

Generische Systemarchitektur für die Erhebung mikroskopischer Verkehrsdaten

vorgelegt von

Dipl.-Ing.

Sascha Knake-Langhorst

ORCID: 0000-0001-7399-0939

an der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Kai Nagel

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Ortgiese

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Hoyer

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 03. März 2022

Berlin 2022

Vorwort

Mir war seit jeher klar, dass ich in meine Dissertation gerne ein persönliches Vorwort einbauen wollte. Was mir dabei vorschwebte, war die Nutzung eines tiefgründigen Zitats oder Textabschnitts als Ankerpunkt. Diese lassen solche Vorworte üblicherweise reflektiert und tiefsinnig wirken und zeugen dabei von einer mehrjährigen, fokussierten Arbeitsleistung, die inspiriert wurde vom Geist großer Worte und Denker. Nun, da der Moment tatsächlich gekommen ist, erscheint mir dieser Ansatz fade und unpassend. Obgleich manche der Personen, die mich näher kennen, vermutlich augenzwinkernd „Gut Ding will Weile haben“ als passendstes Sprichwort benennen würden. Immerhin kam das Thema der Promotion, beurkundet durch eine „Erklärung zur voraussichtlichen Dauer“¹, bereits im Jahr 2008 auf die Agenda. Tatsächlich müsste nach dem obigen Grundsatz diese Dissertationsschrift eine deutlich hohe Qualität aufweisen. Zu entscheiden, ob dies tatsächlich so ist, steht dem Autor eines Werkes vermutlich am wenigsten zu und soll an dieser Stelle auch nicht den Kernpunkt der weiteren Zeilen bilden.

Aus dem langen Prozess habe ich vielmehr mitgenommen, dass dieser nicht so gradlinig und geplant verläuft, wie man dies im Vorhinein annimmt. Und so war das Thema Promotion für mich zwischenzeitlich bereits in weite Ferne gerückt, weil stets andere Aspekte stärker im Vordergrund lagen. Mehr als ein Anlauf verebbte im Alltag, wurde Opfer der sich verändernden Situationen, Arbeitsfelder und -funktionen sowie nicht zuletzt des Schlendrians und der Bequemlichkeit. Zeitweise drängte sich mir das Bild des Sisyphos auf, wie er versucht auf ewig einen Felsblock den Berg hinauf zu wälzen. Dieses Bild kam mir spontan wieder in den Sinn, als ich nach meiner wissenschaftlichen Aussprache gefragt wurde, wie ich mich denn nun fühlen würde. Und so antwortete ich, dass Sisyphos gerade staunend auf dem Gipfel des Bergs stünde, dem Felsblock ungläubig hinterherblickend, der auf der anderen Seite des Bergs hinunterpolterte. Das, was bleibt, ist eine große Demut vor der Aufgabe und Hochachtung vor allen, die vor mir diese Hürde gemeistert haben. Und dieses Gefühl wird mich vermutlich für immer begleiten.

Ich möchte an dieser Stelle allen Menschen, die mich auf diesem langen Weg unterstützt haben, meinen Dank aussprechen. Zu nennen wären hier viele (teils ehemalige) Freunde und Kolleg*innen aus dem Umfeld meiner Tätigkeit am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR. Sie alle namentlich aufzuführen würde den Umfang dieses Vorworts sprengen. Und so beschränke ich mich auf einen kollektiven Dank für viele Jahre gemeinsamer Arbeit mit unzähligen schönen Stunden und tollen wie denkwürdigen Momenten. Fühlt euch alle gedrückt und geherzt!

Ich danke Frank für die gute Betreuung in den ersten Phasen der Arbeit. Es entstand ein Gedankenfundament, welches sich bis zur Fertigstellung erhalten hat. Ich hätte mich gefreut, wenn du mich bis ins Ziel begleitet hättest, aber es sollte wohl nicht sein. Katharina, dir danke ich ausdrücklich für deine Unterstützung und den Glauben an mich, als es notwendig war. Richard und Uwe, ohne die langjährige und tolle Zusammenarbeit mit euch wäre diese Arbeit vielleicht nie entstanden. Danke für den gemeinsamen Weg!

Ein riesiger Dank gebührt natürlich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ortgiese. Michael, ich danke dir für all die Unterstützung, die ich von dir erhalten durfte, sowie die große Zuversicht und die positiv pragmatische und gründliche Art des Umgangs mit allen aufkommenden Themen und Fragestellungen. Daneben danke ich natürlich meinem Zweitprüfer Herrn Prof. Dr.-Ing. Hoyer für den guten Austausch, seine zielführenden Impulse, sowie die äußerst angenehme Art des Umgangs. Herrn Prof. Dr. Kai Nagel danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Eltern danke ich für die viele Liebe und Unterstützung, die ich in meinem Leben erfahren darf. Ihr habt mir Vieles mitgegeben, was mich heute ausmacht: eine geerdete Weltsicht, eine

¹ In dieser wurde übrigens ein möglicher Abschluss der Promotion im September 2010 benannt.

grundlegende Neugier für das Neue sowie Durchhaltevermögen und Zähigkeit, wie sie an dieser Stelle notwendig waren.

Mein letzter und tiefster Dank gebührt meiner Familie, ohne deren unentwegte Unterstützung diese Arbeit nicht entstanden wäre. Neben den Kindern, die mich allesamt auf so unterschiedliche Weise jeden Tag vor Stolz erfüllen und mir so viele Dinge schenken, ist dies natürlich meine Frau Stefanie. Es ist schwer für mich die Liebe und das Verständnis in Worte zu fassen, die entstehen, wenn man zusammen durch so viele Höhen und Tiefen des Lebens geht. Dabei lernt man gemeinsam zu teilen, streiten, stützen, schützen, gestalten und so vieles mehr. Schatz, du bist die Grundlage, du bist mein Leben. Mit dir an meiner Seite ist jeder Tag ein neues Geschenk.

Sascha Knake-Langhorst

Zusammenfassung

Die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Digitalisierung, Datenerfassung und Informationsverarbeitung ermöglicht die Konzeption und Ausgestaltung neuer innovativer Lösungen für ein intelligentes Verkehrssystem. Die sich stetig verschiebenden Grenzen des technisch Machbaren lassen neue Denkweisen und Konzepte für die unterschiedlichen Zielbereiche Sicherheit, Effizienz und Umweltverträglichkeit zu. Ein Kernaspekt liegt dabei in der Analyse von verkehrlichen Verhaltens- und Interaktionsmustern. Ein wichtiger Baustein hierfür ist die Erfassung und Interpretation der jeweils maßgeblichen verkehrlichen Bewegungen, auf deren Grundlage das Wissen um Wirkketten und Zusammenhängen für unterschiedliche Anwendungen erarbeitet werden kann. Für die wissenschaftliche Untersuchung der zugehörigen Fragestellungen ist der Aufbau von adäquaten Werkzeugen essentiell. Der Aufbau und die Entwicklung von Referenzarchitekturen für diese Werkzeuge schlüsselt die Zusammenführung aus verschiedenen Nutzungskontexten in einen gesamtheitlichen Konzeptentwurf auf. Aus diesem Entwurf lassen sich daran anschließend effizient einzelne technische Lösungen unter grundsätzlicher Wahrung von gewünschten Systemeigenschaften und Interoperabilitätsbedingungen ableiten. Durch die Einbettung dieser Systemlösungen in einen Testfeldbetrieb können nachhaltig genutzte und aufeinander abgestimmte Infrastrukturen mit dem Nutzungsfokus der vorwettbewerblichen Forschung und Entwicklung geschaffen werden. Dabei ermöglicht dieses Vorgehen die Wiederverwendbarkeit und den Transfer der zugrundeliegenden Konzepte über die bestehenden technischen Ausprägungen hinaus und damit eine Weiternutzung im Zuge zukünftiger technischer Entwicklungen und Anwendungsfelder.

Diese Forschungsarbeit entwickelt eine Systemarchitektur für die messtechnische Erfassung, Verfolgung und Interpretation von verkehrlichen Bewegungen in Form von Trajektorien für unterschiedliche verkehrliche Szenarien. Zielstellung ist die Schaffung eines Ansatzes mit einem übergreifenden Gestaltungsschema, welcher alle gegebenen Anforderungen einbezieht und abdeckt. Die Systemarchitektur wird dabei ausgehend von einem generisch angelegten Entwurfsmuster stückweise expliziert und ausgestaltet. Für die vorliegende Arbeit werden verschiedene Blickwinkel und Arbeitsfelder zusammengeführt. Dies sind Technologien und Methoden der Objekterfassung und Situationsinterpretation, des Datenmanagements und verteilter Systemkonzepte wie auch technische und organisatorische Rahmenbedingungen für eine betriebliche Einbindung unter grundsätzlicher Wahrung datenschutzrechtlicher Gegebenheiten. Der Ansatz ermöglicht die Nutzung der resultierenden Systemstrukturen für die unterschiedlichen relevanten Anwendungsbereiche. Diese liegen in der automatisierten Erfassung von Bewegungsverläufen und Interaktionsformen von Verkehrsteilnehmern als Grundlage für spezifische Situationsanalysen im Bereich der Verkehrskonflikttechnik, der Nutzung im Bereich szenariengebundener Entwicklungsprozesse automatisierter und vernetzter Fahrfunktionen und deren Validierung sowie der echtzeitfähigen infrastrukturellen Erfassung und Interpretation von verkehrlichen Bewegungen als Baustein für prototypische Implementierungen von kooperativ ausgelegten Fahrfunktionen.

Der Nachweis zur Umsetzbarkeit und Leistungsfähigkeit der entwickelten Konzepte erfolgt an den physischen Systemstrukturen und etablierten Diensten des Testfelds Anwendungsplattform für intelligente Mobilität (AIM) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Die Nutzung dieses Testfelds im Kontext unterschiedlicher Projekte zeigt die erschlossenen Möglichkeiten für die Bearbeitung der maßgeblichen Anwendungsfälle auf. Diese reichen von der Ex-Post-Analyse der Trajektorien- und Interaktionsdaten bis in die echtzeitbasierte Einbindung der ermittelten Informationen in innovative Konzepte mit kooperativer verteilter Umfelderfassung für die Nutzung im Rahmen der Fahrzeugautomation.

Abstract

Progressive developments in the field of digitization, data acquisition and information processing are enabling the conception and design of new innovative solutions for an intelligent transportation system. The constantly shifting boundaries of what is technically feasible allow new ways of thinking and concepts for the different target areas of safety, efficiency and environmental compatibility. A core aspect of this is the analysis of traffic behavior and interaction patterns. An important building block for this is the recording and interpretation of the relevant traffic movements, on the basis of which the knowledge of effect chains and interrelationships can be developed for different applications. The development of adequate tools is essential for the scientific investigation of the related questions. The construction and development of reference architectures for these tools breaks down the confluence from different usage contexts into a holistic conceptual design. From this design, individual technical solutions can then be efficiently derived while fundamentally preserving desired system properties and interoperability constraints. By embedding these system solutions in a test field operation, sustainably used and coordinated infrastructures can be created with the utilization focus of pre-competitive research and development. This approach enables the reusability and the transfer of the underlying concepts beyond the existing technical specifications and thus a further use in the course of future technical developments and fields of application.

This research work develops a system architecture for the metrological acquisition, tracking and interpretation of traffic movements in the form of trajectories for different traffic scenarios. The objective is the creation of an approach with a comprehensive design scheme, which includes and covers all given requirements. The system architecture is based on a generic design pattern while explicated and designed piece by piece. Different perspectives and fields of work are brought together. These are technologies and methods of object detection and situation interpretation, data management and distributed system concepts as well as technical and organizational framework conditions for an operational integration under protection of data privacy. The approach enables the use of the resulting system structures for the different relevant application areas. These are the automated acquisition of movement patterns and interaction forms of road users as a basis for specific situation analyses in the area of traffic conflict technique, the use in scenario-based development processes of automated and connected driving functions and their validation as well as the real-time capable infrastructural acquisition and interpretation of traffic movements as a building block for prototypical implementations of cooperatively designed driving functions.

The feasibility and performance of the concepts developed will be demonstrated using the physical system structures and established services of test bed Application Platform for Intelligent Mobility (AIM) of the German Aerospace Center (DLR). The use of this test bed in the context of different projects shows the developed possibilities for the processing of the relevant use cases. These range from the ex-post analysis of trajectory data to the real-time-based integration of the determined information into innovative concepts with cooperative distributed environment sensing for use in the context of vehicle automation.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Zusammenfassung	4
Abstract	5
1 Einleitung	9
1.1 Problematik	9
1.1.1 Verkehrliche Sicherheit im Straßenverkehr	10
1.1.2 Automatisiertes und vernetztes Fahren	13
1.1.3 Automotive Testfelder	14
1.2 Fragestellung und Zielsetzung	16
1.2.1 Modellbildung in der Verkehrskonflikttechnik.....	17
1.2.2 Nutzung für die Automationsentwicklung	18
1.2.3 Baustein für kooperative Fahrerassistenz und Automation.....	22
1.3 Wissenschaftlicher Beitrag	23
1.4 Vorgehen und Struktur	24
2 Grundlagen, Stand der Technik und Datenschutz	26
2.1 Begriffsdefinitionen in der Objekt- und Situationserfassung	26
2.1.1 Sensor und Sensorsystem.....	26
2.1.2 Merkmale, Objekthypothesen, Tracks und Trajektorien	26
2.1.3 Szene, Situation und Szenario	28
2.2 Technologien und Methoden für die Objekterfassung	30
2.2.1 Sensortechnologien für die Erfassung von Verkehrsteilnehmern	30
2.2.2 Sensordatenfusion.....	31
2.2.3 Superpixel-Ansätze	32
2.3 Verteilte Systemkonzepte	33
2.3.1 Der Begriff der Echtzeitverarbeitung.....	34
2.4 Methoden zur Kritikalitätsbestimmung verkehrlicher Situationen	35
2.4.1 Regelbasierte Ansätze.....	35
2.4.2 Ansätze auf Basis atypischer Ereignisse.....	37
2.5 Datenschutz	37
2.5.1 Relevante Begriffe aus dem Bereich des Datenschutzes	38
2.5.2 Technische und organisatorische Maßnahmen.....	38
2.6 Grundlegende Ableitungen für den Systementwurf	39
3 Anforderungserhebung	41
3.1 Funktionale Kernanforderungen	41
3.2 Nichtfunktionale Anforderungen	43

4	Verwandte Arbeiten	45
4.1	Forschungsaktivitäten zu infrastruktureller verkehrlicher Erfassung	45
4.2	Infrastrukturelle verkehrliche Erfassung im Bereich digitaler Testfelder	49
4.3	Rahmen- und Referenzarchitekturen für intelligente Verkehrssysteme.....	52
4.4	Zusammenfassung und Handlungsbedarf.....	55
5	Systemarchitektur	57
5.1	Generischer Grobentwurf.....	57
5.1.1	Systembausteine.....	58
5.1.2	Grundlegende Datenformen und -flüsse.....	58
5.2	Funktionale Verarbeitungsstruktur	60
5.2.1	Trajektoriengenerierung.....	60
5.2.2	Informationsverarbeitung und Wissensgewinnung.....	62
5.2.3	Datenqualitätsmanagement und Betriebssteuerung	62
5.2.4	Funktionale Gesamtarchitektur	63
5.3	Akteurssicht	64
5.3.1	Aufgaben- und Verantwortungsanalyse	64
5.3.2	Ableitungen für die weitere Systemausgestaltung.....	66
5.4	Prozesssicht.....	67
5.4.1	Trajektoriengenerierung.....	67
5.4.2	Applikationsbereich	68
5.4.3	Sekundäre Verarbeitung	70
5.4.4	Betriebssteuerung.....	70
5.4.5	Betriebsphasen	71
5.4.6	Betriebsformen.....	72
5.4.7	Optimierung der Prozesskette für den Offlinebetrieb	73
5.4.8	Data Interface and Service Control Units (DISCUs).....	75
5.5	Szenariosicht.....	75
5.5.1	Offlinebetrieb	76
5.5.2	Echtzeitbetrieb	77
5.5.3	Kombinierter Regelbetrieb	78
5.5.4	Funktionale Kopplung mit anderen Testfeldbereichen	78
6	Anwendungsbeispiel Testfeld AIM	80
6.1	Systemaufbau	80
6.1.1	AIM Mobile Aufbauten	80
6.1.2	AIM Forschungskreuzung	83
6.2	Daten- und Informationsverarbeitungskette	87
6.2.1	Trajektorien Daten	87
6.2.2	Szenenvideos	88
6.2.3	Daten- und Informationsmanagement.....	90

6.2.4	Systementwicklungsaspekte.....	91
6.2.5	Technische Ausgestaltung der Rohdatenaufzeichnung.....	92
6.2.6	Aufbau des Entwicklungssystems.....	92
6.3	Verfahren der Systemverifikation und Validierung.....	94
6.3.1	Evaluation des Betriebs.....	94
6.3.2	Evaluation der Datenqualität.....	95
6.4	Verkehrliche Anwendungsbeispiele.....	96
6.4.1	Interaktionsanalysen im Rahmen der verkehrlichen Sicherheit.....	96
6.4.2	Infrastrukturgestützte Erfassung als Baustein kooperativer Systemansätze.....	99
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	103
7.1	Zusammenfassung.....	103
7.2	Bewertung des Erreichten.....	104
7.2.1	Generisches Architekturkonzept.....	106
7.2.2	Systemausgestaltung.....	106
7.2.3	Objekterfassung und Situationsinterpretation.....	107
7.2.4	Betriebsformen, Rollen und Verantwortlichkeiten.....	107
7.2.5	Datenschutzaspekte.....	107
7.3	Fazit.....	108
7.4	Ausblick.....	108
	Abbildungsverzeichnis.....	112
	Tabellenverzeichnis.....	115
	Abkürzungsverzeichnis.....	116
	Literaturverzeichnis.....	118

1 Einleitung

Der Verkehrssektor ist im Bereich der Forschung und Entwicklung seit jeher geprägt von einer hohen Dynamik und großen Bereitschaft zu neuen Innovationen. Wesentlicher Treiber für diese Entwicklung liegt in dem grundlegenden Wunsch nach einem sicheren, effizienten und umweltverträglichen Betrieb, der sich in regulativen Vorgaben sowie in einem öffentlich geführten gesellschaftlichen Diskurs widerspiegelt. Ein Leitbild ist dabei der Wunsch nach einer nachhaltigen Mobilitätsform, die die oben genannten Aspekte möglichst optimal miteinander vereint. Dabei treten in den letzten Jahren mit den rasant fortschreitenden Entwicklungen in der Digitalisierung, Datenerfassung und Informationsgewinnung Technologiebereiche in den Vordergrund, auf deren Basis neue innovative Formen von verkehrlichen Systemen gedacht und entwickelt werden.

Einerseits stellen diese neuen Technologien die Grundlage für neue Werkzeuge und Methoden in bereits seit vielen Jahren etablierten Arbeitsbereichen, wie zum Beispiel der verkehrlichen Sicherheit im Straßenverkehr. Dort bildet der weiträumige Betrachtungswinkel mit seinen makroskopisch geprägten Modellen eine Grundlage für die erfolgreiche Bemessung und Auslegung von Straßensystemen und regulativen Maßnahmen. Die mikroskopische Modellwelt ermöglicht wiederum deutlich tiefere und detaillierte Einblicke in das verkehrliche Geschehen mit seinen grundlegenden Mechanismen und Rahmenbedingungen. Dies bildet die Grundlage für ein größeres Verständnis der Artefakte, Abläufe und komplexen Wechselwirkungen im lokalen Verkehrsgeschehen und ermöglicht so eine systematische Problemanalyse sowie die Einführung und Bewertung neuer Maßnahmen. Dabei gibt es seit jeher einen großen Wunsch nach maschinellen Verfahren mit einem möglichst hohen Grad an Automatisierung der Prozesse sowie einer Erhöhung der Informationsgüte und -dichte. Die Anwendung neuer Technologien ermöglicht hierbei die hochgenaue Erhebung verkehrlicher Daten auf Basis von Trajektorien sowie die Nutzung dieser Daten im Bereich der Modellbildung.

Ein weiterer Fokus liegt in der fortschreitenden Automatisierung im Verkehrsbereich. Insbesondere der Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens (AVF) mit den Anforderungen eines immer umfangreicheren Wirkraums der Fahrfunktionen verlangt einerseits nach adäquaten Werkzeug- und Methodenkettens für Auslegung, Test und Validierung unter realen Einsatzbedingungen. Andererseits spannt er den Rahmen für Konzepte neuer funktionaler Architekturansätze im Bereich verteilter Systemverbünde auf. Diese verlassen den Rahmen autonom agierender Fahrzeugsysteme und sehen die Erschließung und Einbindung neuer Daten- und Informationsquellen insbesondere im Bereich der kooperativen Umfelderkennung vor. Die Nutzung intelligenter Infrastrukturen ermöglicht hierbei die Stützung, Plausibilisierung und Erweiterung von rein fahrzeugbasierter Erfassung in Richtung verteilter Systemstrukturen.

Eine Schlüsselstellung im Bereich der vorwettbewerblichen Forschung und Entwicklung an AVF nehmen automotiv Testfelder wie das Testfeld Niedersachsen oder die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) des DLR ein, die Werkzeug- und Dienstleistungsportfolios für eine effiziente und zielgerichtete Konzeption, Auslegung und Bewertung neuer innovativer Ansätze schafft.

Der folgende Abschnitt 1.1 umfasst einen Überblick über die wissenschaftliche Problemstellung und führt in die relevanten Detailthemen ein. Es werden tiefere Einblicke in die Forschungs- und Entwicklungsthemen gegeben, die ein grundlegendes Verständnis für die Motivationslage stellen. Ausgehend hiervon werden dann jeweils fachliche Bedarfe herausgestellt und benannt, die dann im Folgeabschnitt 1.2 in den jeweiligen Themenbereich tiefer eingebettet werden. Daraus werden detaillierte Zielsetzungen erarbeitet. Abschnitt 1.3 benennt den wissenschaftlichen Beitrag. Abschnitt 1.4 gibt einen Überblick über den Aufbau der Arbeit und erläutert die gedankliche Struktur der Folgekapitel.

1.1 Problematik

Das Institut für Verkehrssystemtechnik (TS) des DLR beschäftigt sich mit einer großen Bandbreite von Forschungsthemen im Bereich intelligenter Verkehrssysteme. Die grundlegende Motivation

liegt in der Schaffung einer nachhaltigen Form von Mobilität unter Berücksichtigung einer Balance zwischen wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und umweltspezifischen Gesichtspunkten. Dabei wird ein systemischer Ansatz verfolgt. So wird die Erforschung von innovativen technologisch geprägten Lösungen nicht nur aus einer Einzelperspektive betrachtet. Vielmehr wird das Verkehrssystem parallel auf verschiedenen Ebenen untersucht und die Wirkung von Maßnahmen im Gesamtkontext analysiert. Dieses Vorgehen bedingt die Zusammenführung von verschiedenen Sichtweisen und Aufgabenstellungen. Mit Bezug auf den Straßenverkehr reicht das Aktivitätsfeld dabei von der Perspektive eines einzelnen Verkehrsteilnehmers mit einem Fokus auf den Individualverkehr über die Ebene des Verkehrsmanagements bis hin zum öffentlichen Personenverkehr und Konzepten der intermodalen Mobilität. Die Arbeiten erfolgen im Bereich der anwendungsbezogenen Forschung. Dies beinhaltet die Abstützung auf empirische Untersuchungen und der Ausgestaltung prototypischer Entwicklungen als Grundlage für die Bewertung und den Nachweis der Tragfähigkeit der zugrundeliegenden Konzepte. Hierdurch motiviert sich der Wunsch nach Werkzeugen und Methoden, die als Arbeitsgrundlage für die verschiedenen Fragestellungen im Wissenschaftsalltag verwendet werden können.

Dabei treten grundlegende Problemstellungen zutage: Die Nutzung der Werkzeuge und Methoden in den verschiedenen Arbeitsbereichen und Einsatzumgebungen erzeugen unterschiedliche Anforderungsprofile für die technische Ausgestaltung der zu entwickelnden Systeme. Dies führt im üblichen Fall zu einem in der Forschung wohlbekannten Phänomen: Werkzeuge werden projektspezifisch unter Nutzung größerer Investitionssummen konzipiert und aufgebaut, können allerdings nach Ende des Projekts nicht oder nur bedingt weiterverwendet werden, da sie in ihrer Struktur und Ausprägung auf den vorbestimmten Anwendungskontext zugeschnitten wurden. Daraus resultiert, dass für ähnlich gelagerte Folgeaktivitäten die Entwicklung völlig neuer Werkzeuge und Verfahren erfolgen muss. Es entsteht über die Projekte hinweg eine Ansammlung von unterschiedlich gestalteten Werkzeugen und zugehörigen betrieblichen Konzepten. Diese Vorgehensweise ist aus Kosten- und Aufwandssicht nicht nachhaltig und daher zu vermeiden.

Der Aufbau einer generischen Referenzarchitektur ermöglicht die Wiederverwendbarkeit von grundlegenden Konzepten und Gestaltungsprinzipien in einem vordefinierten Anwendungsgebiet, so dass daraus ohne nennenswerten Mehraufwand die Ableitung von spezifischen technischen Systemen aus einer identischen Konzeptebene heraus ermöglicht wird. Neben dem direkten Vorteil der Wiederverwendbarkeit der Konzepte und der damit einhergehenden Aufwandsreduktion stellt dies die Grundlage für eine grundsätzliche Interoperabilität der Systemlösungen. Darüber hinaus ermöglicht diese Vorgehensweise die gesteuerte Evolution von Werkzeugen durch die zielbezogene Weiterentwicklung einzelner technischer Teilsysteme oder -konzepte, die dann in die Bestandssysteme rückführbar ist.

Die geschilderte Problemstellung stellt die grundlegende Ausgangslage der vorliegenden Arbeit dar. Ausgehend von der vorangegangenen Einleitung werden nun im Folgeabschnitt drei fachliche Bereiche aus dem Forschungskontext des Instituts TS diskutiert und Bedarfe für Werkzeuge und Methoden zur Erhebung mikroskopischer Verkehrsdaten für die Anwendung im Bereich der Modellbildung und des Testens herausgearbeitet.

1.1.1 Verkehrliche Sicherheit im Straßenverkehr

Seit dem massenhaften Aufkommen des motorisierten Individualverkehrs in den Anfängen des zwanzigsten Jahrhunderts begleitet das Thema der verkehrlichen Sicherheit den Rahmen des öffentlichen Lebens und der Verordnungslandschaft. Dabei kam und kommt dem Bereich des Straßenverkehrs durch die vergleichsweise hohen Zahlen an Unfällen und Getöteten² eine zentrale Bedeutung zu. Bereits in den Neunzehnhundertsiebzigerjahren wurden daher die bis dahin geltenden Ordnungsstrukturen um mehrere regulatorische Maßnahmen erweitert, welche die

² Das statistische Bundesamt führt für das Jahr 2018 insgesamt 308721 polizeilich gemeldete Unfälle mit Personenschaden mit 3275 Getöteten (Statistisches Bundesamt (2020)).

passive Sicherheit im fahrzeugtechnischen Bereich nachhaltig verbesserten, wie zum Beispiel die Einführung der Gurtpflicht, die Vorgabe von Kopfstützen und Airbags sowie diverse grundlegende Anforderungen an die Gestaltung des Fahrzeugchassis. Seit vielen Jahren gibt es auch Anstrengungen zur Erhöhung der aktiven Sicherheit. Beispiele hierfür liefern die eingeführten Antiblockiersysteme (ABS) sowie Elektronische Stabilisierungsprogramme (ESP), welche nach (Donges 1982) auf der Stabilisierungsebene der Fahrzeugführung wirken. Nach deren Einzug in den Bereich der Serienproduktion als gegebener Stand der Technik verlagerten sich mehr und mehr Aktivitäten auf die taktische Fahrmanöverebene. Damit stellte sich die Grundlage für den heutigen Stand im Bereich der Assistenz und Automation, wie sie in Abschnitt 1.1.2 beleuchtet werden.

Ein weiterer Zweig der verkehrlichen Sicherheit entwickelte sich aus der Perspektive der Stadt- und Verkehrsplanung sowie des Verkehrsmanagements. Ziel ist hier die optimale Auslegung von Verkehrsraum sowie der dabei eingesetzten Reglementierung unter Abwägung der beiden vorrangigen Zielstellungen der Sicherheit und Effizienz. Dabei erfolgte ein Übergang von großräumigen Betrachtungen unter Verwendung von aggregierten makroskopischen Modellstrukturen hin zu kleinräumigen Phänomenen. Es entwickelte sich dabei der Bereich der Verkehrsunfallforschung mit der Motivation eines Verständnisses von verkehrlichen Prozessen und Wechselwirkungen im mikroskopischen Modellbereich. Dabei dienen Untersuchungen von tatsächlichen Straßenverkehrsunfällen dazu örtlich auftretende Unfallhäufungen aufzudecken und zu analysieren, um dann Maßnahmen für die Beseitigung zu beschließen (FGSV 2012b). Diese Arbeiten werden durch Unfallkommissionen durchgeführt und unterliegen definierten Verfahrensabläufen zur Sicherung der Aussagekraft und Qualität. Dabei werden die Unfallmeldungen analysiert und in so genannte Unfalltypenkarten überführt, die Unfalltyp, -kategorie und umstände in je sechs bzw. sieben unterschiedlichen Klassen differenzieren. Obgleich diese Analysen eine grundlegende systematische Betrachtung von Häufungen und Typisierungen von Unfällen in einem großräumigen Bereich ermöglichen, besitzen die Angaben durch die grobe Zuordnungsstruktur naturgegeben eine begrenzte Aussagekraft und -tiefe.

Das Projekt GIDAS (German In-Depth Accident Study) eröffnet hier deutlich weitergehende Möglichkeiten (BASt 2017). Hierfür werden in den zwei Großräumen Hannover und Dresden seit 1999 etwa 2000 Unfälle pro Jahr analysiert. Der vergleichsweise hohe Aufwand in Systematisierung und Standardisierung auf Basis von durchschnittlich 3500 Einzelinformationen³ pro Unfall samt medizinischer Erhebung, einer jeweiligen Rekonstruktion des Unfallgeschehens und einer Fotofallakte mit durchschnittlich 150 – 170 Fotos pro Unfall zeigen den Rahmen der Aufwände in der Datenakquise und -verarbeitung auf. Allerdings gibt es auch hier methodische Einschränkungen. Nach (Liers 2019) werden die Unfälle stichprobenhaft erhoben, um so eine Hochrechnung für repräsentative Aussagen in Deutschland möglich zu machen. So fällt der örtlich begrenzte Erhebungsraum nicht stärker ins Gewicht. Allerdings gelten einschränkende Auswahlkriterien für die Datenakquise. So werden nur Unfälle mit Personenschaden aufgenommen, Unfälle mit Sachschaden werden nicht betrachtet. Ebenso gibt es feste Erhebungszeiten, Vorfälle außerhalb dieses zeitlichen Rahmens werden ebenfalls nicht aufgenommen. Damit zeigt sich neben den großen Stärken des Verfahrens eine grundlegende Problemstellung der Unfallforschung auf: Auch wenn die Analyse und Aufklärung von unfallfördernden Parametern und Gegebenheiten bereits Gegenstand diverser Arbeiten wie zum Beispiel (Johannsen 2013) war, umfassten die erhobenen Fälle immer lediglich einen Bruchteil des kritischen Verkehrsgeschehens. Je umfangreicher die Bearbeitung eines Einzelfalles ausgestaltet wird, desto kleiner fällt die jeweilige Stichprobe aus.

Viele Vorfälle im Verkehr ereignen sich (glücklicherweise) ohne Personenschäden. So gibt es eine höhere Dunkelzahl an nicht erfassten Unfällen aufgrund dessen, dass kein polizeiliches Aufnahmeverfahren eingeleitet wurde. Dies ist üblicherweise bei so genannten Bagatellschäden, also leichten Kontakten mit Sachschäden, der Fall. Die Auswertung der vergleichsweise geringen Zahl an bekannten Fällen macht es bei der Vielzahl denkbarer Einflussgrößen schwer, systematische Ableitungen zu treiben. Der Einflüsse vieler Faktoren können nicht oder nur bedingt differenziert

³ Diese umfassen Kategorien zu Umwelt, Fahrzeugen, Personendaten sowie Informationen zur Infrastruktur

werden. Gleiches gilt für komplexe Verhaltensmuster und -abfolgen, die häufig nur indirekt abgeleitet werden können, da die zum Unfall führenden Fahrverläufe und -kinematiken nicht mehr genau rekonstruiert werden können. Darüber hinaus führt nicht jede kritische Situation zu einem Unfall. Es ist anzunehmen, dass die Zahl der Beinaheunfälle und kritischen Situationen noch einmal deutlich höher anzusetzen ist, als die der genannten Unfallzahlen.

Der Begriff des Beinaheunfalls ist unter dem Pseudonym Near-Miss in der Literatur auch außerhalb des verkehrlichen Kontextes zu finden, wie zum Beispiel in (Wagner 2007). Für den Bereich der Verkehrsunfallforschung findet sich ein prominentes Modell dazu in (Hydén 1987), das in Abbildung 1 gezeigt ist.

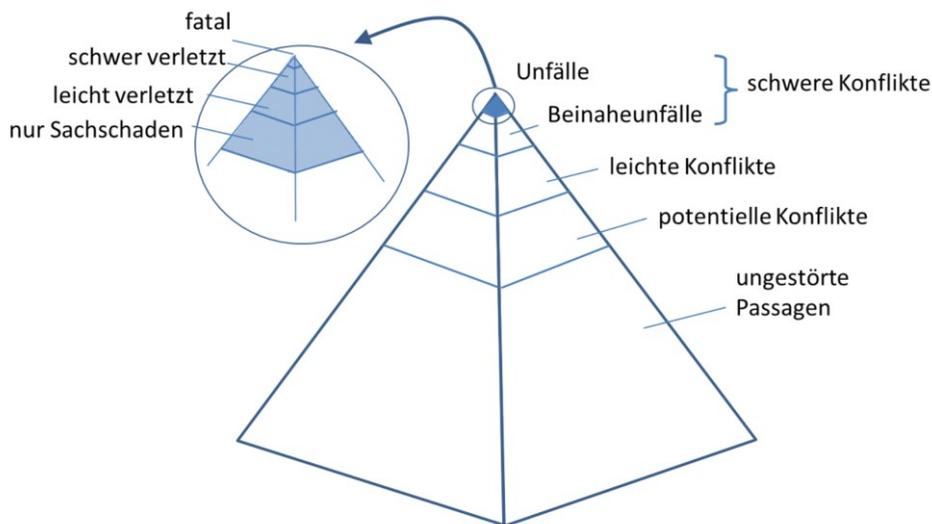


Abbildung 1: Verkehrssicherheitspyramide nach (Hydén 1987)

Das der Abbildung zugrunde liegende Modell gibt den geschilderten Gang der Diskussion wieder. So deuten die Volumina der Pyramidentile als Repräsentanten der Ereignishäufigkeiten eine nach unten hin steigende Anzahl an, während die Auswirkungsschwere der Konflikte in gleicher Richtung abnehmen. Der Großteil der verkehrlichen Bewegungen findet demnach ungestört, also ohne jegliche Form eines Konfliktes statt. Ungeachtet der tatsächlichen Größenverhältnisse der jeweiligen Fallzahlen im Kontext unterschiedlicher Konflikt- und Unfallsituationen, wird es als unstrittig angesehen, dass durch die Nutzung der gesamten Bandbreite des verkehrlichen Geschehens eine große Menge an verwertbaren Informationen nutzbar werden würde, die eine Ableitung von neuem Wissen und erweitertem Verständnis ermöglicht.

Es lassen sich aus dem Geschilderten grundlegende Verständnisfragen ableiten, die den fachlichen Bereich leiten:

- Wie funktioniert verkehrliches Geschehen, insbesondere in urbanen Knotenbereichen, wo die Komplexität teils deutlich erhöht ist?
- Was sind relevante Mechanismen und Wirkgrößen?
- Welche Prozesse und Wechselwirkungen finden statt?

Die Beantwortung dieser Forschungsfragen stellt den Rahmen des ersten fachlichen Bedarfs dar, der für diese Arbeit leitend ist:

B1: Konzeption und Aufbau von Methoden und Werkzeugen für die systematische Erhebung von verkehrlichen Informationen als Grundlage zur Ableitung von Interaktionsmustern und Modellen, die eine tiefere Analyse des Verkehrsgeschehens auf mikroskopischer Ebene ermöglichen.

1.1.2 Automatisiertes und vernetztes Fahren

Seit den Neunzehnhundertneunzigerjahren wurden große Anstrengungen im Bereich der Fahrzeugautomatisierung unternommen, die bis zum heutigen Tage anhalten. Dabei lag bis in das erste Jahrzehnt des neuen Jahrtausends ein starker Bezug auf dem Bereich der Fahrerassistenz (FAS). Grundlegender Wunsch ist hier die Unterstützung des Fahrzeugführers bei der Bewältigung seiner Fahraufgaben, die durch den kontinuierlichen Anstieg des Kraftfahrzeugbestands und allgemein höheren Fahrleistungen auf den Straßen zu einer Erhöhung der Komplexität führen. Prominente Beispiele für etablierte Fahrerassistenzsysteme sind die adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC), die Kollisionswarnung (FCW), Spurverlassenswarnung (LDW) und Kurvengeschwindigkeitswarnung (CSW). Ein guter Überblick über die Fülle der verschiedenen Systeme sowie der damit verknüpften wissenschaftlichen Arbeitsfelder, finden sich in (Winner, Hakuli et al. 2009). In großangelegten Studien wie euroFOT (Benmimoun, Fahrenkrog et al. 2010) wurden die positiven Kurz- und Langzeiteffekte von FAS im Hinblick auf die Verkehrssicherheit, die Verkehrseffizienz, den Kraftstoffverbrauch sowie das Fahrerverhalten und die Fahrerakzeptanz untersucht und bestätigt.

Während sich die Umsetzung einer Fahrerunterstützung in den Jahren zu etablierten Serienstandards entwickelte, erweiterte sich das Spektrum der wissenschaftlichen Betrachtungen in die Richtung der Übernahme von Fahraufgaben durch ein technisches System. Dies wurde ermöglicht durch einen rasanten Fortschritt im Stand der Technik für die grundlegenden Bereiche der Sensorik und Wissensverarbeitung. Hieraus ergaben sich wiederum grundlegende Auslegungsfragen und neue Arbeitsfelder im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion, wie sie zum Beispiel in (Löper 2019) aufgearbeitet werden. Für eine übergreifende Systematisierung des Arbeitsfelds wurden verschiedene Stufen der Fahrzeugautomatisierung definiert, die im SAE Standard J 3016 (SAE International) zusammengefasst und standardisiert werden. Abbildung 2 zeigt diese Systematisierung in sechs Stufen auf, den Levels of Driving Automation.

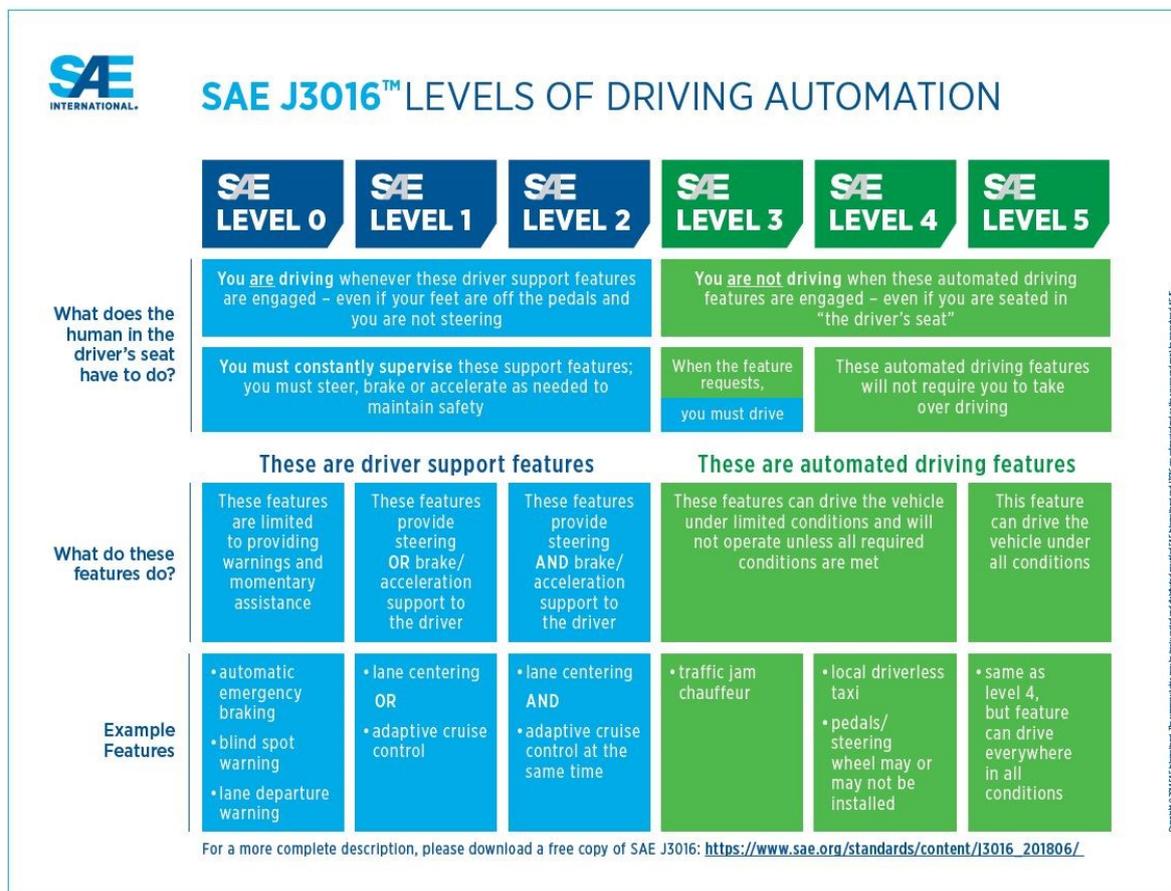


Abbildung 2: Das Automationspektrum nach SAE J3016 aus (Shuttleworth 2019)

Die sechs Stufen umspannen das gesamte Spektrum an denkbaren Automationsgraden vom rein manuellen Fahrbetrieb in Stufe 0 bis hin zu vollautomatisiertem Fahren in Stufe 5. Erkennbar sind die zwei farblich abgesetzten Bereiche. Der linke Bereich umfasst dabei die bereits vorgestellten Assistenzsysteme, während der rechte die Stufen höherer Automationsgrade umfasst, in denen Fahraufgaben teilweise oder ganz durch das Fahrzeug durchgeführt werden.

Erkennbar ist aus den Beschreibungen in Abbildung 2, dass auch bereits in mittleren Bereichen vergleichsweise hohe technische Anforderungen gestellt werden, die ab Stufe 2 in den Bereich der integrierten Längs- und Querführung führen. Spätestens in der Stufe 5 ist ein Grad an Autonomie, Betriebsumfang und -sicherheit gefordert, welcher die Grenzen rein fahrzeugbasierter Systemlösungen erreicht, wenn nicht übersteigt. Das Problem ist prinzipbedingt. Autark agierende Fahrzeugsysteme besitzen trotz aller technischen Innovationen und Fortschritte nur bedingt die notwendige Informationslage und Verarbeitungsressourcen, um den gesamten manuellen Fahrbereich unter allen denkbaren Rahmenbedingungen abzudecken. Außerdem erscheint ein Systementwurf mit autark agierenden Einheiten das Potential des technisch Machbaren nur bedingt auszuschöpfen.

Als Reaktion hierauf gab es in den letzten Jahren eine starke Zusammenführung der fahrzeugbezogenen Forschung und Entwicklung, insbesondere im Bereich der Fahrzeugintelligenz, mit innovativen Vernetzungsansätzen, der Grundlage des automatisierten und vernetzten Fahrens (AVF), wie in der gleichnamigen Strategie der Bundesregierung umrissen (BMDV 2015). Dieser Weg sieht einen Paradigmenwechsel vom Einzelfahrzeug hin zu einem vernetzten Verkehrssystem vor. Damit geht der automotiv Verkehrsbereich auf in eine integrierte Mobilitätslandschaft mit Verknüpfungen in die Bereiche des Verkehrsmanagements bis hin zum Bereich intermodaler Mobilität (Lemmer 2019). Die bereits angesprochene fortschreitende Digitalisierung sowie Vernetzung ermöglichen dabei die Einbindung und Verschneidung verschiedenster Informationsquellen und Senken in Fahrzeugen und Infrastrukturen in technisch ausgestalteten Mehrschichtarchitekturen. Es entsteht eine funktionale Verknüpfung unterschiedlicher Systemebenen vom lokalen Umfeld bis in die Ebene der Hintergrundsysteme und Plattformen hin zu föderierten Systemverbänden, welche eine zielgerichtete Kooperation und Koordination der unterschiedlichen Verkehrsträger ermöglichen.

Kommunikationstechnologien wie der WLAN-Standard ITS-G5 (802.11p) (IEEE 2010) sowie hochperformante Mobilfunklösungen, allen voran das entstehende 5G (ETSI 2019), werden hierbei für die Weitergabe von systemrelevanten Informationen unter angemessenen Rahmenbedingungen benötigt. Die Verknüpfung und Verschneidung von verschiedenen Informationsquellen ermöglichen die Schaffung und Einbindung einer digitalen Verkehrsinfrastruktur für neue Funktionsumfänge bis hin zu vollständig digitalisierten Verkehrsräumen. Dies stellt ein intensiv beforschtes Forschungs- und Entwicklungsumfeld der letzten Jahre dar. Insbesondere der Verkehrskontext urbaner Knotenpunkte mit den einhergehenden komplexen Rahmenbedingungen dient hierbei häufig als Gradmesser für die Tragfähigkeit der Konzepte, wie sie in Forschungsprojekten wie beispielsweise Digitaler Knoten 4.0 (BMDV) oder @CITY (@City Konsortium 2020) erarbeitet werden. Für eine zielgerichtete Beforschung und die Demonstration der Konzepte ist die Verfügbarkeit entsprechend leistungsfähiger Werkzeuge unabdingbar, was den zweiten Bedarfsbereich fixiert:

B2: Konzeption und Aufbau adäquater Methoden und Werkzeuge für eine Unterstützung der Konzeption, Entwicklung und Evaluation von intelligenten verkehrlichen Mobilitätskonzepten im Bereich AVF mit der Möglichkeit einer Einbindung in die prototypische Ausgestaltung intelligenter Systemverbände

1.1.3 Automotive Testfelder

Wie geschildert müssen sich Automationslösungen einer immer breiteren und umfangreicheren Fülle an Funktionsumfängen und Wirkräumen stellen. Dabei wird stets ein korrektes, der Wirksituation angepasstes und sicheres Verhalten erwartet, was durch entsprechende Normung der

Entwicklungsprozesse gewährleistet werden soll. Die ISO 26262 stellt dabei das maßgebliche Rahmenwerk für den Bereich der Entwicklung von elektronischen, elektrischen und programmierbaren elektronischen Systemen als Ableitung der generelleren DIN EN 61508 (Gačnik, Lemmer 2012). Die Normenreihe umfasst ein Vorgehensmodell und gibt die anzuwendenden Methoden in Entwicklung und Produktion vor. Während für einfach gehaltene Funktionen eine zielgerichtete Entwicklung samt Nachweis der funktionalen Sicherheit noch vergleichsweise einfach gelingen mag, ist mit Einführung der komplexeren FAS und AVF-Funktionen ein erweitertes Portfolio von Methoden und Werkzeugen für eine zielgerichtete, effiziente und abgesicherte Entwicklung unabdingbar.

Testfelder übernehmen hier eine Schlüsselrolle im Bereich der systematischen Konzeption, Entwicklung und insbesondere der Erprobung von intelligenten Mobilitätslösungen unter realen Bedingungen. Grundlegende Aufgabe von Testfeldern ist es, (einzelprojekt-)übergreifende und nachhaltige Lösungen für Werkzeugketten zu realisieren und anzubieten. Durch die Vielzahl der verschiedenen Handlungsschwerpunkte hat sich in Deutschland und darüber hinaus eine umfangreiche Testfeldlandschaft gebildet, die sich durch unterschiedliche Aktivitäten aus dem Bereich der Forschung, Industrie und öffentlicher Institutionen gebildet hat. Ein gebündelter Überblick über bekannte und etablierte Testfelder in Deutschland findet sich in Beiträgen wie (Köster 2017), auf der Internetpräsenz des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr⁴ (BMDV 2020b) sowie einem durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bereitgestellten interaktiven Übersicht (BASt 2022). Gerade die beiden letztgenannten Quellen geben einen tieferen Einblick in die jeweiligen Zielstellungen und systematisieren unter anderem in die Schwerpunkte der Erprobung, Ausstattungsmerkmale und Charakteristika im Sinne des verfügbaren Portfolios an Streckenarten, Bauformen und Instrumentierungen. Es zeigen sich Schwerpunktprofile der einzelnen Testfelder in Richtung der gesamten Bandbreite an aktuellen Mobilitätsthemen, wie der Erprobung automatisierter Fahrfunktionen sowie technologischer Herausforderungen im Bereich der Verfügbarmachung und Nutzung von statischen und dynamischen Informationsständen, der Einbindung intelligenter Infrastrukturen und der Verknüpfung mit dem öffentlichen Personen- und Güterverkehr.

