Looming sounds as warning signals: The function of motion cues. In: *International Journal of Psychophysiology* Bd. 74, Elsevier (2009), Nr. 1, S. 28–33
- Almon 1996 BATE, ALMON J: COCKPIT WARNING SYSTEMS COMPARATIVE STUDY (1969)
- Bazilinskyy et al. 2015 BAZILINSKY, PAVLO ; DE WINTER, JOOST: Auditory interfaces in automated driving: an international survey. In: *PeerJ Computer Science* Bd. 1, PeerJ Inc. (2015), S. e13
- Boehm 1984 BOEHM, BARRY W.: Software Engineering Economics. In: *IEEE Transactions on Software Engineering* Bd. SE-10 (1984), Nr. 1, S. 4–21
- Borojeni et al. 2016 BOROJENI, SHADAN SADEGHIAN ; CHUANG, LEWIS ; HEUTEN, WILKO ; BOLL, SUSANNE: Assisting Drivers with Ambient Take-Over Requests in Highly Automated Driving. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - Automotive'UI 16*. New York, New York, USA : ACM Press, 2016 — ISBN 9781450345330, S. 237–244
- Cabral et al. 2011 CABRALL, CHRISTOPHER ; DE WINTER, JOOST ; PETERMEIJER, SEBASTIAAN ; CABRALL, C D ; DE WINTER, J C F ; MANCA, L ; BAZILINSKY, P ; HAPPEE, R: A Survey of Human Machine Interfaces in Automated Driving NeuroSIPE View project User Acceptance of Driverless Shuttles Running in an Open and Mixed Traffic Environment View project
- Diaconescu et al. 2011 DIACONESCU, ANDREEA OLIVIANA ; ALAIN, CLAUDE ; MCINTOSH, ANTHONY RANDAL: Modality-dependent “What” and “Where” Preparatory Processes in Auditory and Visual Systems. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* Bd. 23, MIT Press 238 Main St., Suite 500, Cambridge, MA 02142-1046 USA journals-info@mit.edu (2011), Nr. 7, S. 1609–1623
- Dziennus et al. 2016 DZIENNUS, M., KELSCH, J., & SCHIEBEN, A: Ambient light based interaction concept for an integrative driver assistance system—a driving simulator study. e. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe*, 2016, S. 171–182
- van Erp et al. 2015 VAN ERP, JAN B.F. ; TOET, ALEXANDER ; JANSSEN, JORIS B.: Uni-, bi- and tri-modal warning signals: Effects of temporal parameters and sensory modality on perceived urgency. In: *Safety Science* Bd. 72, Elsevier (2015), S. 1–8
- Kebeck et al. 1997 KEBECK, G., CIELER, S., & POHLMANN, S.: *Vergessene Ergonomie: gedächtnispsychologische Aspekte der Gestaltung von Displays*. : Lit, 1997
- Knauss et al. 2018 KNAUSS, ALESSIA ; DIEDERICHS, FREDERIK ; WILBRINK, MARC ; LILIS, YANNIS ; CHRYSOCHOOU, EVANGELIA ; ANUND, ANNA ; BEKIARIS, ANGELOS ; NIKOLAOU, STELLA ; U. A.: An HMI Framework for Driver/Rider States Adaptive Transitions and ADAS (2018)
- Löcken et al. 2016 LÖCKEN, ANDREAS ; HEUTEN, WILKO ; BOLL, SUSANNE: Enlightening Drivers. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - Automotive'UI 16*. New York, New York, USA : ACM Press, 2016 — ISBN 9781450345330, S. 97–104