Eines der dabei aufgeführten Testfelder, seit 2014 aktiv, ist die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) (Köster, Lang et al. 2016) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) mit seinem Institut für Verkehrssystemtechnik (TS). Das Konzept, das erstmals 2009 vorgestellt wurde (Bauer, Bretschneider et al. 2009), fokussiert in seiner Ausrichtung auf urbanes Verkehrsgeschehen (DLR 2014). Unter dem Motto „eine Stadt wird zum Verkehrslabor“ wurde hier eine dienstbasierte Architektur geschaffen. Diese gliedert sich in die Teilbereiche der sensorischen Erfassung der Realität des städtischen Verkehrsumfelds, den Aufbau simulationsgebundener Werkzeuge zur Ableitung tragfähiger Erkenntnisse für den realen Verkehrsraum sowohl auf der Ebene der kleinräumigen, als auch großräumigen Aspekte, die Fähigkeit zur gezielten Beeinflussung des Verkehrsgeschehens durch die Fähigkeit einer Datenübertragung zwischen Infrastruktur und Verkehrsteilnehmern sowie die Einbettung in vorhandene Teilsysteme des städtischen Verkehrsmanagements. Anders formuliert bildet AIM einen Werkzeugkasten für den gesamten Bereich der Erfassung von Wirkgrößen, Analyse von Zusammenhängen im Sinne einer Modellbildung sowie der Implementierung und Bewertung von Maßnahmen für Verifikation und Validierung. Die aufgebauten Dienste können dabei verschränkt und kombiniert werden, so dass verschiedene Testfeldanteile mit ihren jeweiligen Ausprägungen und Anteilen im Realen und Virtuellen zusammenwirken. Ein Beispiel hierfür wäre der Aufbau einer Kosimulation des Verkehrsgeschehens in der virtuellen Welt unter Nutzung realer Bewegungsdaten zur Sicherstellung der Sinnhaftigkeit und Relevanz der verkehrlichen Konstellationen. Dies ermöglicht die Überführbarkeit und Nutzung der Teilergebnisse aus einem Dienst in andere, so dass sich aus dem Dienstportfolio Werkzeug- und Methodenkette ausbilden, die einen geschlossenen Kreislauf der Systementwicklung

⁴ Nach Neuordnung der ministeriellen Zuständigkeiten im Dezember 2021 hervorgegangen aus dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

ermöglichen (Knake-Langhorst, Köster 2018). Der Kernaspekt der anvisierten Systemlandschaften sind dabei insbesondere die unter 1.1.2 genannten vernetzten Systemlösungen.

Das Testfeld Niedersachsen (TF NDS) ist ein weiteres vom Institut TS aufgebautes Testfeld, welches Anfang 2020 eröffnet wurde. Das Testfeld basiert auf AIM und erweitert dieses um weitere Dienste im Streckenprofil von Autobahnen und Landstraßen. Analog zu AIM wurde das TF NDS in Dienste gegliedert, welche ein vergleichbares methodisches Vorgehen wie in AIM ermöglichen (Köster, Mazzega et al. 2018). Das Testfeld ist ebenso als Plattformkonzept aufgebaut, das sich wie AIM auf Basis projektspezifischer Vorgaben und Anforderungen mit den Anwendungsprojekten mitentwickelt und so zu einer zielgerichteten Weiterentwicklung der Testfelddienste führt. Die Grundidee einer integralen Werkzeugkette mit simulationsgebundenen Werkzeugen, Prüfständen, instrumentierten Streckenabschnitten im öffentlichen Bereich, einem leistungsfähigen Hintergrundsystem und zusätzlichen Informationsquellen wie hochgenauen digitalen Karten und der Anbindung etablierter Informationsdienste machen das Testfeld NDS zu einem direkt anwendbaren Unterstützungswerkzeug für Entwicklungen im Bereich verschiedenster Entwicklungsfragestellungen im Zusammenhang mit automatisiertem und vernetzten Fahren. Auch hier ergibt sich die volle Leistungsfähigkeit des Testfelds insbesondere in der zielgerichteten Kombination der Dienste. Ein Beispiel hierfür bietet die Zusammenführung mikroskopischer verkehrlicher Erfassung mit dem Bereich der technischen Kommunikation. Eine funktionale Kopplung dieser Dienste ermöglicht zum Beispiel die Emulation von Ausrüstungsgraden für Fahrzeuginstrumentierungen als testfeldeigene Funktionalität. Dabei können Echtzeitinformationen zum Verkehrsgeschehen erfasst und als Grundlage für die Echtzeitemulation von V2X-Instrumentierungen⁵ nicht ausgerüsteter Verkehrsteilnehmer genutzt werden, die über passende infrastrukturseitige I2V-Komponenten verbreitet werden können. Dieses vergleichsweise simple Beispiel zeigt bereits das große Potential des Testfelds für den Bereich AVF auf.

Kernelemente der beschriebenen Werkzeugketten in AIM und TF NDS sind Instrumente zur Erfassung des Verkehrsgeschehens. Dabei liegt eine der grundlegenden Anforderungen, wie bereits in den Vorabschnitten diskutiert, in einer feingranularen Erfassung aller relevanten Verkehrsteilnehmer auf Einzelebene für Analysen und der Gewinnung eines Verständnisses von grundlegenden Interaktionsmustern. Darüber hinaus ermöglicht ein solcher Dienst die Nutzbarkeit im Sinne einer Referenz für den Aufbau von Modellen zur Nutzung im Bereich von szenariengebundenen Untersuchungen und damit der Verfügbarmachung relevanter Fahrsituationen für zeit- und kosteneffiziente simulationsgebundene Entwicklungsschritte. Ebenso ermöglicht wird die Bewertung entwickelter Systemlösungen im Regelkreis Fahrer/Fahrzeug/Umwelt über deren eigenen sensorischen Erfassungsraum hinweg. Hieraus lässt sich der dritte grundlegende Bedarfsbereich formulieren:

B3: Konzeption und Aufbau eines Diensteschemas für die Erfassung und Verarbeitung von mikroskopischen Verkehrsphänomenen und -prozessen zur Anwendung im Rahmen eines Testfeldbetriebs samt Einbettung in die Testfeldarchitektur

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Die im vorangegangenen Abschnitt dargelegten Bedarfe ermöglichen die Formulierung der übergreifenden Fragestellung, die in dieser Arbeit erörtert wird:

Wie kann eine Methode zur Erhebung von mikroskopischen Verkehrsdaten konzeptuell so gestaltet werden, dass sie die aufgezeigten Bedarfe zusammenführend erfüllt und dabei für verschiedene technische Ausgestaltungen und die relevanten Anwendungsszenarien im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsbetriebs nutzbar ist?

⁵ V2X, V2I und I2V stehen für Ausgestaltungsformen technischer Kommunikation nach dem 802.11p-Standard und bezeichnen dabei die jeweiligen Quelle-/Zielbeziehungen von fahrzeugsbasierten (V), infrastrukturbasierten (I) sowie gemischten (X) Komponenten im Feldbetrieb.

Die Folgeabschnitte dienen der tieferen Detaillierung der intendierten Anwendungsformen und betten die Zielsetzung in die jeweiligen spezifischen Fachkontexte ein.

1.2.1 Modellbildung in der Verkehrskonflikttechnik

In Abschnitt 1.1.1 wurde bereits deutlich gemacht, dass die Erhöhung der Verkehrssicherheit basierend auf Unfallzahlen, die zum Beispiel in entsprechende Unfallvorhersagemodelle eingehen, stärkeren Beschränkungen unterliegt (Ibler 2015). Reine Zählungen oder statistisch geprägte Unfallanalysen geben zumeist keinen detaillierten Blick in den einzelnen betrachteten Fall, was nur begrenzte Tiefenanalysen zulässt. Durch die zumeist aggregierten Werte können die spezifischen Verläufe der Bewegungsmuster einzelner Konfliktpartner im Nachhinein nicht mehr herausgearbeitet werden. Spezifische Unfalltypen besitzen auch üblicherweise nur geringe Fallzahlen, was die ortsbezogene Herausarbeitung systematischer Zusammenhänge erschwert.

Hier setzt der Fachbereich der Verkehrskonflikttechnik an, welcher die geschilderten Probleme umgeht und vielmehr Beinaheunfälle und kritische Situationen als Grundlage der Untersuchungen nutzt. Dabei stellt sich zuerst die Frage, wie ein Verkehrskonflikt definiert wird. Erste Arbeiten wie (Perkins, Harris et al. 1967) mündeten in folgende grundlegende Festschreibung: "A traffic conflict is an observable situation in which two or more road users approach each other in space and time to such an extent that there is a risk of collision if their movements remain unchanged." (Amundson, Hydén 1977, zitiert nach Laureshyn, Várhelyi 2018). Nach dieser Definition ist also eine Ausweichhandlung in Form einer Beschleunigung bzw. Verzögerung oder eines Ausweichmanövers nötig, um einen ungewollten Kontakt, sprich den Unfall, zu vermeiden.

Im deutschen Raum folgten parallel zu den genannten Quellen Arbeiten wie in (Erke 1982; Erke, Zimolong 1978). 1985 wurde dann durch Erke und Gstalter die Verkehrskonflikttechnik hierzulande verfahrenstechnisch festgeschrieben und standardisiert (Erke, Gstalter 1985). Diese unterteilt Konflikte in drei Merkmalsbereiche: die Entstehung, die Lösung und die Schwere eines Konflikts, die jeweils in verschiedene Kategorien unterteilt wird. Als Folge der technischen Beschränkungen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung basiert die Beobachtungsmethode auf der rein manuellen Betrachtung eines verkehrlichen Bereichs durch speziell geschulte Beobachter, die die jeweilig wahrgenommenen Konflikte in den Merkmalsraum einordnen müssen. Dabei werden durch spezielle Notationen Bewegungslinien der Konfliktpartner in räumlicher und zeitlicher Abfolge qualitativ festgehalten und zusammen mit den Konflikttypen kodiert. Analoge Verfahren wurden auch international über die Jahre hinweg verfolgt und dabei stetig verfeinert (zum Beispiel in (Laureshyn, Várhelyi 2018)). Der Kern der Bemühungen liegt in einem Aufbau von Wissensbezügen über Korrelationen zwischen spezifischen Fahrsituationen und systematisch auftauchenden Konflikttypen bzw. -häufungen.

Neben diesen Arbeiten gibt es weitere Ansätze für die systematische Erfassung von verkehrlichen Konflikten. Eine gebündelte Übersicht über verschiedenen Methoden mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen gibt (Zheng, Ismail et al. 2014). Es werden mit der Beobachtungsmethode, naturalistischen Fahrstudien und der automatisierten Erfassung von Konflikten durch die Anwendung von maschineller Erfassung drei grundlegende Methoden herausgestellt. Die erstgenannte basiert auf einer durch geschulte Bewerter durchgeführten Analyse. Diese ist zwar auf Basis moderner Videoaufzeichnung vergleichsweise einfach durchzuführen und als valide Methode etabliert, allerdings ist das Vorgehen mit Nachteilen behaftet. Zum einen gibt es prinzipbedingt einen hohen Aufwand an menschlichen Ressourcen für die Bewertungstätigkeiten. Dazu kommt ein hoher Aufwand an Schulung und Standardisierung, ohne dass Grenzen der Objektivierung wie die fehlende Reliabilität über die Zeit oder Personen hinweg vollkommen ausgeschlossen werden können. Darüber hinaus ist die manuelle Rückschließung auf kinematische Größen aus dem vorhandenen Material zeitaufwändig und fehleranfällig (Chin, Quek 1997), wobei diese auch nur punktuell erarbeitet werden können.

Arbeiten zu naturalistischen Fahrstudien wie (Barnard, Utesch et al. 2016; Lewis, Dingus et al. 2005; Verband der Automobilindustrie 2011) eröffnen hier erweiterte Möglichkeiten. Obgleich dabei teils komplexe Verfahren der automatisierten Identifikation von Events verfolgt wurden (Stemmler, Kovaceva et al. 2017), verbleibt allerdings doch ein hoher manueller Aufwand in der Sichtung und Einschätzung des Materials, wobei trotz der Fülle an grundlegenden Daten spezifische Formen der Interaktion, die für systematische Analysen verwendet werden könnten, zumeist nur in begrenzter Menge vorhanden sind.

Seit jeher gibt es einen großen Wunsch nach maschinellen Verfahren mit einem möglichst hohen Grad an Automatisierung der Prozesse. So erfolgen seit längerem Anstrengungen insbesondere Verfahren aus dem Bereich der infrastrukturell gestützten Bildverarbeitung für die Nutzung in der Verkehrskonfliktanalyse nutzbar zu machen (Saunier, Sayed 2007; Songchitruksa, Tarko 2004). Diese Vorgehensweise wirkt sehr erfolgsversprechend und einige erfolgreiche Studien wie zum Beispiel (Saunier, Sayed et al. 2010) wurden bereits veröffentlicht. Die Grundidee liegt in der Aufzeichnung und Analyse möglichst aller relevanten Einflussfaktoren und Verkehrsteilnehmern an einem Konflikt. Ein großer Vorteil liegt dabei in der Möglichkeit einer kontinuierlich wirkenden Erfassung in einem definierten Ortsbereich. Damit verbindet sich die Möglichkeit eine tiefgehende Bewertung aller erfassten verkehrlichen Bewegungsverläufe als Basis für unterschiedlichste Analysen zu nutzen. Es ist anzunehmen, dass durch eine ortsgebundene Methode spezifische Interaktionsmuster wie Konfliktschwerpunkte effizient herausgearbeitet werden können. Darüber hinaus ermöglicht eine solche Instrumentierung generell die Nutzung über lange Zeiträume hinweg, so dass selbst Langzeitstudien über viele Wochen und Monate hinweg möglich werden. Allerdings wird aus dem Stand der Literatur auch ersichtlich, dass es immer noch Herausforderungen im Bereich der technischen Realisierung gibt. Zentrale Problemfelder liegen nach (Zheng, Ismail et al. 2014) im Bereich der Erfassungsgüte und der messtechnischen Verfolgung von Verkehrsteilnehmern, welche die Validität der erhobenen Daten begrenzt. Die in Abschnitt 1.1 beschriebenen Fortschritte im Bereich der technologischen Grundlagen lassen mittlerweile allerdings erwarten, dass der Einsatz moderner Methoden zur automatisierten Erfassung von Verkehrsteilnehmern eine ausreichende Datenqualität erzeugt, weshalb die Methode im Rahmen der Arbeit als zentraler Ansatz weiterverfolgt wird. Dies führt auf die erste Zielsetzung der Arbeit:

Z1: Aufbau einer Methode zur automatisierten Erfassung von Bewegungsverläufen und Interaktionsformen von Verkehrsteilnehmern als Grundlage von spezifischen Situationsanalysen im Bereich der Verkehrskonflikttechnik.

Klassischerweise wird die ermittelte Information genutzt, um im Bereich verkehrstechnischer Maßnahmenpakete die Sicherheit zu erhöhen (zum Beispiel durch Veränderungen in der Reglementierung oder der Neugestaltung der Verkehrsfläche). Im Rahmen der TS-basierten Arbeitsfelder werden die Informationen insbesondere zur Ableitung von spezifischen Ansätzen für Unterstützungsmöglichkeiten des Fahrers (im Bereich Assistenz) und den Anforderungen an eine höhere Form der Automationsgestaltung genutzt, wie im folgenden Abschnitt beleuchtet.

1.2.2 Nutzung für die Automationsentwicklung

Eine Automationslösung im Fahrzeug stellt ein komplexes mechatronisches System dar, in dem mechanische, elektronische und informationstechnische Anteile zusammenwirken und zu einem Cyber-Physischen System (CPS) verschmelzen. Die grundlegende Vorgehensweise im Rahmen der Entwicklung folgt dabei gemäß der geltenden Richtlinie VDI 2206 (Verein Deutscher Ingenieure 2004) dem so genannten V-Modell. Abbildung 3 stellt eine gegenüber der Richtlinie leicht erweiterte Form der Darstellung dar. Das V-Modell sieht einen systematischen Prozessablauf für die verschiedenen Schritte einer Systementwicklung vor. Dieser erfolgt auf den unterschiedlichen aufeinander aufbauenden Systemebenen.

Ausgangspunkt ist eine konkrete Menge von Anforderungen an das zu entwickelnde System. Das System wird zunächst auf Gesamtsystemebene in einem Systementwurf grundlegend beschrieben

und ausspezifiziert. Der Gesamtsystementwurf wird in Teilfunktionen zerlegt, die wiederum in einzelne Komponenten dekomponiert und weiter ausspezifiziert werden. Der geschilderte Vorgang entspricht dabei der linken Seite der schematischen Darstellung. Nach dieser Detaillierung werden dann Lösungskonzepte erarbeitet und auf einzelner Funktionalitätsebene realisiert. Der rechte Teil des Schemas behandelt die darauffolgenden Schritte der Integration durch die systematische Zusammenführung der Einzelfunktionen hin zu einer operationalisierten Teilsystemebene und schließlich bis hin zum fertigen Gesamtsystem. Dabei werden auf allen Systemebenen ausgehend von den jeweils formulierten Anforderungskatalogen Schritte für die Verifikation und Validierung durchgeführt, die sich aus den jeweiligen Beschreibungen und Spezifikationen ableiten. Es bietet sich an dieser Stelle an die häufig missbräuchlich genutzten Begriffe Verifikation und Validierung (V&V) näher zu definieren. Es gibt in den zugehörigen Normen und Richtlinien verschiedene Angaben. Eine griffige sprachliche Umschreibung findet sich in (Albers, Behrendt et al. 2016, S. 542). Demnach wird im Zuge einer Verifikation nachgewiesen, „[...] dass die festgelegten Anforderungen erfüllt wurden, unabhängig von der Sinnhaftigkeit dieser Anforderungen“. In einer Validierung hingegen „[...] muss zusätzlich sichergestellt werden, dass die richtigen Anforderungen beschrieben und dokumentiert sind und diese auch erfüllt werden bzw. überprüft werden können.“ Damit stellen sich im Rahmen der Validierung erweiterte Fragen in Hinblick auf die Frage einer Systemwirkung sowie deren Grenzen im Kontext ihres Wirkraums. In der industriellen Welt ist zusätzlich der Begriff der Absicherung in Gebrauch. Hiermit werden nach (Albers, Behrendt et al. 2016, S. 542) „alle Testaktivitäten eines Entwicklungsprojektes zusammengefasst, von der Materialerprobung bis hin zu Versuchsfahrten oder Dauerlauftests“.

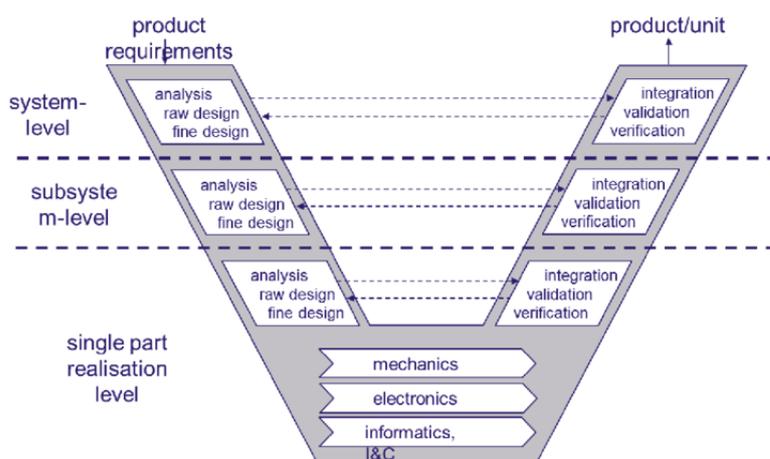


Abbildung 3: V-Modell aus (Törngren, Sellgren 2018) als systematischer Prozessablauf für die Entwicklung eines CPS

Wie bereits in Abschnitt 1.1.2 ausgeführt, besteht der Bedarf an adäquaten zielgerichteten Unterstützungsleistungen in einem Entwicklungsprozess mit den Schwerpunkten im Bereich der initialen Anforderungserhebung sowie bei der Absicherung einer Entwicklung. Eine grundlegende Problemstellung im Bereich der Absicherung von automatisierten und vernetzten Fahrfunktionen liegt darin begründet, dass die Wirkräume im unkontrollierbaren Umfeld liegen. Insbesondere für Systeme mit einem höheren Grad an Automation fehlt daher üblicherweise das Wissen von plausiblen Rahmenbedingungen für den Aufbau ausreichender Anforderungs- und Testfallkataloge. Dies umfasst insbesondere detaillierte und in sich geschlossene Modelle für individuelle Verhaltensmuster von Verkehrsteilnehmern, die deutlich tiefere Aussagen ermöglichen als in makroskopischen Modellen von Verkehrsflüssen, wie in (Helbing 1997) beschrieben und im Rahmen der klassischen Verkehrstechnik erfolgreich angewandt.

Sicherlich existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Arbeiten für die Abbildung von spezifischen Aspekten oder Artefakten von Verhaltensmustern im Verkehr. Beispiele hierfür finden sich in der umfangreich vorhandenen Literatur aus Forschungsarbeiten zu den Themen

Fahrverhaltensanalyse (Graichen 2019; Kraus 2012) und Fahrermodellierung (Hidas 2005; Jürgensohn 1997; Prokop 2001) bis hin zur Abbildung kognitiver Prozesse (Kolrep 2010). Grundlegende Verhaltensmuster lassen sich auf der Ebene ablauffähiger Modelle valide abbilden, was durch die Forschung und Entwicklung im Bereich von mikroskopischen Fahrsimulationen wie zum Beispiel von (Harding 2007; Lopez, Behrisch et al. 2018) bereits seit Längerem untermauert wird. Trotz aller Fortschritte im Bereich der Abbildung von allgemeinem verkehrlichen Geschehen erscheint es doch zumindest fragwürdig, ob die Zielstellung einer Methode für die rein simulationsgebundene Funktionsentwicklung tatsächlich zielführend ist, da diese ein unter allen Umständen valides Verhaltensmodell bei einer Fülle an unterschiedlichen internen und externen Einflussfaktoren die bedingt. Insbesondere für komplexere Automationsfunktionen entstehen immer wieder Fragen zu den resultierenden Anforderungen an die örtlich/zeitlichen Abhängigkeiten von Informationslagen:

- Wann und wo muss ein zu entwickelndes System welchen Informationsstand aufweisen, um entsprechend adäquat (re-)agieren zu können?
- Welche verkehrlichen Situationen sind im Wirkungsbereich der Funktion als relevant anzusehen und wie sind diese in das Systemdesign mit einzubeziehen?

Als methodische Antwort auf diese grundlegenden Fragen wird aktuell ein szenarienbasierter Ansatz verfolgt, welcher Werkzeuge und Methoden aus der realen und simulationsgebundenen Entwicklungswelt verknüpft.

Der Ansatzpunkt für diese methodischen Ansätze liegt in einem prinzipbedingten Dilemma begründet, welche als so genannte „Freigabefälle“ bezeichnet wird (Winner, Lenz et al. 2015). Klassische Verfahren der Funktionsabsicherung stützen sich insbesondere auf das so genannte „Freifahren“ einer Funktion. Dieses Testkonzept sieht vor, dass ein System unter realen Wirkbedingungen ohne Vorfall für so viele Kilometer bewegt werden muss, bis ein empirischer Nachweis der Sicherheit für ein definiertes minimales Restrisiko gelingt. Für Automationslösungen muss dabei ein Mehr an Aufgaben abgetestet werden, welche die Automation vom Fahrer übernimmt. Der Wirkraum einer Automationsfunktion beinhaltet allerdings mannigfaltig viele Facetten und Ausprägungsformen. Als Folge steigt die Zahl der notwendigen Kilometer Fahrleistung in immensem Maße an, so dass für das Beispiel eines Autobahnpiloten als Funktion auf SAE Level 3 eine rechnerische Größe von mindestens 6,62 Millionen Testkilometern auf Autobahnen ergeben würde. Bei Einbeziehung von weiteren Faktoren wäre die Zahl ungleich höher, eine detaillierte Herleitung hierzu findet sich in (Winner, Hakuli et al. 2015). Der Exkurs macht deutlich, dass klassische Methoden der Absicherung bei anvisierten Funktionsumfängen zukünftiger Automationslösungen an ihre Grenzen stoßen. Es gilt neue Methoden, Verfahren und Werkzeuge zu entwickeln, um dem dargelegten Problemfeld zu entgehen. Genau dieses Feld ist Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Förderprojekte wie PEGASUS (PEGASUS-Konsortium 2019), VVMethoden (TÜV Rheinland Consulting GmbH 2020b) und SetLevel4to5 (TÜV Rheinland Consulting GmbH 2020a) adressieren genau dieses Aufgabenfeld. Dabei stützt sich das Projekt PEGASUS auf den Bereich hochautomatisierter Fahrfunktionen (HAF mit SAE Level 3) am Beispiel des bereits genannten Autobahnpiloten. Die beiden anderen Projekte fokussieren auf Level 4 bis 5 Funktionen im urbanen Umfeld sowie den Aspekt der simulationsgebundenen Methodenbereiche. Ein bereits erarbeitetes Kernergebnis besteht in der so genannten PEGASUS-Gesamtmethode, wie sie in Abbildung 4 skizziert ist.

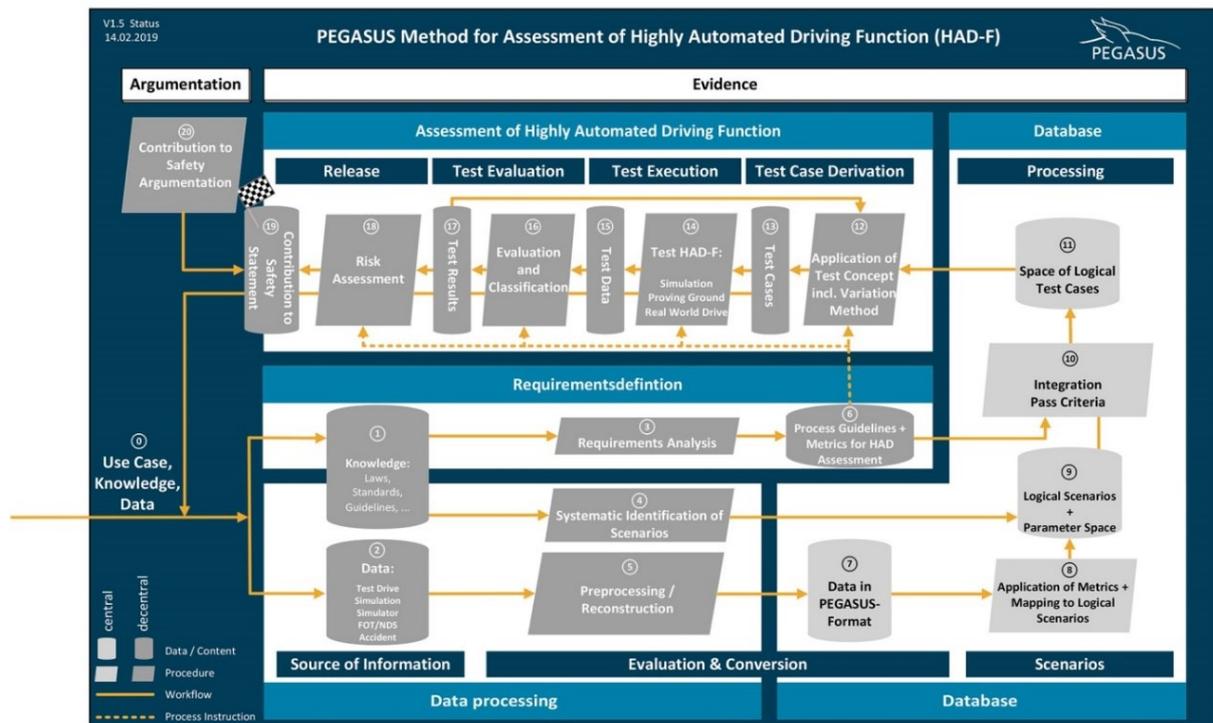


Abbildung 4: Die PEGASUS Gesamtmethode aus (PEGASUS Projektkonsortium 2020)

Sie besteht aus den fünf Grundelementen der Szenarienermittlung, Anforderungsermittlung, Speicherung und Verarbeitung von Informationen, der Bewertung der HAF sowie einem abschließenden Argumentationsschritt. Die Methode sieht vor, dass diese Prozessschritte in serieller Abfolge, ggf. mehrfach, durchlaufen werden. Eine differenzierte Darstellung der einzelnen Teilbereiche würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, es sei auf die genannten Quellen verwiesen. Vielmehr soll an dieser Stelle dargelegt werden, welche Aufgaben und Anforderungen sich im Kontext der vorliegenden Arbeit ergeben, die dann als weiterer Zielbereich formuliert werden können. Wie bereits angesprochen basiert die Methode auf einem szenariengesteuerten Ansatz. Das zentrale Element besteht in einer spezifisch ausgelegten Szenariendatenbank. Diese ist in der Lage auf Basis eines Testobjekts passende abstrakte Szenarienschreibungen, so genannte „logische Szenarien“⁶, zu identifizieren und hieraus Anforderungen an die HAF abzuleiten, die dann als Basis für einen spezifisch ausgearbeiteten Testkatalog sowie dessen Bewertungsrahmen dienen.

Ansatzpunkte für mögliche Unterstützung durch die Erhebung mikroskopischer Verkehrsdaten liegen hierbei insbesondere im Bereich der Erhebung von relevanten Datensätzen für die Ableitung und Plausibilisierung von Testfällen im Zusammenspiel mit weiteren Erhebungsmethoden zum Beispiel aus der Fahrzeugperspektive. Hierbei kommt der Methode gerade durch die Möglichkeit von Langfristerhebungen in relevanten Wirkungsbereichen einer Automationsfunktion eine erhebliche Bedeutung zu. So schafft eine Erhebungsmethode bei entsprechender technischer Ausgestaltung eine effiziente Grundlage für großvolumige und umfangreich nutzbare Datensätze für die angesprochenen Prozessschritte. Ebenso können sie auch für ein Szenario Mining eingesetzt werden, wie zum Beispiel in (Watanabe, Tobisch et al. 2019) ausgeführt. Dabei können unter anderem gezielte Corner Case Analysen durchgeführt werden. Der Begriff des Corner Case ist domänenübergreifend geprägt und bezeichnet grenzwertige Testfälle außerhalb eines Normbereichs, welche durch die kombinierte Wirkung verschiedener Faktoren, die sich zwar alle in spezifizierten Grenzen bewegen, in ihrer Kombination aber ambitionierte und schwer zu handhabende Rahmenbedingungen erwirken. Corner Cases werden üblicherweise als ausgewiesene Stützstellen von Testräumen genutzt, da gerade diese Einschränkungen der Funktionalität mit sich bringen können, die nicht direkt sichtbar erscheinen. Durch die systematische Analyse des verkehrlichen

⁶ Die Begriffswelt der verschiedenen Szenariendefinitionen wird in Abschnitt 2.1.3 tiefer erläutert.

Geschehens wird die Ausweitung der klassischerweise sensorisch geprägten Faktoren (bei optischen Verfahren zum Beispiel niedriger Sonnenstand oder Nebel) um eine systematisch ermittelte verkehrliche Komponente erweitert. Beispiele hierfür sind Verdeckungseffekte in komplexen Verkehrskonstellationen oder untypische Fahrmuster.

Ein weiterer Anwendungsfall liegt in der Validierung auf Basis realer Fahrdaten auf Testgeländen und insbesondere im realen Verkehrsgeschehen. Die Grundfrage für eine automatisierte Fahrfunktion lautet dabei: Hat das automatisierte und vernetzte Fahrzeug seinen Umgebungsverkehr vollständig (genug) erfasst und das Verkehrsgeschehen richtig interpretiert? Wiederum ist insbesondere der Gesamtblick in das relevante Fahrzeugumfeld von entscheidender Bedeutung. Ebenso kann mithilfe der erhobenen Daten eine gezielte Analyse der Rückwirkung einer automatisierten Fahrfunktion durchgeführt werden. Gegenstand der Analysen ist dabei, welche (vielleicht unerwünschten) Rückwirkungen das automatisierte Fahrzeug im Gesamtkontext eines Szenarios erzeugt.

Die diskutierten Anwendungen führen auf die zweite Zielstellung der Arbeit:

Z2: Anwendungsmöglichkeit der aufgebauten Erhebungsmethode im Kontext szenariogebundener Entwicklungsprozesse in den Bereichen Anforderungserhebung, Corner Case Analysen und Scenario Mining sowie zum Zwecke der Validierung automatisierter und vernetzter Fahrfunktionen.

1.2.3 Baustein für kooperative Fahrerassistenz und Automation

Der Ansatz der Vernetzung von Verkehrsteilnehmern hat viele verschiedene kooperativ ausgelegte Systemkonzepte (C-ITS) (Sjöberg, Andres et al. 2016) ermöglicht, deren Anzahl und Funktionsumfang stetig wächst. Abbildung 5 zeigt eine systematisierte Roadmap, die eine Evolution in Richtung eines komplett kooperativ automatisiert ausgestalteten Verkehrsgeschehens vorsieht.

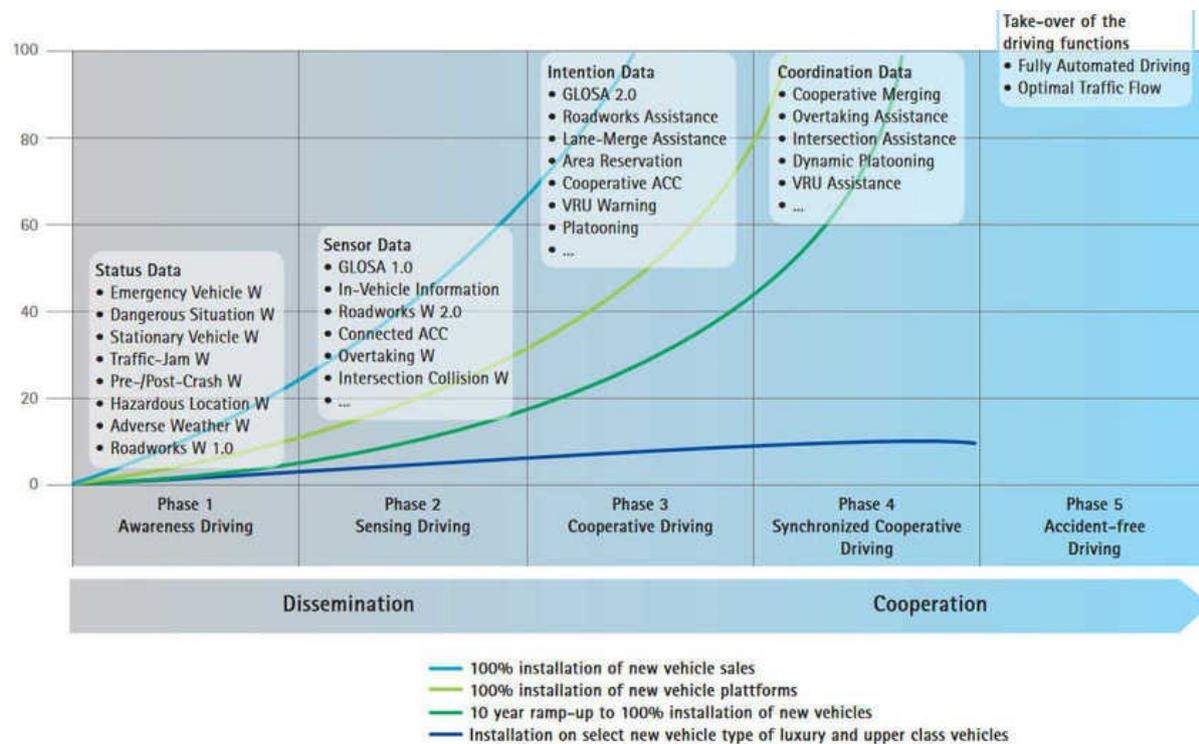


Abbildung 5: V2X Roadmap für C-ITS aus (Thiel, Makridis et al. 2017)

Die Wirksamkeit und Wirkungen solcher C-ITS basiert zumeist auf den vorhandenen Instrumentierungs- oder Ausstattungsdaten. Ein prominentes Beispiel für diese Gruppe von Funktionen ist das Green Light Optimization Speed Advisory (GLOSA), wie zum Beispiel in (Bodenheimer, Eckhoff et al. 2015) ausgeführt.

Im Bereich der Validierung prototypischer Ausgestaltungen für kooperative vernetzte Systemlösungen stellt sich allerdings ein weiteres grundlegendes Problem. Für die umfassende Evaluation eines CPS stehen neben der rein technischen Verifikation der Systemlösung auch noch weitere Aspekte im Fokus, wie die Akzeptanz in Bezug auf Nutzer und andere Verkehrsteilnehmer sowie eine grundlegende Folgenabschätzung (C-Roads Konsortium 2019). Gerade in Bezug auf Untersuchungen für die letzten beiden Aspekte entsteht dabei der Wunsch nach realistischen Rahmenbedingungen für prototypische Tests, was eine gewisse Penetrationsrate voraussetzen würde. Üblicherweise werden im Forschungs- und Entwicklungsumfeld aber nur einzelne Testträger aufgebaut, die dann unter realen Einsatzbedingungen nur eingeschränkt evaluierbar sind. Gerade die wichtige Frage, welche verkehrliche Wirkung eine vernetzte Systemlösung bei unterschiedlichen Ausstattungsgraden besitzt, wird üblicherweise im Bereich des Simulativen bearbeitet (Karoui, Freitas et al. 2019), mit den üblichen Einschränkungen und Nachteilen der simplifizierten zugrundeliegenden Modelllandschaft. Für zielgerichtetes und effizientes Testen wäre allerdings wünschenswert auch in frühen Entwicklungsstadien bereits auf Aussagen aus dem realen Wirkgeschehen rückgreifen zu können. Der Gedankengang führt auf die bereits in Abschnitt 1.1.3 geschilderte Motivation, die eine infrastrukturelle Lösung als Teil einer Ersatzlösung für die Abbildung von Fahrzeuginstrumentierungen aus dem Bereich einer intelligenten Infrastruktur sieht.

Darüber hinaus stellt sich aber auch generell die Frage, welche Aufgaben eine intelligent ausgestaltete Infrastruktur im Bereich der C-ITS zukünftig übernehmen kann und wird. Das angesprochene GLOSA-Konzept zum Beispiel sieht die Hauptaufgaben infrastruktureller Elemente in der Sicherstellung einer gezielten Kommunikation zwischen den Lichtsignalanlagen (LSA) und instrumentierten Fahrzeugen. Dabei erscheint gerade der Bereich der Umfelderkennung und Interpretation als vielversprechendes Aufgabenfeld. Die Rahmenbedingungen für eine infrastrukturell geprägte Lösung sind für viele Einsatzszenarien denen einer rein fahrzeuggestützten Vorgehensweise überlegen. So ermöglicht die infrastrukturell gestützte Erfassung des Verkehrsgeschehens die Ermittlung eines in sich bruch- und widerspruchsfreien Gesamtlagebilds aus einem übergeordneten Blickwinkel heraus. Dies kommt gerade in komplexen Szenarien wie Knotenpunkten zum Tragen, wo die Fahraufgaben hohe Anforderungen an die Fähigkeiten eines Fahrers (Alexander, Lee, Cheng, Pi-Ming et al. 2006) und die Informationsgrundlage einer Funktion im Sinne von Qualität und Zuverlässigkeit stellt (Wiltschko 2004). Diese können über singuläre fahrzeuggestützte Informationslagen oder die Zusammenführung dieser (Rauch 2016) nicht immer in ausreichender Güte und mit dem notwendigen Umfang gewährleistet werden. Gerade Konzepte zur Absicherung automatisierter Shuttledienste bedienen sich dieser Vorgehensweise (Hamburger Hochbahn AG 2021; OTS1.0-Konsortium 2018). Für die Beforschung und Entwicklung solcher Systemkonzepte sind entsprechende Werkzeuge notwendig, die einerseits die Entwicklung und Evaluation prototypischer Ausgestaltungen im sich stets entwickelnden Umfeld verschiedenster technischer Anforderungen ermöglichen. Darüber hinaus besteht Bedarf in der Schaffung einer Referenzimplementierung für die Bewertung und Qualifikation verfügbarer Sensortechnologien für ein Einsatzspektrum im Bereich intelligenter Infrastrukturlösungen für C-ITS in einem produktorientierten Anwendungsfeld, welches sich stets im Spannungsfeld zwischen Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz bewegt. Dies führt auf die Formulierung der dritten Zielstellung der vorliegenden Arbeit:

Z3: Nutzung der Erhebungsmethode zur Erfassung und Interpretation eines komplexen Verkehrsgeschehens im Rahmen prototypischer Implementierungen von C-ITS Anwendungen.

1.3 Wissenschaftlicher Beitrag

Der wissenschaftliche Beitrag der Arbeit liegt in der Bearbeitung der übergeordneten Fragestellung aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive. Der Kernaspekt liegt dabei in der Erarbeitung eines generisch angelegten Systemkonzepts für die hochgenaue Erfassung und Verarbeitung von verkehrlichen Bewegungsdaten auf Basis von Trajektorien. Das Systemkonzept führt die verschiedenen Zielstellungen aus Abschnitt 1.2 zusammen und ermöglicht den Aufbau einheitlicher und technologieunabhängiger Gestaltungsprinzipien auf systemarchitektonischer Ebene. Hieraus

werden technische Systemausprägungen als Teil der Dienstlandschaft des Testfelds AIM abgeleitet und entwickelt, welche die gestellten Anforderungen im Rahmen der Fachfragestellungen und jeweiligen Einsatzbedingungen erfüllen. Hierbei wird der aktuelle Stand von Technik und Wissenschaft in Bezug auf die anzuwendenden Methoden und Technologien aufgegriffen und einbezogen. Durch die Vorgehensweise wird sichergestellt, dass die Möglichkeit einer horizontalen und vertikalen Skalierbarkeit gewahrt ist, um verschiedene Systemausprägungen in einem gemeinsamen Konzept vereinen zu können. Außerdem soll das Konzept den Einsatz einer möglichst großen Bandbreite von technischen Detaillösungen erlauben, um die technische Systemauslegung so optimal wie möglich den jeweiligen messtechnischen Anforderungen und Gegebenheiten anpassen zu können.

Das Systemkonzept umfasst über die reine Erarbeitung der funktionalen Anteile und Eigenschaften hinaus Konzepte für eine Zusammenführung der aufgebauten Technik mit betrieblichen und datenschutzrechtlichen Rahmenbedingungen im vorwettbewerblichen Forschungsumfeld.

Die Zielsetzung der Arbeit lässt sich kompakt zusammenfassen zu

Aufbau und Ausgestaltung eines generischen Systemkonzepts für die mikroskopische Erfassung des verkehrlichen Geschehens in unterschiedlichen Anwendungsszenarien im Bereich der Modellbildung und des Testens.

Als Ergebnis der Arbeit werden erwartet:

- Die Darstellung der Bedeutung einer Objekt- und Situationserfassung aus Sicht unterschiedlicher Zielbereiche
- Ein systematisch aufgebauter Entwicklungsprozess einer Architektur für die maschinelle und automatisierte Erhebung und Verarbeitung für die Objekt- und Situationserfassung für unterschiedliche Verkehrsräume
- Die Darstellung der Prinzipien zur Verknüpfung der technischen, betrieblichen und datenschutztechnischen Aspekte im Kontext des gegebenen Wissenschaftsbetriebes
- Ein Nachweis der technischen Machbarkeit der aufgebauten Konzepte sowie der geforderten Systemeigenschaften auf Basis der Systemnutzung im intendierten Anwendungskontext

1.4 Vorgehen und Struktur

Das grundsätzliche Vorgehen in der Arbeit wird in Abbildung 6 verdeutlicht.

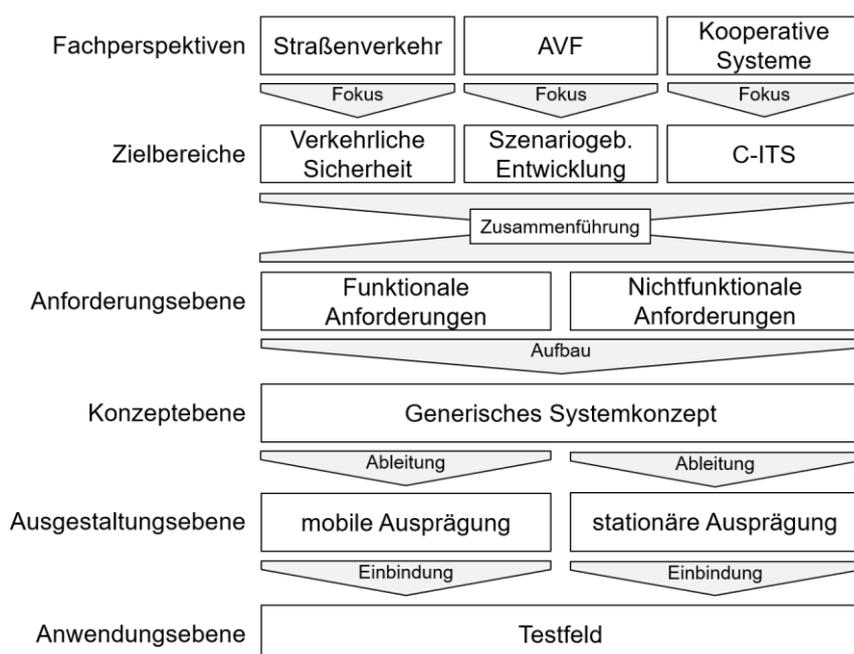


Abbildung 6: Grundlegendes Vorgehen im Rahmen der Arbeit

Im vorliegenden Kapitel erfolgte eine Einleitung in die wissenschaftliche Problemstellung mit dem Fokus auf drei Zielsetzungen in den Bereichen der verkehrlichen Sicherheit, der szenariogebundenen Entwicklung des automatisierten und vernetzten Fahrens sowie dem Bereich von C-ITS-Lösungen. Die übergreifende Fragestellung, Zielsetzung und der wissenschaftliche Beitrag der Arbeit wurden entsprechend formuliert. In Kapitel 2 erfolgt eine Übersicht über die Grundlagen, die sich in fachbezogene Definitionen und eine Einführung in die Grundlagen der Sensordatenverarbeitung in verteilten Systemen, der Situationsinterpretation verkehrlicher Szenarien in Bezug auf Kritikalität sowie des Datenschutzes gliedert. Kapitel 3 nimmt die in Abschnitt 1.1 und 1.2 genannten Arbeitsfelder und Anwendungsfälle auf und überführt diese mit den Ableitungen aus dem zweiten Kapitel zusammen in grundlegende Anforderungen, die dann handlungsleitend für den Rest der Arbeit wirken. In Kapitel 4 wird eine Übersicht über verwandte Arbeiten in dem maßgeblichen Themengebiet erarbeitet und diskutiert. Ausgehend von der zusammenfassenden Darstellung wird eine Ableitung des identifizierten Handlungsbedarfs im Rahmen der Arbeit vorgenommen. In Kapitel 5 erfolgt die systematisierte Herleitung einer systemarchitektonischen Lösung für die vorliegende Aufgabenstellung. Diese erfolgt auf den maßgeblichen Ebenen des Systementwurfs, ausgehend vom generischen Gesamtaufbau bis hin zu den unterstützten Kernszenarien. Die physische Umsetzungsebene mit den Eckpunkten der technischen Ausgestaltung erfolgt in Kapitel 6, ebenso wie die Evaluation der Erhebungsmethode mit ihren grundlegenden Systemeigenschaften. Aufgegriffen werden dabei relevante Aspekte der Verifikation und Testmethodik sowie eine Wiedergabe von Anwendungsbeispielen aus dem Testfeldeinsatz für eine Systemvalidierung im aufgespannten Aufgabenfeld. Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der vorherigen Abschnitte zusammen und gibt einen Ausblick auf aktuelle, geplante und zukünftige Schritte der Weiterentwicklung.

2 Grundlagen, Stand der Technik und Datenschutz

Bevor die Anforderungen an das in dieser Arbeit verfolgte Systemkonzept herausarbeitet werden, sollen relevante fachliche Grundlagen, der aktuelle Stand der Technik sowie maßgebliche Rahmenbedingungen des Datenschutzes beleuchtet werden.

Die folgenden Abschnitte beginnen hierfür mit einer Einführung in die verwendete Fachterminologie für den Bereich der messtechnischen Objekt- und Situationserfassung im verkehrlichen Kontext. Etablierte Technologien und Methoden werden dargestellt und mit ihren Vorzügen und Nachteilen diskutiert. Ein Überblick über die Methodenlandschaft zur Modellierung von verkehrlichem Geschehen mit Fokus auf die Abbildung von Kritikalität wird gegeben. Daran schließt sich ein Abschnitt an, welcher einen kompakten Einblick in den Bereich der verteilten Systemkonzepte und Echtzeitdatenverarbeitung gibt. Danach erfolgt ein Überblick über Definitionen und Grundlagen aus dem Bereich der datenschutzrechtlichen Welt.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet ein Abschnitt, welcher den präsentierten Wissensstand zusammenfasst und grundlegende Ableitungen für die weiteren Bearbeitungsschritte ermöglicht.

2.1 Begriffsdefinitionen in der Objekt- und Situationserfassung

Die grundlegende Aufgabe der Objekterfassung im gegebenen Kontext kann beschrieben werden als Detektion und messtechnische Verfolgung von beweglichen dreidimensionalen Objekten im Verkehrsraum. Darauf aufbauend erfolgt die Modellierung von situationsspezifischen Aspekten. Beide Aufgaben müssen auf der Basis einer solide definierten Begriffswelt durchgeführt werden. Hierfür dienen die folgenden Abschnitte.

2.1.1 Sensor und Sensorsystem

Während der Begriff des Sensors in den Ingenieurwissenschaften allgegenwärtig erscheint, gibt es in der Literatur erstaunlich viele voneinander abweichende Definitionen. Nach (Hesse, Schnell 2012, S. 411) definiert sich ein Sensor als ein „[...] informationsgewinnendes Element gesteuerter technischer Systeme, das eine physikalische Größe auf der Grundlage eines physikalischen Effekts oder eine chemische Verbindung erfasst, in der Regel elektrisch abbildet und oft auch noch eine Messgrößenumwandlung durchführt.“ Die Definition führt viele Aspekte der messtechnischen Begriffswelt zusammen, weshalb sie an dieser Stelle genutzt werden soll.

Neben dem Begriff des Sensors wird in dieser Arbeit der Begriff Sensorsystem gebraucht. Auch dieser ist nur bedingt scharf definiert und gegenüber anderen abgegrenzt. In Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass Sensorsysteme neben einem oder mehreren Sensoren zusätzlich über eine integrierte Verarbeitungslogik auf Basis elektronischer Komponenten verfügt, die eine Vorverarbeitung der Messgrößenerfassung sowie eine Anbindung über definierte Schnittstellen auf allen relevanten Ebenen eines informationsverarbeitenden Systems ermöglichen. Solche Sensorsysteme bilden die übliche Grundlage für die technische Ausgestaltung von komplexen mechatronischen Systemen aller Art.

2.1.2 Merkmale, Objekthypothesen, Tracks und Trajektorien

In den späteren Ausführungen über Fusionsprinzipien werden mehrere Ausdrücke verwendet, die im Rahmen der Arbeit teils umfangreiche Verwendung finden. Deshalb soll an dieser Stelle eine gebündelte Definition der fachlichen Termini mit einer Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge erfolgen.

Der Begriff Beobachtung benennt eine aus Sensorrohdaten extrahierte einmalige Messung zu einem physischen Objekt. Im Allgemeinen umfasst eine Beobachtung lediglich einen bestimmten veränderlichen Anteil des tatsächlichen Objekts (zum Beispiel eine sichtbare Objektkontur, die sich je nach Blickwinkel oder Grad der Verdeckung ändert). Im Rahmen einer Sensordatenverarbeitung

werden diese Beobachtungen in Form von Merkmalen abgebildet (in der Literatur findet sich häufig der englischsprachige Begriff *Feature*). Ein Merkmal entspricht nach (Bishop 2013) einer individuell messbaren Eigenschaft oder Charakteristik eines beobachteten Phänomens.

Beobachtungen können in Objekthypothesen zusammengeführt werden, also potentielle Objekte, die durch das System im weiteren Verarbeitungsprozess geprüft und mit dem vorhandenen Informationsstand abgeglichen werden. Diese Objekthypothesen werden hierfür über die Zeit verfolgt. Dieser Vorgang wird als *Tracking* bezeichnet. Das *Tracking* ermöglicht dabei die Zuordnung eines eindeutigen Identifikators zu den Objekthypothesen. So umfasst ein *Track* Informationen über den Aufenthaltsort, Pose und weitere kinematische Attribute eines Objekts wie Geschwindigkeit und Beschleunigung. Das Verfahren schließt dabei die Möglichkeiten einer Initialisierung oder des Verwerfens eines *Tracks* ein. Für das *Tracking* werden dabei Zustandsschätzer wie spezifische Formen des weit verbreiteten Kalman-Filter (Kálmán, Rudolf E. 1960) benutzt, welches die Modelleigenschaften in Form von Bewegungsgleichungen enthält. Der Zustandsschätzer ermöglicht die Plausibilisierung von Objekthypothesen unter einer optimalen Minimierung des Einflusses von fehlerbehafteten Einzelmessungen sowie die Entkopplung der messtechnisch bedingten Abtastraten von der gewählten Frequenz der modellbasierten Ausgabe. Ein *Track* wird üblicherweise klassifiziert, also einer ausgewiesenen Klasse von Objekten zugewiesen, die sich aus einer abgeschlossenen Grundmenge ergibt. Im Verkehrsbereich sind dies üblicherweise Typen von Verkehrsteilnehmern wie PKW, LKW, Fußgänger oder Radfahrer.

Der Verlauf eines Objekts (und damit auch eines *Tracks*) über Raum und Zeit hinweg wiederum wird als Bewegungsbahn oder *Trajektorie* bezeichnet. Die Grunddefinition dieses Begriffs sieht lediglich vor, dass einem gegebenen Zeitstempel jeweils genau eine Raumposition zugewiesen wird und damit Eindeutigkeit sichergestellt wird (Liebig 2013). Diese sehr weit gefasste Begriffsdefinition geht in den unterschiedlichen Anwendungsgebieten mit impliziten Anforderungen einher. Im Bereich des vorliegenden Kontextes lassen sich diese am Bereich der Fahrzeugführung ausrichten. Abbildung 7 zeigt ein Mehrstufen- und Mehrebenenmodell, wie es in (Löper 2019) Verwendung findet.

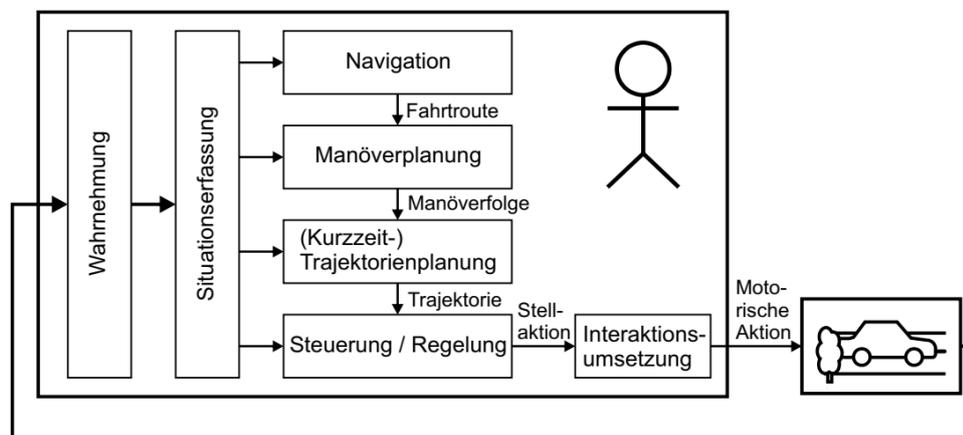


Abbildung 7: Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe aus (Löper 2019)

Das Modell beschreibt unterschiedliche Aufgabenebenen im Bereich Fahrzeugführung, die parallel und in unterschiedlicher Frequenz über die Zeit zu bewältigen sind. Dabei wird der Begriff der *Trajektorie* als Regelgröße für die Umsetzung einer *Manöverfolge* auf fahrtaktischer Ebene eingeordnet, welche dann in die Umsetzung gebracht wird. In Bezug auf die vorliegende Arbeit lässt sich der Zusammenhang umgekehrt deuten. So soll die Erhebung von *Trajektorien* die Analyse einer *Interaktionsumsetzung* erlauben, um somit Rückschlüsse bis auf die taktische Ebene der zugrundeliegenden *Manöverplanung* zu erlangen. Dies bedingt die hohen Anforderungen an die zeitliche Auflösung sowie der Genauigkeit der erzielten Messungen. Eine weit verbreitete Repräsentationsformen für *Trajektorien* besteht in der Nutzung von *Positionsketten* über die Zeit, also einer Form von diskretisierten Messpunkten. Kategoriale Modellierungsebenen (wie in (Verband

der Automobilindustrie 2014)) unter Nutzung höherwertiger Primitive oder funktionale Zusammenhänge finden erst in den weiteren Analyseebenen von Szenarien Verwendung. Die Einbindung korrespondierender Zustandsgrößen wie zum Beispiel kinematische Angaben werden durch Erweiterung der Positionsangaben zu einem Zustandsvektor erreicht. Diese erweiterte Definition wird auch in dieser Arbeit verwendet und im weiteren Verlauf des Textes vorausgesetzt.

2.1.3 Szene, Situation und Szenario

Die Begrifflichkeiten Szene, Situation und Szenario werden ebenfalls häufig unscharf verwendet. Es lohnt sich auch hier etablierte Definitionen einzuführen, die im weiteren Verlauf der Arbeit Verwendung finden.

In (Ulbrich, Menzel et al. 2015, Abschnitt 2) findet eine Differenzierung der Begriffe Szene und Situation statt, auf die sich weitere Arbeiten wie (Pekezou Fouopi 2020) stützen. Darin wird eine Szene definiert als „[...] eine Momentaufnahme des Umfelds, welche die Szenerie, dynamische Elemente, die Selbstrepräsentation aller Akteure und Beobachter wie auch die Verknüpfung dieser Entitäten umfasst.“ Es wird darauf hingewiesen, dass diese in der realen Welt stets „unvollständig, fehlerbehaftet, unsicherheitsbehaftet und aus der Perspektive eines oder mehrerer Beobachter (subjektive Szene)“ sei. Einzig Szenenrepräsentationen in einer simulierten Welt können demnach allumfassend sein und führen auf die synonym gebrauchten Begriffe einer objektiven Szene und Ground Truth.

Dem gegenüber wird in (Ulbrich, Menzel et al. 2015, Abschnitt 4) der Begriff der Situation gestellt. Diese „[...] umschreibt die Gesamtheit der Umstände, die für die Auswahl geeigneter Verhaltensmuster zu einem bestimmten Zeitpunkt zu berücksichtigen sind. Sie umfasst alle relevanten Bedingungen, Möglichkeiten und Determinanten von Handlungen.“ Eine Situation wird aus der Szene „[...] durch einen Prozess der Informationsauswahl und -augmentierung abgeleitet, basierend auf transienten (z. B. missionspezifischen) wie auch permanenten Zielen und Werten. Folglich ist eine Situation immer subjektiv, indem sie die Sicht eines Elements repräsentiert.“ Die ausgeführte Begriffswelt wird in einem anschaulichen Diagramm visualisiert, welches in Abbildung 8 zu sehen ist.

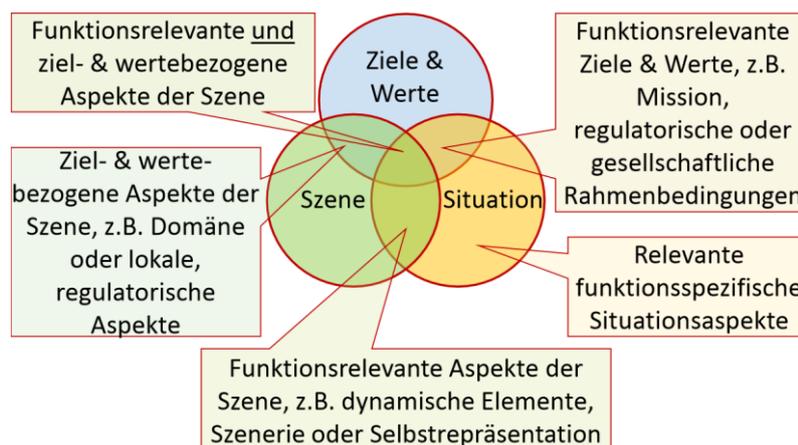


Abbildung 8: Die Zusammenhänge zwischen den Szenen, Situationen sowie Zielen und Werten aus (Ulbrich, Menzel et al. 2015)

Auch für den Begriff des Szenarios geben die Autoren eine Definition (Ulbrich, Menzel et al. 2015, Abschnitt 6): „Ein Szenario beschreibt die zeitliche Entwicklung von Szenenelementen innerhalb einer Folge von Szenen, welche mit einer Startszene beginnt. Aktionen und Ereignisse ebenso wie Ziele und Werte können spezifiziert werden, um diese zeitliche Entwicklung in einem Szenario festzulegen. Im Gegensatz zu Szenen decken Szenarien eine gewisse Zeitspanne ab.“ Ein Szenario verknüpft demnach Szenen durch Aktionen und Ereignisse, wie in Abbildung 9 grafisch

dargestellt. Diese Aktionen und Ereignisse werden üblicherweise in der Form von klassifizierten Manövern beschrieben, wie „Fahrstreifen folgen“, „Annäherung“ oder „Fahrzeug folgen“.

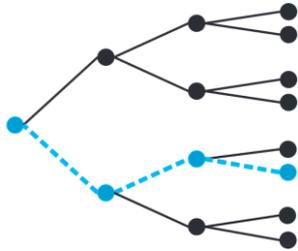


Abbildung 9: Ein Szenario (blau gestrichelt) als zeitliche Abfolge von Aktionen/Ereignissen (Kanten) und Szenen (Knoten) aus (Ulbrich, Menzel et al. 2015)

Im Kontext des Projekts PEGASUS wurden weitere Begriffe für die tiefere Differenzierung eines Szenarios erarbeitet. Gemäß (Bagschik, Menzel et al. 2017) unterteilt sich dabei in die Begriffswelt in funktionale, logische und konkrete Szenarien. Diese unterscheiden sich maßgeblich in Form und Abstraktionsgrad. Funktionale Szenarien stellen demnach „[...]“ Betriebsszenarien des Entwicklungsgegenstands auf semantischer Ebene dar. Die Entitäten und Beziehungen zwischen den Entitäten der Anwendungsdomäne werden in sprachlich gefassten Szenarien ausgedrückt. Die Szenarien sind widerspruchsfrei. Das Vokabular der funktionalen Szenarien ist spezifisch für den Anwendungsfall und die -domäne und kann unterschiedliche Detailgrade aufweisen.“ Daneben definiert sich ein logisches Szenario folgendermaßen: „Logische Szenarien stellen Betriebsszenarien durch Entitäten und Beziehungen dieser Entitäten mithilfe von Parameterbereichen im Zustandsraum dar. Für die einzelnen Parameterbereiche können optional statistische Verteilungen angegeben werden. Zusätzlich können optional die Beziehungen der Parameterbereiche zueinander mithilfe von Korrelationen oder numerischen Bedingungen modelliert werden. Logische Szenarien enthalten eine formale Beschreibung von Szenarien.“ Als letzten Begriff werden konkrete Szenarien definiert. Sie „[...]“ stellen Betriebsszenarien eindeutig durch Entitäten und Beziehungen dieser Entitäten mithilfe von festen Werten im Zustandsraum dar.“ Zur Erläuterung zeigt ein Beispiel für die Beschreibung des Szenarios „Auffahren auf Stauende“ auf den jeweiligen drei genannten Ebenen dar.

Funktionale Szenarien	Logische Szenarien	Konkrete Szenarien
Basisstrecke: 3-streifige Autobahn in Kurve; Geschwindigkeitsbegrenzung durch statisches Verkehrszeichen	Basisstrecke: Breite Fahrstreifen [2,3..3,5] m Kurvenradius [0,6..0,9] km Pos_Verkehrszeichen [0..200] m	Basisstrecke: Breite Fahrstreifen [3,2] m Kurvenradius [0,7] km Pos_Verkehrszeichen [150] m
Stationäre Objekte: -	Stationäre Objekte: -	Stationäre Objekte: -
Bewegliche Objekte: Ego, Stau; Interaktion: Ego in Manöver „Annähern“ auf mittleren Fahrstreifen, Stau zähfließend	Bewegliche Objekte: Stauende_Pos [10..200] m Stau_Geschw. [0..30] km/h Ego_Abstand [50..300] m Ego_Geschw. [80..130] km/h	Bewegliche Objekte: Stauende_Pos 40 m Stau_Geschw. 30 km/h Ego_Abstand 200 m Ego_Geschw. 100 km/h
Umwelt: Sommer, Regen	Umwelt: Temperatur [10..40] °C Tröpfchengröße [20..100] µm	Umwelt: Temperatur 20 °C Tröpfchengröße 30 µm

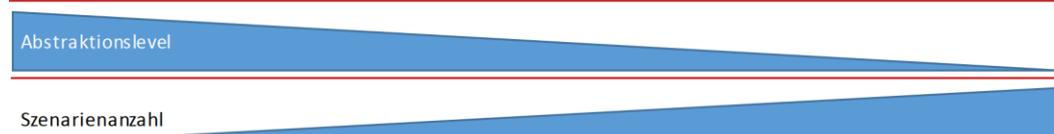


Abbildung 10: Abstraktionsebenen am Beispiel des Szenarios "Auffahren auf Stauende" aus (Bagschik, Menzel et al. 2017)

Wie in den vorangegangenen Definitionen erfolgt die Attributierung der Szenarien über relevante Aussagen zur Basisstrecke (inkl. Reglementierung), stationäre und dynamische Objekte sowie weitere relevante Umweltfaktoren wie maßgebliche Witterungsbedingungen. Während die Begriffsdefinitionen selbst schlüssig ausgeführt werden, erscheint die Wahl der Begrifflichkeiten etwas sperrig. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit zwar die Definitionswelt übernommen, die Bezeichnungen allerdings in Richtung generischer und etablierter Begriffe angepasst. Unter Bezugnahme auf das weit verbreitete Paradigma der objektorientierten Programmierung erscheint eine Nutzung der Begriffe Szenarienkategorie als Ersatz für das Logische Szenario sowie Szenarienzustand für ein konkretes Szenario zielführend und wird den weiteren Ausführungen zugrunde gelegt. Vermutlich würde sich passend dazu der Begriff der Templates für die Ebene eines funktionalen Szenarios anbieten. Das wird allerdings im Rahmen der Arbeit nicht weiterverfolgt.

2.2 Technologien und Methoden für die Objekterfassung

Wie aus dem vorigen Abschnitt ersichtlich wird, bestehen Szene und Szenarienbeschreibungen unter anderem aus dynamischen Objekten. Diese stellen die im Rahmen dieser Arbeit wichtigste Form der Artefakte dar. Der folgende Abschnitt führt in die verschiedenen gebräuchlichen Technologien und Methoden ein, die im Bereich der Objekterfassung Anwendung finden. Ausgehend von einem Überblick über etablierte Formen von Sensortechnologien erfolgt dafür eine Diskussion verschiedener Formen der Sensordatenfusion. Der Abschnitt schließt sich ein Exkurs zu superpixelbasierten Ansätzen an. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet ein Fazit mit Ableitungen für die vorliegende Arbeit.

2.2.1 Sensortechnologien für die Erfassung von Verkehrsteilnehmern

Im Bereich der verkehrlichen Anwendungen werden viele verschiedene Sensorsysteme basierend auf ganz unterschiedlichen Technologien genutzt. Das Spektrum reicht hier von etablierten Systemen im Bereich der Verkehrstelematik und -leittechnik über Systeme zur Geschwindigkeitsmessung und Rotlichtverstößen bis in den bereits angerissenen Bereich der Fahrzeugintelligenz.

Dabei erscheinen im Rahmen dieser Arbeit insbesondere die Verfahren relevant, die sich im Bereich der Erfassung des verkehrlichen Umfelds und hier insbesondere zur Erfassung von Verkehrsteilnehmern etabliert haben. Eine umfangreiche Übersicht über etablierte messtechnische Verfahren gibt (Winner, Hakuli et al. 2009), wo mit Ultraschall, Radar, Lidar, Bildverarbeitung und 3D-Imaging die gebräuchlichsten Verfahren eingeschlossen werden. Dort wird auch eine umfangreiche und systematisierte Form der Darstellung über die jeweiligen Vor- und Nachteile gegeben sowie Beispiele für Sensorsysteme auf dem Markt dargestellt. Es soll an dieser Stelle auf die vielfach in der Fachwelt genutzte Darstellung einer tabellarischen Zusammenfassung mit generellen Aussagen zu den jeweiligen Systemgrenzen und Eigenschaften (wie zum Beispiel in (Wisselmann, Gresser et al. 2004)) verzichtet werden. Gründe liegen zum einen im rasanten Fortschritt der Entwicklung auf dem Gebiet der Sensortechnik und insbesondere deren Verarbeitungsalgorithmik, die eine nachhaltige Bewertung des Leistungsstands aktueller Sensorik kaum ermöglicht, was aber der Anspruch an eine solche Aufstellung sein müsste. Darüber hinaus würde es zu kurz greifen die Anwendbarkeit eines Sensorprinzips lediglich anhand der sensorischen Grundeigenschaften festzumachen, da allein die Bandbreite verschiedener Ausgestaltungsformen eine pauschalisierte Aussage unmöglich macht. An dieser Stelle sei allerdings festgehalten, dass es nicht „den einen“ Sensor gibt, der sich für alle Formen der Anwendungen aufdrängt. Alle genutzten Prinzipien weisen Systemgrenzen sowie bekannte Vor- und Nachteile auf (Winner, Hakuli et al. 2009). In Kapitel 6 werden entsprechende eigene Erfahrungen aus dem Rahmen dieser Arbeit verdeutlicht und anhand von Beispielen erläutert.

Die Nutzung einer vorherbestimmten Sensortechnologie als Ausgangspunkt eines Systemdesigns greift in Bezug auf die vorliegende Aufgabenstellung zu kurz. Vielmehr gilt es für eine definierte Aufgabenstellung eine optimale Kombination von eingesetzter Sensorik, von

Verarbeitungsverfahren sowie der eigentlichen Funktionsausgestaltung zu finden, so dass die vorgegebenen Anforderungen möglichst kosten- und aufwandseffizient erfüllt werden. Dieser Gedanke führt u.a. auf den Begriff der Sensordatenfusion, der in Abschnitt 2.2.2 aufgegriffen und tiefer erläutert wird.

2.2.2 Sensordatenfusion

Die gezielte Zusammenführung von sensorbasierten Daten in einem System wird Sensordatenfusion genannt. In der Literatur (zum Beispiel in (Brooks, Iyengar 1998)) werden verschiedene Fusionsparadigmen differenziert, die eine grundlegende Systematisierung der Ansätze mit der Herausstellung der jeweils intendierten Vorteilen ermöglicht:

- Komplementäre Fusion: die Sensoren sind nicht direkt voneinander abhängig, liefern aber zusammen genommen eine komplettere Beschreibung des zu beobachtenden Messbereichs.
- Unabhängige Fusion: Entspricht einer komplementären Fusion ohne Nutzung oder Definition von Querverweisen zwischen den Daten
- Kooperative Fusion: Verknüpfung von Sensordaten zur Erweiterung der erfassten Informationen um einen Aspekt, der auf Basis der Einzelsensoren nicht messbar ist
- Konkurrierende Fusion: Einsatz redundanter Sensorik zur Verbesserung der Aussagengüte und zur Vermeidung von Fehlmessungen
- Hybride Fusion: als Zusammenführung mehrerer der genannten Formen

Dabei hat sich in der Literatur eine Vielzahl verschiedener Fusionsarchitekturen entwickelt. Diese können nach (Liggins, Chong et al. 1997) zusammenfassend in drei grundlegende Formen differenziert werden: es werden zentrale, hierarchische und dezentrale Architekturen unterschieden. Abbildung 11 gibt diese schematisch wieder.

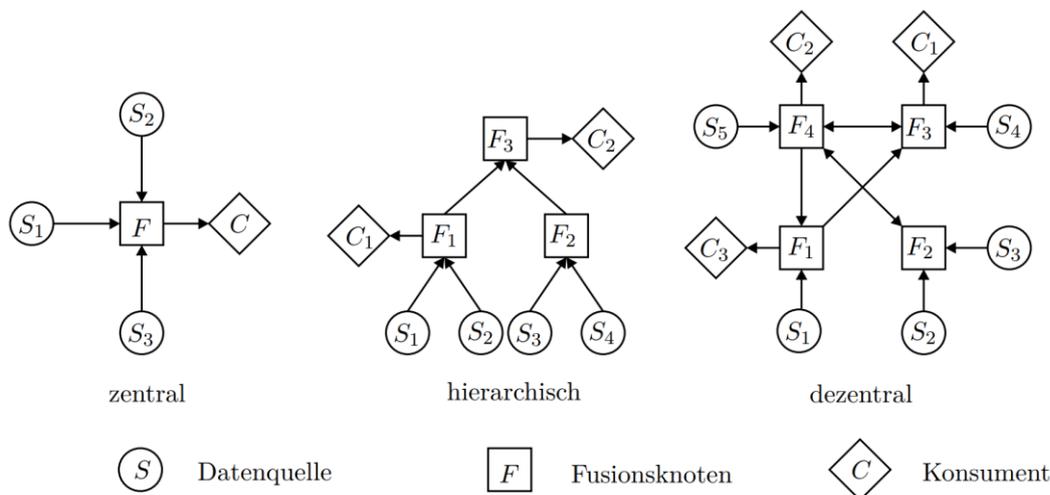


Abbildung 11: Fusionsarchitekturformen nach (Liggins, Chong et al. 1997) aus (Haberjahn 2013)

Zu erkennen ist, dass eine zentrale Architektur alle Datenquellen an einen Punkt im System zusammenführt. Die Verarbeitungsflüsse von hierarchischen Konzepten besitzen Fusionsknoten an verschiedenen Punkten, die in kaskadierten Strukturen zusammengeführt werden. Dezentrale Strukturen verallgemeinern das Verteilungsprinzip und machen Rückführungsschleifen im System sowie mehrere Konsumenten für verschiedene Fusionsergebnisse möglich. In (Haberjahn 2013) werden grundlegende Vor- und Nachteile der Architekturen zusammengeführt. Die zentrale Fusion an einem Knoten stellt demnach „[...] theoretisch die optimale Form der Datenfusion dar, da alle verfügbaren Daten in einem Schritt zusammengeführt werden.“ Grundlage hierfür sei, dass alle Daten in einem gemeinsamen Format vorliegen. Allerdings betont der Autor, dass der Ansatz

bestimmte Problemfelder in den Bereichen der Kommunikation, Inflexibilität, Verwundbarkeit und Nicht-Modularität mit sich bringen kann.

In (Catalá Prat 2010) erfolgt eine Klassifikation von Fusionsprinzipien nach Abstraktionsebenen in Anlehnung an das JDL Data Fusion Model II (Llinas, Bowman et al. 2004). Maßgeblich ist hierbei, auf welcher Ebene der Verarbeitung, wie sie im vergangenen Abschnitt eingeführt wurden, die eigentliche Zusammenführung der Daten ausgeführt wird. Abbildung 12 stellt diese wiederum schematisch dar.

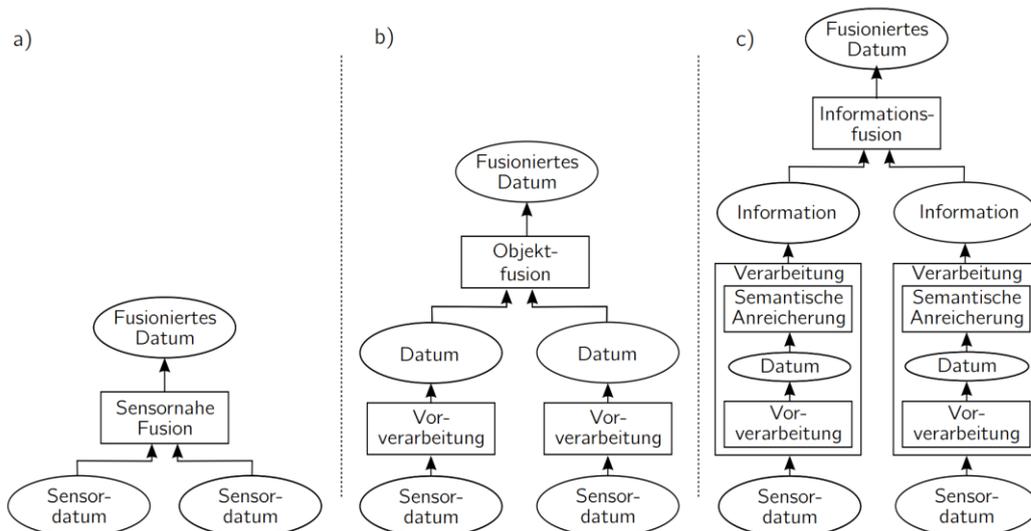


Abbildung 12: Abstraktionsebene der Fusion. a) sensornah, b) Objektfusion, c) Informationsfusion aus (Catalá Prat 2010)

Der Autor unterteilt hier in drei prinzipielle Formen: sensornah Fusion, Objektfusion sowie Informationsfusion. In der weiteren Literatur lässt sich für die zweite Ebene noch die Differenzierung in Feature Level Fusion (Hall, Llinas 1997) (auf Merkmalsebene) und Track Fusion (Chong, Mori et al. 2000) (auf Objektebene) finden. In (Catalá Prat 2010) werden grundlegende Eigenschaften, die sich mit den jeweiligen Formen verbinden, herausgestellt. Vorteile einer möglichst tief angelegten Fusionsebene werden vor allem in einer vergleichsweise hohen Leistungsfähigkeit der Lösung gesehen. Für eine hohe Ebene spricht eine höhere Zuverlässigkeit der Lösung sowie besserer Erweiterbarkeit und Austauschbarkeit der Komponenten.

2.2.3 Superpixel-Ansätze

Gerade der Anspruch eines generisch angelegten Ansatzes für die Fusion unterschiedlicher Sensortechnologien stellt hohe Ansprüche an die genutzten Verfahren. Gründe dafür sind unter anderem, dass die verwendeten Sensorsysteme Daten auf Basis ganz unterschiedlicher Modelle liefern, wie beispielsweise Kamerabilder, relativ zum Sensor verortete Objektlisten aus einem Radarsystem oder Punktwolken aus einem Mehrzeilen-Laserscanner. Dezentral angelegte Fusionsysteme erscheinen auf den ersten Blick zwar als Mittel der Wahl, nur führen diese zumeist auf hochspezialisierte Lösungen, die sich wiederum schwer generalisieren lassen. Setzt man folglich einen zentralen Ansatz voraus, besteht eine grundlegende Problemstellung hierbei in der adäquaten Auswahl eines gemeinsamen Modells sowie deren Ebene als gemeinsame Repräsentationsschicht zur Beschreibung der dreidimensionalen Welt mit allen relevanten Artefakten.

Insbesondere die in den letzten Jahren fortschreitende Nutzung von optischen Systemen hat zu Entwicklungen im Bereich so genannter Superpixelansätze geführt, die einen vielversprechenden Ansatzpunkt liefern. Der Begriff Superpixel als Segmentationsansatz ist unter anderem im Bereich der Bildverarbeitung bekannt (Achanta, Shaji et al. 2012). Er bezeichnet die Gruppierung von Bildpunkten (Pixeln) in sinnvoll angelegte atomare Bereiche, die als Ersatz für die Pixelgitterstrukturen eines Bildes verwendet werden können. Die Segmente bieten damit ein praktisches Grund-

element für die Berechnung von Bildmerkmalen und reduzieren die Komplexität nachfolgender Bildverarbeitungsaufgaben erheblich durch die Zusammenführung redundanter Informationen. Nach (Neubert 2015) gibt es viele verschiedene Ausgestaltungsformen für diesen Modellierungsansatz je nach Anwendungsfeld. Neben der Nutzung im Bereich der semantischen Segmentation erscheinen im Rahmen dieser Arbeit insbesondere Verfahren im Bereich der 3D-Rekonstruktion (Hoiem, Efros et al. 2005) und Objektdetektion (Wang, Lu et al. 2011) als relevant.

Ein im automotiven Kontext bekannter Ansatz ist der so genannte Stixelansatz (Pfeiffer 2012), wie er in Abbildung 13 als annotierte Fahrscene dargestellt ist. Stixel repräsentieren jeweils einen bestimmten Teil eines Objektes im 3D-Raum. Dabei werden Stixel speziell für die Repräsentation dynamischer Fahrzeugumgebungen verwendet.



Abbildung 13: Mit Stixeln annotiertes Kamerabild einer Fahrscene aus (Badino, Franke et al. 2009)

Sie stellen sich im Bild als planare Säulen dar, die die sichtbaren Konturen von Verkehrsteilnehmern abbilden und neben einer Position im Raum weitere Attribute wie eine Höhe zugewiesen bekommen.

Zusammenfassend lässt sich aus der Literatur ableiten, dass Superpixelansätze ein hohes Potential bei der performanten Bewältigung der entsprechenden fachlichen Aufgabenstellungen bieten.

2.3 Verteilte Systemkonzepte

Die Ausführung komplexer und ressourcenintensiver maschineller Prozesse stellt Entwickler seit jeher vor die Frage in welcher grundlegenden Architektur sie ihre Systeme aufbauen wollen. Dabei haben sich verteilte Systemkonzepte als Standard entwickelt, wobei sich die Entwicklung von statischen lokalen IT-Netzen hin in die Richtung Ultra-Large-Scale Systeme komplexer kaskadierter und verschachtelter Funktionalitäten mit Begriffen wie Cloud Computing und Mobile Agents entwickelt hat (Linnert 2015). Der vorliegende Abschnitt soll einen gebündelten Einblick in die Welt der verteilten Systemkonzepte geben sowie die grundlegenden Charakteristika erläutern und diskutieren.

Verteilte Systemkonzepte sind bereits seit vielen Jahrzehnten etabliert und in Gebrauch. In der Literatur finden sich viele Definitionen nebeneinander. Nach (Enslow 1978) definiert sich ein verteiltes System als ein Datenverarbeitungssystem, bei dem Daten und/oder Funktionskomponenten eines Programmsystems auf mehrere, zu einem Netz zusammengeschlossene Rechner verteilt sind. Das vermutlich bekannteste System stellt das weltweite Internet dar, welches das öffentliche und private Leben seit den Neunzehnhundertneunziger Jahren stark geprägt hat. Daneben sind verteilte Systemkonzepte heutzutage in nahezu allen Bereichen technologischer Anwendungen zu finden, sei es in eingebetteten Systemen, E/E-Architekturen moderner Fahrzeuge oder den in Abschnitt 1.1.2 dargestellten Ansätze für AVF.

In verteilten Systemen erfolgt Kommunikation üblicherweise über Prozesse, welche die dahinterliegenden Entitäten abstrahieren und Informationen in Form von Nachrichten austauschen. Die Prozesse sind dabei in einer Client-Server-Struktur oder Peer-to-peer organisiert (wo alle Prozesse sowohl Client- als auch Serveraufgaben übernehmen). Für die Interprozesskommunikation (IPC) selbst gibt es wiederum unterschiedliche Organisationsformen. So kann diese zum Beispiel über Broad- oder Multicast-Verfahren erfolgen, bei denen eine Nachricht an alle oder eine bestimmte Gruppe von Empfängern gesendet wird. Ein weiteres Verfahren nennt sich Event-Based-Communication oder auch Publish-Subscribe genannt. Hier werden durch einen Sender Events veröffentlicht, auf die sich ein Empfänger abonnieren kann. Der damit aufgebaute Filtermechanismus führt üblicherweise zu einer guten Skalierbarkeit und besseren Effizienz. Shared-Memory Konzepte ermöglichen die gemeinsame Nutzung von einem bestimmten Teil des verfügbaren Speichers und erlauben somit den Austausch von Informationen auf der gleichen Hardware, ohne dass hierfür tatsächlich eine Übertragung stattfinden muss, was die Effizienz und damit das Laufzeitverhalten weiter positiv beeinflusst.

2.3.1 Der Begriff der Echtzeitverarbeitung

Der Begriff des Laufzeitverhaltens führt wiederum auf den Begriff der Echtzeitverarbeitung. In der Literatur werden hier verschiedene Ausgestaltungsformen unterschieden. Grundlage für diese ist das jeweils genutzte Interaktionskonzept sowie das Ausführverhalten von Prozessen.

Eine synchrone Auslegung der IPC zusammen mit einem entsprechend ausgelegten Prozess-Scheduler erfüllt die Anforderungen für harte Echtzeitbedingungen. Hierbei wird die Antwort eines Prozesses stets innerhalb einer vorgegebenen Zeitfensters erwartet, ansonsten gilt der Prozess als gescheitert. Als Auslegungsgrundlage werden Worst Case Szenarien genutzt. Ein unter harten Echtzeitbedingungen ausgelegtes System ist die Voraussetzung für die Anwendung von Prozessen, deren Verhalten von einer vorgegebenen Zykluszeit abhängen. Dies ist üblicherweise bei zeitdiskreten Regelalgorithmen der Fall. Die Entwicklung läuft hierbei im Allgemeinen sehr hardwarenah ab. Nachteil dieser Verfahren ist neben dem hohen technischen Aufwand zur Realisierung die Notwendigkeit einer Nutzung von spezieller Hard- und Softwaretypen sowie unflexible und schlecht skalierfähige Architekturen.

Asynchrone Interaktionskonzepte lassen jeweils Verzögerungen zu und führen damit zu weichen Echtzeitbedingungen (Salfner, Sommer 2010), wie sie durch den Einsatz moderner Multitasking-Betriebssysteme ermöglicht werden. Hierbei wird die Antwort eines Prozesses auf eine Anfrage in endlicher Zeit erwartet, allerdings darf es hierbei zu Latenzen kommen. Als Anforderungsebene werden hier Durchschnittswerte angenommen, wobei statistische Größen wie die Verteilungsfunktionen die Ergebnisqualität definieren. Der große Vorteil dieser Konzepte liegt in einer besseren Dimensionierbarkeit der Ressourcen sowie der Nutzungsmöglichkeit vieler etablierter Soft- und Hardwareplattformen. Ein großer Nachteil liegt natürlich in den entsprechenden Einschränkungen der Echtzeitanforderungen, was allerdings für viele technische Prozesse in Kauf genommen wird. In vielen Fällen werden beide Ansätze miteinander zu hybriden Ansätzen verknüpft, um die Vorteile beider Auslegungsformen miteinander zu verbinden.

Häufig werden in einer Schichtenarchitektur die Kommunikation und die damit verbundenen komplexen technischen Lösungen abstrahiert und vor den Anwendungen verborgen. Eine Middleware (Gronau, Becker et al. 2016a) übernimmt die Aufgabe der Interprozesskommunikation und steht als anwendungsneutrale Schicht zwischen dem Betriebssystem und der Applikationsebene. Dies hat insbesondere Vorteile bei der Zusammenführung unterschiedlicher Plattformen und zugrunde liegender Architekturen. Der Anwendungsentwickler muss sich schlicht mit diesen Belangen nicht mehr auseinandersetzen und kann diese als erarbeitet annehmen.

2.4 Methoden zur Kritikalitätsbestimmung verkehrlicher Situationen

Im Rahmen der Arbeit wurden bereits verschiedene fachliche Bereiche benannt, die sich mit der Modellierung von verkehrlichen Situationen beschäftigen. Insbesondere die Bereiche, die eine Erhöhung der verkehrlichen Sicherheit zum Ziel haben, bedienen sich dabei dem Begriff der Kritikalität.

Es gibt diverse Ansätze in der Literatur, die sich mit der Modellierung verkehrlicher Situationen auseinandersetzen. (Catalá Prat 2010) unterteilt zwischen den grundsätzlichen Ansätzen von regelbasierten Ansätzen, denen bestimmte modellhafte Annahmen von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zugrunde liegen und einer Menge von Ansätzen, die sich auf einer Gefahrenaussage durch die Erfassung atypische Ereignisse stützen.

2.4.1 Regelbasierte Ansätze

Die regelbasierten Ansätze stellen die Grundlage für die meisten modernen FAS und Automationsysteme, wie sie in Abschnitt 1.1.2 eingeführt und benannt wurden (Catalá Prat 2010). In der Systemauslegung werden Metriken definiert, die eine Prognose für Szenarien auf Basis einer Szenenprädiktion ermöglichen, die wiederum auf Grundlage bestimmter Modellannahmen erfolgt. Übliche Vertreter dieser Indikatoren sind Time to Collision (TTC) als prognostizierte Zeit bis zu einem ungewollten Kontakt unter Beibehaltung der momentanen kinetischen Parameter oder Time Headway (THW) als Zeitraum, der vergeht, bis ein Fahrzeug bei gleichbleibender Geschwindigkeit die gleiche Stelle wie das vorausfahrende Fahrzeug passiert. Weitere bekannte Metriken sind Predicted Minimum Distance (PMD) und die Time to Predicted Minimum Distance (TPMD), wie sie in (Polychronopoulos, Tsogas et al. 2004) vorgeschlagen werden. Unabhängig von der jeweilig gewählten Metrik werden in einem regelbasierten Ansatz Schwellwerte definiert, die bei jeweiligem Über- bzw. Unterschreiten zu der Auslösung einer Systemreaktion führen. In der Praxis hat sich dabei eine stufenförmige Ausgestaltung etabliert, in der Systeme mit einer Eskalationsstrategie ausgestattet werden, die stufenweise von einer Informations- in eine Warnungsebene und schließlich bis in aktive Eingriffe in die Fahrodynamik reicht (Winner, Hakuli et al. 2009).

Der in der Einleitung vorgestellte Bereich der Verkehrskonflikttechnik bietet einen reichen Schatz an etablierten regelbasierten Größen zur Bestimmung von Kritikalität. Gemäß der grundlegenden Definition eines Konflikts aus Abschnitt 1.2.1 erfolgt in (Laureshyn, Várhelyi 2018) eine Metrik für die Schwere eines Konflikts. Sie wird für den Zeitpunkt definiert, in dem die (zur Unfallvermeidung notwendige) Ausweichhandlung eines der Konfliktpartner sichtbar wird. Die Konfliktschwere basiert auf dem Einfluss zweier Indikatoren: Time to Accident (TA) als verbleibender Zeitraum bis zum Kontakt ohne Reaktion sowie Conflicting Speed (CS), also der Geschwindigkeit des Eingreifenden. Sie wird in Abbildung 14 grafisch als Kurvenschar dargestellt.

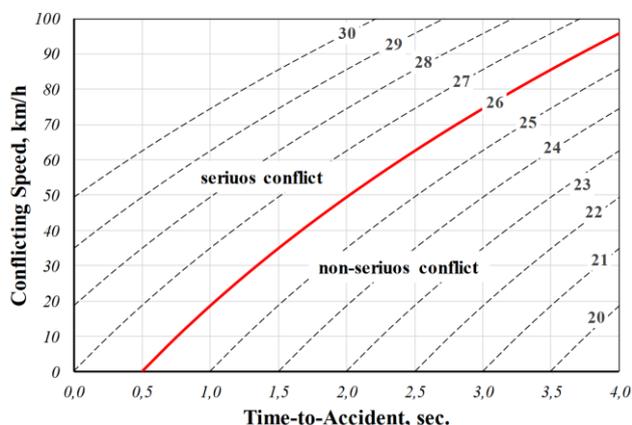


Abbildung 14: Konfliktschwerediagramm aus (Laureshyn, Várhelyi 2018)

Zu erkennen ist die rot markierte Linie, die die Fläche in zwei Bereiche nicht schwerer und schwerer Konflikte trennt. Diese Einordnung basiert nach Angaben der Autoren auf einer „angemessenen“ Korrelation dieser Größe mit offiziell erhobenen Unfallstatistiken. Die Vorgehensweise zeigt auf,

dass die Einordnung verkehrlichen Geschehens üblicherweise kein eindimensionales Problem darstellt und für eine tragfähige Aussage verschiedene Gesichtspunkte einbezogen werden müssen. Passend dazu liefert die Literatur viele unterschiedliche Ansätze für die Ableitung von Aussagen zur verkehrlichen Sicherheit von Interaktionen.

Eine grundlegende Aufarbeitung verschiedenster etablierter Metriken, so genannter Surrogate Safety Measures (SSM) findet sich in (Gimm 2014). Dabei führt diese bereits vorgestellte Metriken mit weiteren in einer gesamtheitlichen Übersicht zusammen und ordnet sie grundlegend nach zeitbasierten, ortsbasierten, kinematikbasierten Größen, sowie weiteren indexbasierten Verfahren. Abbildung 15 zeigt eine Auswahl der Verfahren in ihrer Einordnung als Baumstruktur.

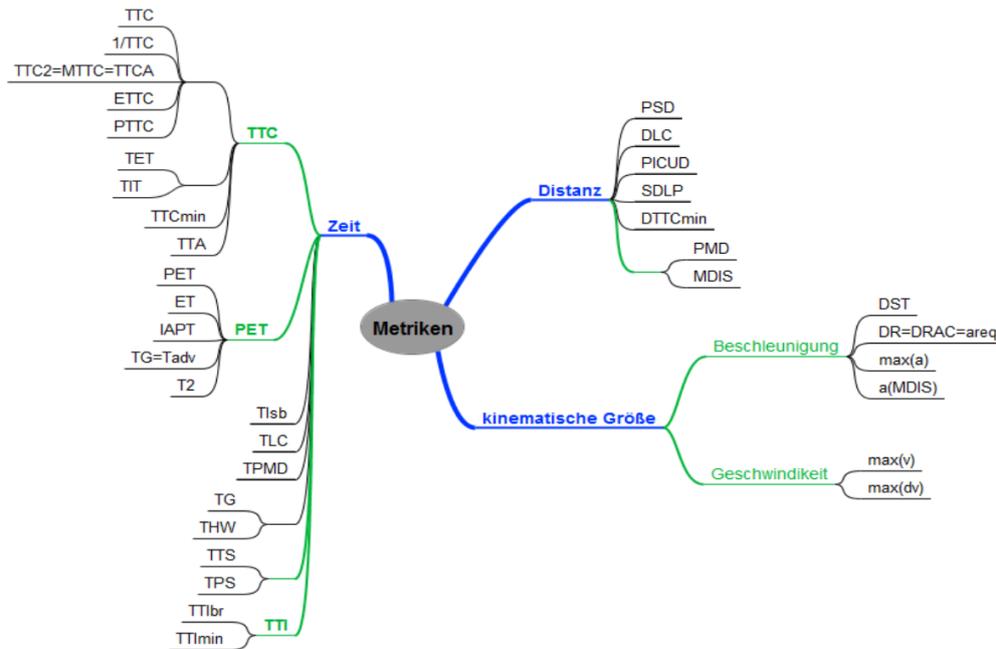


Abbildung 15: Auswahl von Surrogate Safety Measures in der Literatur aus (Gimm 2014)

Im weiteren Verlauf der Arbeit findet die Post Encroachment Time (PET) Verwendung und soll daher an dieser Stelle für ein besseres Verständnis erläutert werden. Abbildung 16 zeigt eine symbolhafte Darstellung der Metrik.

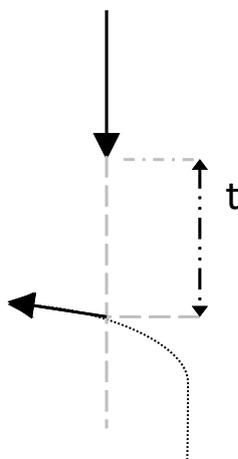


Abbildung 16: Symbolhafte Darstellung der PET

Die PET ist ein seit vielen Jahren etabliertes Maß ist für die vorliegende Situation (Allen, Shin et al. 1978). Die PET entspricht der Zeitlücke, um die sich die Konfliktpartner im Bereich einer Konfliktzone verpassen. Mit der Metrik ist es folglich möglich, enge und damit potentiell gefährliche Annäherungen bei sich kreuzenden Verkehrsströmen zu detektieren. Die Grundannahme liegt dabei

in einer zunehmenden Kritikalität für kleinere PET. In der Literatur lässt sich ein Wert von 1 s als Obergrenze für potentiell kritische Situationen finden (van der Horst, Goede et al. 2014).

Die regelbasierten Ansätze besitzen den großen Vorteil einer simplen Modellstruktur, was sie für die Anwendung in Einsatzumgebungen mit begrenzten Zeit- und Berechnungsressourcen prädestiniert. Allerdings liegt eine bekannte Problematik darin, dass die Anwendung von statisch angelegten Metriken im Wirkkontext unterschiedlichster Einflussfaktoren zu einem ungewollten Auslösen führen kann. Diesem Umstand muss bei der Auslegung der Metriken und ihrem Einsatz im Bereich der Kritikalitätsbestimmung stets Rechnung getragen werden. Ein möglicher Umgang mit diesem Problem liegt in der Verwendung von adaptiven Schwellwerten oder Verknüpfung verschiedener Metriken in kombinierten Ansätzen zur Erzeugung von komplexeren Regelbaumstrukturen.

2.4.2 Ansätze auf Basis atypischer Ereignisse

Als atypische Ereignisse werden statistisch selten auftretende Situationen verstanden. Damit bezieht sich die Bewertung einer solchen Situation auf eine vorab definierte und von einer Systemstruktur angelegte Wissensbasis. Ein Beispiel für diese Ansätze liefert (Catalá Prat 2010), der auf der Grundlage einer fahrzeugbasierten Umfelderkennung das Konzept eines statistischen Informationsgitter (SIG) definiert. Dieses SIG dient als Grundlage einer Diskretisierung des Fahrzeugumfelds und spannt dabei ein egozentriertes Gitter auf, welches mehrere Schichten umfasst. Trainingsdaten werden genutzt, um statistische Häufigkeitsverteilungen für jeweils vordefinierte Metriken in den verschiedenen Schichten innerhalb der Zellen zu erarbeiten und diesen zuzuweisen. Das SIG erzeugt damit eine Grundlage für die egozentrierte ortsabhängige Bewertung von Situationsaspekten durch eine zielführende Kombination der Aussagen zu vorherrschender Atypik auf den verschiedenen Ebenen des SIG.

Ein weiteres Beispiel findet sich in (Saul, Kozempel et al. 2014). Hier wird ein infrastrukturell gestützter Ansatz benutzt, um aufbauend auf Arbeiten von Meysel (2010) eine Wahrscheinlichkeitsdichtekarte (PDM) zu erzeugen, die eine ortsbezogene Analyse der Trajektorien nach der Verlauf sowie den korrespondierenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungsmustern erlaubt, welche als Grundlage für die Ableitung von atypischen Verhaltensmustern dient.

Der große Vorteil bei der Nutzung atypischer Ereignisse liegt darin, dass das Wissen je nach Anwendungsbereich aus der Vergangenheit ermittelt und passend angelernt werden kann. Dies führt auf eine zumeist gute und trennscharfe Typisierung der Ereignisse, welche die grundlegende Charakteristik des jeweils betrachteten Verkehrsgeschehens sehr gut wiedergeben sollte. Ein Grundproblem bei der Gefahrensuche nach Atypik ist allerdings, dass ein atypisches Szenario nicht gleichzusetzen ist mit einer Gefahr. Atypik kann zwar gute Indikatoren auf mögliche Gefahren liefern, doch gibt es sicherlich auch viele atypische Ereignisse, ohne dass jemals gefährliche Situationen entstehen. Anders herum muss sich nicht jede Form der Gefahr als Atypik zeigen. Eine etablierte Übertretung von sicherheitsrelevanten Grenzen und Regeln würde sich als normales Verhaltensmuster in der Datenbasis wiederfinden, ungeachtet des tatsächlichen Gefährdungspotentials. Daraus folgert, dass ein Systemkonzept wie die zwei vorgestellten in jedem Fall eine nachgelagerte Gefährdungsbeurteilung besitzen muss, welche die erkannten Events in einen tatsächlichen Gefährdungsrahmen einordnet.

2.5 Datenschutz

Das Recht auf informationelle Selbstbestimmung ist im Grundgesetz verankert. Es gibt jedem Einzelnen das Recht selbst darüber zu entscheiden, was mit seinen personenbezogenen Daten geschieht und ob diese verarbeitet werden dürfen oder nicht. Die vorliegende Arbeit verfolgt explizit das Ziel einer Anwendung von Sensorik zur Erfassung und messtechnischen Verfolgung von Verkehrsteilnehmern im öffentlichen Raum. Hierdurch öffnet sich sofort ein datenschutzrechtlich sensibles Feld. Die folgenden Abschnitte geben einen gebündelten Einblick in die Begriffsdefinitionen

und erläutern den geforderten Rahmen an Maßnahmen im Kontext der geltenden Regelwerke und Verordnungen.

Es soll hier explizit festgehalten werden, dass im Rahmen dieser Arbeit keine vollumfängliche Diskussion des Themas erfolgen kann. Vielmehr sollen die relevanten Leitbegriffe und Grundgedanken des Datenschutzes genannt werden, um das Verständnis für die Ausgestaltung der Systemarchitektur sowie im Bereich der späteren Evaluation des Erreichten zu ermöglichen.

2.5.1 Relevante Begriffe aus dem Bereich des Datenschutzes

Für grundlegende Begriffsdefinitionen können die Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) (Europäisches Parlament und europäischer Rat 2016) sowie das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2017) herangezogen werden.