- Marchiori et al. 2017 MARCHIORI, DAVID R. ; ADRIAANSE, MARIEKE A. ; DE RIDDER, DENISE T.D.: Unresolved questions in nudging research: Putting the psychology back in nudging. In: *Social and Personality Psychology Compass* Bd. 11, Wiley-Blackwell (2017), Nr. 1, S. e12297
- Mehler and Reimer 2011 MEHLER, BRUCE ; REIMER, BRYAN: *MIT AgeLab Delayed Digit Recall Task Social Science of Automated Driving View project Surface EMG Assessment and Biofeedback Applications View project*
- Meske and Potthoff 2017 MESKE, CHRISTIAN ; POTTHOFF, TOBIAS: THE DINU-MODEL – A PROCESS MODEL FOR THE DESIGN OF NUDGES. In: *Research-in-Progress Papers* (2017)
- Mirsch et al. 2017 MIRSCH, TOBIAS ; LEHRER, CHRISTIANE ; JUNG, REINHARD: Digital Nudging: Altering User Behavior in Digital Environments (2017)
- Naujoks et al. 2016 NAUJOKS, FREDERIK ; KIESEL, ANDREA ; NEUKUM, ALEXANDRA: Cooperative warning systems: The impact of false and unnecessary alarms on drivers' compliance. In: *Accident Analysis & Prevention* Bd. 97, Pergamon (2016), S. 162–175
- Petermeijer et al. 2017 PETERMEIJER, SEBASTIAAN ; BAZILINSKY, PAVLO ; BENGLER, KLAUS ; DE WINTER, JOOST: Take-over again: Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop. In: *Applied Ergonomics* Bd. 62, Elsevier (2017), S. 204–215
- Poloitis et al. 2014 POLITIS, IOANNIS ; BREWSTER, STEPHEN A. ; POLLOCK, FRANK: Evaluating multimodal driver displays under varying situational urgency. In: *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI '14*. New York
- Reisemann and Spiegel 2002 REISEMANN, M., & SPIEGEL, G.: *Gebrauchstauglichkeitstests zu hochintegrierten Fahrer-informationssystemen - was man Fahrern zumuten darf*: VDI Verlag, 2002 — ISBN 3180916788
- Semmer et al. 2007 SEMMER, N ; JACOBSHAGEN, N ; MEIER, L ; ELFERING, AH: Occupational stress research: The stress-as-offense-to-self perspective (2007)
- Shahid et al. 2011 SHAHID, AZMEH ; WILKINSON, KATE ; MARCU, SHAI ; SHAPIRO, COLIN M.: Karolinska Sleepiness Scale (KSS). In: *STOP, THAT and One Hundred Other Sleep Scales*. New York, NY : Springer New York, 2011, S. 209–210
- Talsma et al. 2010 TALSMA, DURK ; SENKOWSKI, DANIEL ; SOTO-FARACO, SALVADOR ; WOLDORFF, MARTY G.: The multifaceted interplay between attention and multisensory integration. In: *Trends in Cognitive Sciences* Bd. 14, Elsevier Current Trends (2010), Nr. 9, S. 400–410
- Thaler and Sunstein 2009 THALER, RH ; SUNSTEIN, CR: Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness (2009)
- Twisk and Hair-Buijssen n.D. TWISK, D ; HAIR-BUIJSSEN, S DE: MeBeSafe: Developing and testing infrastructure & car based nudges to improve cyclist safety. In: *figshare.com*
- Waard 1996 WAARD, D DE: The measurement of drivers' mental workload (1996)
- Weinmann et al. 2016 WEINMANN, MARKUS ; SCHNEIDER, CHRISTOPH ; BROCKE, JAN VOM: Digital Nudging. In: *Business and Information Systems Engineering* Bd. 58, Gabler Verlag (2016), Nr. 6, S. 433–43
- Wittmann et al. 2006 WITTMANN, MARC ; KISS, MIKLÓS ; GUGG, PETER ; STEFFEN, ALEXANDER ; FINK, MARTINA ; PÖPPEL, ERNST ; KAMIYA, HIROYUKI: Effects of display position of a visual in-vehicle task on simulated driving. In: *Applied Ergonomics* Bd. 37, Elsevier (2006), Nr. 2, S. 187–199
- Yu et al. 2018 YU, BIN ; HU, JUN ; FUNK, MATHIAS ; FEIJS, LOE: DeLight: biofeedback through ambient light for stress intervention and relaxation assistance. In: *Personal and Ubiquitous Computing* Bd. 22, Springer-Verlag (2018), Nr. 4, S. 787–8

Kontaktadresse:

Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD),
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart
www.iktd.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Daniel Roth
Telefon +49 711 685-60240, Fax -66219
daniel.roth@iktd.uni-stuttgart.de

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2364-4885

© Fraunhofer IAO, 2021

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich all seiner Teile urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes
hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und
strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen,
Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die
Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch
berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der
Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten
wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in
diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien
(z. B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann
das Institut keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität
übernehmen.

Die vollständigen Beiträge finden Sie unter:
<http://s.fhg.de/symposium-ssp>

Das Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2021
wird unterstützt von der Wissenschaftlichen Gesellschaft für
Produktentwicklung WiGeP e. V.