Personenbezogene Daten sind nach DSGVO „[...] alle Informationen, die sich auf eine identifizierte oder identifizierbare natürliche Person (im Folgenden „betroffene Person“) beziehen; als identifizierbar wird eine natürliche Person angesehen, die direkt oder indirekt, insbesondere mittels Zuordnung zu einer Kennung wie einem Namen, zu einer Kennnummer, zu Standortdaten, zu einer Online-Kennung oder zu einem oder mehreren besonderen Merkmalen, die Ausdruck der physischen, physiologischen, genetischen, psychischen, wirtschaftlichen, kulturellen oder sozialen Identität dieser natürlichen Person sind, identifiziert werden kann;“ Datenschutz adressiert folglich den Schutz natürlicher Personen, nicht denen von juristischen Personen wie Institutionen.

Dem gegenüber steht der Begriff der Anonymisierung, der nach BDSG definiert ist als „[...] das Verändern personenbezogener Daten derart, dass die Einzelangaben über persönliche oder sachliche Verhältnisse nicht mehr oder nur mit einem unverhältnismäßig großen Aufwand an Zeit, Kosten und Arbeitskraft einer bestimmten oder bestimmbarer natürlichen Person zugeordnet werden können.“ Häufig verwechselt wird dabei der Begriff der Anonymisierung mit dem Pseudonymisierung. Dieser kennzeichnet sich durch „[...] das Ersetzen des Namens und anderer Identifikationsmerkmale durch ein Kennzeichen zu dem Zweck, die Bestimmung des Betroffenen auszuschließen oder wesentlich zu erschweren.“

Die zu schützenden Daten lassen sich differenzieren in personenbezogene Daten⁷ als Einzelangaben über persönliche oder sachliche Verhältnisse einer natürlichen Person und personenbeziehbare Daten, also Daten, die man mithilfe anderer Angaben, über die man verfügt, auf eine bestimmte Person beziehen kann. Letztere sind damit also Daten ohne direkten persönlichen Bezug, aus denen sich aber eine Person herleiten lässt. Klassische Beispiele sind hierbei eine spezifische IP-Adresse, das KFZ-Kennzeichen eines geführten Kraftfahrzeugs oder ähnliche Angaben. Es werden darunter allerdings auch „nicht ausreichend anonymisierte oder pseudonymisierte personenbezogene Daten“ verstanden (Lill 2015). In der Praxis sind die gesetzlichen Vorgaben für personenbezogene und personenbeziehbare Daten dieselben. Daher müssen sie gleichbehandelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher alle diese Daten fortan der Einfachheit halber in den Begriff personenbezogene Daten zusammengefasst.

2.5.2 Technische und organisatorische Maßnahmen

Die Verordnungen und Regelwerke geben ebenfalls vor, wie im Falle der Erhebung personenbezogener Daten zu verfahren ist. Das Leitbild für Maßnahmen ist, dass die verantwortliche Stelle nach BDSG „[...] geeignete technische und organisatorische Maßnahmen zu treffen [hat], die sicherstellen, dass durch Voreinstellungen grundsätzlich nur solche personenbezogenen Daten verarbeitet werden können, deren Verarbeitung für den jeweiligen bestimmten Verarbeitungszweck erforderlich ist. Dies betrifft die Menge der erhobenen Daten, den Umfang ihrer Verarbeitung, ihre Speicherfrist und ihre Zugänglichkeit. Die Maßnahmen müssen insbesondere

⁷ Allgemeingültige Beispiele hierfür sind Name, Geburtstag, Adressdaten oder E-Mail-Inhalte.

gewährleisten, dass die Daten durch Voreinstellungen nicht automatisiert einer unbestimmten Anzahl von Personen zugänglich gemacht werden können.“ Die Maßnahmen, die zu ergreifen sind, werden in folgende Gruppierungen differenziert:

- Zutrittskontrolle: Unbefugten wird der Zutritt zu Datenverarbeitungsanlagen, mit denen personenbezogene Daten verarbeitet oder genutzt werden, verwehrt.
- Zugangskontrolle: Verhindern, dass Datenverarbeitungssysteme von Unbefugten genutzt werden können.
- Zugriffskontrolle: Sicherstellung, dass die zur Benutzung eines Datenverarbeitungssystems Berechtigten ausschließlich auf die ihrer Zugriffsberechtigung unterliegenden Daten zugreifen können, und dass personenbezogene Daten bei der Verarbeitung, Nutzung und nach der Speicherung nicht unbefugt gelesen, kopiert, verändert oder entfernt werden können.
- Weitergabekontrolle: Sicherstellung, dass personenbezogene Daten bei der elektronischen Übertragung oder während ihres Transports oder ihrer Speicherung auf Datenträger nicht unbefugt gelesen, kopiert, verändert oder entfernt werden können, und dass überprüft und festgestellt werden kann, an welche Stellen eine Übermittlung personenbezogener Daten durch Einrichtungen zur Datenübertragung vorgesehen ist.
- Eingabekontrolle: Sicherstellung, dass nachträglich überprüft und festgestellt werden kann, ob und von wem personenbezogene Daten in Datenverarbeitungssysteme eingegeben, verändert oder entfernt worden sind.
- Auftragskontrolle: Sicherstellung, dass personenbezogene Daten, die im Auftrag verarbeitet werden, nur entsprechend den Weisungen des Auftraggebers verarbeitet werden können.
- Verfügbarkeitskontrolle: Sicherstellung, dass personenbezogene Daten gegen zufällige Zerstörung oder Verlust geschützt sind.
- Zwecktrennungskontrolle: Sicherstellung, dass zu unterschiedlichen Zwecken erhobene Daten getrennt verarbeitet werden können.

2.6 Grundlegende Ableitungen für den Systementwurf

In diesem Kapitel wurden relevante fachliche Grundlagen, der aktuelle Stand der Technik sowie maßgebliche relevante Rahmenbedingungen beleuchtet. Es zeigt sich, dass für die gegebene Aufgabenstellung eine beachtliche Bandbreite von Einzelaspekten zusammenzuführen ist. Der erste Abschnitt führte dafür in die relevanten Begrifflichkeiten der Objekt- und Situationserfassung ein. Im Folgeabschnitt wurden grundlegende Technologien und Methoden für die messtechnische Erfassung dynamischer Objekte vorgestellt. Für die Bestimmung von verkehrlicher Kritikalität wurden zwei etablierte Herangehensweisen aufgezeigt, wobei insbesondere die regelbasierten Ansätze etablierte Verfahren in der Verkehrskonflikttechnik darstellen. Mögliche Vorgehensweisen bei der Schaffung verteilter Systemstrukturen wurden mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert und ein gebündelter Einblick in Maßnahmen zur Realisierung eines datenschutzkonformen Systementwurfs gegeben. Aus den vorigen Abschnitten lassen sich nun grundlegende Ansätze für das zu entwickelnde Systemkonzept ableiten, welche helfen die Kernanforderungen weiter zu konkretisieren.

Es wurde aufgezeigt, dass Performanz einer bestimmten Sensortechnologie von vielen spezifischen Rahmenbedingungen abhängig ist und nicht pauschalisiert vorausgesagt werden kann. Anzunehmen ist allerdings, dass die Anforderungen im vorliegenden, breit angelegten Einsatzspektrum im Allgemeinen nicht durch eine einzelne Sensortechnologie zu gewährleisten ist, da jede spezifische Lösung bestimmte Vor- und Nachteile mit sich bringt. Ohnehin muss für eine Skalierbarkeit der Systemlösung die parallele Nutzung mehrerer Sensorsysteme vorgesehen werden. Beide aufgeführten Punkte bedingen das Vorsehen einer Sensordatenfusion im grundlegenden Systemdesign. Dabei stellt sich die Frage welche Prinzipien hierbei Anwendung finden sollen. Die zielbringende Nutzung der Systeme im Kontext der Aufgabenstellung bedingt eine in sich schlüssige und bruchfreie Gesamtsicht des gesamten Sensorbereichs. Dies führt auf eine zentrale Fusionsarchitektur. Ein vielversprechender Ansatz liegt in den Methoden auf Feature Level Ebene, da

diese eine vergleichsweise hohe Performanz mit einer verbleibenden Modularität als Grundlage einer guten Skalierbarkeit und Flexibilität verbinden. Als gemeinsames Format für die Zusammenführung und Weiterverarbeitung bieten sich Superpixelansätze an. Aus der Literatur lässt sich ableiten, dass diese ein hohes Potential bei der performanten Bewältigung der fachlichen Aufgabenstellungen bieten. Darüber hinaus versprechen sie eine zielgerichtete und gut handhabbare Modellform für die sensortechnologieunabhängige Zusammenführung objekterfassender Datenquellen und bieten alle Grundlagen für die Ausgestaltung hybrider Fusionsprinzipien, wie sie hier erforderlich erscheinen. Die Aufgabenstellung bedingt keine harten Echtzeitbedingungen. So wird fortan von einem asynchronen Interaktionskonzept zwischen den Systemprozessen ausgegangen. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass das System damit auf einfache Art und Weise „verklemmungsfrei“ ausgelegt werden kann. Der Absturz einer Komponente bedingt nicht den Ausfall des Gesamtsystems, da die anderen Systembereiche weiterarbeiten können. Dies führt zu hoher Betriebsbereitschaft und verringert gleichsam die Anforderungen an die Auslegungen der genutzten Hardwarestruktur. Die Inhalte zum Datenschutz machen deutlich, dass eine Einbeziehung datenschutzrechtlicher Belange auf verschiedene Ebenen eines Systems rückwirkt und damit weit über den technischen Rahmen hinausreicht. Sie stellt maßgebliche Anforderungen für die Auslegung, die von vornherein bei der Ausgestaltung eines systemarchitektonischen Konzepts beachtet werden muss, nicht erst in der Ableitung eines tatsächlichen technischen Systems.

3 Anforderungserhebung

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit den Anforderungen, die an eine mikroskopische Verkehrsdatenerhebung zu stellen ist. Ausgangspunkt der Betrachtungen sind die Bedarfe sowie Ziele der Arbeit aus Kapitel 1 im Zusammenspiel mit den Ableitungen aus Abschnitt 2.6. Darauf basierend werden Kernanforderungen ausformuliert, die grundlegende Systemanforderungen wiedergeben. Diese teilen sich in funktionale Anforderungen, die damit den Funktions- und Wirkungsbereich der Systeme spezifizieren sowie nicht funktionale Anforderungen, die qualitätsbestimmende Anforderungen der Umsetzung beinhalten. Daran schließen sich Anforderungen aus dem datenschutzrechtlichen Bereich an.

Diese Kernanforderungen dienen im Rahmen der Umsetzung als Ausgangspunkt für die Ausdetaillierung einzelner Systemspezifikationen für das Anforderungsmanagements der technischen Umsetzungen, die im Rahmen dieser Arbeit erfolgt sind. Passend dazu werden die relevantesten Aspekte der Systemspezifikationen im Kontext der jeweiligen Kernanforderungen benannt. Um eine entsprechend gut lesbare Struktur zu erzeugen, wird hierfür von bestimmten Grundsätzen der Anforderungserhebung (Schnieder 2017) im Requirements Engineering abgewichen, die die tatsächlichen Arbeiten begleitet haben, wie zum Beispiel eine stets gegebene Atomarität sowie die Nutzung einer stark vereinheitlichten Syntax.

3.1 Funktionale Kernanforderungen

Es lassen sich folgende funktionale Kernanforderungen ableiten, die inhaltlich die Konzeptebene, die aufzubauenden Systeme oder Teile der Ausgestaltung adressieren:

K1: Das generische Architekturkonzept muss die Ausgestaltung unterschiedlicher physischer Architekturen erlauben

In der Einleitung wurde die Anforderung an ein einheitliches Systemkonzept für die Ausgestaltung flexibel ausgestaltbarer Systemlösungen für unterschiedliche Anwendungsbereiche hinlänglich motiviert. Der Anspruch dieser Arbeit besteht daher in einem generisch angelegten Konzept. Generisch bedeutet in diesem Kontext, dass das Systemkonzept die Ausgestaltung verschieden skalierten und ausgelegter Systemlösungen ermöglichen muss, die die gegebenen Anforderungen erfüllen, die sich im jeweils fachlichen Kontext stellen. Dabei ist als Grundlage dieser Flexibilität die Ausgestaltung als verteiltes System vorzusehen.

K2: Das generische Architekturkonzept muss horizontal und vertikal skalierbar sein

Ein Testfeldbetrieb kann als projektübergreifende Langzeitaufgabe angesehen werden, Laufzeiten für entsprechende Systeme liegen im Bereich von zehn bis fünfzehn Jahren. Es ist anzunehmen, dass sich die Anforderungsprofile mit der Nutzung in unterschiedlichen Forschungsvorhaben ändern. Dies bedingt, dass ein System sich entsprechend mit den Anforderungen mitentwickeln kann. Als Grundlage für die Schaffung langlebig angelegter, erweiterbarer Systemstrukturen muss eine vertikale Skalierbarkeit im Sinne der modularen Aufwertung und Anpassung der Hard- und Software zur Steigerung und Erweiterung des Leistungsumfangs der Systeme möglich sein. Eine horizontale Skalierbarkeit ermöglicht dabei eine möglichst flexible Erweiterung der Systeme mit zusätzlichen Systemelementen, zum Beispiel durch das Einbinden neuer Sensoren und der Ausweitung auf weitere Detektionsbereiche. Im Zuge dieser Anforderungen erscheint es sinnvoll, die grundlegenden Systemstrukturen ohne die Nutzung neuronaler Netzstrukturen auszugestalten, die in den letzten Jahren aufgrund ihrer Performanz im Bereich der Objekterfassung sehr große Verbreitung gefunden haben. Insbesondere ist auf die Nutzung von End-to-End Architekturen zu verzichten, da zum einen das dort inkludierte Wissen nur implizit vorhabend und damit das Systemverhalten nur bedingt voraussagbar ist. Außerdem ginge eine Änderung oder Skalierung eines Systems zumeist mit einem Neuanlernen der gesamten gelernten Strukturen einher.

K3: Das generische Architekturkonzept muss einen **sensortechnologieunabhängigen Aufbau** besitzen

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 ausgeführt, besitzen unterschiedliche Sensortechnologien spezifische Stärken und Schwächen, insbes. im Bereich der Sensibilität der Datenqualität bezüglich bestimmter äußerer Faktoren. Es muss daher eine Architektur definiert werden, die eine Zusammenführung und Fusionierung unterschiedlicher, nicht vorbestimmter Sensortechnologien ermöglicht. Diese Unabhängigkeit von spezifischen Sensortechnologien ermöglicht die Sicherstellung der flexiblen Erweiterbarkeit und Anpassungsfähigkeit der Anlagen in späteren Betriebsphasen, wie sie in K5 gefordert wird.

K4: Das generische Architekturkonzept muss ein flexibel ausgestaltbares infrastrukturelles **Dienschema** für eine Nutzung im Testfeldeinsatz erlauben

Die Erhebungsmethode, die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wird, soll im Kern infrastrukturell ausgelegt sein. Die physische Ausgestaltung soll dabei die Möglichkeit ausgedehnter stationärer Systeme als auch flexibler mobiler Aufbauten für temporäre und projektspezifische Mess- und Einsatzkampagnen umfassen. Dabei müssen die Systeme so ausgestaltet sein, dass eine kombinierte Nutzung innerhalb der Testfeldarchitekturen wie AIM und TF NDS mit ihrem modularen Architekturprinzip ermöglicht wird. Darüber hinaus sollen die im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Systemlösungen wie ein Werkzeugkasten miteinander kombiniert werden können, um eine adäquate Anpassung des Leistungsumfangs auf eine möglichst große Bandbreite von Anwendungsszenarien zu ermöglichen.

K5: Die aufgebauten Systeme müssen eine **hohe Betriebsbereitschaft** aufweisen

Diese Anforderung ist Voraussetzung für den intendierten Einsatz von 24/7-fähigen Systemen, was wiederum die Basis für Langzeitstudien unter Einbeziehung von diversen äußeren Einflussfaktoren wie Tages- oder Jahreszeiten ist. Dabei müssen die Systemgrenzen der Systeme so ausgelegt sein, dass die Güte und der messtechnisch erfassbare Umfang möglichst unabhängig von diesen äußeren Faktoren ausgelegt sind, wie auftretende Witterung oder Beleuchtungsaspekte. Für die Sicherstellung und Nachvollziehbarkeit der Systemeigenschaften müssen die relevanten Aspekte über ein maschinelles Systemmonitoring überwacht, aufgezeichnet und verwaltet werden können.

K6: Die aufgebauten Systeme müssen ein **Datenqualitätsmanagement** ermöglichen

Wie alle realen physischen Messprozesse werden die operationalisierten Verfahren in einem gewissen Maße fehlerbehaftet sein. Daher sollen korrespondierend zu den Trajektorien Evaluationsdaten aufgebaut werden, die eine Einschätzung der erzeugten Datengüte für ein Datenqualitätsmanagement ermöglichen. Dies umfasst sowohl die effiziente Abschätzung des zur Messzeit vorherrschenden Systemzustands, als auch die Möglichkeit einer manuellen Güteaussage der zugehörigen Trajektorien Daten, um Bias-Effekte⁸ zu detektieren, die aus den rein numerischen Daten nicht mehr herauszuarbeiten wären.

⁸ Der Bias-Effekt (Verzerrung) bezeichnet eine im statistischen Sinn mittlere systematische Abweichung zwischen dem erwarteten („richtigen“) Modellergebnis und dem mittleren wirklich eingetretenen Modellergebnis (Mehne 2019).

K7: Die Objekterfassung muss räumlich und **zeitlich fein aufgelöste Zustandsinformationen über alle Verkehrsteilnehmer** in vorab definierten Bereichen ermöglichen und persistent speichern

Diese Anforderung führt auf die Generierung von Trajektorien, die diesen genau diesen Informationsstand für Objekte über Zeit und Ort sicherstellen. Die Nutzung der Trajektorien in Interaktionsanalysen bedingt die Kenntnis der Dimensionen (insbes. Länge und Breite) der Verkehrsteilnehmer, da diese die Grundlage für die Bildung von diversen Metriken darstellt. Ebenso benötigt wird eine ausreichend detaillierte Klassifikation der Verkehrsteilnehmer, um eine zielbezogene Modellbildung von Situationen sicherstellen zu können, auf denen die fachlichen Fragestellungen bearbeitet werden.

K8: Die **Objekterfassung und Situationsinterpretation** müssen **automatisiert** erfolgen können

Die Echtzeitfähigkeit der erzeugten Systemlösungen bedingt eine Automatisierung des technisch zugrundeliegenden Betriebsablaufs, welcher ohne manuelle Eingriffe wirken kann. Dies gilt natürlich in jedem Fall für die Erfassung von verkehrlichen Objekten, aber auch für die darauf basierende Situationsinterpretation, sofern diese ein Teil des echtzeitfähigen Systems ist.

K9: Die Objekterfassung sowie die Situationsanalyse müssen die Bedingungen von **Echtzeitfähigkeit** sicherstellen

Die Nutzung der Anlagen als systemrelevanter Baustein eines verteilten Konzepts für FAS und AVF bedingt die Echtzeitfähigkeit der entsprechenden Signalverarbeitung zur Objekterfassung. Soll eine höherwertige Form der Analyse von verkehrlichen Situationen im Echtzeitbetrieb genutzt werden (was im üblichen Maße der Fall sein dürfte), so muss die Situationserfassung und -interpretation ebenso echtzeitfähig ausgelegt sein. Unter Echtzeit wird hier weiche Echtzeit verstanden, was im gegebenen Anwendungskontext als ausreichend angesehen wird.

3.2 Nichtfunktionale Anforderungen

Passend zum vorhergehenden Abschnitt lassen sich auch nicht funktionale Kernanforderungen formulieren:

K10: Wahrung **hoher Service Level** durch Sicherstellung eines professionalisierten Systembetriebs

Ein professionalisierter Systembetrieb ist für die intendierte Nutzungsform im Forschungs- und Entwicklungsbereich unumgänglich. Dies gilt insbesondere, wenn diese im Zusammenspiel mit anderen Institutionen erfolgt, deren Beitrag in direkter Form von einem hohen System Readiness Level und einer gleichbleibenden Servicequalität der aufzubauenden Systemlösungen abhängt. Dies umfasst den Betrieb der zentralen Hardware- und Softwarekomponenten wie Datensicherung, das Datenbank- und Netzwerkmanagement sowie die Betreuung der verschiedenen Applikationen. Grundlage hierfür stellt ein systematisch geführter Requirements Engineering Prozess sowie eine saubere Systembetriebsdokumentation für das Wissensmanagement, was alle relevanten Aspekte der Systemausgestaltung bis hin zur Wartung und Fehlerbehebung umfasst. Über die Bestandsdokumentation hinaus erfordert es eine Einsatzdokumentation mit der Information über die jeweils eingesetzten Hardware- und Softwaresysteme sowie der angeschlossenen IT-Infrastruktur.

K11: Sicherstellung eines Betriebsverständnisses unter **Einbeziehung aller relevanten Rollen** und Verantwortlichkeiten

Der Betrieb eines komplexen Hardware-Softwaresystems stellt hohe Anforderungen an eine systematische Form der Allokation von Aufgaben und Verantwortlichkeiten auf die maßgeblichen Akteure. Es muss stets sichergestellt, dass alle relevanten Rollen ihren Tätigkeitsrahmen in das Gesamtgeschehen einordnen können und dass diese Aufgaben spannungs- und bruchfrei verortet sind, um Probleme im Betrieb durch White Spots oder konfliktbehaftete Rollengebilde zu vermeiden. Dabei helfen nach (Schulz, Joisten et al.) Koordinationsregeln wie:

- Regeln zur Kommunikation (u.a. Unterrichtung, Kontrolle)
- Regeln zur Entscheidungsfindung (u.a. Hierarchien, Teamregeln)
- Regeln zur Steuerung (zum Beispiel wenn A eintritt, dann B)

Diese organisatorisch geprägte Kernanforderung stellt auch einen maßgeblichen Anteil an den Grundlagen für datenschutzrechtliche Belange als Gegenstands der nächsten Anforderung.

K12: Aufbau eines **datenschutzrechtlich konformen Systementwurfs**

Wie in Abschnitt 2.5 ausgeführt liegt der Sinn und Zweck datenschutzrechtlicher Anforderungen in der Wahrung von Rechten eines Individuums in Bezug auf seine Daten. Der Gesetzgeber verlangt dafür u.a. ein entsprechendes Datenschutzkonzept sowie eine entsprechende Ausgestaltung von technischen, organisatorischen Maßnahmen zur Wahrung der Rechte Dritter.

4 Verwandte Arbeiten

In diesem Kapitel sollen bekannte Arbeiten ausgeführt werden, die sich ebenfalls mit dem Bereich der infrastrukturellen Erfassung von verkehrlichen Aspekten auseinandersetzen. Die Darstellung gliedert sich dabei in einen Überblick zu bekannten Forschungsfeldern und -aktivitäten sowie dem bestehenden Kenntnisstand zur Nutzung infrastruktureller verkehrlicher Erfassung im Rahmen der Konzeption und Ausgestaltung von Testfeldern. Das Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden Bewertung des Literaturstands und der Formulierung des verbleibenden Handlungsbedarfs.

4.1 Forschungsaktivitäten zu infrastruktureller verkehrlicher Erfassung

In der Literatur lässt sich eine Vielzahl von Ansätzen für die infrastrukturelle Erfassung von Verkehrsteilnehmern finden. Einen sinnhaften Einstieg für eine Systematisierung liefern die jeweils verwendeten Sensortechnologien.

Eine etablierte Methode für die Erfassung von Trajektorien bildet die bereits in Abschnitt 1.2.1 benannte Verwendung von Kamertechnologie. Diese wird bereits seit vielen Jahren erfolgreich für die automatisierte Erfassung verkehrlicher Phänomene im Kontext von Verkehrssicherheitsuntersuchungen eingesetzt. So findet sich zum Beispiel in (Kamijo, Matsushita et al. 2000) ein Ansatz für den Aufbau eines Systems zur Analyse des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern an einer urbanen Kreuzung. Die Verfahren bedingen jeweils eine Transformation von Informationen aus der zweidimensionalen Bildebene in eine dreidimensionale Welt, was ohne vorhandene Tiefeninformationen erfolgen muss. Die Systeme arbeiten daher mit Ansätzen, die dynamische Anteile in einem Bild vom statischen Hintergrund trennen, zum Beispiel auf Basis von Verfahren wie dem optischen Fluss (Horn, Schunck 1981). Ein vielfach genanntes Problemfeld bei der Verwendung von Monovideotechnik zeigt sich dabei in Konstellationen mit auftretender Sichtverdeckung, gerade in den verkehrswissenschaftlich relevanten Umgebungen komplexer urbaner Verkehrsumgebungen. Hierbei kommt es zu Artefakten wie Split- und Mergeeffekten⁹ sowie insbesondere zum Abreißen von Tracks oder Übersehen von Objekten (False Negatives). Als Gegenmaßnahme werden in der Literatur wiederum verschiedene Ansätze genannt, wie zum Beispiel die Nutzung von Hidden Markov Modellen oder regressionsbasierten Bewegungsschätzern (Leich, Junghans et al. 2015). Während viele Beiträge in der Literatur einen starken Fokus auf die Bildverarbeitungsverfahren legen, erfolgt in (Laureshyn 2010) eine Darstellung der gesamten Methodenkette bis in die Ebene der Anwendung im Bereich der automatisierten Erfassung von Verkehr im Anwendungsfeld der Verkehrskonflikttechnik. Der Beitrag beleuchtet weitere grundlegende Herausforderungen bei der alleinigen Verwendung von Monokameraansätzen wie zum Beispiel die performante Erfassung von Objektpositionen durch die unterschiedlichen Blickwinkel in eine Szene und die teils komplexen Fahrzeugstrukturen. Die Ansätze ermöglichen je nach Anbaupunkt und technischen Rahmenbedingungen der verwendeten Kamertechnik die Überwachung von Arealen mit Knotenpunktcharakter, wie zum Beispiel komplexe Kreuzungen, mehrstreifige Kreisverkehre oder einzelner Kantenzüge. Die technischen Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens ermöglichen mittlerweile neue fachliche Ansätze unter Nutzung von tiefen neuronalen Netzen (CNN), wie zum Beispiel in (Ćorović, Ilić et al. 2018) ausgeführt, die allerdings nur einige der genannten Problemfelder adressieren.

Das BMWi geförderte Verbundprojekt UR:BAN mit einer Laufzeit bis 2016 hatte die Zielstellung einer sichereren und effizienteren Verkehrsgestaltung mit dem Fokus auf innerstädtisches Verkehrsgeschehen (UR:BAN-Konsortium 2016). Das Teilprojekt Vernetztes Verkehrssystem hatte den Auftrag der Entwicklung neuer Technologien zur Erhöhung der Kapazitäten in städtischen Straßennetzen, der Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sowie der Erhöhung der Sicherheit. Hierfür wurden vernetzte FAS-Konzepte für eine vorausschauende Führung von Fahrzeugen durch den Stadtverkehr entwickelt und prototypisch erprobt, wie zum Beispiel ein Kreuzungslotse, ein Grüne

⁹ Darunter verstehen sich eine ungewollte Zusammenführung nahe zusammenliegender physischer Objekte bzw. die Aufspaltung eines physischen Objekts in mehrere Tracks, wie unter Catalá Prat (2010) beschrieben.

Welle- sowie ein Verzögerungsassistent. Teil dieser kooperativ ausgelegten Systeme war neben der Nutzung fahrzeuggestützter Quellen und V2X Kommunikation der Einsatz von infrastruktureller Erfassung auf Basis von Radartechnologie. Ein vom DLR aufgebautes System wurde in Braunschweig für das Projekt an einem komplexen vierarmigen Knotenpunkt aufgebaut und betrieben. Das Systemkonzept der Erfassungslösung basiert auf der Nutzung von vier Radarsystemen, welche paarweise gegensinnig orientiert in ca. 6 m Höhe an die zentralen Lichtsignalmasten angebracht wurden, um die jeweils gegenüberliegenden Kreuzungsbereiche sensorisch zu erfassen. Die technische Ableitung einer fahrzeuggestützten Architektur ermöglichte die Vernetzung und Fusionierung der Radarsysteme auf Objektebene. Die Fokusbereiche lagen dabei auf der Detektion der äußeren Bereiche der Kreuzung mit den Aufstellflächen und in den Armen zur Realisierung einer zeitlich und räumlich fein aufgelösten Verkehrslageschätzung und -prognose im Sinne von Rückstaulängen, Reise- und Wartezeiten als Grundlage für die entsprechenden FAS-Applikationen. Im Rahmen des Projekts konnte das vorgestellte Architekturkonzept erfolgreich erprobt werden und wurde für die Instrumentierung einer weiteren Kreuzung in Düsseldorf genutzt (Mosebach, Frankiewicz et al. 2016). Allerdings entspricht die erreichte Informations- und Qualitätsebene der technischen Lösung nicht die im Rahmen der Arbeit anvisierte Ausprägung.

Ein alternativer Systemansatz auf Basis von Lidar-Technologie als Grundlage für Interaktionsanalysen findet sich in (Zhao, Cui et al. 2009). Dieser basiert auf einer Fusion von Punktwolken aus mehreren horizontal scannenden Laserscannern, die auf einer Höhe von ca. 40 cm über der Fahrbahn die Konturen von Verkehrsteilnehmern wie Fahrzeuge und die Beine von Fußgängern erfassen. Dabei müssen mehrere Systeme vernetzt genutzt werden, um mit den bereits beschriebenen Verdeckungseffekten umgehen zu können. Im vorliegenden Fall wurden für die Nutzung an einer dreiarmigen urbanen Kreuzung sechs Systeme zusammengeschaltet. Der Systementwurf sieht eine Fusionierung der Daten aus den Scannern auf Featureebene vor, indem die Punktwolken in ein gesamtheitliches Modell zusammengeführt werden. Aus diesem werden mittels Clusteringverfahren dann Objekte abgeleitet. Die Autoren beschreiben die Möglichkeit der Fusionierung von Laserscannerdaten mit denen aus weiteren Sensortechnologien. Dies wird allerdings im Rahmen der geschilderten Arbeiten nicht ausgeführt. Verfügbare korrespondierende Kameradaten werden lediglich für eine Szenenvalidierung genutzt.

Den Schritt der Fusion von Laserscannerdaten mit anderen Sensoren findet sich zum Beispiel in (Alexander, L., Cheng, Pi-Ming et al. 2006), auch bereits dargestellt in (Alexander, Lee, Cheng, Pi-Ming et al. 2006). Hier wird ein System vorgestellt, welches Laserscannersysteme mit Radarsensoren zusammenführt. Die Motivation der Arbeiten liegt wiederum in der Gewinnung eines tieferen Verständnisses über verkehrliche Interaktionsformen, hier insbesondere Problemstellungen bei der Lückenwahl für ein Einschneiden in den Fließverkehr bei Landstraßenkreuzungen. Interessant ist der Beitrag auch durch die explizite Formulierung von Anforderungen an eine Langzeitstudie, in diesem Fall jeweils volle zwei Monate an acht spezifischen Kreuzungen. Daher liegt ein Augenmerk auf einem robusten und wettertauglichen Systemdesign. Die genaue Fusionsarchitektur wird leider nur bedingt ausgeführt. Es lässt sich aber ableiten, dass die Daten in einem mehrschrittigen Verfahren verarbeitet werden, wobei die Laserscannerdaten wieder mithilfe von Clusteringverfahren in Objekte überführt werden, um dann mit den radarbasierten Objekten in ein fusioniertes Modell zusammengeführt zu werden. Wie in vielen der bisher genannten Verfahren wird zusätzlich eine hochgenaue Karte als Grundlage einer Filterung der Objektdaten im Sinne einer Plausibilisierung genutzt.

Einen weiteren Ansatz für komplexere Fusionsansätze liefert das BMWi geförderte Verbundprojekt Ko-FAS (Forschungsinitiative Ko-FAS 2009). Das Projekt, welches bis Ende 2013 lief, hatte die Zielstellung einer Steigerung der verkehrlichen Sicherheit mit dem Schwerpunkt auf urbane Verkehrssituationen. Der Fokus lag dabei auf dem Gebiet der Unfallvermeidung und Vermeidung von Unfallfolgen durch den Einsatz kooperativer Fahrerassistenzsysteme. Das Projekt gliederte sich in drei Teilprojekte, die verschiedene Aspekte abdeckten. Das hier relevante Teilprojekt Ko-PER erarbeitete Konzepte für eine kooperativ angelegte und möglichst vollständige Erfassung der lokalen Verkehrsumgebung, die sich für eine Bewertung möglicher verkehrlicher Risiken in komplexen

Knotenpunktbereichen auf den Einsatz messtechnischer Infrastruktur abstützte. Im Rahmen des Projekts wurde unter anderem eine innerstädtische Kreuzung in Aschaffenburg als „öffentliche Musterkreuzung“ technisch ausgestattet, so dass das resultierende System die Detektion und Verfolgung von Verkehrsteilnehmern im lokalen Umfeld unter Echtzeitbedingungen ermöglichte. Der Abschlussbericht (Wertheimer 2014) gibt eine detaillierte Einsicht in die Kernpunkte der konzeptuellen und technischen Ausgestaltungen im Rahmen des Projekts. Ausgehend von einer Anforderungsanalyse wurde ein spezifisches Sensorkonzept erarbeitet, welches den Einsatz unterschiedlicher Sensortechnologien umfasste. Abbildung 17 zeigt einen Überblick mit den jeweiligen Aufgabenfeldern der verwendeten Sensorsysteme.

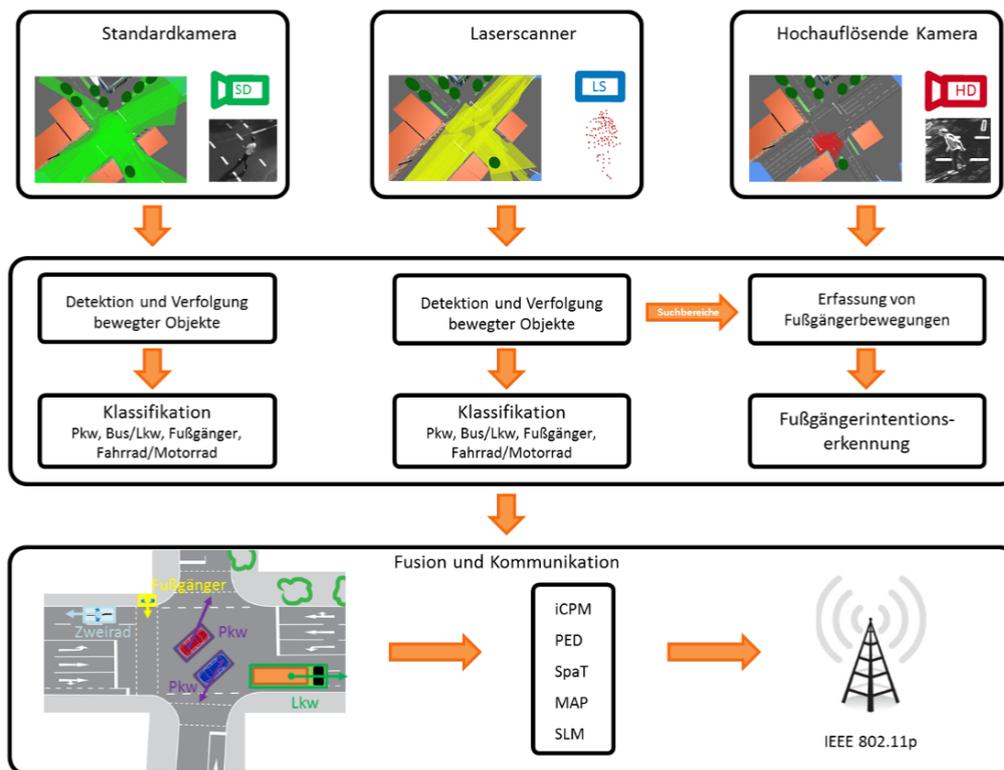


Abbildung 17: Überblick über das Ko-PER Kreuzungsperzeptionssystem aus (Wertheimer 2014)

Das Systemkonzept sieht den Einsatz von Monokameratechnik vor, um auf Kreuzungsarmen möglichst frühzeitig ankommende Fahrzeuge erfassen und klassifizieren zu können. Dazu wird ein Netzwerk von Laserscannern zur Erfassung und Klassifikation von Fahrzeugen, Zweirädern sowie Fußgängern im Zentralbereich der Kreuzung und auf den Zufahrten verwendet. An einem spezifischen Punkt des Kreuzungsinnenraums wird zusätzlich ein Stereokamerasystem zur Erkennung von Fußgängerbewegungen und zur Ableitung von Intentionen genutzt. Die Prozessierung der Sensordaten erfolgt parallelisiert bis zur Objektebene, auf der sie dann zu einem Gesamtmodell fusioniert werden. Das System klassifiziert in einem 4+1 Schema PKW, LKW, Zweirad und Fußgänger. Die Erfassungsbereichweite für zwei Hauptarme und einen Seitenarm der vierarmigen Kreuzung wird im Bericht zwischen 40 und 70 m angegeben. Die mittleren Positionsfehler liegen dabei zwischen 15 cm bei der Fußgängerfolgung bis 50 cm bei der Erfassung von Fahrzeugen (Meißner, Reuter et al. 2014). Weitere Angaben zur Leistungsfähigkeit des Systems wie zum Beispiel die Trennfähigkeit von Personengruppen, die Fähigkeiten und Grenzen der Verfolgung bei teilweisen Blickwinkelverdeckungen oder die Güte der Fahrzeugdimensionen werden nicht aufgeführt.

Das EU finanzierte Integrierte Projekt SAFESPOT mit einer Laufzeit bis 2010 verfolgte ebenfalls den Ansatz der Steigerung der Verkehrssicherheit durch die Anwendung kooperativer FAS. Relevant ist im vorgegebenen Kontext insbesondere das Subproject 2 INFRASENS mit dem Fokus einer Zusammenführung von fahrzeug- und infrastruktur-basierten Erfassungslösungen zur Situationsaufbereitung und -verarbeitung. Dabei wurde ein Konzept entwickelt, das eine echtzeitfähige

Erfassung und Situationsinterpretation mit einer Roadside Unit (RSU) für den Austausch von Daten mit instrumentierten Verkehrsteilnehmern auf Basis von 802.11p erlaubt (SAFESPOT Konsortium 2009). Abbildung 18 zeigt ein grundlegendes Aufbauschema.

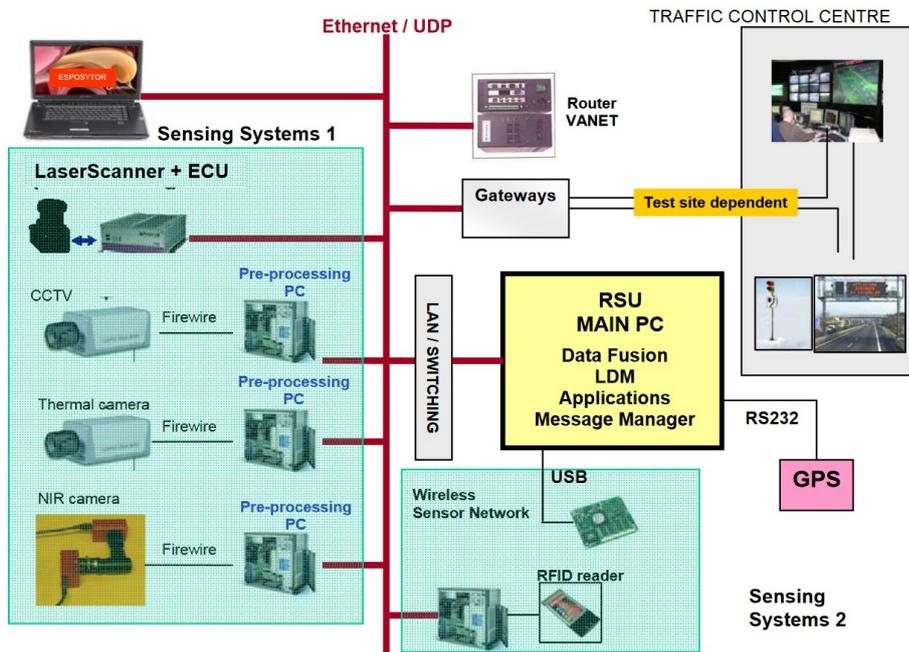


Abbildung 18: SAFESPOT Aufbauschema der Plattformlösung aus (SAFESPOT Konsortium 2009)

Das Konzept sieht eine Fusion der verschiedenen vernetzten Sensorsysteme auf der Objektebene vor. Aus diesen speist sich eine Local Dynamic Map (LDM), die statische und dynamische Informationen auf vier Ebenen vorhält. Anders als in vielen anderen Beispielen entspricht die dargestellte Lösung nicht nur einem spezifisch ausgelegten technischen Ansatz zur Erfassung und messtechnischen Verfolgung von Verkehrsteilnehmern, vielmehr handelt es sich um ein Plattformkonzept für die systematische Zusammenführung von nicht vorab spezifizierten Sensorsystemen in verschiedenen verkehrlichen Umgebungen. Die Aufgaben liegen neben der eigentlichen Erfassung von Verkehrsteilnehmern in der Detektion äußerer Einflüsse auf die Fahrsicherheit wie Witterungs- und Beleuchtungsbedingungen als moderierende Faktoren für spezifisch ausgelegte Gefährdungsanalysen. Im Rahmen des Projekts erfolgte eine prototypische Ausgestaltung des Konzepts mit unterschiedlichen Schwerpunkten an sechs verteilten Orten in Europa. Dabei kamen verschiedene Sensortechnologien zum Einsatz, wie Kameras und Laserscanner, die auf ihre Anwendbarkeit und Systemgrenzen hin untersucht wurden (SAFESPOT Konsortium 2010). Unabhängig von der (laut Autoren recht eingeschränkten) Leistungsfähigkeit der Einzellösungen wurden die bereits dargestellten technischen Problemstellungen in der sensorischen Verarbeitung deutlich, die in der hohen Komplexität der messtechnischen Aufgaben begründet liegen.

Neben den bereits genannten Projekten gibt es noch weitere öffentlich geförderte Projektaktivitäten, die noch nicht abgeschlossen sind. Daher ist die verfügbare Informationslage für diese Projekte aktuell noch sehr eingeschränkt. Obwohl sie damit für eine vergleichende Analyse von verwandten Arbeiten nicht näher herangezogen werden können, sollen sie an dieser Stelle genannt werden, um die grundsätzlichen Ziele und thematischen Bezüge zu verdeutlichen und Ansatzpunkte für spätere Recherchen zu ermöglichen. So stellt sich das europäisch geförderte Projekt ICT4CART (ICT4CART Konsortium 2020) aktuell der Aufgabe der Konzeption einer Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (IKT) als Grundlage für die Nutzung in Automationsfunktionen mit SAE Level 3 und 4. Eine Teilaufgabe liegt dabei in der Stützung einer automatischen Kreuzungsdurchführung mithilfe infrastruktureller Sensorinformationen. Erkennbar ist hier der Schritt der Forschungsthemen vom Bereich kooperativer FAS-Systeme in die Richtung des AVF-Themenfelds. Dieses wird auch in dem BMWi geförderten Projekt MEC-View (MEC-View Konsortium 2017) adressiert. Aufgehend von der Herausforderung einer Implementierung von

hochautomatisierten Lösungen im Mischverkehr wird in diesem Projekt ein Konzept für vernetzte Infrastrukturelemente auf Basis von in Lichtmasten verbauter Sensorik aufgebaut und ihr Nutzen für die robuste und sichere Realisierung automatisierter Fahrfunktionen in urbanen Szenarien evaluiert. Analog zu den anderen aufgeführten Aktivitäten im Bereich der kooperativen Systemstrukturen liegt die grundlegende Motivation dabei in einer sinnhaften Erweiterung fahrzeuggebundener Umfeldsensorik.

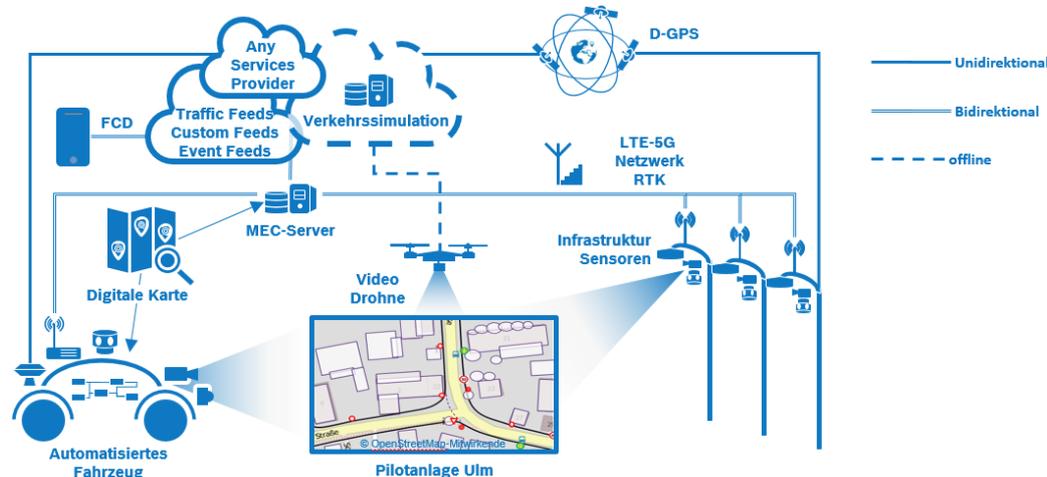


Abbildung 19: Kommunikationsschema des MEC-View Konzepts aus (MEC-View Konsortium 2017)

Das BMVI geförderte Projekt KoMoDnext (BMDV 2020a) fokussiert weniger auf die Fahrzeugfunktionen selbst, sondern mehr auf den Forschungsbereich der Verkehrsinfrastruktur im städtischen Umfeld und zielt darauf ab diese auf die kommenden Generationen des automatisierten Fahrens vorzubereiten. Dies führt zur konsequenten Fortführung der Digitalisierung von Verkehrsinfrastruktur. Konkret sollen im Projektverlauf ausgewählte Netzabschnitte im Testfeld in Düsseldorf für eine Nutzung mit Level 4-Automationslösungen ertüchtigt werden. Der Fokus liegt dabei auf der Umfeldabsicherung. Die Anforderungen und Ausgestaltungskonzepte basieren auf der weiteren Verschmelzung infrastruktureller Erfassung mit der fahrzeugbasierten Welt, um so die Ausbildung von kooperativen Systemverbänden zur Detektion von Verkehrsteilnehmern in Knotenpunktbereichen sowie die Zusammenführung und Bereitstellung dieser Informationen in Echtzeitbedingungen für eine prädiktive Perzeption durch Vernetzungsansätze zu ermöglichen.

Das BMU geförderte Projekt HEAT (Hamburger Hochbahn AG 2021) adressiert die höchste Stufe im Automationsspektrum und hat zum Ziel elektrisch angetriebene, vollautomatisiert fahrende Kleinbusse im realen Verkehrsgeschehen der Hamburger Hafencity zu etablieren. Wie in KoMoDnext wird auch hier eine vorrangige Problemstellung in der Umfeldabsicherung der automatisierten Lösung gesehen. Dafür soll eine messtechnische Infrastruktur aufgebaut werden, die dann in Kombination mit den jeweiligen fahrzeugeigenen Systemen einen sicheren Fahrgastbetrieb mit innenstadtypischen Geschwindigkeiten erlauben. Hierbei soll die Infrastrukturseite neben einer sicheren Kommunikationslösung mit „aktiver sowie passiver“ Sensorik ausgestattet sein, die eine entsprechend performante Erfassung des dynamischen Verkehrsgeschehens um die Shuttles herum garantiert.

4.2 Infrastrukturelle verkehrliche Erfassung im Bereich digitaler Testfelder

Wie bereits in Abschnitt 1.1.3 ausgeführt, spielen digitale Testfelder eine relevante Rolle in der Forschung und Entwicklung von innovativen Mobilitätskonzepten, insbesondere dem AVF unter Verwendung intelligenter Infrastrukturelemente zur Erfassung von Verkehr. So wurden oder werden einige der im vorigen Abschnitt benannten Aktivitäten unter Nutzung von Testfeldern durchgeführt, wie zum Beispiel das bereits vorgestellte Testfeld KoMoD in Düsseldorf, welches im Rahmen der gleichnamigen Förderprojekte in seinem Leistungsportfolio weiterentwickelt werden soll. Die folgende Aufstellung reflektiert die aktuell verfügbare Informationslage über Ansätze,

Rahmenbedingungen und Leistungsumfänge verkehrlicher Erfassungslösungen in automotiven Testfeldern in Deutschland, ausgehend von (BASt 2022; BMDV 2020b) und weiteren vorhandenen Informationsquellen.

Das Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg (TAF-BW) setzt den Fokus auf die Erprobung von Technologien und Dienstleistungen für vernetztes und automatisiertes Fahren in unterschiedlichen Anwendungsfeldern, gerade auch im innerstädtischen Bereich. Der Umfang des Testfelds lässt sich in gebündelter Form einem Leistungskatalog entnehmen (Karlsruher Verkehrsbetriebe GmbH 2019). Neben anderen Aspekten wie Prüfständen, Testfahrzeugen, teils mit Kommunikation ausgerüsteten Streckenanteilen im öffentlichen und abgeschlossenen Raum sowie simulationsbasierten Bausteinen ist hier insbesondere der Bereich der „Bereitstellung von Objektlisten“ relevant. Dabei werden zwei ausgewiesene mehrstreifige Kreuzungsbereiche aufgeführt, in deren Bereich Echtzeit- oder Offlinedaten zu Verkehrsteilnehmern verfügbar sind. Hierfür wird als sensorische Basis der Einsatz von Sensornetzwerken aus drei bzw. vier Kameras benannt. (Fleck, Daaboul et al. 2018) führt die Arbeiten tiefer aus und beleuchtet die Nutzung tiefer neuronaler Netzstrukturen für die Detektion von Verkehrsteilnehmern in der Bildebene der Kameras. Nachgeschaltete Prozesse ermöglichen die Überführung in den 3D-Raum als Konturfläche auf der Fahrbahn und die gemeinsame Fusion auf Merkmalebene in ein Gesamtmodell, auf dem ein nachgelagerter Multi-Target-Trackingprozess läuft. Die Ausgestaltung des Klassifikators wird im Text nicht ausgeführt. Die verfügbaren Informationen legen eine Klassifikation in motorisierten Verkehr, Radfahrer und Fußgänger nahe. In (Fleck, Daaboul et al. 2018) wird auch die Motivation der Trajektorienfassung genannt. Abbildung 20 zeigt die Architektur für den Aufbau einer lokalen intelligenten Infrastruktur für die Nutzung in den bereits angesprochenen Feldern für Anwendungen für AVF.

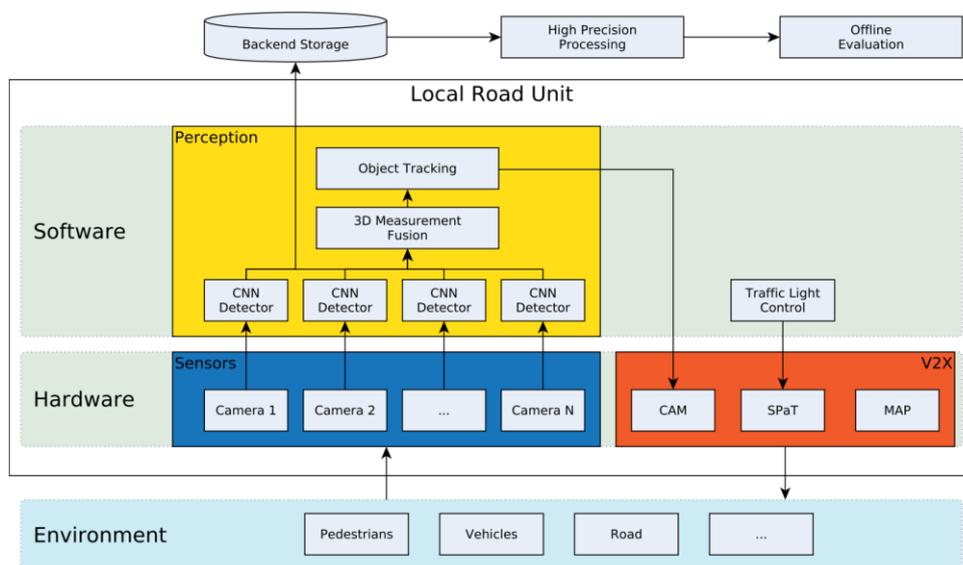


Abbildung 20: Architektur der lokalen intelligenten Infrastruktur im TAF-BW aus (Fleck, Daaboul et al. 2018)

Die Abbildung zeigt die Möglichkeiten einer Nutzung der Tracks unter Echtzeitbedingungen über den Empfang von standardisierten Cooperative Awareness Messages (CAM) (ETSI 2011), die über 802.11p verfügbar gemacht werden sowie in Form von Offlinedatenpaketen.

Das Digitale Testfeld Autobahn (BMDV 2017a) soll als „Labor unter Realbedingungen“ Wirtschaft und Forschung ermöglichen, neueste Technologien im realen Verkehr zu erproben und weiterzuentwickeln. Hierfür wurden wiederum mehrere technische Maßnahmen gebündelt, die die Verfügbarkeit einer hochgenauen Karte, die Platzierung von Landmarkenschildern für die Erfassung und Verortung automatisierter Fahrzeuge sowie die Sicherstellung einer Mobilfunklösung zur Datenübertragung umfasst. Daneben soll die Strecke mit radarbasierter Sensorik ausgestattet werden, die eine echtzeitbasierte Erfassung der Verkehrsteilnehmer zur Generierung von Verkehrsfluss, Verkehrsdichte, Geschwindigkeit sowie dem Fahrverhalten erlauben. Hierbei werden in dem

aktuell laufenden Förderprojekt KoRA9 (BMDV 2017b) Radarsysteme auf Basis einer Trägerfrequenz von 77 GHz entwickelt und für den Einsatz als Infrastruktursensor erprobt. Darüber hinaus beinhaltet das Projekt das Ziel diese Daten zu aggregieren, aufzubereiten über eine zentrale Datenbank in die Fahrzeuge zu übertragen. Das technische Konzept sieht vor die Radarsensoren in jedem Leitpfosten entlang der Teststrecke zu verbauen, sodass eine flächendeckende Erfassung des Verkehrs erreicht werden kann (Technische Universität München 2017). Der Detailgrad der später verfügbaren Daten wird nicht weiter ausgeführt.

Im Rahmen des Förderprojekts DIGINET-PS (BMDV 2021a) wurde ein digitales Testfeld für die Entwicklung des automatisierten vernetzten Fahrens im urbanen Verkehrsumfeld erarbeitet. Zielstellung ist hierbei die Schaffung einer „offene[n] und skalierbare[n] Plattform für die Erprobung des automatisierten und vernetzten Fahrens“ (Technische Universität Berlin 2019b). Das grundlegende Konzept basiert auf der Vernetzung von Fahrzeugen mit Edge- und Cloudkomponenten für die Realisierung verschiedener intelligenter Systemlösungen zur Verbesserung der Verkehrsflüsse, Fahrerentlastung, Schaffung neuer Wertschöpfung und Umweltschonung. Die hierfür aufgebaute Protokollstrecke des Autonomous Driving Playground Testbed (ADP) der TU Berlin (Technische Universität Berlin 2020) umfasst einen 3,7 km langen Streckenbereich mit sechs Fahrstreifen und zwei integrierten mehrstreifigen Kreisverkehren. Abbildung 21 zeigt eine Visualisierung des Konzepts als Screenshot aus einem verfügbaren Informationsvideo von der Projekt-Webseite (Technische Universität Berlin 2019a).

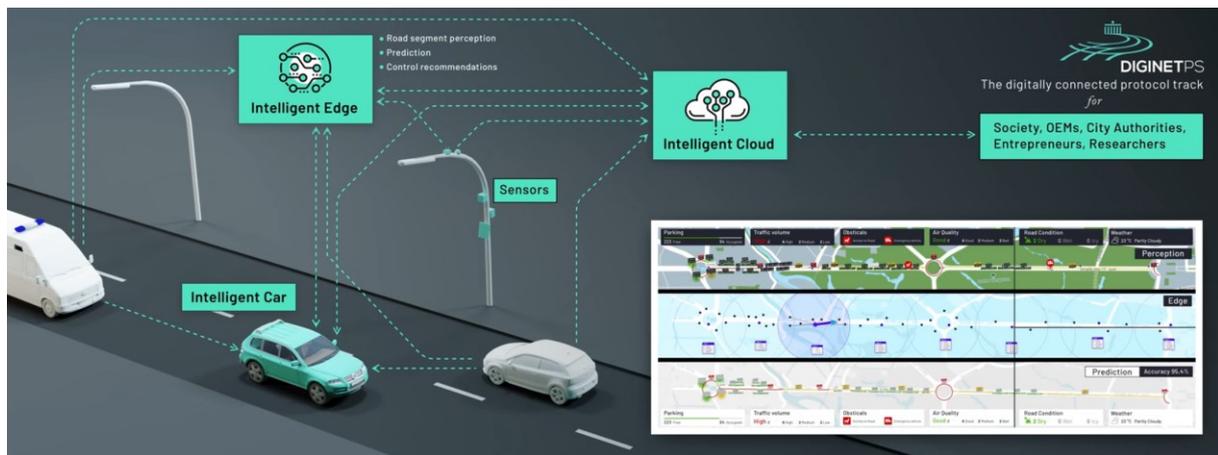


Abbildung 21: Visualisierung des Systemkonzepts von DIGINET-PS aus (Technische Universität Berlin 2019a)

Verschiedene Sensorsysteme und Kommunikationstechnologien ermöglichen die Erfassung, Verteilung und Verarbeitung verkehrlicher Zustandsdaten, Lichtsignalen, Parkplatzbeleginformationen wie auch relevanten äußeren Faktoren wie Niederschlag, Witterung und Emissionsdaten. Beispielanwendungen liegen dabei u.a. im Bereich der Verkehrssteuerung, des Parkplatzmanagements und Einsatzes adaptiver Straßenbeleuchtung wie auch in Funktionen zur Erhöhung der Sicherheit, zum Beispiel durch Glatteiswarnungen. Der Bereich der verkehrlichen Erfassung aus der Infrastruktur heraus wird in den verfügbaren Quellen leider kaum ausgeführt. Benannt wird eine messtechnische Erfassung mit Möglichkeiten einer Prädiktion von verkehrlichen Zuständen auf Basis von Verkehrsüberwachungskameras. Die genaueren Rahmenbedingungen und Qualitätsparameter der Datenerfassung werden allerdings nicht benannt, gleiches gilt für genauere Angaben zur Architektur des Testfelds. Mit dem Förderprojekt BeIntelli (BMDV 2021b) wurde zum Beginn des Jahres 2021 ein anschließendes Fördervorhaben gestartet, welches unter anderem eine Erweiterung der dargestellten Infrastruktur zum Ziel hat. Hierbei soll in der Projektlaufzeit bis Mitte 2023 das bereits bestehende digitale Testfeld verlängert und Richtung Kurfürstendamm und Berliner Reichstag erweitert werden. Dies umfasst die Installation von weiterer Sensorik, einer Edge-Infrastruktur sowie einer 5G-Kommunikationsinfrastruktur (Technische Universität Berlin 2021).

Die Teststrecke für automatisiertes und vernetztes Fahren in Hamburg (TAVF-HH) umfasst eine 9 km lange Teststrecke in der Innenstadt von Hamburg (Geschäftsstelle Teststrecke automatisiertes und vernetztes Fahren Hamburg 2019). Die Stadt möchte damit Forschungs- und

Entwicklungsschwerpunkte von AVF im urbanen Raum bis SAE Level 4 unterstützen und dafür eine barrierefreie Daten- und Dienstplattform schaffen, die unter anderem Daten aus Wärmebild- und Kamerasystemen zum dynamischen Verkehrsgeschehen ableitet. Diese bilden zukünftig die messtechnische Basis für eine kooperativ ausgelegte infrastrukturelle Umfeldsensorik für vernetzte Automationsfunktionen. Die Teststrecke wurde 2020 fertig gestellt und geplant bis Ende 2024 schrittweise erweitert werden. Diese Erweiterung schließt die Integration von erweiterten ITS-Diensten wie Schutzmaßnahmen für schwache Verkehrsteilnehmer, die Bereitstellung von Verkehrszeicheninformation oder die Verkehrsdatenerfassung ein (Geschäftsstelle Teststrecke automatisiertes und vernetztes Fahren Hamburg 2021).

Es existieren neben den öffentlich geförderten Testfeldern für die Forschung und Entwicklung im vorwettbewerblichen Bereich auch noch weitere, die durch die Industrie aufgebaut und mit dem Zweck einer produktnahen Entwicklung und Erprobung betrieben werden. Ein Beispiel hierfür liefert die Continental AG, die in einer Pressemitteilung (Continental AG 2020) ankündigte, dass sie verschiedene Systemkonzepte mit dem Ziel der Steigerung von Effizienz und Sicherheit an urbanen Knotenpunkten auf Basis vernetzter Systemstrukturen testet. Dies erfolgt in drei nicht näher benannten „Smart City Living Labs“ in Deutschland, den USA und China, wo die Erprobung im realen Verkehrsgeschehen stattfinden soll. Dabei wird die Entwicklung einer „intelligenten Kreuzung“ benannt. Das Konzept umfasst die Nutzung von Kamera- und Radarsensorik für die Erfassung von Objekten im Kreuzungsbereich, die dann in ein Umfeldmodell zusammengeführt werden und als Grundlage für die Ausgestaltung von Funktionen wie Haltelinienerkennung, Stauererkennung sowie die „Erkennung und Kommunikation von verdeckten Fußgängern“.

4.3 Rahmen- und Referenzarchitekturen für intelligente Verkehrssysteme

Der intendierte Anwendungsrahmen der Erhebungsmethode im Kontext von C-ITS motiviert einen Einblick in bekannte Bestandsarchitekturen aus dem entsprechenden Bereich. Dabei erscheinen insbesondere die Arbeiten interessant, die sich nicht nur auf die Ebene einzelner technischer Realisierungen beziehen, sondern dabei ein gesamtheitlicheres Herangehen aus einer übergreifenden Sichtweise anstreben, was ja ebenfalls der grundlegenden Idee und Vorgehensweise innerhalb dieser Arbeit nahekommt.

Ein guter Ansatzpunkt hierfür findet sich in der IVS-Rahmenarchitektur für Deutschland. Die Zielstellung in der Rahmenarchitektur liegt in der Schaffung eines ganzheitlichen Umsetzungsrahmen für die Realisierung aller Aspekte von ITS-Architekturen. In (FGSV 2012a) wird hierfür eine methodische „Orientierungs- und Strukturierungshilfe“ geboten, um „eigene Aufgabenstellungen in einen übergreifenden Rahmen einordnen und daraus resultierende Vorstellungen erklären zu können.“ Zentrales Element ist dabei die in Abbildung 22 dargestellte Pyramide zur Systematisierung des Zusammenhangs unterschiedlicher Modellebenen, angefangen vom strategischen Ziel bis hin zu den eingesetzten Technologien.

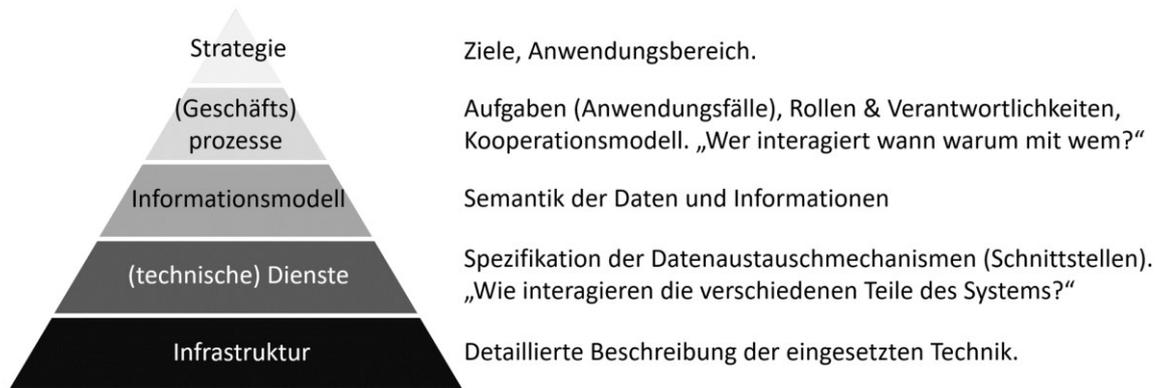


Abbildung 22: Pyramide als Grundstruktur für Gestaltungskontexte von ITS nach (FGSV 2012a)

Der Betrag schafft damit ein grundlegendes Ordnungsprinzip für die Entwicklung von ITS Anwendungen. Dabei wird der Begriff der Rahmenarchitektur von dem der Referenzarchitektur unterschieden. Während die Rahmenbildung die Zielstellung einer Konsensbildung über die Beziehung „alle[r] ins Auge gefassten Maßnahmen“ verfolgt, setzt die Ebene der Referenzarchitekturen tiefer an und entspricht einem „Lösungsmodell, das aus den abstrakten Konzepten der Rahmenarchitektur“ ableitbar ist und als Grundlage der spezifischen Ausgestaltung von tatsächlich realisierten Systemen dienen soll. Obgleich also der Abstraktionsgrad, der eingenommen wird, deutlich über der dieser Arbeit steht, lässt sich diese sich doch gut in den Kontext des Geschilderten einordnen: Strategie und Anwendungsbereiche sind durch Kapitel 1 beleuchtet und definiert. Ebenso liegt eine grundlegende Definition der maßgeblichen Daten und Informationen durch die in Abschnitt 1.2.3 dargelegten Anwendungsbereiche im C-ITS-Kontext vor. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lässt sich im Bereich der Entwicklung einer Referenzarchitektur für eine Dienstestruktur mit ihren Verknüpfungen in Richtung der technischen Ausgestaltungen unter Einbeziehung einer prozessualen Sichtweise einordnen. Dabei lässt sich aus dem Blickwinkel der betrieblichen Integration festhalten, dass die verschiedenen Sichtweisen auf die Architektur nicht nur eine technische Sicht bedingen, sondern auch die Auseinandersetzung mit Rollen und betrieblichen Prozessen beinhaltet. Für tiefere Einblicke in die IVS-Rahmenarchitektur samt Analysen und Überblick über weltweite Bestrebungen für nationale ITS-Architekturen sowie deren Einordnung in einen systematisierten Kontext sei an dieser Stelle auf (Krüger 2013) verwiesen.

In (FGSV 2012a; Krüger 2013) werden Beispiele für bekannte ITS-Referenzarchitekturen benannt, wie zum Beispiel das Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ) (BMVI 2018). Diese definiert Vorgaben und Randbedingungen für die Konzeption von Verkehrsrechnerzentralen (VRZ) und Unterzentralen (UZ) für den Anwendungsbereich von Verkehrsbeeinflussungsanlagen. Das fachliche Ziel dieser Systeme liegt in einer Harmonisierung und Steuerung von Verkehrsflüssen. Abbildung 23 zeigt dabei zwei grundlegende Sichten auf die Architektur.

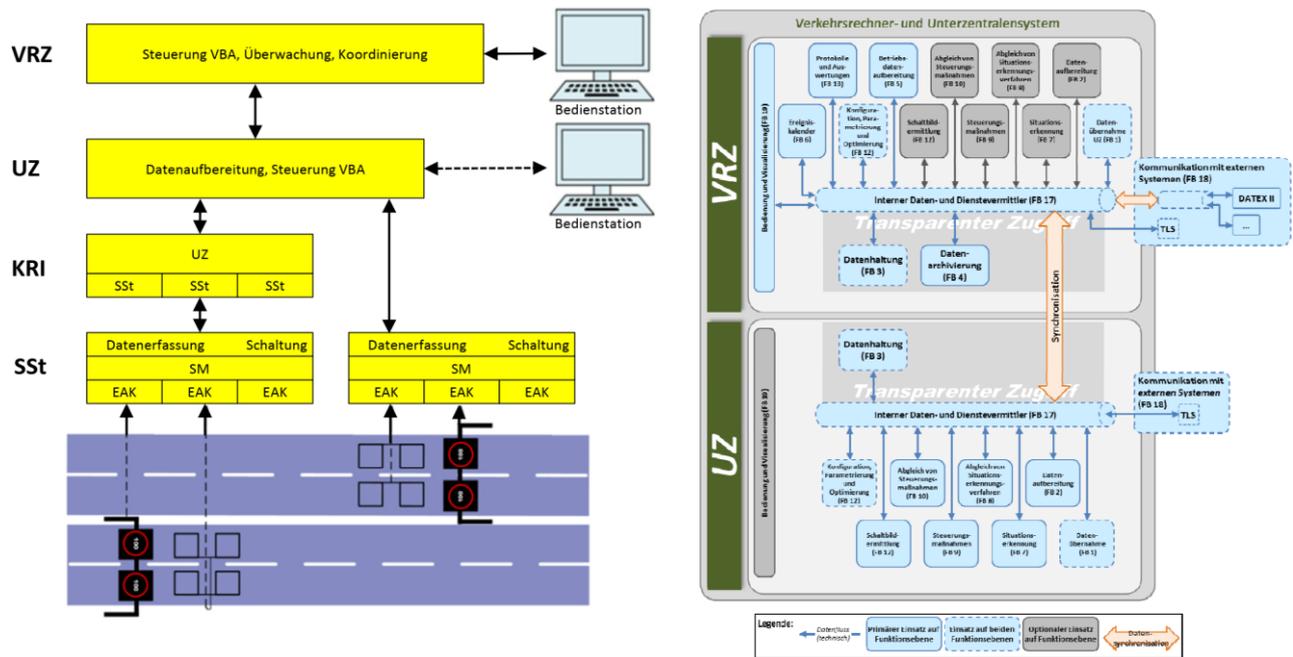


Abbildung 23: Architekturprinzipien des VRZ-IUZ-Systems Links: Funktionsebenen des Systems Verkehrseinflussung, rechts: Technische Architektursicht mit Kapselungsprinzip über den „Daten- und Dienstvermittler“ aus (BMVI 2018)

Die linke Abbildung schlüsselt verschiedene funktionale Systemebenen und -bereiche auf, in denen die Aufgaben der messtechnischen Erfassung der verkehrlichen Zustände, deren Verarbeitung mit Bezug zu von außen eingespeisten Umweltdaten (wie Wetterdaten oder Tagesereignissen), der Erarbeitung von Stellgrößen für die Schaltung der Anzeigequerschnitte sowie die Steuerung und Überwachung der verschiedenen Systemanteile erfolgen. Obgleich die fachlichen Aufgaben der Anlagen von den in dieser Arbeit verfolgten Zielen abweichen, zeigen sich dabei grundlegende Prinzipien einer auf Betriebssicherheit ausgelegten und technologieunabhängig beschriebenen Systemarchitektur. So beinhalten die vielfältigen Anforderungen an die Ausgestaltung solcher Systeme eine klar definierte Organisations- und Ablaufstruktur mit Aufgaben sowie einer Zuordnung auf Rollen mit entsprechenden Kompetenzen und Verantwortungen. Zugangsmöglichkeiten auf das System werden soweit möglich reduziert und sollen für die Akteure servicebezogen abgebildet werden. Die rechte Seite von Abbildung 23 zeigt einen Einblick in die technische Architekturebene mit dem Prinzip eines „internen Daten- und Dienstvermittlers“, welcher die Kommunikation mit den systemexternen Systemanteilen kapselt. Es werden darüber hinaus umfangreiche Vorgaben für die Etablierung eines Datenqualitätsmanagements vorgegeben, die u.a. eine Plausibilitätsprüfung der Datenlage wie auch des Anlagenzustands umfasst.

Auf europäischer Ebene wurde im Förderprojekt C-Mobile ebenfalls eine Referenzarchitektur für C-ITS erarbeitet (C-Mobile Konsortium 2017). Zielstellung des Projekts war die Grundlage für einen großmaßstäblichen Einsatz von C-ITS in Europa zu schaffen. Dies sollte durch die Schaffung einer Zusammenführung und Harmonisierung bekannter Architekturen in eine einzige homogene Referenzarchitektur ermöglicht werden, welche zukünftig als Basis für die Entwicklung konkreter, umsetzungsfähiger Architekturen dient. Die gewählte Beschreibungsebene der Referenzarchitektur fokussiert dabei Schnittstellen und Protokolle dabei über bestehende technische Standards hinweg. Die Beschreibungs- und Zielebene liegt hierbei wiederum deutlich über der hier gestellten Arbeitsstellung. Interessant sind allerdings die analysierten Ansätze und Architekturen aus diversen Projekten und Aktivitäten des internationalen Arbeitskontextes, welche auf technischen Kommunikationsprinzipien zwischen Verkehrsteilnehmern, wie auch mit intelligenten Infrastrukturen beruhen. Dabei lässt sich festhalten, dass sich eine messtechnische Infrastruktur mit dem in dieser Arbeit verfolgten Leistungsspektrum in nahezu keiner der aufgeführten Referenzen

wiederfindet¹⁰. Dies begrenzt die Ableitungsmöglichkeit direkter Anforderungen und Ansatzpunkte an die hier zu entwickelnde Konzeptionsebene. Das in C-MoBILE verfolgte Ziel einer schrittweisen Konkretisierung einer tatsächlichen implementierungsfähigen Systemspezifikation aus einer abstrahierten Referenzsicht heraus bestätigt allerdings den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Weg.

4.4 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Die Literatur reflektiert die in der Einleitung dieser Arbeit dargestellten Bedarfe und Motivation für die Steigerung der Effizienz und Sicherheit innovativer Systemkonzepte im Bereich des Straßenverkehrs und zeigt die verschiedenen Fokusbereiche der jeweiligen Arbeiten, Projekte und Testfeldaktivitäten auf. Es zeigt sich eine hohe Bandbreite an fachlichen Ansätzen und Arbeitsfeldern für die Konzeption und Entwicklung infrastruktureller Erfassungslösungen bis in die weiteren Bereiche der Nutzung dieser Daten im Bereich verteilter Systeme, insbesondere für den Bereich kooperativer vernetzter Systemstrukturen. Es werden dabei grundlegende bekannte Problemfelder deutlich sowie etablierte Herangehensweisen für die Detaillösungen benannt. Die in der Literatur aufgeführten Quellen können größtenteils beachtliche Erfolge vorweisen. So sind im Rahmen der Arbeiten Systeme mit einer großen Bandbreite und teils hohen Performanz entstanden. Der Beitrag der Testfeldaktivitäten in Düsseldorf und Hamburg zeigt auf, dass die traditionelle Verkehrstechnik mit den typischen Aufgaben wie der Koordination verkehrlicher Flüsse an singulären Knotenpunkten mit den Anforderungen und Rahmenbedingungen der voranschreitenden Digitalisierung des Verkehrsraums verschmilzt. Diese ebnet den Weg für die Einführung und Operationalisierung von intelligenten vernetzten Systemkonzepten mit dem Fokusfeld des AVF. Dabei überschreiten sie wie im Beispiel der Continental AG die Grenzen des vorwettbewerblichen Bereiches in Richtung der produktnäheren Vorentwicklung und folgen dabei dem Trend, der bereits seit einiger Zeit in der Fahrzeugindustrie zu erkennen ist.

Eine Bewertung der Ansätze im Rahmen der in Kapitel 2.6 formulierten Anforderungen allerdings zeigt auf, dass keiner der Ansätze den vollen Umfang erfüllt, der im Kontext dieser Arbeit gestellt wird. Festzuhalten ist, dass die wenigsten Ansätze für die Konzeption infrastruktureller Erfassungslösungen im Forschungsbereich aus einem generischen Konzeptgedanken heraus entwickelt werden. So fokussieren die Lösungen zumeist auf der prototypischen Evaluation technischer Machbarkeit und Grenzen bestimmter Sensortechnologien, Algorithmenkonzepte oder fokussieren von vornherein auf spezifisch vorbestimmte verkehrliche Umgebungen oder Anwendungsfälle. So entsteht in vielen Fällen die Gewissheit, dass die Portierbarkeit und Skalierfähigkeit der jeweiligen Konzepte begrenzt ist oder doch zumindest die Leistungsfähigkeit der Systeme in anderen Einsatzszenarien kaum vorhersagbar ist. Zudem erfolgt eine Diskussion der jeweiligen Systemgrenzen und Fehlerphänomene nur oberflächlich oder findet gar nicht statt, was eine integrale Bewertung der Tragfähigkeit der Konzepte erschwert. Nur wenige Ansätze wie die Arbeiten in UR:BAN weisen die Portierbarkeit eines Systemkonzepts in praktischer Form nach, wobei der vorliegende Anwendungsfokus mit den Aufgaben einer Verkehrslage- und Rückstaulängenabschätzung an urbanen Knotenpunkten andere Anforderungen in Bezug auf die Informationsgüte und -dichte mit sich bringt. Herauszuheben ist an dieser Stelle der Ansatz, der in SAFESPOT verfolgt wurde. Dieser führt zu einem Konzept einer generisch angelegten Plattform für die Einbindung unterschiedlichster Sensortechnologien im Zusammenspiel mit einer Systemebene für den Aufbau situationsspezifischer Analysen. Während das Systemkonzept auf dieser Ebene als Leitbild für die weitere Vorgehensweise in dieser Arbeit herangezogen werden kann, basiert die technische Ausgestaltung auf einem veralteten Wissensstand. Ebenso erscheint die Wahl der Architektur im Sinne der prozessualen Ausgestaltung eher aus pragmatischen Grundsätzen entstanden zu sein. So lag der Fokus augenscheinlich auf anderen Bereichen, was auch datenschutzrechtliche Aspekte in den Hintergrund treten ließ.

¹⁰ Ausnahme ist hier das Projekt XCYCLE, welches im Rahmen der späteren Kapitel wieder aufgegriffen wird.

Es lässt sich generell in der Literatur ein klarer Schwerpunkt auf den Systembereich der messtechnischen Erfassung und deren Einbindung im Rahmen eines vernetzten Systemkonzepts finden. Ein integral gedachtes Systemkonzept in Kombination mit den Aufgaben einer Situationsinterpretation als flexible, erweiterbare Basis für die Modellbildung und das Testen, wie im Rahmen dieser Arbeit vorgegeben, ist nicht zu erkennen. Die Grundlage dafür stellt das Konzept des TAF-BW, was parallel zu den Arbeiten dieser Arbeiten entstanden ist. Aber auch hier wird kein systematischer Prozess der Ableitung einer generischen Architektur vorgenommen, sondern eng umrissene Anwendungsfelder als Grundlage der Ausgestaltung herangezogen.

Der Literaturstand zu ITS-Rahmen- und Referenzarchitekturen ermöglicht die Einordnung der Zielsetzung dieser Arbeit in den Arbeitskontext bestehender Aktivitäten sowie die Ableitung von grundsätzlichen Prinzipien technischer, organisatorischer und betrieblicher Maßnahmen in den Bereich der Architekturausgestaltung. Die verfolgten Vorgehensweisen basieren dabei stets auf der Einbeziehung verschiedener Blickwinkel auf die zu entwickelnde Architektur mit einem Startpunkt in abstrahierten und technologieunabhängigen Beschreibungsebenen. Es erfolgt eine schrittweise Konkretisierung und Ausgestaltung der Architekturen bis in die Ebene der eigentlichen Implementierung, um eine Wiederverwendbarkeit der Konzepte sowie Interoperabilität sicherstellen zu können. Damit stützen sie den grundlegenden Gedankengang im Aufbau der vorliegenden Arbeit und die Schritte in der Ausarbeitung der Systemarchitektur im folgenden Kapitel.

5 Systemarchitektur

Die zu entwickelnden Systemlösungen zeichnen sich durch eine hohe Komplexität mit einem sehr hohen Anteil informationstechnischer Verarbeitung auf Softwareebene aus. Passend dazu erfolgt der Aufbau der Systemarchitektur angelehnt an etablierte Verfahren aus der Softwareentwicklung.

In der Literatur finden sich an vielen Stellen Definitionen des Begriffs Systemarchitektur. Beispiele hierfür liefern zum Beispiel (Sommerville 2012) oder (Wasson 2006). Der aktuell geltende Standard ISO/IEC/IEEE 42010:2011 (ISO/IEC/IEEE 2011) beschreibt eine Architektur als „grundlegende Konzepte oder Eigenschaften eines Systems in seiner Umgebung, verkörpert in seinen Elementen, Beziehungen und in den Prinzipien seiner Gestaltung und Entwicklung“. Balzert wiederum beschreibt in (Balzert, Balzert et al. 2009) eine Architektur als „eine strukturierte oder hierarchische Anordnung der Systemkomponenten sowie Beschreibung ihrer Beziehungen“. In (Foegen, Atamaniuk 2002) wird diese Definition um dynamische Aspekte wie etwa die Kommunikation zwischen den Komponenten erweitert. Starke greift diese Sichtweise in (Starke 2017) auf und stellt sie in den Arbeitskontext eines Entwicklungsvorgangs. So „unterstützt die Architektur den schwierigen Übergang von der Problemanalyse zur konkreten technischen Realisierung und beschreibt dabei eine Lösung basierend auf diversen Entwurfsentscheidungen. Dabei wird der Systementwurf schrittweise detailliert und entwickelt“.

Im Rahmen der Arbeit wird auf die Anwendung einer formalen Modellierungssprache wie UML¹¹ verzichtet. Die gewählte eigene Symbolik zieht sich konsistent durch die gesamten Ebenen der Erläuterung, ermöglicht eine bruchfreie Darstellung aller Sichten und erfüllt damit alle grundlegenden Anforderungen, ohne dass die strikte Beachtung formaler Konstrukte und Sprachelemente notwendig ist. Die folgenden Abschnitte beschreiben diesen Prozess für die im Rahmen der Arbeit bearbeitete Aufgabenstellung der mikroskopischen Verkehrsdatenerhebung. Den Ausgangspunkt der Betrachtung stellt dabei ein generischer Architektorentwurf auf der Basis grober Systembausteine. Ausgehend von den in Abschnitt 2.6 formulierten Anforderungen und dem identifizierten Handlungsbedarf wird eine Systemarchitektur entwickelt und detailliert. Hierfür werden in Anlehnung an 4+1 View Model von Kruchten (Kruchten 1995) verschiedene Sichtweisen auf das System genutzt. Der logische Aufbau gibt dabei eine funktionale Sichtweise auf das System wieder und stellt die Bausteine der zentralen Verarbeitungsketten heraus. Anschließend wird eine Akteurssicht aufgebaut. Diese beschreibt die Interaktionsformen mit dem System und den Zugang zu Informationen und Systembestandteilen zur Ausführung der jeweiligen Rollen und Aufgaben. Darauffolgend entwickelt eine prozessuale Sichtebeine die Ausführung der Systemprozesse sowie deren Zusammenfassung in unterschiedliche Betriebsformen. Die Kernszenarien sowie Abläufe zwischen Komponenten bzw. Prozessen für die Einsatzszenarien des Systems im Kontext der Testfeldnutzung werden in der Szenariosicht ausgeführt.

Die Grobarchitektur wird damit stückweise über alle Ebenen bis in die betriebliche Ebene überführt und expliziert. Dabei werden gemeinsame Muster in der Gestaltung der verschiedenen im Rahmen der Arbeit entstandenen Systeme verdeutlicht. Die Physische Sichtebeine, welche die physikalische Systemausgestaltung beschreibt, die Zuordnung zwischen Hard- und Softwarebestandteilen differenziert und die Datenorganisation beschreibt, wird im Rahmen des Kapitels 6 gesondert ausgeführt.

5.1 Generischer Grobentwurf

Startpunkt der Betrachtungen ist der generische funktionale Grobentwurf eines signalverarbeitenden Systems. Dieser Entwurf lässt sich aus den gestellten Anforderungen an das System ableiten.

¹¹ UML steht für Unified Modeling Language, wie zum Beispiel in (Gebhardt 2019) erläutert.

5.1.1 Systembausteine

Abbildung 24 zeigt eine grafische Aufarbeitung mit den grundlegenden Systembestandteilen. Diese repräsentieren jegliche im Zielsystem benötigte Funktionsanteile, wie sie in Abschnitt 2.6 definiert wurden. Dies umfasst insbesondere ein technisches Erfassungssystem sowie die darauf aufbauende Funktionalität.

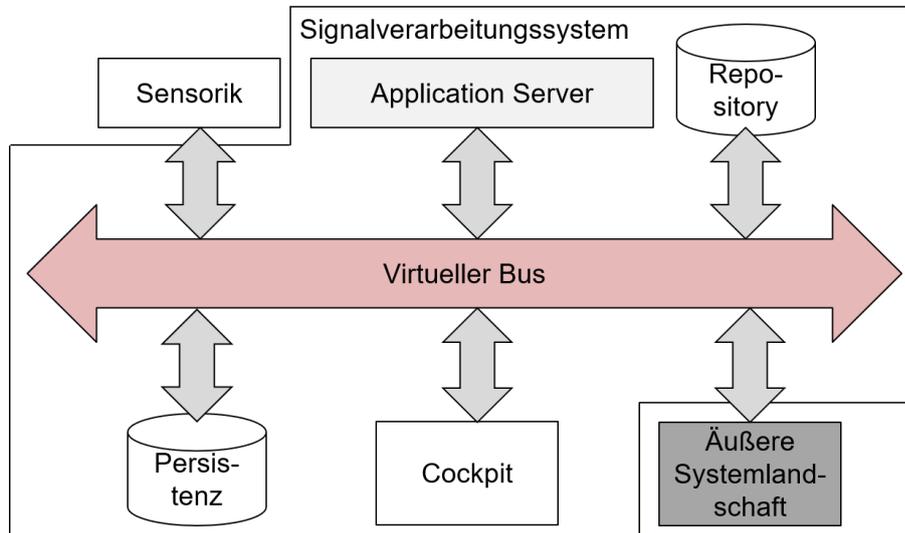


Abbildung 24: Grobarchitektur des Signalverarbeitungssystems mit generischen Systembausteinen

Die Sensorik repräsentiert dabei die systemeigenen Sensorsysteme als Grundlage für den Aufbau einer sensorgestützten Verarbeitungs- und Analyseketten. Differenziert werden daneben verschiedene Systembausteine. Der Application Server umfasst alle Verarbeitungsinstanzen, auf denen die funktionalen Abläufe und Prozesse der Softwareanteile stattfinden. Das Repository stellt einen passiven Speicher als Instanz für die Vorhaltung und Verwaltung der systemrelevanten Source Codes dar. Die Persistenz entspricht einer Instanz zur nicht flüchtigen Langzeitspeicherung systemrelevanter Daten und Informationen. Das Cockpit stellt die Schaltstelle für die Interaktion mit dem Gesamtsystem dar und umfasst dabei alle Aspekte eines Daten- und Informationsmanagements, der Systemsteuerung sowie Elementen der Funktionsentwicklung. Jede weitere Funktionalität, wie Quellen und Senken für Systemgrenzen überschreitende Prozesse, wird an dieser Stelle in den Block der äußeren Systemlandschaft zusammengeführt. Die äußere Systemlandschaft speist zum Beispiel Unterstützungsdaten in das System ein, andererseits ist sie auch Senke für die Ergebnisdaten zur Nutzung in weiteren Bausteinen einer umfangreicheren Testfeldarchitektur.

Die Verknüpfung aller genannten Systembausteine erfolgt über einen Virtuellen Bus. Dieser stellt die Repräsentanz einer hardwareunabhängigen Kommunikations- und Verteilungsschicht für alle Daten und Informationen dar.

5.1.2 Grundlegende Datenformen und -flüsse

Analog zur Definition grundlegender Systembausteine ist es erforderlich grundlegenden Daten- und Informationsflüsse auszuweisen, die sich zwischen den generischen Bausteinen aufspannen. Auch diese werden vorerst auf abstrakter Ebene formuliert und im weiteren Verlauf parallel zur Funktionalität immer weiter differenziert und dabei spezifischer ausgeführt. Abbildung 25 zeigt ein entsprechend angereichertes Schaubild auf Basis der Abbildung aus Abschnitt 5.1.1.

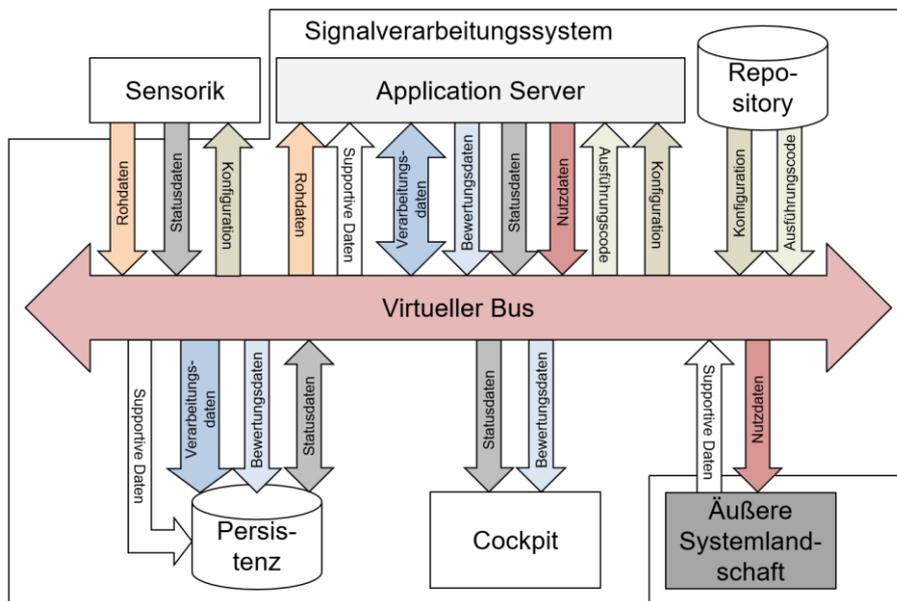


Abbildung 25: Übersicht über die grundlegenden Datenflüsse auf Grobarchitekturebene

Dabei stellen die Rohdaten die verfügbaren Messdaten aus den Schnittstellen der unterschiedlichen Messsysteme dar. Wie in Abschnitt 2.2.1 aufgezeigt, gibt es durch die unterschiedlichen Technologien und sensorsystemseitige Vorverarbeitung bereits hier unterschiedliche Ebenen der Verarbeitung, die hier nicht weiter differenziert werden. Beispielsweise entspricht das Rohdatenformat einer digitalen Kamera einem Einzelbild im Rasterformat, in Radarsystemen werden die Primärechodaten bereits durch die sensornahe Verarbeitung weiterverarbeitet und stehen dann als Objekthypothesenliste schnittstellenseitig zur Verfügung. Eine solche lokale Vorverarbeitung liegt allerdings stets im Sensorsystem gekapselt und ist nicht über die Nutzerschnittstelle des Sensorsystems zugreifbar, was als grundlegende gemeinsame Eigenschaft aller Rohdaten angesehen werden kann.

Neben den Rohdaten aus den Sensorsystemen benötigt ein System für den tatsächlichen Betrieb üblicherweise bestimmte zusätzliche Daten und Informationen. Form und Umfang dieser – im vorliegenden Kontext als Supportive Daten zusammengefasst – Daten sind vielfältig und je nach fachlichem Aufgabenbereich sehr heterogen. So erfordert eine verkehrliche Situationsanalyse zum Beispiel Informationen zu den aktuellen oder zukünftigen Lichtsignaldaten für eine Aussage zu möglichen Rotlichtverstößen. Ebenso lassen sich zum Beispiel Wetterdaten als moderierende Faktoren in eine Fahrverhaltensanalyse einbeziehen. Allen diesen Daten gemein ist, dass sie außerhalb des eigentlichen Systemkontextes erzeugt und somit über die Systemgrenzen eingespielt werden.

Die bidirektional ausgeführten Verarbeitungsdaten repräsentieren alle Datenformen, die sich aus dem funktionalen Zusammenspiel der Signalverarbeitungskette ergeben. Eine Speicherung dieser Daten erfolgt üblicherweise zum Zwecke der Entwicklung und der Nachvollziehbarkeit des Systemverhaltens. Darüber hinaus umfasst dieser Datentyp insbesondere die in Abschnitt 3.1 spezifizierten zeitlich fein aufgelöste Zustandsinformationen über alle Verkehrsteilnehmer aus dem Erfassungsbereich der Anlage.

Nutzdaten stehen stellvertretend für Daten und Informationen, die aus den Zustandsinformationen im Zusammenspiel mit supportiven Daten erzeugt werden, zum Beispiel zur verkehrlichen Situationsmodellierung.

Bewertungsdaten ermöglichen das Monitoring der verschiedenen vom System aufgearbeiteten Verarbeitungsdaten sowie deren Evaluation, so dass der in den Anforderungen gestellte Abgleich unterschiedlicher Datenformen zur Plausibilisierung des Betriebszustands und der Datenqualität sowie ein unkomplizierter Zugriff für manuelle Datenbeschau ermöglicht wird.

Die Statusdaten umfassen die Informationen über den aktuellen Status der jeweiligen Hard- und Softwarekomponenten. Dies umfasst Informationen zur Erreichbarkeit von Hardwareelementen (zum Beispiel Sensorik), dem Status der Verarbeitungsmodule, Kennwerten aus höheren System- und Verarbeitungsschichten bis hin zu statistischen Informationen über die Einhaltung über das Übertreten von Systemgrenzen oder Betriebsparametern. Neben der Weitergabe der Daten in das Cockpit werden ausgewählte Daten auch persistent gespeichert, um eine Nachverfolgung von Systemvorgängen zum Beispiel für geführte Maßnahmen für prädiktive und korrektive Maßnahmen sowie zum Debugging zu ermöglichen.

Der Ausführungscode entspricht der Menge an Modulen und Algorithmen, welche in Form von Programmcode im Repository gespeichert werden und dort nach der Codegenerierung vorliegen. Der Ausführungscode wird auf das Gesamtsystem verteilt.

Neben dem Ausführungscode benötigt das System in Form von Konfigurationsdaten für den bestimmungsgemäßen Betrieb diverse zusätzliche Informationen, die die reibungslose Initialisierung und den Ablauf der Verarbeitungskette ermöglichen, zum Beispiel Schlüsseldaten für die korrekte Verwaltung und Adressierung der Systemmodule und Hardwareelemente, notwendige Kalibrierdaten oder Statusinformationen.

Zu erkennen ist, dass der generische Grobentwurf nahezu keine gestalterischen a priori Annahmen enthält, wie beispielsweise Unterteilungen in Systembereiche oder Entwurfsmuster für spezifische Kommunikationsformen, die ihn bereits an dieser Stelle einschränken. Tatsächlich ist genau dies die Kernidee des verfolgten Ansatzes. Auf Basis des nunmehr vorliegenden Stands liegt eine gute Basis für die Entwicklung einer spezifischeren funktionalen Verarbeitungsstruktur vor, wie sie in den folgenden Abschnitten ausgeführt ist.

5.2 Funktionale Verarbeitungsstruktur

Aus dem generischen Grobentwurf aus Abschnitt 5.1 wird im Folgenden die funktionale Verarbeitungsstruktur aufgebaut. Dabei werden die Teilschritte herausgearbeitet und auf Basis der Einführungen in Abschnitt 2.2.2 in Form eines Schichtenmodells systematisiert. Der große Vorteil dieses Schichtenmodells ist die Systematisierung der verschiedenen Grundbereiche des Systems, was die Ausarbeitung in den Folgeabschnitten erleichtert.

Das System lässt sich auf dieser Betrachtungsebene in vier grundlegende Systembereiche unterteilen, die verschiedene Funktionalitäten umfassen: die Generierung der Trajektorien, dem Bereich der Informationsverarbeitung und Wissensgewinnung, dem Datenqualitätsmanagement und der Betriebssteuerung. Diese Bereiche werden einzeln aufgeschlüsselt, die Datenflüsse tiefer ausgeführt und in einem abschließenden Schritt dann zu einem funktionalen Gesamtsystementwurf zusammengeführt. Zur Erhöhung der Übersicht werden in diesem Abschnitt lediglich die für die Funktionalität relevanten Datenflüsse gezeigt und diskutiert. Kontrollflüsse kommen dann in späteren Abschnitten zum Tragen.

5.2.1 Trajektoriengenerierung

Der Bereich der Trajektorienverarbeitung umfasst alle Kernelemente, die für die Gewinnung der verkehrlichen Zustandsinformationen vonnöten sind. Abbildung 26 zeigt grafisch die beteiligten Funktionalitäten, abgebildet als abgerundete Boxen, sowie die bereits bekannten Instanzen der Sensorik und Persistenz.

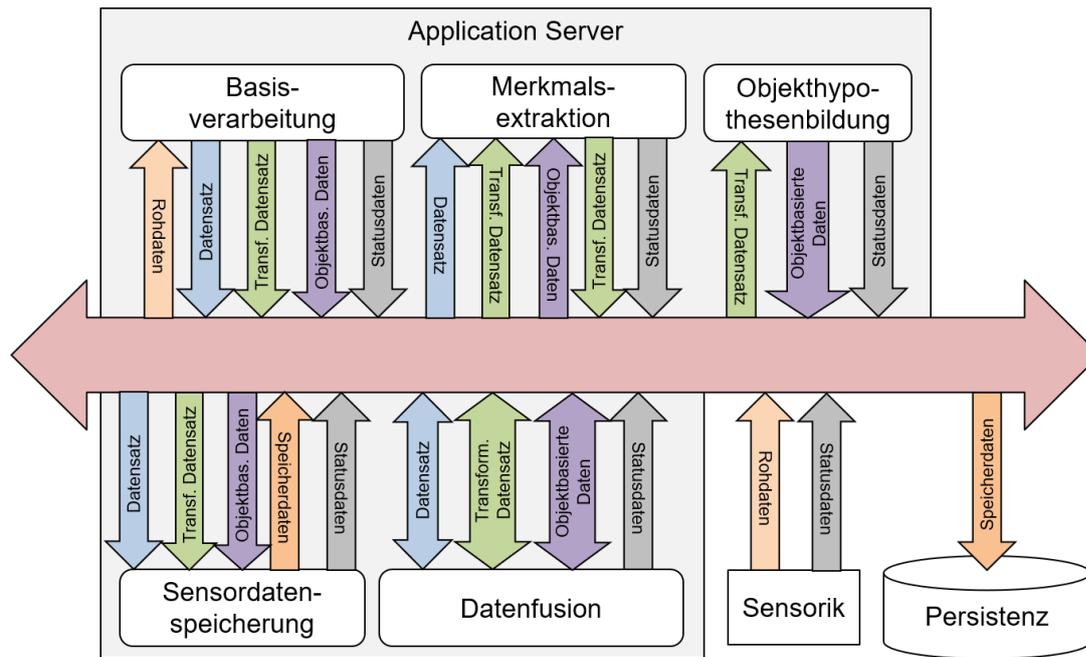


Abbildung 26: Funktionale Struktur der Trajektoriengenerierung

Die Basisverarbeitung umfasst dabei alle Funktionalitäten zur grundlegenden Verarbeitung auf sensorischer Einzelebene mit dem Ergebnis von im System verwertbaren Daten. Typische technische Verfahren umfassen dabei die Dekodierung von Datenströmen und das Überführen der Daten in systemeigene Datencontainer, ggf. flankiert durch Maßnahmen wie Filterung oder anderen grundlegenden Bearbeitungsschritte. Wie bereits an anderen Stellen ausgeführt, können die Ergebnisse dieses Verarbeitungsschrittes, abhängig vom Sensorsystem und der dort integrierten Vorverarbeitung, auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen liegen. Denkbar sind rohdatennahe Datensätze (wie Einzelbilder aus einer digitalen Kamera), transformierte Datensätze (wie Punktwolken aus einem LIDAR-System), aber auch objektbasierte Daten (wie Objektlisten aus einem Radarsystem).

Im Schritt der Merkmalsextraktion werden aus diesen Datensätzen spezifische Merkmale erarbeitet. Dies erwirkt eine Abstraktion der teils sensor(technologie-)spezifischen Daten auf abstrakte und technologieunabhängige Features. Die transformierten Datensätze können im System als datensatzerweiternde Informationen vorliegen – folglich eine Erweiterung der Datensätze darstellen – oder als einzelne Datenform für Folgeverarbeitungsschritte von den Datensätzen losgelöst behandelt werden.

Die Objekthypothesengenerierung umfasst wiederum die Funktionalitäten zur Gewinnung von getrackten und klassifizierten Trajektorien zur weiteren Verarbeitung.

Die Datenfusion ermöglicht die Zusammenführung verschiedener Teildaten auf den jeweiligen Abstraktionsebenen in akkumulierte Datensätze. Die Funktionalität stellt damit die Grundlage für ein multisensorfähiges Gesamtsystem, wie es insbesondere in Abschnitt 2.6 gefordert wird. Wie in Abschnitt 2.2.2 ausgeführt, kann die Verarbeitungskette auf mehreren Abstraktionsebenen in komplexen Strukturen mit der Datenfusion verknüpft sein.

Eine weitere Funktion liegt in der Sensordatenspeicherung, welche die unterschiedlichen Datensätze in Speicherdaten überführt, die dann in der Persistenz abgelegt werden. Übliche Schritte der Verarbeitung liegen hierbei in einer Auswahl und/oder Zusammenführung der verschiedenen Daten in korrespondierende Speicherdatensätze, die eine Nutzung im Rahmen der Entwicklung oder der Nachvollziehbarkeit von Systemprozessen erlauben.

5.2.2 Informationsverarbeitung und Wissensgewinnung

Der Systembereich der Informations- und Wissensverarbeitung beinhaltet Funktionen zur Abstrahierung der gewonnenen objektbasierten Daten auf höhere semantische Ebenen zum Zwecke der verkehrlichen Situationsanalyse. Abbildung 27 zeigt die funktionalen Bausteine und Systemflüsse auf.

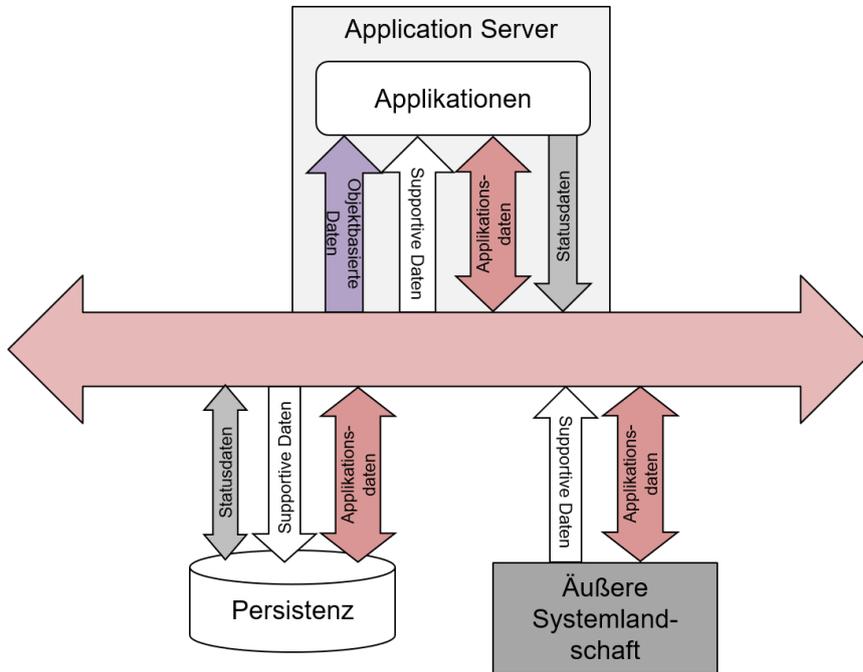


Abbildung 27: Funktionale Struktur der Applikationsebene

Ergebnisse dieser Systembausteine sind Applikationsdaten, die den Verständnisaufbau von verkehrlichen Situationen bzw. spezifischen Anteilen davon, erlauben. Es werden hierfür Ableitungen und Abstrahierungen von Szenenanteilen (zum Beispiel für eine Risikoabschätzung) vorgenommen und dabei eine Verknüpfung der systemeigenen Objektdaten mit supportiven Daten vorgenommen. Je nach Anwendungsfall erfolgt der gerichtete Austausch von Applikationsdaten über die Systemgrenzen hinaus mit der äußeren Systemlandschaft.

5.2.3 Datenqualitätsmanagement und Betriebssteuerung

Der Systembereich Datenqualitätsmanagement und Betriebssteuerung umfasst Systemprozesse und Instanzen, die nicht mit der primären Aufgabe der Hypothesengenerierung oder Informationsverarbeitung in Verbindung stehen. Abbildung 28 zeigt das entsprechende Schaubild. Der Bereich umfasst damit Funktionalitäten zur Wahrung und Bewertung von Datenqualitätsmanagementaufgaben. Hierbei erfolgt eine systematisierte Aufarbeitung der relevanten Informationslagen aus dem Systembereich der Trajektoriengenerierung zu Bewertungsdaten, die dann einen primären Input in das Cockpit darstellen. Daneben speist sich das Cockpit aus den verfügbaren Statusdaten der Systemprozesse, die dort zu systembetrieblichen Statusinformationen überführt werden.

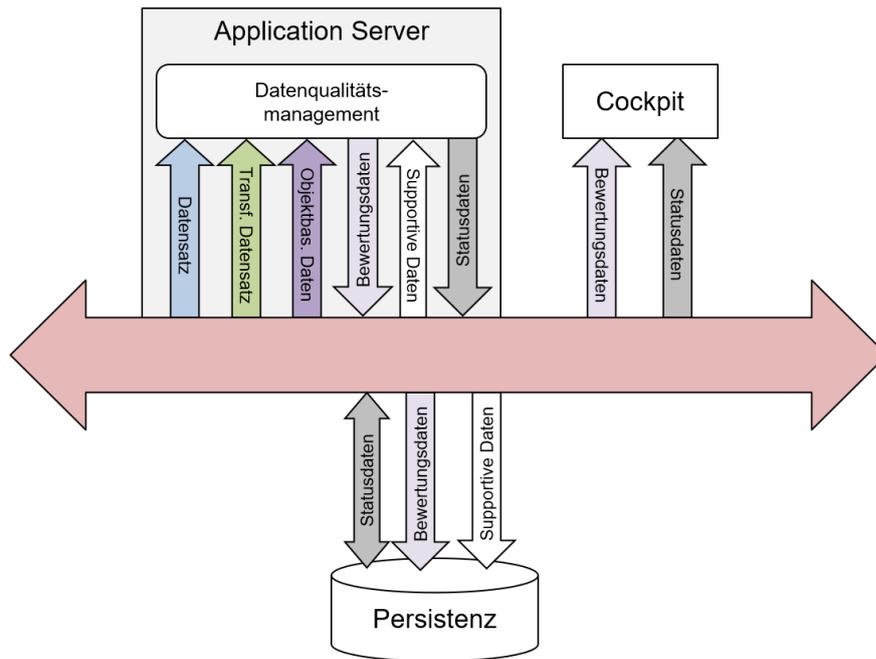


Abbildung 28: Funktionale Struktur der sekundären Verarbeitungsebene

5.2.4 Funktionale Gesamtarchitektur

Abbildung 29 führt die in den Vorabschnitten ausgeführten Funktionalitäten zusammen.

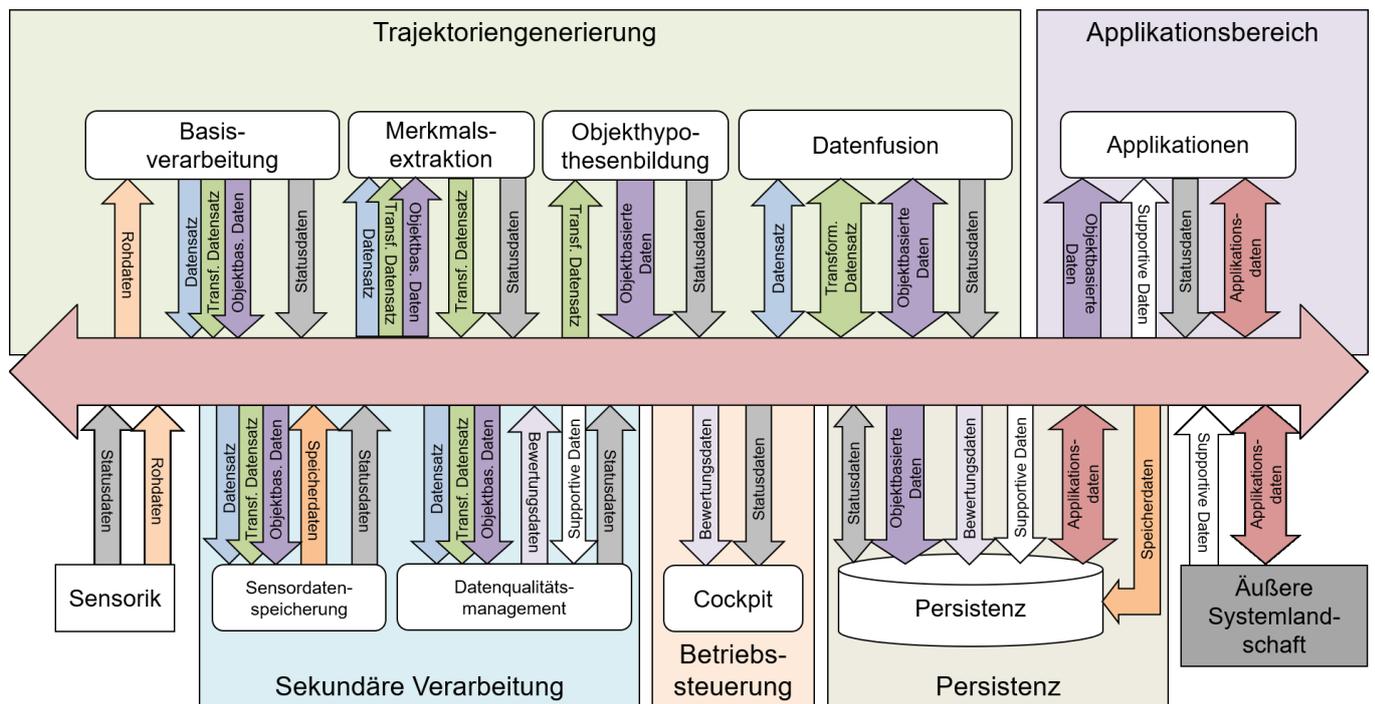


Abbildung 29: Funktionale Gesamtstruktur mit ausgewiesenen Systembereichen

Die differenzierten Systembereiche wurden hierfür für eine höhere Übersichtlichkeit farblich abgesetzt und der Bereich der Persistenz in Form einer gemeinsam genutzten Systemressource dargestellt.

Ogleich in der bisherigen rein funktionalen Betrachtungsebene keine tiefe Ausgestaltung der Funktionalität erfolgt, wird bereits hier die vergleichsweise hohe Komplexität der unterschiedlichen Systembereiche und deren Zusammenspiel sichtbar. Für die weiteren Schritte der

Systemausgestaltung wird daher im folgenden Abschnitt die bisherige Form der Systemausgestaltung auf Basis der Akteurssicht untersucht.

5.3 Akteurssicht

Der Begriff des Akteurs wird laut Duden (Dudenverlag) definiert als „Beteiligter, Beteiligte, handelnde Person, Handelnder, Handelnde“. Im Rahmen dieser Arbeit wird darunter die Zusammenführung aller Personen verstanden, die im Zusammenspiel die relevanten Aufgaben eines geregelten Systembetriebs übernehmen. Der Begriff des Systembetriebs ist nach (Gronau, Becker et al. 2016b) eng verknüpft mit dem so genannten Application Management, welches gemäß (Rohloff 2011) sowohl die Entwicklung mit dem Betrieb und der Wartung zusammenführt. Ein umfassendes Application Management beinhaltet dabei damit eine enge Verzahnung von Anwendungsentwicklung und -betrieb und muss beiderseits in einen Systementwurf einfließen.

Die Akteurssicht hat zur Aufgabe die Frage zu beantworten, welche Rollen und Verantwortlichkeiten im Kontext des Systemmanagements wie ineinandergreifen. Eine systematische Differenzierung ermöglicht dabei eine klare Spezifizierung notwendiger Freiheitsgrade und Manipulationsmöglichkeiten der verschiedenen Rollen in das technische System. Hieraus lassen sich später im Zusammenspiel mit technischen oder datenschutzrelevanten Rahmenbedingungen weitere notwendige Maßnahmen in der Systemausgestaltung ableiten.

5.3.1 Aufgaben- und Verantwortungsanalyse

Tools für die systematische Erarbeitung von Zuständigkeiten gibt es zum Beispiel im Bereich der kollegialen Führung mit der Delegationsmatrix (Oestereich, Schröder 2019). Während diese zwar die Auffächerung der Aufgaben zulässt, erscheint die Systematik der RACI-Matrix als etablierte Methode aus dem Bereich der IT Infrastructure Library (Great Britain: Cabinet Office 2013) hier aber sinnvoller anwendbar. Der Vorteil liegt in der Differenzierung von vier unterschiedlichen Zuständigkeiten im Kontext einer einzelnen Aufgabe. Diese unterteilen in

- R = Responsible (zuständig, führt aus)
- A = Accountable (verantwortlich, Entscheider (Budget))
- C = Consulted (konsultieren vor einer Entscheidung)
- I = Informed (informieren nach einer Entscheidung)

Die RACI-Matrix stellt damit nicht nur übersichtlich dar, wer für welches Aufgabengebiet welche Verantwortung übernimmt, sondern auch welche Rolle wie einbezogen wird. Dies ermöglicht eine hohe Informationsdichte bei vergleichsweise großer Übersicht. (Beckmann, Vonk Noordegraaf et al. 2011) unterteilt vier auftretende Rollen im Anwendungsfeld einer Testfeldnutzung. In Passung hierzu lassen sich im DLR-Arbeitskontext im Umgang mit komplexen Systemen grundlegend drei Rollenbereiche differenzieren: die Systemverantwortung, der technische Service / Entwicklung sowie der Forschung, im vorliegenden Kontext stark geprägt vom Aspekt der Datenanalyse. Die vierte Rolle, die in (Beckmann, Vonk Noordegraaf et al. 2011) als Customer beschrieben wird, hat lediglich einen mittelbaren Bezug in den technisch/fachlichen Betrieb des Systems und lässt sich an dieser Stelle vorerst vernachlässigt. Auf sie wird im späteren Verlauf wieder eingegangen.

Auf Basis dieser drei Rollen zeigt Tabelle 1 unterschiedliche Aufgabenfelder auf. Damit findet sich ein klar definiertes Verantwortungsportfolio pro Rolle.

Tabelle 1: RACI-Matrix zur Aufgabenanalyse für DLR-typische Rollenverteilung

Aufgabe / Rolle	System- verantwortung	Technischer Service / Entwick- lung	Forschung / Datenanalyse
Systemkonfiguration	R	C	A
Bereitstellung	R	I	A
Instandhaltung	A	R	I
Systementwicklung	A	R	I
Entwicklung Fachfunktion	I	C	R/A

Die Kernaufgabe der Systemverantwortung liegt in einer Sicherstellung eines stabilen und hochverfügbaren Regelbetriebs der Systemlösung. Sie sorgt dabei auch für die organisatorische Sicherstellung der Sicherheit und der Einhaltung der entsprechenden Rahmenbedingungen (zum Beispiel bezogen auf datenschutztechnische Aspekte). Sie entscheidet im Zusammenspiel mit dem Management über Maßnahmen zur Durchführung technischer Systementwicklungen, koordiniert diese und begleitet damit deren Durchführung bis zur Abnahme der integrierten Lösung. Der Bereich Technischer Service / Entwicklung führt prädiiktive und korrektive Maßnahmen zur Sicherstellung eines reibungslosen Anlagenbetriebs durch. Ebenso erarbeitet dieser Bereich neue Algorithmen und Systemkomponenten zur Erfüllung erweiterter Anforderungen im Bereich der Anlagenbetriebs (zum Beispiel der Trajektoriengenerierung) und integriert diese in den Systemkontext.

Der Bereich Forschung / Datenanalyse verantwortet die Wissensgewinnung und Modellbildung im Kontext der Beantwortung von Forschungsfragen. Das operative Aufgabenfeld liegt folglich im Aufbau fachgebundener Funktionalität, hier aufbauend auf der Trajektorienerfassung, und deren Nutzung im Rahmen der in Abschnitt 1.2 dargelegten Forschungsbereiche.

Der nächste Schritt liegt in einer Untersuchung zur Verknüpfung der o.g. Rollen mit den jeweils notwendigen Zugriffsmöglichkeiten in das System im Rahmen ihrer Aufgabenausführung. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 30 ausgeführt. Die Abbildung teilt sich in drei grundlegende Bereiche, die differenziert werden. Rot unterlegte Bereiche umfassen den Anwendungskontext des Systems, kaskadierend unterteilt in einen höheren Forschungskontext, aus dem sich ein spezifischer Anwendungskontext sowie die daraus entstehenden Anforderungen an das System ableiten und dabei die Bezugsebene der weiter oben beschriebenen Customer-Rolle wieder spiegeln. Der durch die starke Linienführung eingefasste Bereich umfasst das System selbst, wie in Abschnitt 5.2.4 in vier funktionale Systembereiche unterteilt. Die blau abgesetzten Bereiche wiederum markieren die in diesem Abschnitt erarbeiteten Aufgabenbereiche.

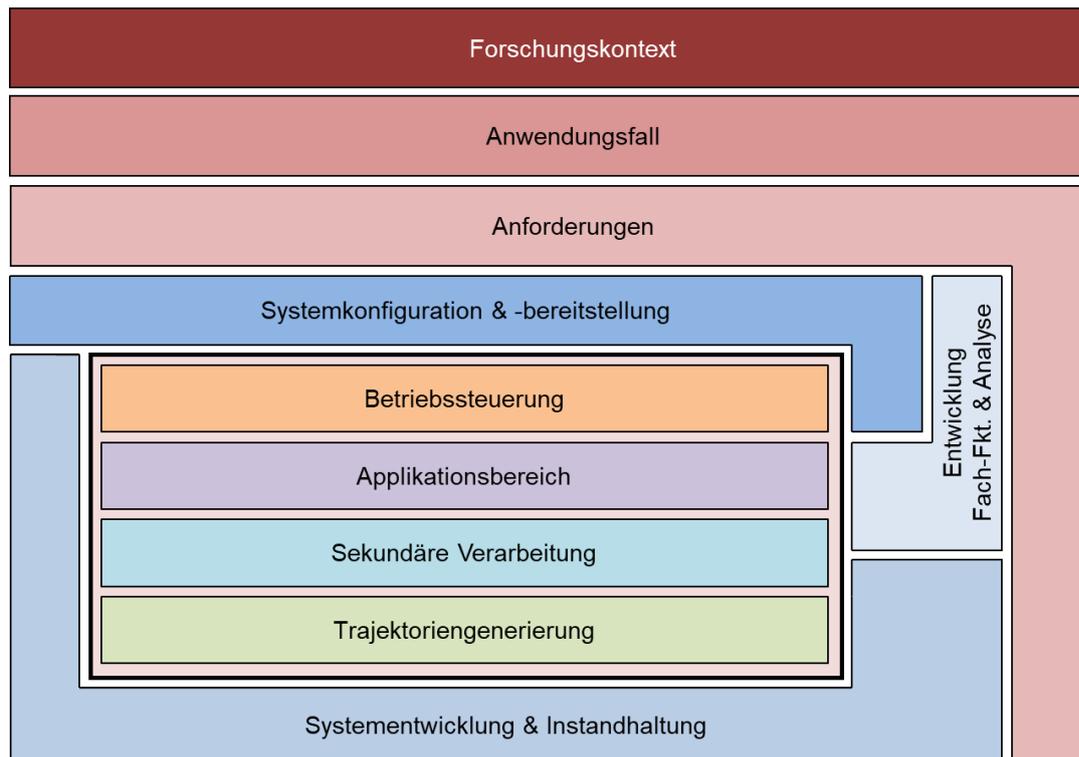


Abbildung 30: Visualisierung der Systembereiche im Aufgaben- und Rollenkontext

Die gemeinsame Konturführung zwischen dem roten und blauen Bereich verdeutlicht die verschiedenen Aspekte projektbezogener Anforderungen. Die Systemnutzung in ihrem Anwendungskontext bedingt spezifische Systemkonfigurationen und Bereitstellungsformen. So muss das System zum Beispiel in der Lage sein, in bestimmten Anwendungskonstellationen oder über einen definierten Zeitraum hinweg arbeiten zu können. Für diese Tätigkeiten wird der direkte Zugriff auf die Betriebssteuerungsebene des Systems benötigt, was durch die Einfassung des entsprechenden Systembereichs dargestellt wird. Zusätzlich erfolgt dabei die Identifikation von Systementwicklungsbedarfen. Folglich stellt die Systemkonfiguration und Bereitstellung die einzige direkte Schnittstelle zwischen dem Systembetrieb und der Projektanwendung. Ebenso wie prädiiktive oder korrektive Maßnahmen zur Instandhaltung des Systems erfordert die Systementwicklung natürlich einen umfangreichen Zugriff auf alle relevanten Systemebenen, inklusive der primären Verarbeitungskette der Trajektoriengenerierung. Die Entwicklung und Nutzung der Fachfunktionalität fokussiert sich auf den Applikationsbereich, die Trajektoriengenerierung läuft davon abgetrennt.

5.3.2 Ableitungen für die weitere Systemausgestaltung

Aus der vorgenommenen Aufgabenanalyse lassen sich nun Ableitungen für den Systementwurf treiben. Ausgangspunkt der Diskussion sind die beiden bereits angesprochenen Ziele eines stabilen Systembetriebs, wie auch einer Einbeziehung datenschutztechnischer Belange.

Ein zentraler Aspekt liegt im Verständnis, dass für die Durchführung eines geordneten Regelbetriebs keinerlei Zugriffe auf die Rohdatenebene notwendig sind. Eine entsprechende Kapselung dieser Funktionsbereiche ist daher schon aus betrieblichen Belangen sinnvoll, um Interferenzen dieses sensiblen Funktionsbereichs mit äußeren Störeffekten zu vermeiden. Aus datenschutzrechtlicher Sicht ist dieses sogar als notwendig anzusehen. Ein weiteres Augenmerk liegt im sekundären Systembereich, insbesondere dem Datenqualitätsmanagement. Dem muss in den weiteren Teilen Systemausgestaltung Rechnung getragen werden, so dass sowohl betriebliche wie auch datenschutzrelevante Aspekte beachtet werden.

Die genannten Punkte werden im Rahmen von Abschnitt 5.4.6 wieder aufgegriffen und in die grundlegende Systemgestaltung eingebunden.

5.4 Prozesssicht

Die vorangegangenen Abschnitte bauen auf einem rein funktionalen Systemverständnis auf. Dieser Blickwinkel wird nun um die prozessuale Komponente erweitert. Dabei werden Systemfunktionen weiter detailliert und das Zusammenspiel der einzelnen Systemprozesse aufgeschlüsselt. Anforderungen hinsichtlich des Laufzeitverhaltens innerhalb der Grenzen der bekannten Prozessbereiche werden herausgearbeitet und erste Spezialisierungen der bisherig generisch ausgelegten Systemdefinition herausgearbeitet. In einem zweiten Schritt werden die Systembereiche in den Kontext verschiedener Betriebsformen gestellt, um das Gesamtsystem wiederum auf seiner Gesamtebene prozessual zu beschreiben.

5.4.1 Trajektoriengenerierung

Die rein funktionale Sichtweise beinhaltet hohe Freiheitsgrade für die Ausgestaltung der Signalverarbeitungsketten. Für die weitere Explizierung des Systems müssen an dieser Stelle grundlegende Designentscheidungen getroffen werden. Ein zentraler Kernpunkt ist der grundlegende Aufbau der Fusionsarchitektur. Wie in Abschnitt 2.2.2 ausgeführt, lassen sich in der Literatur Beispiele für unterschiedlichste Ausgestaltungsformen finden.

In Abschnitt 2.6 wurde als vielversprechender Ansatz eine zentrale Feature Level Fusion herausgearbeitet, welcher hier Verwendung finden soll. Dieser verspricht die Verbindung eines möglichst gut skalierbaren Aufbaus mit einer hohen zu erwartenden Performanz und ist in Abbildung 31 skizziert.

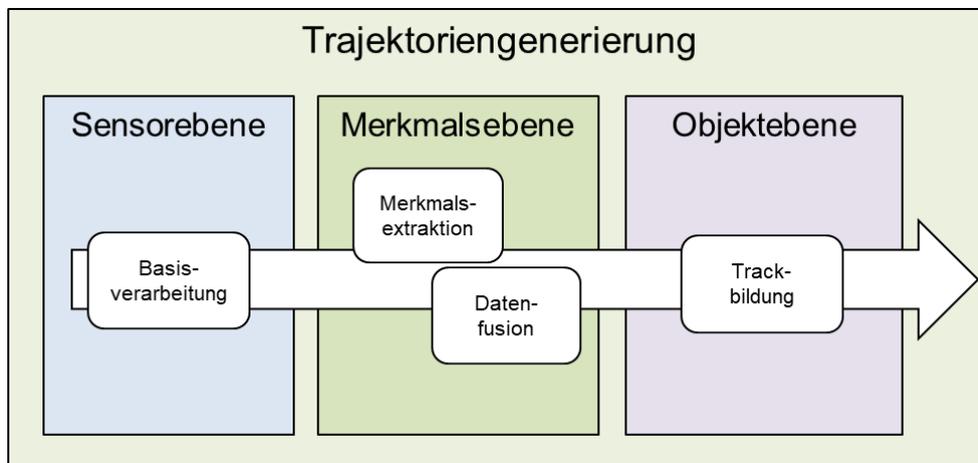


Abbildung 31: Prozessuale Sicht auf die Trajektoriengenerierung (Grobansicht)

Abschnitt 5.2.1 weist drei grundlegende Abstraktionsebenen aus, die sich in der Abbildung wiederfinden: die Sensorebene, die Merkmalsebene sowie die Objektebene mit den jeweiligen grundlegenden Funktionalitäten der Basisverarbeitung, Merkmalsextraktion und Trackbildung.

Der verfolgte Ansatz basiert nun darauf, dass die Datenfusion als vierter dargestellter Funktionsbereich gebündelt auf der Merkmalsebene erfolgt. Hierdurch ergeben sich bestimmte Vorteile: Die Zusammenführung der Daten erfolgt unterhalb der eigentlichen Objektebene, was eine vergleichsweise hohe Performanz des Gesamtansatzes erwarten lässt. Gleichzeitig werden die Daten auf einer abstrakten, sensortechnologieunabhängigen Ebene zusammengeführt, was eine hohe Flexibilität in Bezug auf die genutzten Technologien ermöglichen sollte. Zusätzlich führt die grundlegende Anforderung der Erweiterbarkeit zu Rahmenbedingungen eines vergleichweisen

einfachen Aufbaus, der gut skaliert, was durch den systematischen Ansatz mit der klaren Zuordnung der Funktionszuordnung ebenfalls gegeben sein sollte.

Abbildung 32 zeigt die prozessuale Verarbeitungskette der Trajektoriengenerierung, erkennbar sind die drei genannten Ebenen.

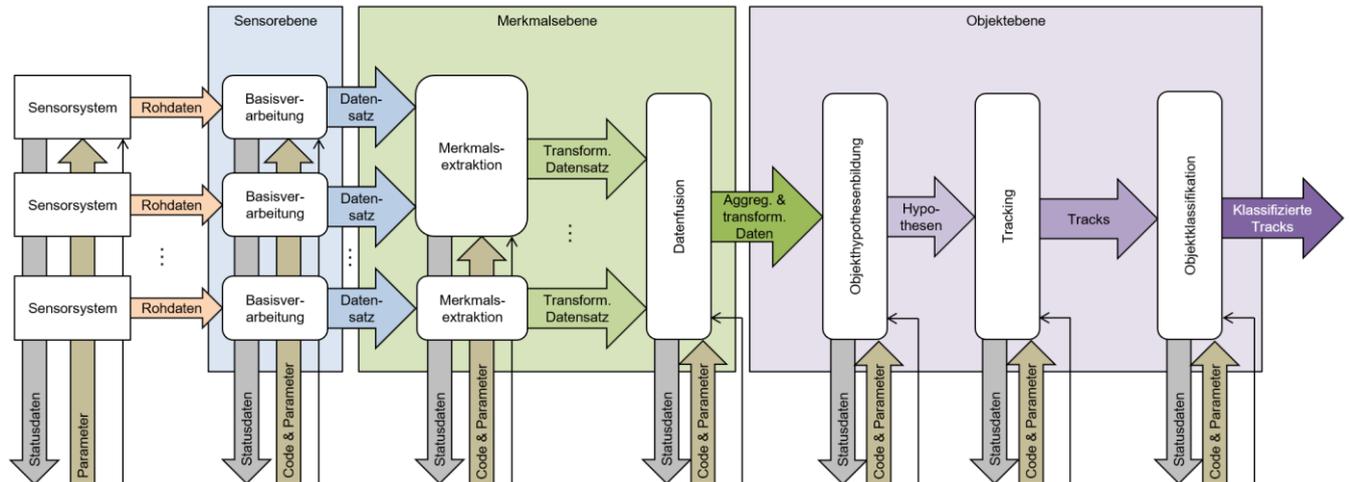


Abbildung 32: Prozessuale Sicht auf die Trajektoriengenerierung (Feinansicht)

Die Rohdaten aus den Sensorsystemen bilden die Grundlage der vollständig parallelisierten Basisverarbeitungsprozesse. Die daraus resultierenden Datensätze werden auf Einzelsensorebene der weiteren Verarbeitung auf Merkmalsebene zugeführt. Je nach verwendeter Sensorik werden hierfür die Datensätze teilweise zusammengeführt, teils auch als Einzeldatensatz verarbeitet. Insgesamt erzeugt diese prozessuale Ausgestaltung die Möglichkeit einer beliebigen Anzahl von transformierten Datensätzen, die eine abstrakte Repräsentation der jeweiligen Sensordaten umfassen. In dem darauffolgenden Schritt der Datenfusion erfolgt eine Aggregation der transformierten Datensätze innerhalb eines gemeinsamen Merkmalsraums. Der hierdurch erzeugte aggregierte und transformierte Datensatz wird dann in Folge über die Teilschritte einer Objekthypothesenbildung mit folgendem Tracking und Klassifikationsschritte weiter zu klassifizierten Tracks veredelt, dem gewünschten Ergebnis dieses Systembereichs. Die Trajektorien ergeben sich dann aus einer Zusammenführung der Tracks über den zeitlichen Ablauf einer Szene.

Zusätzlich zu den tiefer aufgeschlüsselten Verarbeitungspfaden umfasst die Abbildung noch zu- und abgehende Daten- und Steuerungspfade. Diese umfassen sowohl Daten für die Konfiguration der jeweiligen Prozesse in Form von Ausführungscodes und Parameter für eine Konfiguration des Betriebs als auch Statusdaten für Aufgaben im Bereich der Systemsteuerung und des Datenqualitätsmanagements. Die Steuerungspfade für die Ablauf- und Betriebssteuerung sind in schwarzer Linienführung ausgeführt.

5.4.2 Applikationsbereich

Der Applikationsbereich ist der Bereich, in dem Fachlogik zur Anwendung kommt und die Daten aus einer objektbasierten Ebene (also einer Datenebene) in ihren semantischen Kontext auf einer Informationsebene eingearbeitet werden. Der Bereich kann in die zwei grundlegenden Bereiche Situationserfassung und -interpretation, wie in Abbildung 33 dargestellt, systematisiert werden.

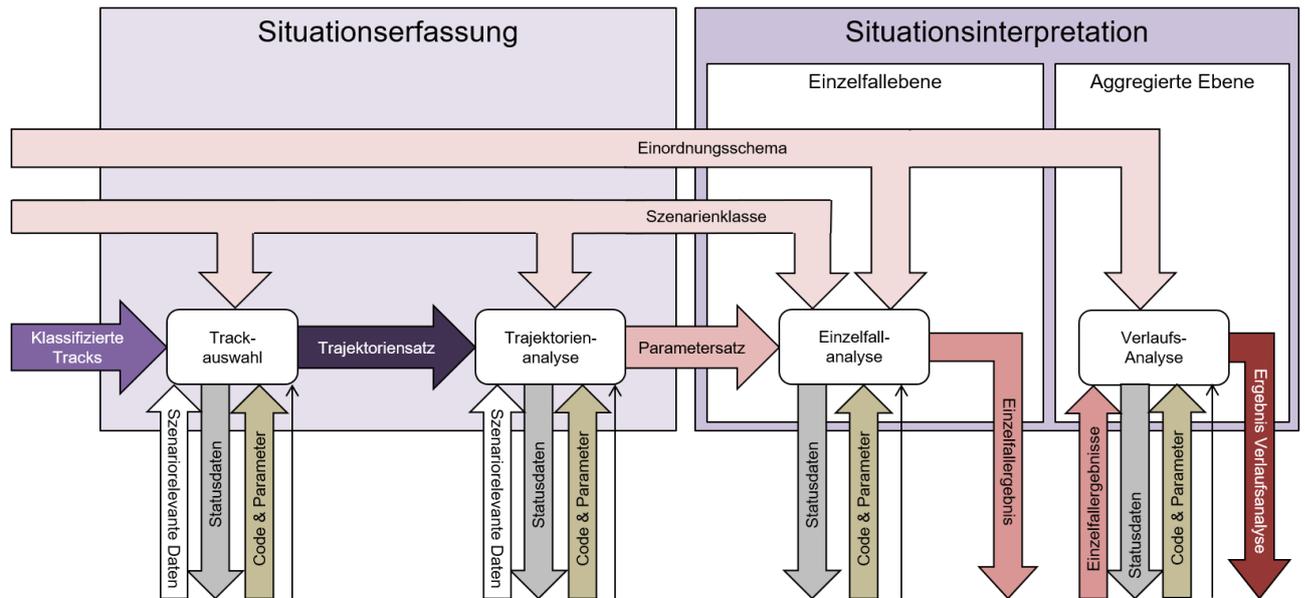


Abbildung 33: Prozessuale Sicht auf die Situationserfassung und -interpretation

5.4.2.1 Situationserfassung

Die grundlegende Aufgabe der Situationserfassung liegt in der Auswahl und Bestimmung von verkehrlichen Bewegungsmustern aus der Menge aller klassifizierten Trajektorien. Hierfür erfolgt eine Zusammenführung der Bewegungsdaten mit den relevanten szenariospezifischen Zusatzdaten. Die Situationserfassung beinhaltet zwei explizite Zwischenschritte:

Der erste Schritt liegt in der Situationserfassung. Diese umfasst eine Auswahl von passenden Trajektorien aus den vorliegenden Gesamtdaten. Grundlage hierfür bietet das Modell einer Szenarienkasse, welche bereits vor Laufzeit erarbeitet und spezifiziert wurde, sowie weitere bestimmende Faktoren wie die relevanten Entitäten und die Szenerie (statisches Umweltmodell, verkehrliche Reglementierungen, Wetter u.ä.). Auf Basis dieses Modells erfolgt die spezifische Auswahl der Tracks aus der aktuell verfügbaren Grundmenge – der Trajektoriensatz. In der Trajektorienanalyse erfolgt die Bestimmung der Szenarieninstanz aus dem Trajektoriensatz. Die Trajektorien- und Szenariendaten werden hierfür in den Zustandsraum der Szenarienkasse überführt. Diese Bestimmung lässt sich zusammen mit den weiteren szenariospezifischen Daten in einen Parametersatz zusammenführen. Die eigentliche Interpretation findet dann im Zustandsraum der Szenarienkasse statt.

5.4.2.2 Situationsinterpretation

Generell lassen sich zwei grundlegende Formen der Situationsinterpretation differenzieren: die Einzelfall- und Verlaufsanalyse. Die Einzelfallanalyse umfasst die Behandlung und Interpretation eines konkreten singulären Ereignisses und die Ableitung entsprechender Erkenntnisse im szenariospezifischen Zustandsraum. Dafür übernimmt die Situationsinterpretation als Input die Szenarienkasse, den bestimmten Parametersatz sowie ein vorab aufgebautes Einordnungsschema, nach dem die konkreten Szenarien bewertet und analysiert werden. Diese werden der Einzelfallanalyse zugeführt. Je nach Anwendungsfall und fachlicher Fragestellung erfolgt dann die Formulierung eines spezifisch ausgestalteten Einzelergebnisses.

Ziel einer Verlaufsanalyse ist die Zusammenführung einer Menge von Einzelergebnissen eines Szenarios, um daraus Trends und Systematiken abzuleiten. Typische Ergebnisse dieser Analysen sind statistisch geprägte Aussagen, die zum Beispiel in Form von Histogrammen, Verteilungsplots oder anderen Formen visualisiert werden.

5.4.3 Sekundäre Verarbeitung

Die sekundäre Verarbeitung teilt sich auf in die Bereiche der Rohdatenspeicherung und der Ergebnisvisualisierung, wie in Abbildung 34 skizziert.

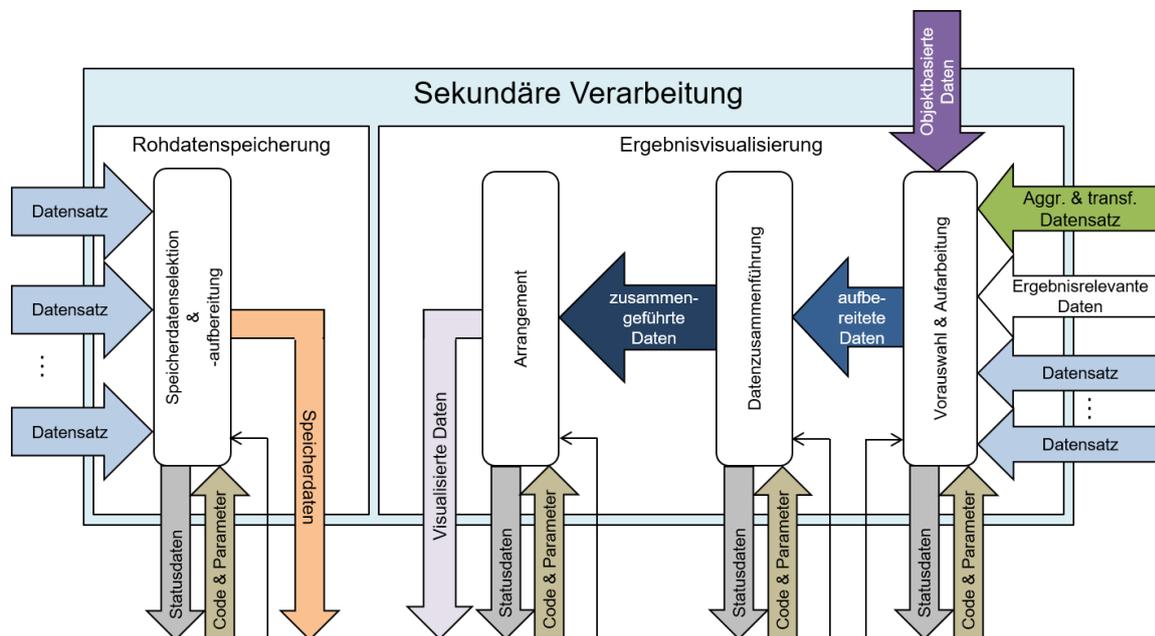


Abbildung 34: Prozessuale Sicht auf den sekundären Verarbeitungsbereich

Die Rohdatenspeicherung wird insbesondere für Zwecke der Entwicklung verwendet (vgl. Abschnitt 6.2.6). Die Eingangsdaten dieses Bereichs bestehen in den Datensätzen, also den sensor-systemnächsten Datenformen, die zur Verfügung stehen. Aus diesen Daten wird die Untermenge an Datensätzen ausgewählt, die für die Speicherung vorgesehen werden. Diese werden im Rahmen einer Aufbereitung dann als Speicherdatensatz korrespondierend gespeichert. Der relevanteste Faktor liegt hierbei in einer Sicherung der zeitlichen Verfügbarkeiten im Systemkontext, um in späteren Testläufen valide Aussagen über ein Laufzeitverhalten ableiten zu können.

Die Ergebnisvisualisierung hat zur Aufgabe je nach Ausgestaltung und Konfiguration systemnahe Verarbeitungsschritte zu visualisieren und zum Zwecke der Nachvollziehbarkeit und Präsentation aufzubereiten. Diese Aufbereitung ermöglicht die Verfügbarmachung visuell abgleichbarer Aussagen über die Funktionsfähigkeit und Systemgrenzen, wie auch der Aufbereitung von Datenmaterial für die manuelle Bearbeitung im Rahmen von Offline-Analysen (zum Beispiel manuelle Annotationen von Trajektorienmaterial bei neuen Formen von Anwendungen o.ä.). Die prozessuale Abfolge beginnt mit der Auswahl und Zusammenführung der jeweiligen Daten aus den unterschiedlichen Systemverarbeitungsebenen, die mit externen Daten verschnitten und in einem abschließenden Schritt arrangiert werden (wie Aufbau und Zusammenführung von verschiedenen Blickwinkeln o.ä.).

5.4.4 Betriebssteuerung

Der Begriff des Betriebs beschreibt die Aufgaben im Zusammenspiel mit der Zusammenführung von Systemprozessen, deren Kopplung sowie Management. Die Betriebssteuerung in Abbildung 35 umfasst daher neben der eigentlichen Systemsteuerung selbst das Daten- und Informationsmanagement des Systems. Ebenso ist hier der Bereich der Funktionsentwicklung eingefasst.

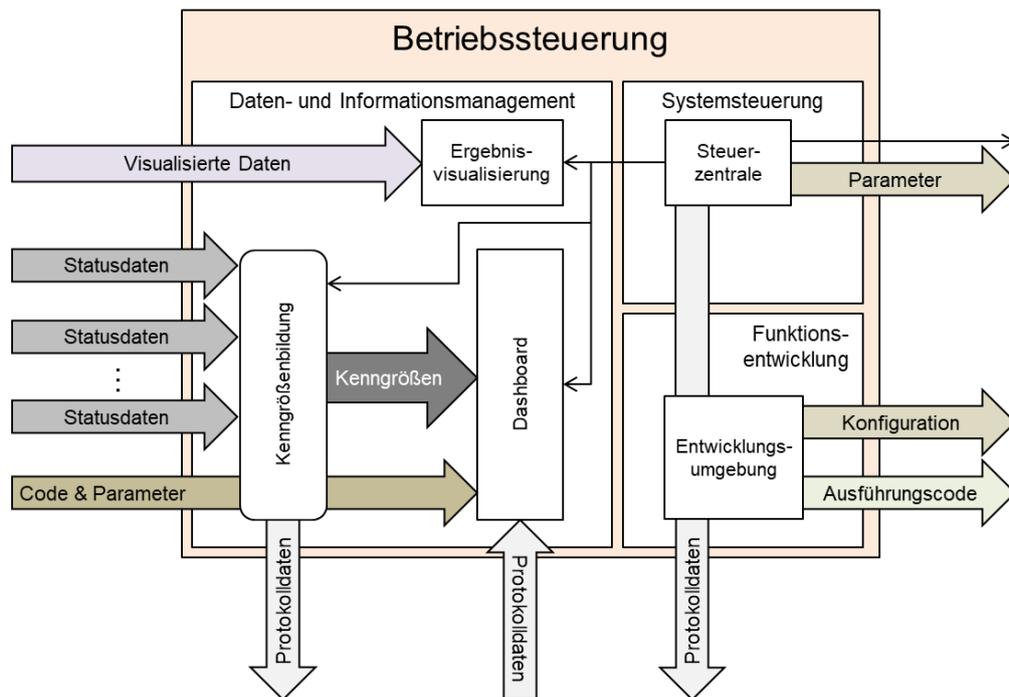


Abbildung 35: Prozessuale Sicht auf den Bereich der Betriebssteuerung

Das Daten- und Informationsmanagement führt dabei verschiedene Informationsebenen aus dem gesamten System zusammen. Zum einen sind dies die visualisierten Daten aus dem der sekundären Verarbeitungsbereich, die hier in eine Ergebnisvisualisierung eingebettet werden. Daneben erfolgt hier die Verarbeitung der aus dem Gesamtsystem erhobenen Statusdaten. Diese werden in Form von Kenngrößen transformiert, also in den Kontext ihrer jeweiligen Systemrahmenbedingungen gestellt. Diese Kenngrößen werden danach in einem Dashboard als Information für den Systembetriebszustand zur Verfügung gestellt und stellen damit das Herzstück des Systemmonitorings dar. Die jeweiligen Kenngrößenverläufe können für die Nachvollziehbarkeit protokolliert werden, so dass die historischen Verläufe Hinweise auf Veränderungen im Betriebsverhalten wie auch Hinweise auf punktuelle Events im Dashboard ermöglichen.

In der Steuerzentrale erfolgt die gebündelte Manipulation des Systembetriebs. Diese erfolgt einerseits über Steuereingriffe, andererseits über die Vorgabe der Parameter für die Spezifizierung zu den Konfigurationen für die systemeigenen Module.

Der letzte Bereich der Systementwicklung steht stellvertretend für alle auftretenden Formen der in Abschnitt 5.3 diskutierten Entwicklungsaufgaben. Das Ergebnis dieser Arbeiten liegt in neuen Formen von Ausführungscode sowie passender Konfigurationen, welche im Code-Repository gespeichert werden.

5.4.5 Betriebsphasen

Die vorangegangenen Abschnitte geben das grundlegende prozessuale Zusammenspiel des Systems wieder. Ein zusätzlicher Blickwinkel liegt in der temporalen Komponente. Abbildung 36 gibt eine Übersicht über die grundlegenden Phasen im Rahmen eines Wissenschaftsbetriebs wieder.

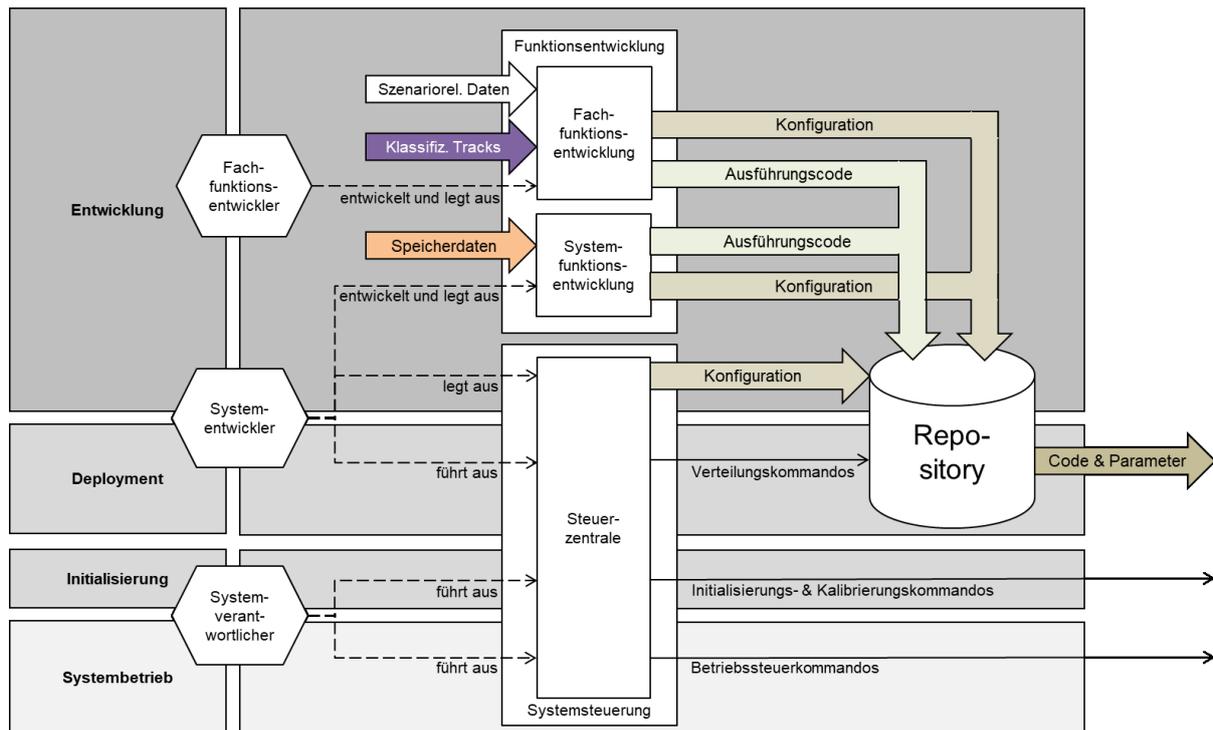


Abbildung 36: Systematisierung der seriell aufeinanderfolgenden Betriebsphasen

Dabei werden mit der Entwicklung, dem Deployment, der Initialisierung sowie dem tatsächlichen Systembetrieb vier grundlegende Phasen unterschieden, die seriell aufeinander folgen. Die Auffächerung in die verschiedenen Schritte ermöglicht die Differenzierung der Arbeitsfelder der bereits bekannten Akteure. Deren Handlungsfelder und Aufgaben sind in Form gestrichelter Pfeile ausgeführt.

Der Beginn liegt dabei in der Entwicklung von notwendigen fachbezogenen und systemfunktionsrelevanten Funktionalitäten durch die jeweiligen Entwickler, was die Grundlage für die Weiterentwicklung der jeweiligen Systembereiche gemäß Abbildung 30 ermöglicht. Die Ergebnisse dieser Arbeiten bestehen in neuen Formen von ausführbarem Code und den dazu passenden Konfigurationen. Nach dem Schritt des Deployments, also der Verteilung der Systemfunktionalitäten und der entsprechenden Parametersätze erfolgt die Initialisierung des Systems durch die Systemverantwortung, so dass das System in den Betrieb übergeht. Dieser Systembetrieb wird dann durch die Systemverantwortung gesteuert und (hier nicht dargestellt) das Monitoring durchgeführt.

Die skizzierten Phasen werden als Prozessablauf für jeden Einsatz im Rahmen neu durcharbeitet und schließen sich dabei über die unterschiedlichen anwendungsfallbezogenen Nutzungen des Systems in Form einer iterativen Schleife.

5.4.6 Betriebsformen

In den Kernanforderungen in Abschnitt 3.1 ist die Fähigkeit zu einem echtzeitfähigen Betrieb der gesamten Verarbeitungskette, also von der Erfassung bis hin zur Situationsanalyse, aufgeführt. Diese Form des Systemaufbaus stellt vergleichsweise hohe Anforderungen an die Systemgestaltung und die Auslegung der Systemstrukturen und bedeutet auch gleichzeitig operative Einschränkungen für algorithmische Strukturen und Nutzung von Methoden. Außerdem ist es für viele Anwendungsfälle im Bereich der Situationsanalyse nicht grundlegend erforderlich eine vollständige Echtzeitfähigkeit vorauszusetzen. Daher orientiert sich die weitere Systemgestaltung an zwei grundlegenden Auslegungsformen, die zwei verschiedene Betriebsformen erzeugt, den Offlinebetrieb und den Onlinebetrieb.

Abbildung 37 zeigt die Prozessabläufe für beide Betriebsformen in Form einer Grafik.

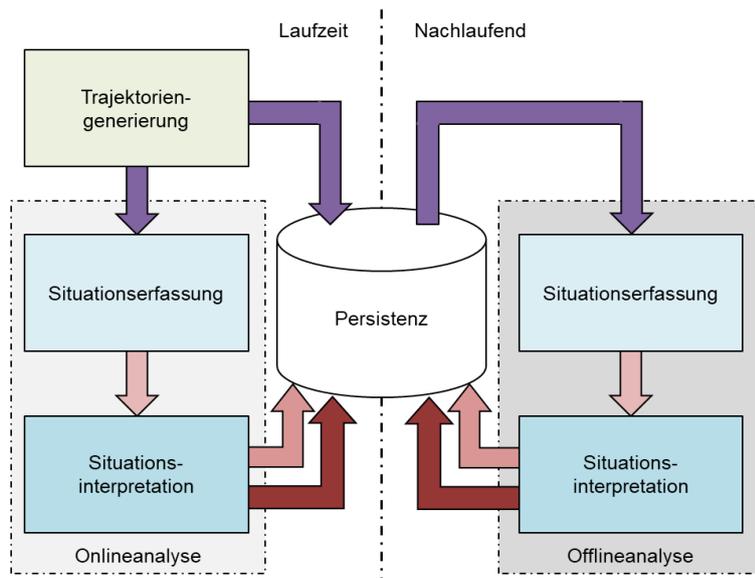


Abbildung 37: Online- und Offlinebetriebsabläufe

Die Abbildung unterteilt sich in zwei Halbkugeln. Links sind Systemprozesse skizziert, die zur Laufzeit des Systembetriebs ablaufen. Dargestellt wird mit der Trajektorien-generierung sowie einer onlinefähigen Analyse-kette eine vollständig durchgängige Echtzeitfähigkeit der Systemprozesse.

Für einen Offlinebetriebsablauf wird die Trennung der Arbeitsbereiche Trajektorien-generierung und deren Verarbeitung möglich. So erfolgt zwar die Trajektorien-generierung in Echtzeit. Dagegen erfolgt die Analyse dieser Daten zeitlich unabhängig als chronologisch nachgelagerter Prozess. Gekoppelt sind die Prozessbereiche über die persistente Speicherung der Trajektorien für die spätere Verarbeitung. Notwendig und sinnvoll ist diese Betriebsform zum Beispiel für die Validierung der implementierten Echtzeitprozesse, eine Entwicklung neuer Echtzeitfunktionalität im Kontext der Fachfunktionsentwicklung sowie der Durchführung von ressourcenkritischen und nicht echtzeitfähig auszulegenden Prozessen. Daneben ermöglicht sie auch die örtliche Entkopplung der Prozesse, was unter anderem eine schlankere technische Systemausgestaltung im Falle begrenzter Systemressourcen (zum Beispiel kleinerer Einheiten im Feld) ermöglicht sowie die Grundlage für eine institutionsübergreifende Arbeitsweise ermöglicht. Die Offlineanalyse kann somit auch in anderen Systemen (zum Beispiel Backendstrukturen) stattfinden, wo üblicherweise deutlich größere Systemressourcen bereitgestellt werden können, als im feldnahen Systembereich.

Mit dem vorgestellten Systemkonzept lassen sich damit alle denkbaren Formen von Studien durchführen. Von der singulären Messkampagne bis hin zur Längsschnittstudie über verschiedene Projektkontexte hinweg sind viele Formen aus-gestaltbar.

5.4.7 Optimierung der Prozesskette für den Offlinebetrieb

Die prozessuale Darstellung in Abbildung 32 zeigt den in lilafarbenen Schattierungen eingefassten Bereich der Objektebene als einzelne sequentiell ablaufende Prozesskette. Dies entspricht der grundsätzlich gewählten Systematik, die so gewählt wurde, dass sie eine möglichst latenzfreie Verarbeitungskette ermöglichen. Die technische Ausgestaltung umfasst dabei üblicherweise Validierungsprozesse, die eine Bewertung der einzelnen Objekthypothesen auf Basis von Schätzgrößen (zum Beispiel Existenzwahrscheinlichkeiten) sicherstellen. Je nach Szenenverlauf und sensorischen Gegebenheiten kommt es dabei zu Anpassungen von grundlegenden Aussagen wie Objektausdehnung oder Klassifikation. Die Gründe hierfür lassen sich aus dem einfachen Gedankenmodell eines den Detektionsraum durchfahrenden Fahrzeugs ableiten:

Zu Beginn der Durchfahrung wird das Fahrzeug nur mit einem Teil der eigenen Kontur erfasst. So ist es dem System, unabhängig vom gewählten sensorischen Setup, in diesen zeitlichen Bereichen nur bedingt möglich bestimmte Größen wie die Länge des Fahrzeugs oder daraus abgeleitete Aussagen wie dessen Klassifikation zu ermitteln. Ebenso kann es in bestimmten Phasen der Durchfahrung zu temporären Störeffekten, zum Beispiel durch messtechnische Verdeckungen, kommen. Hierdurch werden sich im zeitlichen Szenenverlauf gegebenenfalls systeminterne Schätzgrößen anpassen und zu Änderungen auf der Ausgabeseite führen. Solche Änderungen sind im Allgemeinen unerwünscht, da sie der Anforderung einer jederzeit verfügbaren gesamtheitlichen Szenenbewertung Grenzen setzen. Während diese Phänomene für einen latenzarmen Echtzeitbetrieb nur bedingt zu umgehen sind, ermöglicht die Betriebsform der Offlineanalyse hier einen höheren Freiheitsgrad.

Abbildung 38 zeigt zwei parallel aufgebaute Prozessketten für den Teilbereich der Objektebene. Der obere Zweig entspricht der bereits bekannten Form, wie sie in Abschnitt 5.2.1 eingeführt wurde. Parallel hierzu wurde eine weitere, unabhängig davon arbeitende Prozesskette aufgebaut, die für die Betriebsform der Offlineanalyse genutzt wird. Das Verfahren ist in der Abbildung im unteren Bereich schematisch dargestellt. Im Schritt der Objekthypothesenbildung werden Informationen mit einem Ringspeicherelement zwischengepuffert. Diese Zwischenpufferung ermöglicht den Rückgriff auf historische Daten innerhalb der Verarbeitung. Diese werden dann als erweiterte Grundlage für eine zeitversetzte Generierung von klassifizierten Trajektorien genutzt. In der Praxis hat sich ein Zeitversatz von 30 bis 60 Sekunden als praktikabel herausgestellt, da hierdurch im üblichen Verkehrsfluss genügend relevante Informationen zusammengeführt werden können, so dass die oben genannten Störeffekte minimiert werden.

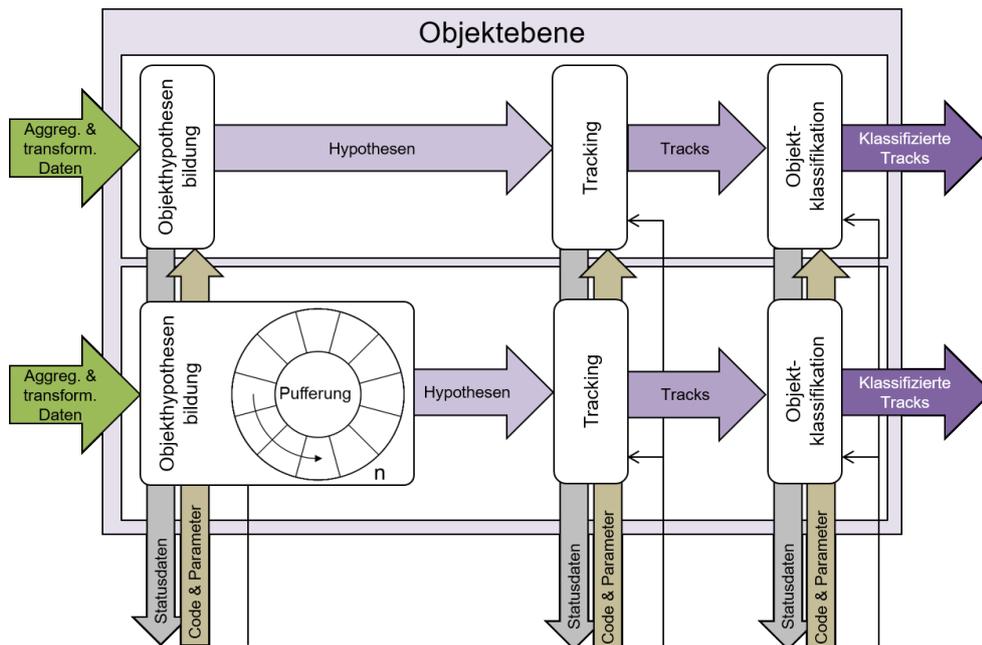


Abbildung 38: Prozessuale Sicht auf die Objektebene in paralleler Ausgestaltung

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das geschilderte Verfahren nicht zu einer Aushebelung der vormals definierten Echtzeitfähigkeit des Systembereichs führt. Eine unbestimmte Länge des Zeitversatzes würde zu einer kaum kontrollierbaren Anhäufung von Daten führen, was jedes System an physische Grenzen brächte. Damit wäre ein störungsfreier Dauerbetrieb nicht zu gewährleisten, da das System an relevanten Stellen „Volllaufen“ würde. In der technischen Ausgestaltung wird lediglich die Latenz des Systems als Zeitversatz über einen festen Parameter voreingestellt, welcher im Rahmen der Initialisierung des Systems übergeben wird. Die darauf aufbauende Kette der Weiterverarbeitung kann davon entkoppelt weiterarbeiten und von der verbesserten Datenqualität profitieren.

5.4.8 Data Interface and Service Control Units (DISCUs)

In Abschnitt 5.3.2 wurde ausgeführt, dass eine Kapselung der zwingend in Echtzeit auszulegenden Systembereiche der Trajektorienerfassung geboten erscheint, um einen professionalisierten Systembetrieb mit einem hohen Service Level sowie eine Beachtung datenschutzrechtlicher Belange sicherzustellen. Das Ziel besteht in einer funktionalen Kohäsion, also der Zusammenführung aller Funktionalitäten für die Objektermittlung in einen in sich geschlossenen Verarbeitungsbereich.

Auf Basis dieser Diskussionen wird an dieser Stelle das Konzept eines Data Interface and Service Control Units (DISCUs) als generisches Gestaltungs- und Strukturierungselement eingeführt. Abbildung 39 zeigt das Schema des Konzepts in grafischer Form.

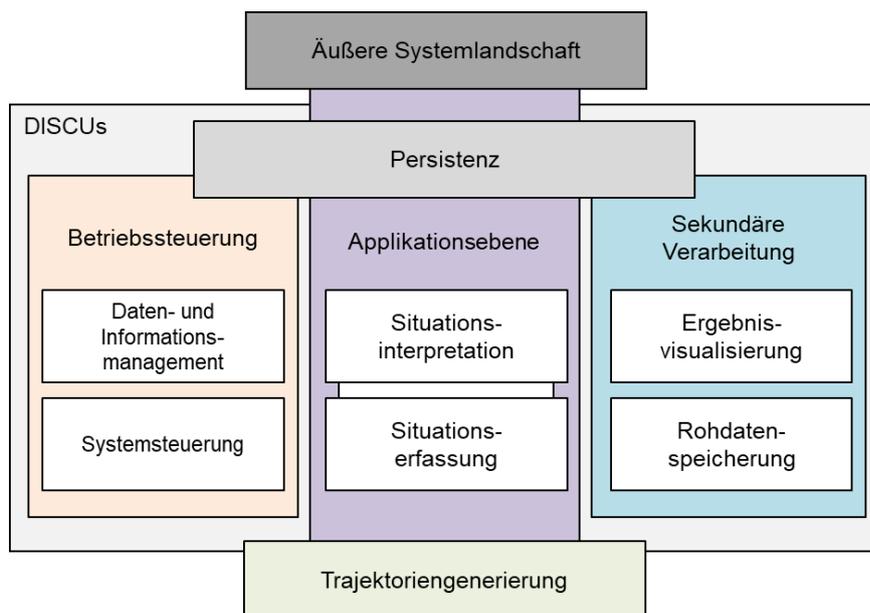


Abbildung 39: Schema der Systembereiche mit den durch DISCUs eingefassten Systembereichen

DISCUs umfasst dabei verschiedene Motivationen: Das Konzept ermöglicht die Schaffung einer expliziten Instanz für die Bündelung verschiedener Systembereiche. Dabei erfolgt eine definierte Entkopplung der hochperformant auszulegenden Trajektoriengenerierung von weiteren Aufgabenbereichen und folgt damit dem Prinzip des in (BMVI 2018) aufgezeigten Schemas des Daten- und Dienstvermittlers.

Die Interaktion mit der äußeren Systemlandschaft läuft ebenfalls komplett über die funktionale Kopplung ab. DISCUs dient damit als Schnittstellenfunktion auf Applikationsebene und vereint diese mit den weiteren Aspekten des Systembetriebs wie dem Daten- und Informationsmanagement, der Systemsteuerung, Ergebnisvisualisierung sowie der persistenten Datenspeicherung. Die Ausgestaltung des DISCUs-Konzepts orientiert sich dabei auf physischer Ebene an den jeweils vorhandenen Ressourcen und Möglichkeiten, wie im folgenden Abschnitt ausgeführt wird.

5.5 Szenariosicht

Die Szenariosicht beschreibt die Kernszenarien, die ein System unterstützt und erläutert dabei Abläufe zwischen Komponenten bzw. Prozessen des Systems im Anwendungskontext eines Testfeldbetriebs. Den Betrachtungen liegen dabei wiederum Kernanforderungen aus Abschnitt 3.1 zugrunde, die in Weiterführung der Überlegungen aus den vorhergehenden Abschnitten in typische Anwendungsszenarien überführt werden.

5.5.1 Offlinebetrieb

Die grundlegende Motivation für die Ausgestaltung des Offlinebetriebs liegt in der Ex-Post-Analyse vorab aufgezeichneter Trajektorienverläufe. Typische Aufgabenfelder liegen in der Batch-Analyse großer Sets von Trajektorien in unterschiedlichen fachlichen Aufgabenstellungen, wie beispielsweise der Bewertung von sicherheitskritischen Ereignissen im Verkehr in (Dotzauer, Junghans et al. 2017) oder (Dotzauer, Saul et al. 2018). In Abschnitt 6.4 werden hierfür Anwendungsbeispiele vorgestellt. Genutzt werden in diesen Analysen typische Methoden aus dem Bereich der explorativen Datenanalyse und Statistik, Big Data Ansätze sowie Data Analytics Techniken. Je nach Anbindungsgrad des Systems lassen sich verschiedene Anwendungsszenarien herausarbeiten.

Der so genannte Inselbetrieb sieht vor, dass ein System ohne Anbindung an äußere Systemstrukturen zur Laufzeit einer Kampagne genutzt wird. Der Betrieb der aufgebauten Systeme läuft üblicherweise in abgeschlossenen Kampagnen ab, die im Zuge von Forschungsprojekten definiert und ausgeplant werden. Über schmalbandige Kommunikationsanbindungen (zum Beispiel Mobilfunk) kann über entsprechende Fernwartungszugänge eine Statusabfrage und grundlegende Manipulation des Betriebs gewährleistet werden. Darüber hinaus trennt diese Form des Betriebs die Verarbeitungskette in zeitlich und zumeist auch örtlich abgetrennte Teilbereiche der Erfassung und Abspeicherung von Trajektorien samt maßgeblichen situativen Einflussgrößen einerseits und der Verarbeitung auf Applikationsebene andererseits. Große Vorteile liefert dieses Verfahren überall dort, wo es aus technisch-organisatorischen Gründen nicht möglich oder zu komplex ist ausreichende Rechenkapazität für eine vollständige messortnahe Verarbeitungskette oder ausreichend hohen Bandbreiten für die Übertragung zum Analyseort zur Verfügung zu stellen. Dies trifft insbesondere auf mobile Varianten der infrastrukturellen Erfassung zu, wie sie im Rahmen von Messkampagnen im öffentlichen Verkehrsraum oder auf einem Testgelände zum Einsatz kommen (vgl. Abschnitt 6.1).

Die Ergebnisdaten aus der Erfassung werden in vorbestimmten Zyklen aus dem Feldaufbau entnommen und durch die Nutzung von Datenspeichern an den Ort der Datenhaltung transferiert, wo sie in Datenbanken eingespeist und damit für die Analysen verfügbar gemacht werden. Die Nutzung von physikalischen Wechselspeichern wie SSD's oder Festplatten bedingt die Integration eines Transferservers, welcher als physikalische Schnittstelle für die Aufnahme dient und in dem Netzwerkbereich des Backendbereichs angebunden ist.

Vorteile dieser Betriebsform liegen darin, dass am Ort der Messung (also im Feldbereich) keine umfangreiche Datenanbindungsinfrastruktur erforderlich wird. Dies ermöglicht eine Reduktion der notwendigerweise in Echtzeit ausgelegten Teile der Signalverarbeitungskette. Hierdurch ist der Betrieb vergleichsweise robust sowie technisch und organisatorisch aufwandsarm. Die Nachteile des Verfahrens liegen in einem fehlenden integrierten Gesamtablauf, einem daraus resultierenden höheren Anteil an manuellen Prozessschritten sowie einer zumeist recht starren Organisationsform einer Kampagne.

Die Verfügbarkeit von hochvolumigen Datenanbindungen zwischen den Bereichen der Daten- und Wissensgewinnung ermöglicht die Ausgestaltung maschineller und automatisierter Transferierungsansätze. Es findet immer noch eine zeitliche und örtliche Trennung von Erfassung und Analyse statt. Die Verarbeitung erfordert allerdings weder die physische Präsenz vor Ort, noch die manuelle Durchführung des Transfers. Dieser kann zyklisch bzw. eventbasiert mit beliebig hoher Automatisierung angestoßen und abgearbeitet werden (zum Beispiel über Skripte). Anzumerken ist, dass die Datenvolumina, die im Rahmen der Transfers bewegt werden müssen, trotz aller Maßnahmen vergleichsweise hoch sind. Gleiches zeigt sich folglich bei den technischen Kosten der Anbindungslösung. In der Praxis hat es sich als durchaus sinnvoll erwiesen die Daten zu bestimmten Zeitpunkten in Paketen zu transferieren (in den verkehrlich wenig frequentierten Bereichen), da dieses Verfahren sich letztendlich als robust und störungsarm gezeigt hat und so unerwünschte Rückwirkungen auf den eigentlichen Erfassungsbetrieb durch Phasen intensiven Datenzugriffs vermieden werden. Die Analysen finden wiederum auf persistent gespeicherten

Datensätzen ab und unterliegen den gleichen Rahmenbedingungen wie im oben beschriebenen Inselbetrieb.

Für die eigentliche Datenanalyse stehen zwei grundlegende Formen zur Auswahl: Ein Transfer auf die Arbeitsplatzrechner der Analyseexperten ermöglicht die dortige Verarbeitung. Dies erbringt naturgegeben Vorteile durch die Möglichkeiten von schnellen und unkomplizierten Zugriffen auf die Daten. Ein Nachteil ist die vergleichsweise niederperformante Systemumgebung eines Arbeitsplatzrechners mit seinen begrenzten Ressourcen. Diese Form der Analyse wird typischerweise für erste explorative Ansätze und Rapid Prototyping Verfahren genutzt. Dem gegenüber steht eine Verarbeitung in einem Hintergrundsystem. So stehen zum Beispiel im TS-eigenen Backend (DLR 2021) als Hintergrundsystem für die Testfelder AIM und TF NDS systemnahe performante Ressourcen zur Verfügung, die als Ausführungsumgebung genutzt werden können, wie zum Beispiel ein professioneller Application Server. Die Vorteile liegen in einer skalierbar performanten Systemumgebung samt breitbandiger Datenanbindung zwischen den genutzten Ressourcen. Außerdem lassen sich umfangreiche automatisierte Prozessketten aufbauen, die Datenbestände in den Datenbanken des Hintergrundsystems ohne weitere manuelle Bearbeitung um korrespondierende Informationen erweitern. Somit lässt sich eine hohe Nachhaltigkeit in der Algorithmenutzung erreichen. Diese Arbeitsform bedingt allerdings auch die Notwendigkeit eine Einarbeitung in die einzusetzenden Technologien und Softwareportfolios. Diese Form der Verarbeitung findet sich typischerweise für die professionalisierte Analyse großer Datenbestände mit Algorithmenbeständen in hohen Reifegraden oder mit hohen Ressourcenanforderungen.

5.5.2 Echtzeitbetrieb

Die grundlegende Motivation ist eine echtzeitfähige Ad-hoc-Analyse und Verarbeitung von Trajektorien- und Laufzeitdaten zur Laufzeit der Erfassung. Daraus erfolgt die direkte Anforderung einer direkt(er)en Kopplung zwischen dem Erfassungs- und dem Analysebetrieb. Mit dieser Kopplung kommen auch im Bereich der Analyse zeitkritische Parameter in den Blickwinkel.

Eine übliche Vorgehensform ist die Erarbeitung von Funktionalität im Rahmen von offline analysierten Datensätzen und deren darauffolgende Implementierung in Form echtzeitfähiger Algorithmen. Eine Kernfrage in der technologischen Ausgestaltung behandelt die Form der Kopplung zwischen Erfassungs- und Analyseprozesskette. Die Trajektorien- und Laufzeitdaten sollten für den Fall des Echtzeitbetriebs architektonisch nah an der Quelle bearbeitet werden, um so eine latenz- und störungsarme Verarbeitung zu ermöglichen. Die Überlegungen in Abschnitt 5.2.4 zeigen, dass Trajektorien- und Laufzeitdaten sowohl in der Persistenz, als auch in der Ebene des Application Servers vorliegen (wo sie ja erzeugt werden). Eine Nutzung der systemeigenen Persistenzschicht zur Übergabe der Trajektorien- und Laufzeitdaten an die Analyseprozesse erscheint nicht zielführend. Eigene Untersuchungen zeigen zwar eine prinzipielle Eignung von klassischen Datenbankkonzepten für einen Dual Use, also einer parallelen Speicherung und echtzeitnahen Weiternutzung. Selbst relationale Datenbanksysteme sind in der Lage entsprechende Anfragen (Queries) so zu puffern, so dass ein weicher Echtzeitbetrieb denkbar wäre, doch skaliert dieser Ansatz nur unzureichend. Darüber hinaus verbleibt stets das Problem, dass die Zugriffszeiten vom Auslastungsgrad der Datenbank und damit schlussendlich von der verkehrlichen Situation bestimmt und damit nicht deterministisch vorhersagbar sind. Die Nutzung spezialisierter Datenbanksystemen wie in (Walz 22.08.2016) diskutiert wäre natürlich denkbar, führt aber letztlich an einer schlanken pragmatischen Problemlösung vorbei.

Im Kontext der vorliegenden Arbeit wurden zwei Ansätze konzipiert. Einerseits ist dies die Einbindung der Analyseketten über eine Kopplung auf Basis der Interprozesskommunikationsschicht, die in Abschnitt 6.1 aufgeführt wird. In der tatsächlichen Ausgestaltung erfolgt dabei teilweise ein Übergang der in den Systemen genutzten IPC-Variante in das DLR-eigene Dominion (Hendriks, Harms et al. 2019) über generische Konverter. Festzuhalten ist dabei aber der konzeptuelle Grundsatz, dass unbeachtet der jeweils genutzten Rahmenstrukturen die lückenlose Weiterverarbeitung der Trajektorien- und Laufzeitdaten über echtzeitfähige Interprozesskommunikation auch auf der Analyseebene sichergestellt wird. Dabei ist es durchaus gewollt und üblich, dass einmalig aufgebaute

Funktionalität (zum Beispiel eine bestimmte Form der verkehrlichen Risikoanalyse bei örtlicher Annäherung von zwei Fahrzeugen) wiederverwendet und damit nachhaltig aufgebaut und genutzt wird. Mit dem Grad der Funktionserweiterung der Situationsanalyse kommt dem Systemmonitoring für die gemeinsam genutzte Systemressource des Application Servers eine entscheidende Bedeutung zu. Es muss stets sichergestellt werden können, dass die zusätzlichen Systemanforderungen sauber abgeschätzt werden, um die Validität der laufenden Prozesse und damit der Ergebnisdaten absichern zu können. Diese Form des Echtzeitbetriebs wurde im Testfeld AIM umgesetzt.

Der zweite Ansatz bedient sich zur Kopplung der Trajektoriengenerierung mit der Situationsanalyse an Technologien aus dem Datenstrommanagementbereich. Dieser Ansatz wurde im Rahmen des Testfelds NDS umgesetzt. Die Wahl der Systemausgestaltung basierte auf der Länge der sensierten Strecke und der damit zu erwartenden Systemanforderungen im Bereich der Situationsanalyse. Diese machen eine skalierfähige und professionalisierte Form der physischen Architektur notwendig, die eine einheitliche Plattform mit hohem Durchsatz und geringer Latenz für die Verarbeitung von Echtzeit-Datenfeeds bereitstellt, welche auf einer direkten Anbindung der Feldeinheiten mit dem Hintergrundsystem basiert. Eine detailliertere Darstellung dazu erfolgt in Abschnitt 7.4.

5.5.3 Kombiniertes Regelbetrieb

Ein großer Vorteil der systematischen Trennung von Trajektoriengenerierung und Situationsanalyse ist die gute Nebenläufigkeit der beiden Betriebsformen Offline und Online. Bei Einhaltung bestimmter Grenzen, die durch die technischen Verfahren und Systemressourcen gegeben sind, ist es möglich im Regelbetrieb eine nahezu unbeeinflusste Parallelnutzung zu ermöglichen. Dabei werden die Ergebnisse der Ad-hoc-Analysen üblicherweise wie die Trajektorien Daten behandelt, also persistent gespeichert und einer nachträglichen Analyse zugeführt. Die Einbindung in die Prozesswelt entspricht dabei der unter Abschnitt 5.5.1 aufgezeigten Verarbeitungsketten.

Der kombinierte Regelbetrieb ermöglicht einerseits eine Nachvollziehbarkeit über die Performanz und Validität der unter Echtzeitbedingungen ablaufenden Prozessketten. Hierfür können die korrespondierend aufgezeichneten Zeitreihendaten in einem nachfolgenden Schritt ausgewertet werden, was einen systematisch geführten Analyseprozess auf der Basis einer breiten Datenbasis ermöglicht.

Daneben ermöglicht der kombinierte Regelbetrieb die zeitgleiche Nutzung eines Systems unter verschiedenen Aufgabenbereichen. So ist es zum Beispiel möglich, einerseits sicherheitskritische Ereignisse in einem spezifischen Interaktionsbereich einer Kreuzung zu erfassen, während parallel dazu das gesamte erfassbare Verkehrsgeschehen miterfasst wird. So lassen sich zeitgleich mehrere Zielstellungen innerhalb einer Messkampagne bearbeiten. Daneben stellt diese Möglichkeit der Nebenläufigkeit die Grundlage für eine Bewertung aktiver Eingriffe in das Verkehrsgeschehen unter Nutzung des Systems im Sinne einer Vorher-Nachher-Analyse. Die hierfür notwendige Form der funktionalen Kopplung mit anderen Bereichen eines Testfelds wird im folgenden Abschnitt angerissen.

5.5.4 Funktionale Kopplung mit anderen Testfeldbereichen

Die Stärke eines dienstebasierten Ansatzes für die Architektur eines Testfelds liegt in der Möglichkeit einer funktionalen Kopplung von Diensten zur Generierung erweiterter Nutzungsszenarien. Ein prominentes Beispiel für diese Vorgehensweise in den Testfeldern AIM und Testfeld NDS liegt in einer Kombination der infrastrukturebundenen verkehrlichen Erfassungslösung mit einem technischen Kommunikationsdienst, wie der AIM Referenzstrecke (DLR, Institute of Transportation Systems 2017). Durch diese Kombination ergeben sich Möglichkeiten der zielgerichteten Einbindung des Systems in einen höheren Funktionsverbund, wie in (Knake-Langhorst, Gimm et al. 2016) ausgeführt. Grundlage ist dabei, dass die echtzeitfähige Erfassung und Interpretation des Verkehrsgeschehens genutzt werden, um die vorliegende Informationslage über technische

Kommunikationslösungen mit möglichst geringer Latenz an Verkehrsteilnehmer zu kommunizieren. Ebenso ist eine Übertragung von Informationen zum Beispiel aus der Fahrzeugwelt in den Infrastrukturbereich denkbar, die dort dann miteinander verschnitten und zu neuen Informationslagen veredelt werden können.

Letztendlich ermöglicht das Vorgehen die Schaffung verteilter Systemverbünde, in denen ein Geflecht verschiedener Informationsquellen und -senken bestehend aus Fahrzeugen, intelligenten Infrastrukturen miteinander wirkt, wie er in Abbildung 40 skizziert wird. Neben den bereits beschriebenen Diensten können dabei natürlich weitere eingebunden sein, die sowohl im Feldbereich, auf der Ebene von Edgesystemen¹² als auch in Hintergrundsystemen allokiert sind.

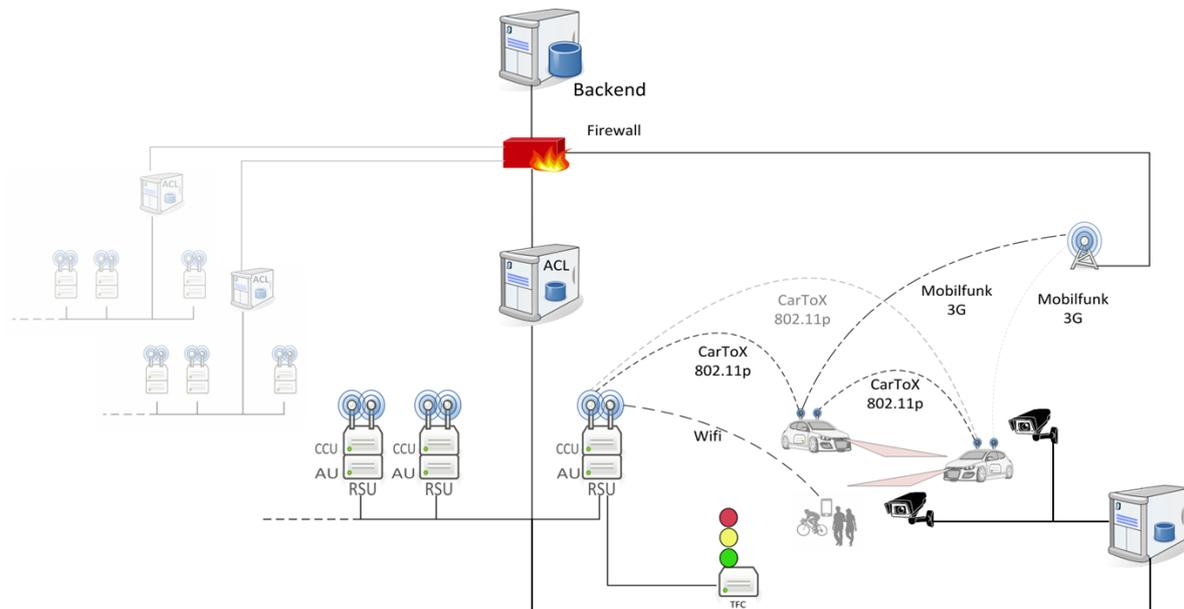


Abbildung 40: Verteilter Systemverbund unter Einbindung intelligenter Infrastrukturen nach (Knake-Langhorst, Köster 2018)

Ein System, wie es im Rahmen dieser Arbeit diskutiert wird, stellt dabei sicherlich nicht die letztendliche Ausgestaltung im Sinne eines Produktwesens dar. Dies ist allerdings auch nicht der intendierte Nutzen eines Testfelds. Vielmehr schafft dieses einen passenden Rahmen von Werkzeugen für einen flexiblen und umfänglichen Einsatz für vorwettbewerbliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie für die Evaluation effizienter (und entsprechend kostengünstig ausgelegter) produktnaher Lösungen im Rahmen von Test und Validierung. Gleichwohl lassen sich prototypische Lösungen erzeugen und auf ihre Wirksamkeit hin untersuchen.

Während eine tiefere Diskussion der damit verbundenen Möglichkeiten den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengt, zeigt sich doch auf Basis des Geschilderten, welches Potential sich in dem generellen Vorgehen entfaltet. Relevanter Punkt ist hierbei, dass die verkehrliche Erfassung und Interpretation unter Echtzeitbedingungen die Grundlage für eine valide und performante Erfassung von situationspezifischen Konstellationen und Artefakten bildet, die viele neue Möglichkeiten für ein innovativ gestaltetes intelligentes Verkehrssystem, insbesondere im Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens, bietet. Beispiele für entsprechende Ausgestaltungsansätze werden in Abschnitt 7.4 wieder aufgegriffen und verdeutlicht.

¹² In der Abbildung sind Edgekomponenten durch den Begriff ACL (Aggregation and Concentration Layer) gekennzeichnet

6 Anwendungsbeispiel Testfeld AIM

Die folgenden Abschnitte dienen dazu einen tieferen Einblick in die technische Ausgestaltungsebene der entwickelten Systeme zu erhalten und relevante Aspekte ihrer Leistungsumfangs und Performanz zu belegen. Hierzu werden zuerst die Systeme selbst beleuchtet und mit ihren grundlegenden Ausprägungen dargestellt. Daran anschließend werden systemübergreifende Eckpunkte der technischen Ausgestaltung beleuchtet. Dem Abschnitt folgt ein gebündelter Überblick über die eingesetzten Verfahren zur Evaluation der Güte von Betrieb und Datenqualität. Anschließend werden Beispiele aus dem bisherigen Einsatzspektrum der Systeme in den intendierten Anwendungsfeldern präsentiert.

Am Beispiel des Testfelds AIM wird dabei das zuvor beschriebene Systemkonzept in vier Schritten angewendet:

1. Umsetzung der generischen Systemarchitektur in konkrete Systemaufbauten. Hierbei wird zwischen einer mobilen Variante und einer stationären Variante unterschieden
2. Darstellung der Daten- und Informationsverarbeitungskette, die für die Analyse von verkehrlich relevanten Situationen zur Anwendung kommt
3. Einblicke in die Verfahren zur Systemverifikation und -validierung inkl. der Evaluation der Datenqualität
4. Darstellung konkreter Analyseergebnisse am Beispiel einer Verkehrssicherheitsanalyse und der Ausgestaltung kooperativer Systeme

6.1 Systemaufbau

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die Erhebungssysteme, die auf Basis der Konzeptebene abgeleitet und im Rahmen der Errichtung des Testfelds AIM aufgebaut wurden¹³. Die Abschnitte stellen die dabei genutzten Technologien heraus und stellen den jeweiligen Bezug zur Architekturebene her. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei in der Verteilung der Softwarekomponenten auf physikalische Instanzen, also deren Verortung auf die eingesetzten Hardwareelemente sowie der Kommunikation zwischen diesen. Je nach projektgebundenem Anwendungskontext wurden und werden die Anlagen teilweise angepasst und erweitert. Hierfür werden an entsprechenden Stelle Beispiele benannt. Die Abschnitte ermöglichen damit eine Übersicht über das zugrundeliegende modulare Aufbaukonzept mit exemplarischen Einblicken in die gewählten Systematiken, Vorgehensweisen und Systemmerkmale. Dazu gehört auch die exemplarische Darstellung genutzter Sensorverarbeitungsketten unter dem Einsatz verschiedener Sensortechnologien. Tiefere Einblicke in die spezifischen Systemauslegungen und insbesondere die sensorischen Verarbeitungskonzepte geben die systemeigenen Dokumentationen des Testfelds AIM wie (Arndt 2018b; JENOPTIK Robot GmbH 2015a, 2015b).

6.1.1 AIM Mobile Aufbauten

Ein guter Ausgangspunkt der Betrachtungen liegt in den AIM Mobilen Aufbauten (DLR, Institute of Transportation Systems 2016b). Dieser Dienst aus dem Testfeld AIM besteht aus insgesamt drei Messeinrichtungen für die Durchführung von Messkampagnen in wechselnden Einsatzgebieten. Der Gesamtaufbau umfasst für diese Messsysteme in der kleinsten Ausprägungsstufe ein projektspezifisch ausgelegtes Sensorsystem mit einer darauf abgestimmten Verarbeitungskette, welches als einzelnes Verarbeitungssystem ausgelegt ist.

Abbildung 41 zeigt auf der linken Seite ein Bild eines der Systeme, die in Form von Mastaufbauten ausgelegt sind, sowie auf der rechten Seite den generellen Systemaufbau in schematischer

¹³ Die Dienste zur infrastrukturellen verkehrlichen Erfassung im Testfeld Niedersachsen wurden analog zu den AIM-Systemen ausgelegt und folgen den in dieser Arbeit gezeigten Architekturschemata. Sie befanden sich zum Zeitpunkt der Schriftlegung allerdings noch in der Entwicklung, so dass sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt werden. Es sei auch hier auf bereits vorhandene Systemdokumentation verweisen, wie [Arndt (2018a)].

Darstellung. Das Bild zeigt den eigentlichen Masten mit dem daran befestigten Sensorkopf. Der hier in Kurbelausführung realisierte Mast kann bis zu einer Höhe von 5-6 m ausgefahren werden, um verkehrliche Szenen aus einer Überblicksperspektive erfassen zu können. Der Sensorkopf bildet den Anbauort der genutzten Sensortechnologien. In der abgebildeten Ausbaustufe sind dies ein Stereo-Video-System sowie ein mit den Belichtungsvorgängen der Kameras gekoppelter Infrarot-Blitz zur künstlichen Szenenbeleuchtung. In den vergangenen Jahren ihres Einsatzes erfolgten zu verschiedenen Zeitpunkten Umbau- und Anpassungsmaßnahmen. Dabei kamen Monokamerasysteme, Radar- wie auch Lidarsysteme zum Einsatz.

Die Energieversorgung, Rechen- und Vernetzungstechnik sind in einem outdoorfähigen Schaltschrank untergebracht. Die Rechentechnik umfasst mehrere Standardserver mit x64-Architektur im 19 Zoll-Format. Die funktionalen Elemente sind auf einem massiven Betonfundament montiert. Der vergleichsweise robust und massiv ausgelegte Grundaufbau ermöglicht einen gewissen Grad an Schutz vor Vandalismus und wurde gewählt, um Messkampagnen mit einer Dauer von mehreren Tagen bis wenigen Wochen ohne stetigen Zugriff oder Überwachung auch im öffentlichen Bereich zu ermöglichen. Ebenso konnten mit der Ausgestaltung wichtige Aspekte des Datenschutzes umgesetzt werden, insbesondere die Zutritts- und Zugriffskontrolle zu den datenverarbeitenden Rechnerinstanzen. Für den flexiblen messtechnischen Einsatz können zusätzlich vorhandene Lastenanhänger genutzt werden, um einen effizienten Transport sicherzustellen und die Notwendigkeit eines Absetzens der Masten am Einsatzort zu umgehen.

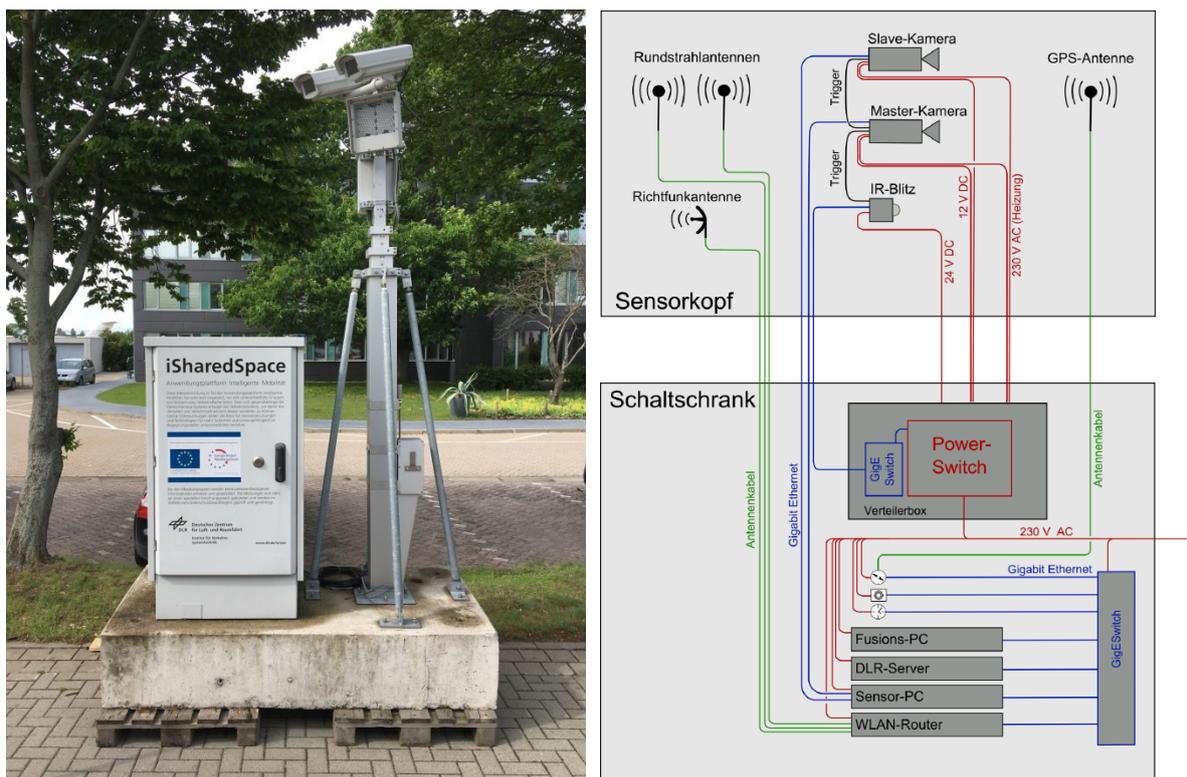


Abbildung 41: AIM Mobile Aufbauten. Links: Abbildung eines Mastaufbaus, rechts: physisches Aufbauschema aus (DLR, Institute of Transportation Systems 2016b)

Das Schaubild differenziert verschiedene Rechnerinstanzen, auf die die eingesetzten Softwaremodule verteilt sind. Eine Interprozesskommunikationsschicht ermöglicht auf Basis eines TCP/IP-Protokolls den gezielten Informationsaustausch zwischen den Modulen nach einem Publish/Subscribe-Paradigma. Hardwaretechnische Grundlage hierfür ist ein Gigabit-Ethernet Switch, welcher die zeiteffiziente Verteilung der Daten zwischen den Instanzen ermöglicht. Das Schaubild führt im Bereich des Sensorkopfes unter anderem eine GPS-Antenne auf. Diese dient dem Empfang einer

Zeitreferenz als Grundlage einer NTP-basierten Synchronisation aller im Systemverbund vorhandenen Rechnerinstanzen.

Abbildung 42 skizziert die physische Architektur der AIM Mobilen Aufbauten in Form der bereits bekannten Symbolik. Die verschiedenen eingesetzten Rechnerinstanzen sind in strichpunktierter Form und unterschiedlicher Farbschattierung voneinander abgesetzt. Der Fokus soll vorerst auf dem mittleren der drei Mastaufbauten liegen (dem so genannten Hauptmast), welcher das Minimalsetup des Systems für den Einsatz darstellt.

Das Schaubild zeigt die grundsätzliche Logik der Funktionalitätsverteilung auf. Dabei erfolgt die Basisverarbeitung auf Sensorebene auf einer Instanz, die hier in Analogie mit Abbildung 41 als Sensor-PC bezeichnet ist. Diese Bündelung ermöglicht die Nutzung von zeit- und ressourceneffizienten Shared-Memory Konzepten zur Verarbeitung der hochvolumigen Bilddatenströme aus den beiden hochauflösenden Kameras bis hin zum Aufbau einer Disparitätskarte. Die Prozesse der Merkmalsextraktion und -fusion wiederum laufen gebündelt auf einer weiteren Instanz, hier Fusions-PC benannt. Alle weiteren Prozesse sind auf einer als DLR-Server benannten eigenen Rechnerinstanz zusammengeführt, die mit der Hypothesenbildung, dem Tracking und der Klassifikation die weiteren Prozessschritte der Trajektorienermittlung in sich vereint. Die – außer für die Ermittlung der Videorohdaten – asynchron ausgelegte Kommunikationsausführung über die Interprozesskommunikationsschicht erlaubt die blockierungsfreie Funktion des gesamten aufgebauten Signalverarbeitungsflusses. Die physische Repräsentanz des DISCUs Konzepts ist ebenfalls auf dem DLR-Server allokiert, über den unter anderem der Daten- und Informationsaustausch mit der äußeren Systemlandschaft erfolgt und insbesondere die jeweilige Applikationsebene umfasst.

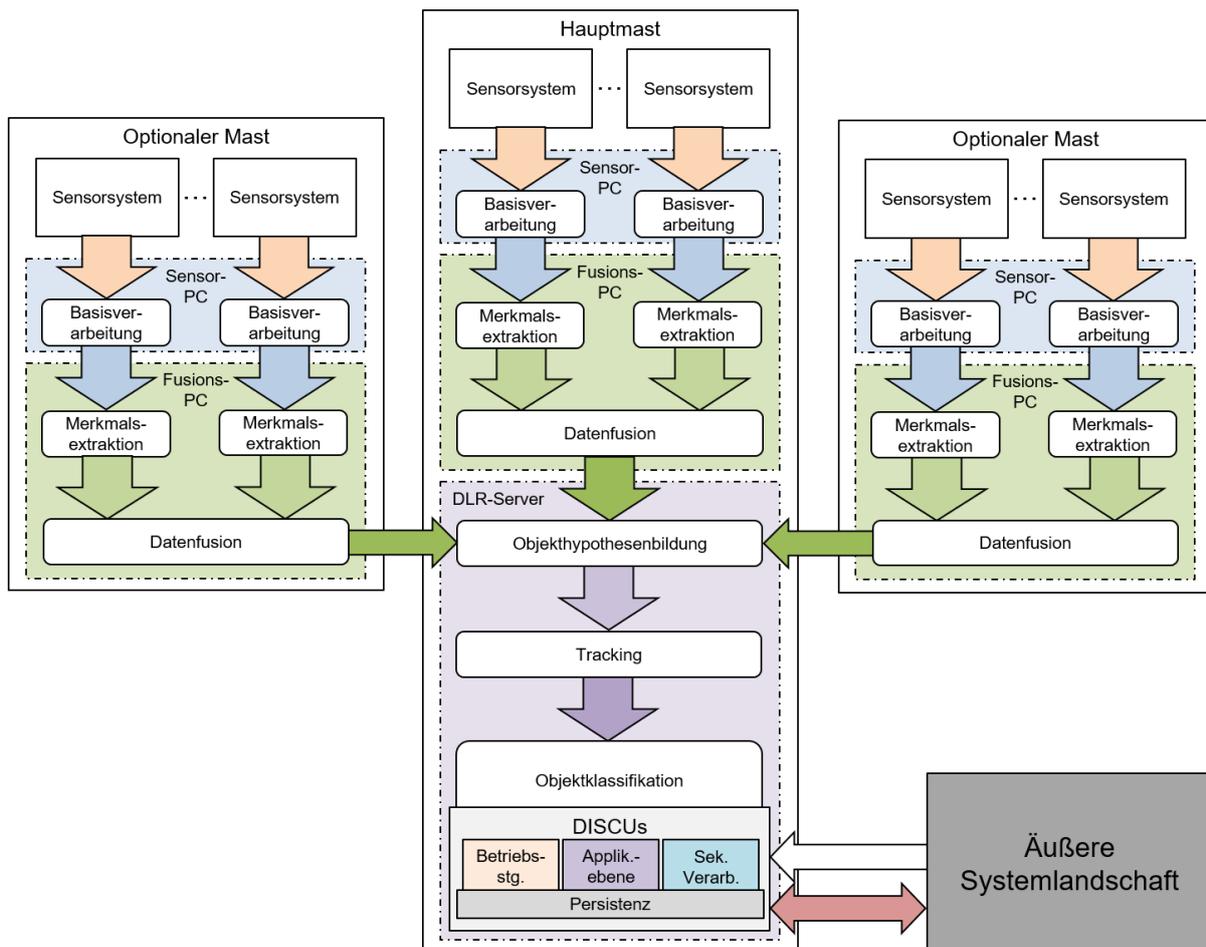


Abbildung 42: Physische Architektur der AIM Mobilen Aufbauten

Das Systemkonzept der AIM Mobilien Aufbauten sieht explizit die Erweiterung des Messaufbaus mit weiteren Maststandorten vor, also einem kombinierten Betrieb von zwei oder mehr Masten. Hierfür erfolgt eine funktionale Kopplung des Hauptmasts mit weiteren optionalen Masten. Ein Beispiel hierfür wird in Abbildung 43 gezeigt, das Bild entstand während eines Prüfgeländetests auf dem VW-Testgelände in Ehra-Lessin im Rahmen des Projekts PEGASUS. Es sind neben den Testfahrzeugen zwei von drei verschalteten Mastaufbauten im Bild zu erkennen.



Abbildung 43: Prüfgeländetest auf dem VW-Testgelände Ehra-Lessin im Rahmen von PEGASUS

Abbildung 42 zeigt auf, in welcher Systematik sich hierdurch die physische Architektur erweitert. In diesem Fall nutzen alle eingesetzten Mastaufbauten die jeweils vorhandenen Sensor- und Fusions-PCs für die bereits beschriebenen Aufgabenbereiche. Die Kopplung der Masten kann drahtlos ausgeführt werden, in Praxisbetrieb hat sich die drahtgebundene Ausführung allerdings besser bewährt. Die Gründe liegen in schwer steuerbaren Latenzeffekten durch die WLAN-Übertragungsprotokolle, die qualitätsmindernd auf die Trajektoriengüte einwirken. Die erzeugten Merkmalsdaten werden auf einem der Masten zentral zusammengeführt, aggregiert und zu gemeinsam erzeugten Trajektorien Daten veredelt. Diese Trajektorien Daten werden zentral in einem relationalen Datenbankschema gespeichert. Dies erfolgt in Korrespondenz mit aufbereiteten Szenenvideos, die in Form von Videofiles abgelegt werden.

6.1.2 AIM Forschungskreuzung

Bei der AIM Forschungskreuzung (DLR, Institute of Transportation Systems 2016a) handelt es um eine stationäre Anlage an der nordöstlichen Ecke des innerstädtischen Rings im Stadtgebiet Braunschweig (Ecke Hagenring / Rebenring). Der betreffende Knotenpunkt ist einer der meist frequentierten und komplexesten im gesamten Stadtgebiet mit mehrstreifiger Ausführung von Haupt- und Abbiegestreifen in allen Armen.

Abbildung 44 zeigt die Kreuzung jeweils in der Draufsicht. Die Grafik links skizziert dabei die Sensorstandorte und deutet die jeweiligen Sichtkegel der Sensorik an. Die rechte Abbildung zeigt die projizierten Spuren von Trajektorien zur Verdeutlichung der Erfassungsreichweite. Die linke Abbildung veranschaulicht das umfangreiche Sensor-Setup unter Nutzung von insgesamt elf unterschiedlichen Anbauorten. Diese wurden so gewählt, dass für die gesamte Fläche des inneren Kreuzungsbereichs sowie ausgewählte Randbereiche gewährleistet werden kann, dass eine Szene von jeweils mindestens zwei Sensorsystemen aus unterschiedlichen Winkeln überblickt werden kann. So können Verkehrsteilnehmer stets von mehreren Seiten gleichzeitig erfasst werden.

Darüber hinaus können in dem vergleichsweise komplexen messtechnischen Aufbau temporäre Verdeckungen vermieden werden, die zu Abrissen oder systematischen Ungenauigkeiten in den Trajektorienverläufen führen würden.

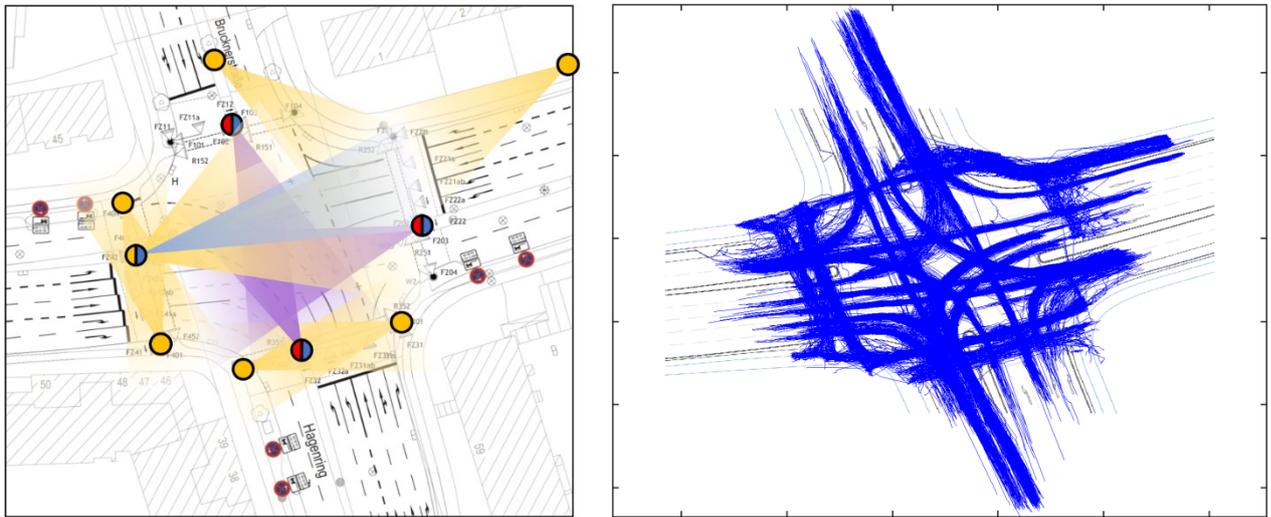


Abbildung 44: AIM Forschungskreuzung. Links: sensorischer Aufbau, rechts: exemplarischer Spurverlauf von Trajektorien

Zum Einsatz kommen dabei verschiedene etablierte Technologien, die in der Abbildung durch unterschiedliche Farbgebung der Kreissymbole angedeutet werden. Die gelb gefärbten Standorte repräsentieren Stereokamerasysteme, die Farbe Rot weist auf Monokamerasysteme hin, Radarsysteme sind an der blauen Färbung zu erkennen. Die Sensorkegel deuten die jeweiligen Detektionsbereiche an. Abbildung 45 zeigt eine Übersicht über die montierten Sensorgruppen.¹⁴ Fünf der Anbauorte befinden sich an den zentralen Lichtsignalmasten der Kreuzung auf ca. 4-5 m Höhe über Straßenniveau und fokussieren dabei auf zentrale Teilbereiche der Kreuzungsinnenfläche. Vier weitere Anbauorte ermöglichen die detaillierte Detektion im Bereich der östlichen und südlichen Querung. Darüber hinaus wird die nördliche Furt samt östlichem Zulauf zusätzlich aus zwei Blickwinkeln aus einer Höhe von ca. 3 m messtechnisch erfasst. Alle Sensorstandorte verfügen neben der aufgeführten Sensorik über Infrarotblitze zur künstlichen Szenenbeleuchtung.

Die Rohdatensignale der Mastanbauten werden direkt in ein Schalthaus im südwestlichen Kreuzungsbereich zusammengeführt, wo die eigentliche Verarbeitung stattfindet. Die Stereokamerasysteme erzeugen dabei Disparitätskarten, aus denen 3D-Merkmale abgeleitet werden. Die Merkmalsextraktion aus den Monokamerasystemen erfolgt durch die Fusion mit den jeweiligen Radarsystemen und basiert dabei grundlegend auf dem optischen Fluss. Für die technische Systemauslegung wurden die bereits in Abschnitt 6.1.1 ausgeführten Elemente und Verfahren genutzt. Es kommt das gleiche Interprozesskommunikationsframework zum Einsatz, die Synchronisation des Systems wird über einen systemweit genutzten NTP-Zeitserver realisiert. Die eingesetzte Rechentechnik ist zum überwiegenden Teil in einem klimatisierten Schaltschrank untergebracht.

¹⁴ Alle in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse (insbesondere Abschnitt 6.4) auf dem hier dargestellten Sensor-Setup. Gemäß der in der Arbeit gestellten Rahmenbedingungen einer kontinuierlichen Weiterentwicklungsfähigkeit der Anlagen unterliegt der messtechnische Aufbau Änderungen, welche den tatsächlichen Ausbaustand in der Zukunft beeinflussen werden



Abbildung 45: AIM Forschungskreuzung, eingesetzte Sensortechnologien Stand Februar 2020 aus (Arndt 2018b)

Abbildung 46 zeigt die Allokation der verschiedenen Prozessschritte auf die verbauten Rechensysteme analog zum Vorgehen in Abbildung 42. Für die Ausführung werden wiederum Standard-Server mit x64-Architektur im 19 Zoll-Format genutzt. Einzig die Rechnerinstanzen der integrierten Stereo-Video-Masten im Nordbereich der AIM Forschungskreuzung (in Abbildung 46 als Signalverarbeitungsserver Querungsbereich Nord 1 und 2 bezeichnet) sind aufgrund des beschränkten Bauraums und der nicht klimatisierten Unterbringung im Mastaufbau selbst als Industrie-PC ausgeführt.

Die Basisverarbeitung der Mastensensoren erfolgt wie bei den AIM Mobilien Aufbauten über spezifische Signalverarbeitungsserver mit direkter Anbindung an die jeweilige Sensorik. Die extrahierten Merkmalsdaten werden dann auf einer einzelnen Serverinstanz – dem Objekterkennungsserver – zusammengeführt und zu klassifizierten Objekthypothesen verarbeitet. Die weiteren Schritte der Prozesskette laufen auf einer zusätzlich vorhandenen DISCUS-Instanz ab.

Die Trajektorien werden, ebenfalls analog zum Vorgehen bei den AIM Mobilien Aufbauten, in relationalen Datenbanken gespeichert. Da das System AIM Forschungskreuzung für den 24/7-Dauerbetrieb ausgelegt ist, erfordert der Systemaufbau einen Umgang mit dem stetig anwachsenden Datenvolumina. Die gefundene Lösung liegt in der Anwendung eines Ringpuffermechanismus. Dieser Mechanismus ist so ausgelegt, dass die jeweils ältesten Daten im persistenten Speicherbereich gelöscht werden, um ein Überlaufen der Speicher zu vermeiden. Das gleiche Verfahren wird für die korrespondierend aufgezeichneten Szenenvideos durchgeführt, um stets ein gesamtheitliches Gesamtdatenpaket als Grundlage weiterer Verarbeitungen sicherstellen zu können.

Das dargestellte Systemkonzept entspricht damit auf konzeptueller Ebene einer Zusammenführung verschiedener Sensorverarbeitungsstränge analog zu den in Abschnitt 6.1.1 modular erweiterbaren Mastkonstellationen der AIM Mobilien Aufbauten. Tatsächlich lassen sich die Anlagen beliebig miteinander kombinieren, so dass selbst eine modulare Erweiterung der AIM Forschungskreuzung mit einem oder mehreren Mastaufbauten der Mobilien Aufbauten ohne Entwicklungsaufwand möglich ist.

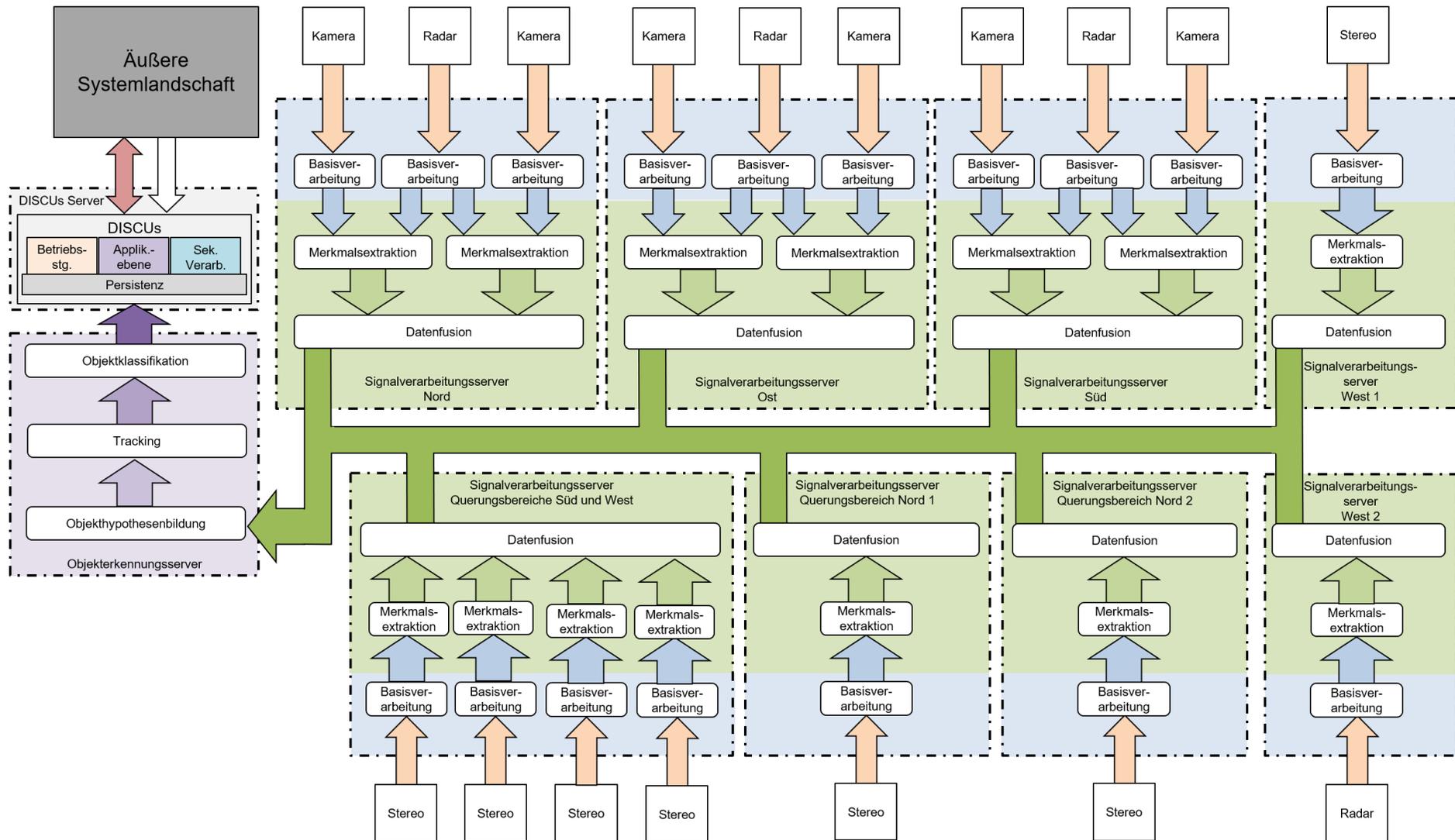


Abbildung 46: Funktionsallokation auf die Rechnersysteme an der AIM Forschungskreuzung

Ein interessanter Punkt, der sich in Abbildung 46 zeigt, ist die vergleichsweise freie Wahl der Funktionsallokation auf die verfügbare Rechnerressourcenlage durch die hochgradig parallelisierten Prozessketten. Ein prägnantes Beispiel liefert der Signalverarbeitungsserver Querungsbereiche Süd und West, welcher als alleinige Instanz für die Erzeugung der 3D-Merkmale aus insgesamt acht Bilddatenströmen mit einer Bandbreite von jeweils ca. 19 MB/s unter Echtzeitbedingungen dient, während dies aufgrund begrenzter Systemressourcen auf anderen Rechnersystemen nicht möglich war.

6.2 Daten- und Informationsverarbeitungskette

Die in den Vorabschnitten dargestellten Systemausgestaltungen wurden jeweils aus der in Kapitel 5 entwickelten Systemarchitektur abgeleitet. Sie stützen sich damit auf den gleichen elementaren Prinzipien auf funktionaler, organisatorischer und prozessualer Ebene ab. In diesem Abschnitt soll nun eine tiefergehende Darstellung der Umsetzungsergebnisse erfolgen, die anhand von projektspezifischen Anforderungen in den jeweiligen Anwendungsfeldern abgeleitet und implementiert wurden. Auch die technische Ausgestaltung erfolgte in einer Form, die eine Nutzung gleichartiger Prinzipien ermöglicht. Folglich finden sich die hier dargestellten Eckpunkte in allen im Rahmen der Arbeit entstandenen Systemen. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Ausgestaltung der Systembereiche der Trajektoriengenerierung sowie dem Daten- und Informationsmanagement als Grundlage des Systembetriebs.

6.2.1 Trajektorien- und Merkmalsdaten

Wie bereits im Rahmen von Abschnitt 5.4.1 ausgeführt, erfolgt die Fusion der sensorspezifisch erhobenen Daten auf der Merkmalsebene unter Nutzung von 3D-Merkmalen. Das genutzte Verfahren stellt ein dem Stixelprinzip artverwandtes Segmentationsverfahren dar. Die 3D-Merkmale werden nach ihrer Erzeugung unabhängig von ihrem zugrunde liegenden messtechnischen Prinzip in ein Gesamtmodell zusammengeführt und zu klassifizierten Tracks weiterverarbeitet. Es erfolgt an dieser Stelle ein gebündelter Überblick über die Ausgestaltung zur Schaffung des grundlegenden Verständnisses der späteren Abschnitte. Tiefere Einblicke in die Implementierung lassen sich aus den systemspezifischen Dokumentationen wie (Arndt 2018b; JENOPTIK Robot GmbH 2015b) entnehmen.

Abbildung 47 zeigt die systemeigene Merkmalsebene auf Basis einer annotierten Verkehrsszene aus dem Blickwinkel eines Sensormasten der AIM Mobilen Aufbauten. Die Szene entstammt aus einer Messkampagne im Innenstadtbereich der Stadt Ulm. Die Abbildung zeigt die Szene des Rathausvorplatzes mit unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern sowie die überlagerte Datenlage auf Merkmalsebene.



Abbildung 47: Annotierte Verkehrsszene aus einer Messkampagne mit den AIM Mobilen Aufbauten

Erkennbar ist die Überführung von sensorspezifisch ermittelten Informationen in diskretisierte Volumenelemente mit einer jeweils ausgewiesenen Höhe über der Grundfläche sowie einer Aussage zur Existenzwahrscheinlichkeit. Aus dem Bild lässt sich der grundlegende Unterschied zum Stixelansatz erkennen: Stixel sind Merkmale, die im 2D-Raum (der Bildebene) aufbereitet und modelliert werden, um dann als Grundlage einer 3D-Objekt-Rekonstruktion zu dienen (vgl. Abbildung 13). Das Verfahren, das im Rahmen dieser Arbeit implementiert wurde, basiert auf der Überführung der sensorspezifischen Daten in eine dreidimensionale Repräsentation. Jedem 3D-Merkmal wird dabei ein 3D-Geschwindigkeitsvektor zugeordnet. In der Abbildung sind die Merkmale entsprechend der geschätzten Bewegungsrichtung unterschiedlich eingefärbt (zum Beispiel in hellblau im Falle des nächstliegenden Fahrzeugs), wobei statische 3D-Merkmale (wie die Masten, Straßenpoller und Hausfassaden) weiß dargestellt sind. Das Prinzip der Datenfusion erlaubt die Zusammenführung beliebig vieler dieser 3D-Merkmale aus unabhängig voneinander arbeitenden Quellen. Im Allgemeinen sind die jeweiligen Messzeitpunkte nicht zueinander synchronisiert, so dass die Zeitbasis der 3D-Merkmale ebenfalls unterschiedlich ist. Die Geschwindigkeitsvektoren ermöglichen eine Überführung der Merkmale auf ein vorab definiertes Zeitraster. Zusätzlich erfolgt die Transformation der Daten in ein gemeinsames absolutes UTM-Referenzsystem (Bayerische Vermessungsverwaltung 2016). Mit dem gemeinsamen zeitlichen und örtlichen Bezugssystem ist die Voraussetzung für die Zusammenführung der Merkmale in ein gesamtheitliches Modell geschaffen.

Ein Objekt, welches sich durch den messtechnisch erfassten Raum bewegt, erzeugt charakteristische Anhäufungen von 3D-Merkmalen, die in Cluster zusammengefasst und mit einem gemeinsamen Geschwindigkeitsvektor versehen werden. In jedem Zeitschritt werden für alle Merkmale mögliche Zuordnungen zu bestehenden Clustern berechnet, so dass diese mit weiteren Messungen aktualisiert und angereichert werden. Für die Cluster werden damit Histogramme erzeugt, die die Grundlage der späteren Klassifikation bilden. Genauso können neue Cluster gebildet oder bei zu geringer Existenzwahrscheinlichkeit verworfen werden. Einzelne Volumenelemente, die keinem Cluster zugewiesen werden können, werden im Zuge dieses Verfahrens ignoriert, so dass stochastisch auftretende Fehlmessungen, wie sie in Abbildung 47 vereinzelt zu sehen sind, möglichst geringen Einfluss auf der Objektebene haben.

Die Klassifikation erfolgt in einem 5+1 Klassifikationsschema unter der Differenzierung der Klassen LKW, Transporter, PKW, Radfahrer und Fußgänger sowie der Klasse Unbekannt. In der aktuellen Form der Implementierung erfolgen dabei mehrstufig ausgelegte Klassifikationsprozesse jeweils für die drei motorisierten und die zwei nicht motorisierten Verkehrsteilnehmerklassen. Das grundlegend genutzte Differenzierungsmerkmal für den motorisierten Verkehr geht dabei von der A-priori-Annahme aus, dass deren quaderförmige Konturen in Form einer 3D-Box rekonstruiert werden können. Folglich differenziert das Verfahren zwischen den unterschiedlichen Objektdimensionen aus den Objekt-Histogrammen. Radfahrer und Fußgänger mit ihren prinzipiell eher punktförmig angelegten Objektkonturen werden davon differenziert betrachtet und anhand ihrer Bewegungsgeschwindigkeiten voneinander unterschieden.

Die Ausgabe der Trajektorien erfolgt unabhängig von den jeweiligen messtechnischen Abstraten mit einer Frequenz von 25 Hz. Neben der Ausweisung der Position und Klassifikation der Tracks erfolgt dabei jeweils die Ausgabe von Ausrichtung, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen in geostationären Koordinaten.

6.2.2 Szenenvideos

Parallel zum Aufbau der numerischen Trajektorien Daten erfolgt die automatisierte Erstellung von korrespondierenden Szenenvideos. Je nach Systemaufbau und messtechnischem Setup ermöglichen die eingesetzten Kamerasysteme die Nutzung unterschiedlicher Blickwinkel für eine möglichst differenzierte Szenenanalyse an, die auf bestimmte örtliche Bereiche oder Fokuspunkte ausgerichtet sind. Es hat sich als zweckmäßig herausgestellt passend zu den jeweiligen Bedarfen und Anforderungen einzelne Videostreams in Mehrsektorenbilder zusammenzufassen, die die benötigten Einblicke in eine Fahrscene aus mehreren Blickwinkeln erlauben. Abbildung 48 zeigt

exemplarisch eine Zusammenstellung aus dem Bereich der AIM Forschungskreuzung mit der Wiedergabe einer Fahrszene in Form eines Viersektorenbilds.

Zu erkennen ist der Innenbereich der Kreuzung aus der jeweiligen Perspektive der vier Mittelinseln (vgl. Abschnitt 6.1.2). Diese Zusammenstellung erlaubt einen guten Gesamtüberblick des gesamtgesellschaftlichen Verkehrsgeschehens, andere etablierte Zusammenstellungen bieten tiefere Detaileinsichten in bekannte Hotspots und Interaktionsflächen. Unabhängig von der jeweiligen Zusammenstellung lassen sich die Bilder mit der systemeigenen Informationslage überlagern, wie im vorliegenden Beispiel aus der Objektebene. Die Abbildung zeigt detektierte Fahrzeug-Tracks als grüne 3D-Boxen sowie zwei detektierte Fußgänger und einen Radfahrer als rote bzw. orangefarbene ausgewiesene Säulen¹⁵. Je nach Position der Objekte lassen sich diese teils mehrfach in den vier Sektoren wiederfinden. Alle Objekte tragen eine Kurzangabe ihrer jeweiligen Klassenzugehörigkeit¹⁶ und den letzten Stellen der eindeutig vergebenen ID. Zusätzlich zu erkennen sind transparente Pfeilspuren auf der Fahrbahnoberfläche. Diese markieren die Fahrwege der Objekte in den nächsten Sekunden und geben visuelle Hinweise über die zukünftigen Bewegungsmuster und Interaktionen. Dabei handelt es sich nicht um Prädiktionen. Vielmehr ermöglicht die zeitversetzte Ausgabe der Objekte (vgl. Abschnitt 5.4.7) eine Vorausschau der weiteren Trajektorienverläufe, da diese zur Ausgabezeit ja bereits bekannt sind.



Abbildung 48: Viersektorenbild einer exemplarischen Fahrszene aus vier unterschiedlichen Blickwinkeln der AIM Forschungskreuzung

Die Szenenvideos sind in stark eingeschränkter Qualität aufbereitet. Wie in beiden Beispielabbildungen zu erkennen, verfügen sie über eine reduzierte Auflösung und weisen diverse Kompressionsartefakte auf, die einzelne Details aus dem Bild entfernen. Dies ist eine gewünschte

¹⁵ Die nicht motorisierten Verkehrsteilnehmer besitzen zusätzlich zu der genannten Grundfarbe im unteren Bereich der Säule jeweils noch blaue Bereiche. Das jeweilige Längenverhältnis der farblichen Trennbereiche gibt dabei eine visualisierte Aussage zur Zuordnungswahrscheinlichkeit zu der jeweiligen Klasse an.

¹⁶ Hier „C“ für Kfz (car), „B“ für Radfahrer (bicyclist) und „P“ für Fußgänger (pedestrian)

Entfremdung des hochaufgelösten Rohdatenmaterials, um den Anforderungen des Datenschutzes Rechnung zu tragen. Mit dieser technisch einfach umsetzbaren Maßnahme lassen sich personenbezogene und -beziehbare Daten aus dem Material entfernen. So lassen sich insbesondere Gesichter und Nummernschilder nicht mehr aus dem Material rekonstruieren.

Der framewise eingebrachte Zeitstempel unten links im Bild erlaubt eine direkte Zuordnung der jeweilig betrachteten Verkehrssituation für manuell durchgeführte Analysen. Eine übliche Anforderung im Bereich der Offlineanalysen von Trajektorienverläufen ist die Sicherung von Videomaterial in handhabbarer Form für bestimmte Ausschnitte aus dem vorhandenen Material, zum Beispiel die Erstellung eines Videozuschnitts, welcher die Anbahnung und Auflösung eines detektierten Beinaheunfalls umfassen. Das Schneiden dieser Videodaten kann natürlich manuell durchgeführt werden, erfolgt allerdings im Sinne einer automatisierten Verarbeitungskette üblicherweise maschinell gesteuert. Diese Arbeiten verlangen nach einer maschinenlesbaren Zuweisung von Zeitstempeln zu den einzelnen Videoframes. Dies wird durch die Aufbereitung einer entsprechenden Zuweisungstabelle ermöglicht, die genau diese Information vorhält. Je nach technischer Ausgestaltungsform ist diese zum Beispiel in Form von CSV-Files oder zusätzlichen Datenbanktabellen realisiert und komplettiert die primären Ausgabedaten der Trajektoriengenerierung.

6.2.3 Daten- und Informationsmanagement

Der für den Betrieb relevante Systembereich des Daten- und Informationsmanagements entspricht dem Hauptarbeitsbereich des Systemverantwortlichen. Der Bereich führt alle Informationen zusammen, die für das Management und Monitoring der Systeme notwendig sind (vgl. Abschnitt 5.4.4). Eine wichtige Information liegt dabei in der manuellen Begutachtung des Systemzustands auf Basis der Sichtung der oben genannten Videostreams. Für diesen Zweck sind diese nicht nur als persistierte Videodaten, sondern auch zusätzlich in Form webbasierter Echtzeitdatenstreams abrufbar und ermöglichen damit einen direkten ersten Einblick in den jeweiligen Systemzustand.

Für tiefere Einblicke in die komplexe Welt der technischen Ausführungsebene existiert daneben ein webbasiertes Tooling zum Systemmonitoring auf Basis des Open Source Frameworks Icinga (Icinga GmbH 2020). Abbildung 49 zeigt einen Screenshot des Web Interfaces am Beispiel der AIM Forschungskreuzung, welche die Überwachung einer beliebigen Menge von Systemparametern auf allen Systemebenen der Hard- und Softwareanteile eines Systems ermöglicht. Neben Wiedergabe der reinen Informationslage lassen sich dabei komplexe Prozesse steuern und auslösen, die ein umfangreiches und professionelles Datenqualitätsmanagement erlauben, was von der Zustandserfassung und Visualisierung der Daten über Loggingfunktionen bis hin zu automatisierten Prozessabfolgen und Benachrichtigungsfunktionen reicht.

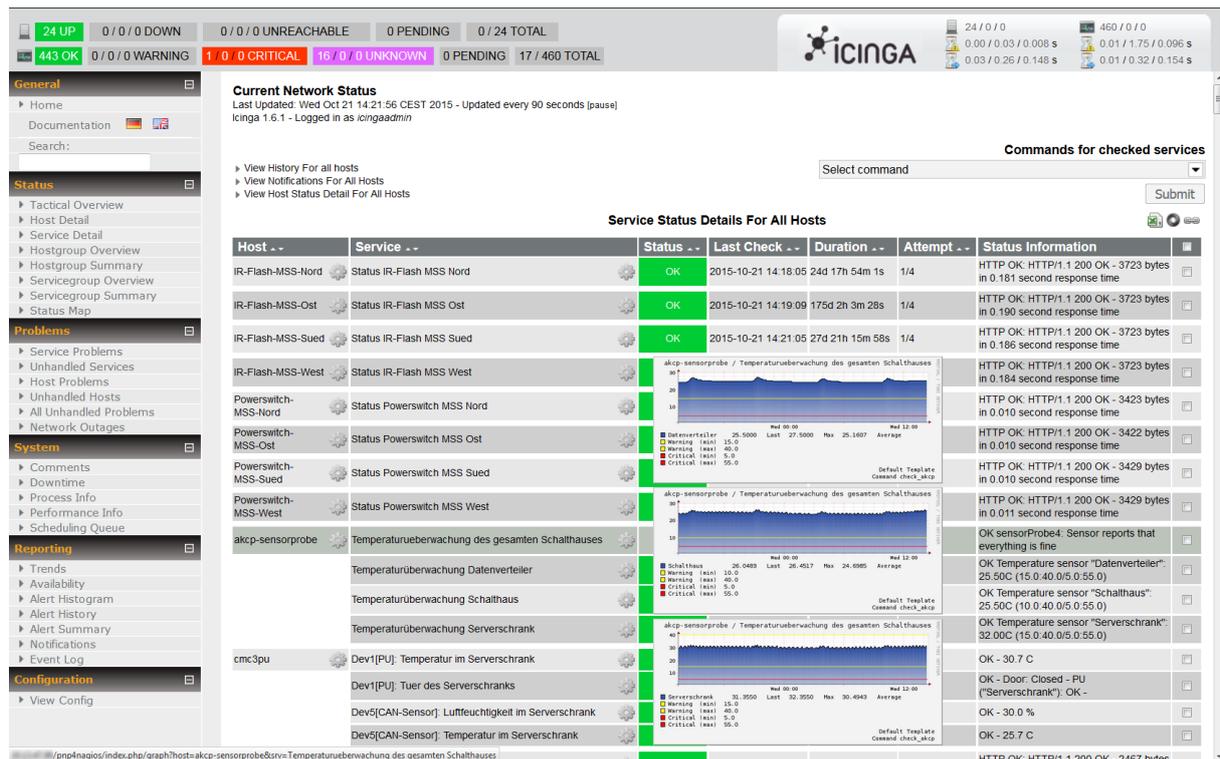


Abbildung 49: Screenshot des Web Interfaces aus dem Monitoringsystem der AIM Forschungskreuzung aus (Knake-Langhorst, Gimm et al. 2016)

6.2.4 Systementwicklungsaspekte

Die vorangegangenen Abschnitte zeigen die Ausgestaltungsebene der verschiedenen Funktionalitäten, Prozesse und darauf basierenden Betriebsformen für den Regelbetrieb des Systems auf. Im Rahmen des Kapitels 5 wurde der Aspekt der Systementwicklung durch einen Entwickler mehrfach angerissen, aber im Sinne einer Detaillierung nicht tiefergehend diskutiert. Für eine umfangreiche Systemkonzeption muss allerdings auch dieser Rahmen durchdacht und ausgestaltet werden. Dabei sind zwei Aspekte von zentraler Relevanz: zum einen muss sichergestellt sein, dass ein Systementwickler gegen geeignete Datensätze entwickeln kann. Für Arbeiten auf Komponentenebene, also niederen Systemschichten, sowie in ersten Testzyklen werden diese häufig synthetisch erzeugt, da dies üblicherweise effizienter ist und vollständig kontrollierte Testbedingungen ermöglicht. Für das Testen des Zusammenspiels der Komponenten auf höheren Systemebenen werden dann üblicherweise reale Datensätze genutzt, die realistische Laufzeitaspekte und relevante Größenverläufe bis in die Test- und Validierungsebene des Gesamtsystemverhaltens abbilden. Die Nutzung von sensornahen Rohdatensätzen ermöglicht dabei die integrierte Überprüfung des Systemverhaltens über allen Systemebenen hinweg. Darauf basierend benötigt ein Entwickler natürlich auch eine sinnhaft gestaltete Systementwicklungsumgebung, die es erlaubt Software zu entwickeln, zu kompilieren und dann in einem passenden Systemumfeld integrieren und testen zu können.

In beiden Aspekten stellt insbesondere die Skalierbarkeit der Systemlösung, wie sie in den grundlegenden Anforderungen formuliert wird, ein zu beachtendes Kriterium dar. So erscheint es vergleichsweise einfach machbar einen einzelnen Sensor und dessen Verarbeitungskette in einer Entwicklungsumgebung aufzubauen. Der Umgang mit einem hoch skalierfähigen verteilten System wie der AIM Forschungskreuzung mit dem damit einhergehenden Rahmen an Umfang und Komplexität auf Software- wie auch auf Hardwareebene stellt allerdings ungleich höhere Anforderungen an eine Entwicklungsumgebung. Daher beleuchten die folgenden Abschnitte beide Aspekte und zeigen auf, wie mit den entsprechenden Rahmenbedingungen umgegangen wird.

6.2.5 Technische Ausgestaltung der Rohdatenaufzeichnung

Die Rohdatenaufzeichnung der entwickelten Systeme ist von hohen technischen Anforderungen gekennzeichnet. Insbesondere die Datenvolumina der Kameradaten resultierend aus den hohen Bandbreiten und der Anzahl der Sensorsysteme stellt hohe Anforderung an eine Aufzeichnungslösung. Ein kurzes Rechenbeispiel verdeutlicht dies: die aktuell verbauten Gigabit-Ethernet-Kameramodelle in der AIM Forschungskreuzung besitzen eine Auflösung von 2750 x 2200 Pixeln bei 13 Hz Wiederholrate und einer monochromen Farbtiefe von bis zu 14 bit. Damit erzeugt eine dieser Kameras allein ein rechnerisches Datenvolumen von ca. 137 Mbyte/s. Für die Gesamtanzahl verbauter Modelle ergibt sich damit eine immens große Gesamtmenge für das gesamte System. Allein diese Zahlen verdeutlichen bereits den immensen technischen Aufwand, den eine kontinuierlich unter Echtzeitbedingungen erfolgende Aufzeichnung der Rohdaten bedeutet und damit auch entsprechend hohe Anforderungen an die Hardware stellt.

Aus der physischen Architektur in Abschnitt 6.1.1ff. lässt sich ableiten, dass Ethernet als Kommunikationsschicht zur Laufzeit der Aufzeichnungsprozesse keine Zusammenführung aller Daten in eine Rechnerinstanz ermöglicht. Stattdessen erfolgt die Speicherung der Daten auf den einzelnen Rechnerinstanzen, an die die Kameras über GiGE angeschlossen sind.

Für eine Aufzeichnung korrespondierender Daten werden auf Basis eines Steuermoduls auf allen relevanten Signalverarbeitungsrechnern Aufzeichnungsmodule gestartet. Diese starten das parallele Schreiben des Datenstroms in den Hauptspeicher der Rechner als Zwischenspeicher sowie parallel dazu das Persistieren der Daten auf die Festplatten der Systemrechner. Die Implementierung ermöglicht dann das definierte Ende der Aufzeichnung vor Überlauf einer Systemressource. Die Systemgrenzen der eingesetzten Rechnersysteme haben bei solch anspruchsvollen Prozessen natürlich einen entscheidenden Einfluss auf die Grenzen des technisch Möglichen. Aktuell werden zum Beispiel in der Praxis keine spezifisch hoch performant ausgelegten Persistenzspeicher genutzt. Hierdurch bedingt füllen sich die Hauptspeicher der Rechnerinstanzen sukzessive über die Zeit hinweg, da sie nicht in der erforderlichen Geschwindigkeit geleert werden können. Neben einem manuellen Abbruchtrigger ermöglicht die Prozessgestaltung den kontrollierten Abbruch der Rohdatenaufzeichnung, sobald die Hauptspeicher eine kritische Füllmenge erreicht haben. Es werden dann keine weiteren Daten mehr aufgezeichnet. Die Prozesse zum Überführen der Daten im RAM auf die Festplatten werden bis zu Ende ausgeführt, dann nimmt das System seinen Regelbetrieb wieder auf, während die Datenpakete an einen entsprechend definierten Punkt auf der DISCUS-Instanz zusammengeführt werden. Dort stehen sie dann für eine weitere Verwendung zur Verfügung. Die aktuell genutzten Systemressourcen erlauben eine Aufzeichnungsdauer von wenigen Minuten Dauer. In dieser Zeit erwirtschaftet das System eine Datenmenge von diversen Terrabytes.

Die geschilderte Prozessabfolge steht sicherlich nur exemplarisch für eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten, die denkbar wären und sicherlich auch technisch ausgefeilter implementiert wären. Allerdings zeigen das Verfahren und die damit einhergehenden Zahlen eindrucksvoll auf, mit welchen technischen Anforderungen im Rahmen einer Rohdatenaufzeichnung umzugehen ist, gerade wenn man sich verdeutlicht, dass die erhobenen Massendaten ja in einem Entwicklungssystem auch verarbeitet werden müssen.

6.2.6 Aufbau des Entwicklungssystems

Es gibt viele unterschiedliche Anforderungen, die an ein Softwareentwicklungssystem zu stellen sind (IT-Service24 Datenrettung 2020). Im Kontext dieser Arbeit wird darunter das zentrale Werkzeug eines Entwicklers verstanden, mit Hilfe dessen Entwicklung, Debugging und Tests der erarbeiteten Softwarekomponenten ermöglicht werden. Während für die ersten zwei Bereiche eine Vielzahl von Softwaretools in Form von IDEs am Markt verfügbar sind, lässt sich der letztgenannte nicht so ohne weiteres sicherstellen. Dabei kommt gerade diesem eine zentrale Bedeutung im Bereich der Softwarequalitätssicherung zu. Zentraler Punkt ist hierbei ein zum Zielsystem

möglichst identisches Systemverhalten auf allen relevanten Systemschichten. Für eine Weiterentwicklung des Signalverarbeitungspfades zur Trajektorienermittlung umfasst dies nahezu die gesamte primäre Verarbeitungskette und damit alle Systemschichten von der Komponenten- bis zur Gesamtsystemebene. Identisch heißt in diesem Kontext nicht unbedingt gleich performant. Viel entscheidender ist, dass das Laufzeitverhalten der verschiedenen Prozessketten und insbesondere das Zusammenspiel der verschiedenen Module auf den vorhandenen verteilten Rechenressourcen möglichst gut wiedergegeben wird, um eine Vielzahl an möglichen Artefakten identifizieren und behandeln zu können.

Ein einfacher Zugang wäre einerseits die Nutzung des Zielsystems. Die erste Möglichkeit würde allerdings Nachteile in Bezug auf die operative Leistungsfähigkeit der Zielsysteme stark einschränken. Die parallele Nutzung eines Systems im laufenden Regelbetrieb für Testzwecke sollte schon zur Garantie der betrieblichen Stabilität und IT-Sicherheit eher vermieden werden. Der Aufbau einer (ggf. nur teilweise ausgeführten) redundanten Hardwarelandschaft könnte dieses Problem umgehen. Diese Lösung muss sich allerdings stets der Frage einer effizienten Mittelnutzung stellen, was die Möglichkeiten begrenzt.

Stattdessen wurde im Rahmen dieser Arbeit das Konzept einer Anwendungsvirtualisierung verfolgt, welche das Gesamtsystem für eine zielgerichtete und umfassende Entwicklung und Integration von Softwarebausteinen und/oder neuer Funktionalität abbildet. Für die unterschiedlichen Testfelder wurden dabei Varianten dieser Lösung aufgebaut, im Folgenden wird das etablierte Entwicklungssystem aus dem AIM Testfeld beschrieben. Die geschilderten Mechanismen und Ideen kamen für das Entwicklungssystem der Erfassungssysteme im Testfeld Niedersachsen in gleicher Art und Weise zum Tragen. Lediglich die Anforderungen an die genutzte Hardware wurden den erhöhten Systemanforderungen entsprechend angepasst.

Die Ausgestaltung erfolgte dabei auf einer leistungsfähigen Workstation, wie in Abbildung 50 verdeutlicht.

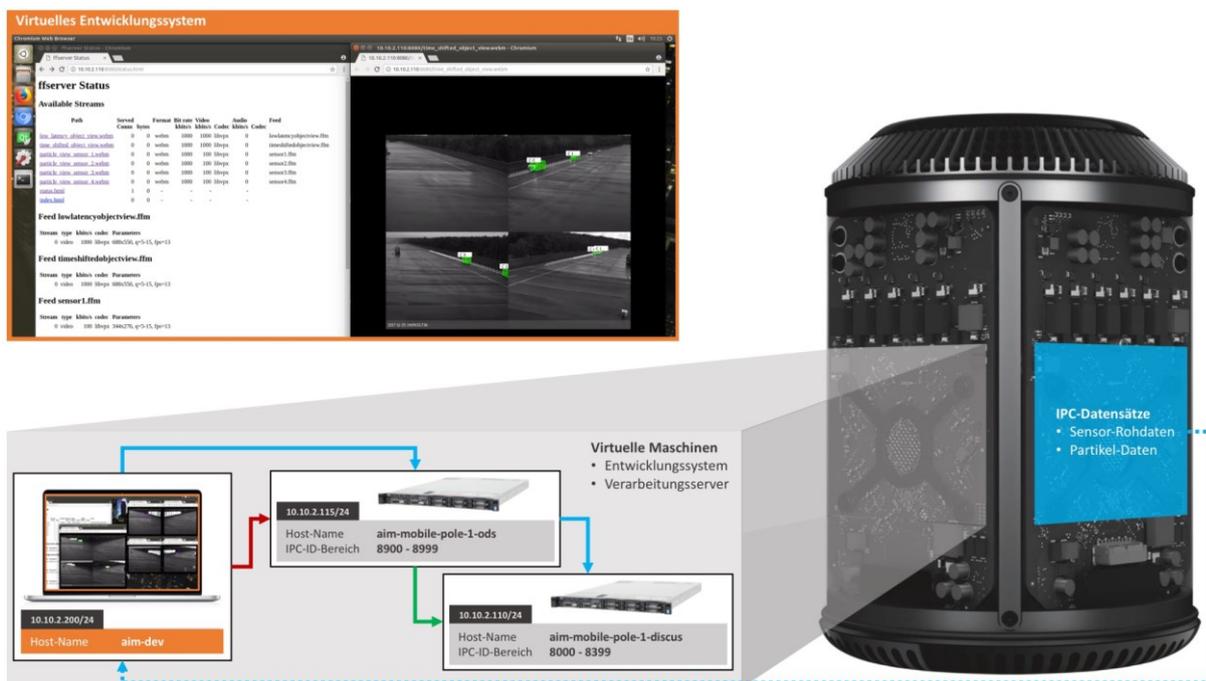


Abbildung 50: Konzept der Anwendungsvirtualisierung auf Basis einer integrierten Workstation aus (Arndt 2018b)

Das grundlegende Prinzip ist dabei die Abbildung der im Zielsystem vorhandenen Hardwareressourcen durch die Instanziierung von entsprechend eingerichteten virtuellen Maschinen auf dem Entwicklungssystem. Auf diesen Virtualisierungen werden dann analog zum Zielsystem die Softwarekomponenten bereitgestellt. Auf Basis dieses Vorgehens ist es möglich das gesamte System virtuell nachzubauen. Lediglich die Schnittstellenschicht für den Empfang der sensorischen

Messdaten wird durch einen softwareseitigen Einspeisungsprozess der aufgezeichneten Rohdaten ersetzt.

Messungen der Performanz zeigten eine ausreichende Effizienz der Virtualisierung für die gegebenen Anwendungsfälle sowie eine hohe Nähe des Laufzeitverhaltens der virtuellen Instanzen zum Betrieb der Zielsysteme.

6.3 Verfahren der Systemverifikation und Validierung

Wie in Abschnitt 1.2.2 eingeführt, erfolgt die technische Ausgestaltung komplexer Cyber-Physischer Systeme stets eng verzahnt mit dem Bereich der Systemverifikation und Validierung. Die Entwicklung der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Systeme folgte dabei dem V-Modell aus Abbildung 3. Dabei spannten sich natürlich die gleichen Rahmenbedingungen und Problemfelder auf, wie sie sich auch für ihren eigentlichen Anwendungsbereich im Rahmen der Unterstützung von V&V-Aktivitäten im fahrzeugtechnischen Bereich ergeben. Insbesondere auf der Ebene des Gesamtsystemverhaltens besteht der Bedarf nach adäquaten Test- und Validierungsmethoden, welche die Systemgrenzen möglichst genau und differenziert erfassen und wiedergeben. Eine vollständige Darstellung der im Rahmen der Arbeit vorgenommenen Aktivitäten sprengt den hier verfügbaren Rahmen. Ebenso liegt die Motivation nicht in einer allumfassenden Darstellung der genauen Systemeigenschaften der im Rahmen der Arbeit entwickelten Einzellösungen. Vielmehr werden spezifische Fragestellungen aus dem allgemeinen Kontext entwicklungsbegleitender Testverfahren herausgearbeitet, Vorgehensweisen aufgearbeitet und die gewählten Verfahren exemplarisch beleuchtet. In der Auswahl der betrachteten Systemeigenschaften lehnt sich die Arbeit dabei an die Systematik maßgeblicher Normen, wie der DIN EN 61069-1 (DIN EN 2017) an.

6.3.1 Evaluation des Betriebs

Die Entwicklung eines komplexen technischen Systems muss sich immer der Frage des technologischen Reifegrads (TRL) (ISO/TC 20/SC 14) der aufgebauten Lösungen stellen. Der TRL ergibt sich aus der Einbeziehung diverser verschiedener Systemeigenschaften und ermöglicht im Zusammenspiel mit weiteren Aspekten organisatorischer Rahmenbedingungen (Teile davon wurden in Abschnitt 5.3 beleuchtet) eine Abschätzung über die Leistungsfähigkeit des Systembetriebs, den so genannten Servicegrad.

Während Produktivsysteme im wirtschaftlichen Umfeld diesen Servicegrad über entsprechende Service-Level-Agreements nach außen vereinbaren und durch entsprechende Operational-Level-Agreements sowie die Ableitung technischer Metriken absichern (Chen, Iyer et al. 2007), finden die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Systemlösungen eine Anwendung im Bereich der vorwettbewerblichen Forschung und Entwicklung. Dies führt auf der Ebene vertraglicher Regelungen üblicherweise zu deutlich abgeschwächten Verbindlichkeiten und in der Folge auch zu technisch niedrigeren Mindestanforderungen. Trotzdem liegt die Zielstellung gerade für die Nutzung und Einbindung solcher Systeme im Rahmen eines Testfeldbetriebs natürlich in einer möglichst ausgeprägten betrieblichen Reife, da diese die Grundlage der darauf stattfindenden wissenschaftlichen Arbeit stellt und daneben die Aussagekraft der Ergebnisse sichert. Maßgebliche Systemeigenschaften, die hier im Fokus liegen, sind im Bereich der Verlässlichkeit der technischen Lösung zu finden. Dies umfasst insbesondere Aspekte wie die Verfügbarkeit und Störungsempfindlichkeit gegenüber Einflussgrößen. Die grundsätzliche Frage ist hier folglich nicht wie genau und präzise ein System arbeitet. Vielmehr entstehen Fragen zu Ausfallwahrscheinlichkeiten und Systemgrenzen, die zu temporären oder anhaltenden Störungen führen, welche im schlimmsten Fall unentdeckt bleiben.

Eine Hauptfehlergruppe auf der Hardwareebene hat ihre Ursache in äußeren Umgebungsbedingungen, die ein System außerhalb der vorgesehen Systemspezifikation treiben und bis hin zum teilweisen oder vollständigen Systemausfall führen können. Prominente Beispiele sind dabei Feuchtigkeitseinbrüche durch die Einwirkung starker Niederschläge, ungünstiger

Witterungseinflüsse wie Nebel oder Kälteeinwirkung. Ebenso denkbar sind Störungen durch zu hohe Umgebungstemperaturen sowie die schleichende Systemdegradation durch physikalische Alterung. Die im Rahmen der Arbeit angewandten Testverfahren basierten zumeist auf einer zielgerichteten Analyse der vorliegenden Spezifikationen der eingesetzten Komponenten. So wurden bestimmte Standards für die Auslegung und Auswahl von Hardwarekomponenten vorausgesetzt und abgeprüft, zum Beispiel bestimmte Schutzklassen gegen Staub und Feuchte im Bereich der Außengehäuse (DIN EN) oder Angaben zu Temperaturarbeitsbereichen für eingesetzte Sensorik. Daneben wurden (zumeist qualitativ ausgeführte) Fehlerbaumanalysen durchgeführt, die den hardwaretechnischen Anteil der Systeme auf Ausfälle von Teilkomponenten und deren Auswirkungen hin untersuchten. Wo möglich, wurden dabei Angaben zur mittleren Ausfallzeit (MTTF) von Komponenten für Abschätzungen eines quantitativen Rahmens herangezogen. Diese flossen dann auch in entsprechende Wartungs- und Instandhaltungskonzepte ein, welche aus den Analysen und Tests abgeleitet wurden. Fehler im Bereich der Softwareebene liegen zumeist in prozessualen Störgrößen, wie nicht abgefangenen Softwarefehlern, die je nach Schweregrad und Ort des Auftretens einzelne Prozesszweige bis hin zur gesamten Systemlandschaft betreffen können. Diese Fehler wurden auf niedrigen Systemebenen durch die Anwendung systementwicklungsbegleitender Testabläufe abgefangen, die Fehlereinflüsse auf höheren Systemebenen wurden ausgehend von spezifisch entwickelten Systemtestspezifikationen durch das systematische Durchtesten vorab definierter Testkataloge abgedeckt. Die Einbindung diverser hardware- und software-spezifischer Kenngrößen in das Daten- und Informationsmanagement (vgl. Abschnitt 6.2.3) ermöglicht darüber hinaus ein kontinuierliches Monitoring und Dokumentieren des Betriebszustands eines Systems im laufenden Betrieb.

Es hat sich im Rahmen der Arbeiten erwiesen, dass die Systemverlässlichkeit der erzeugten Lösungen als vergleichsweise hoch eingestuft werden kann. So erfolgt ein nahezu durchgehender 24/7-Betrieb der AIM Forschungskreuzung seit der Eröffnung des Testfelds im Jahr 2014. Ausfallzeiten lagen in allen Jahren jeweils im Bereich weniger Tage. Eine ähnliche Systemverlässlichkeit lässt sich im Rahmen der Messkampagnen der mobilen Aufbauten nachweisen. Genaue Aussagen zur Erfassungstrecke im Testfeld Niedersachsen lassen sich zum Zeitpunkt der Schriftniederlegung noch nicht treffen, es wird allerdings eine mindestens gleichwertige Verlässlichkeit angestrebt. Damit befindet sich der Reifegrad der Lösungen im Bereich von TRL 8 (Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich).

6.3.2 Evaluation der Datenqualität

Die Güte einer Messung lässt sich nicht aus einer einzelnen Sichtweise heraus beantworten. Vielmehr gibt es viele verschiedene Facetten und Aspekte, die die Güte einer Messung beschreiben. Ziel dieser Evaluationsebene ist es ein quantifiziertes Bild der Gesamtsystemperformanz im relevanten Einsatzumfeld zu gewinnen. Hierfür können sowohl systematische Testläufe mit vorab definierten synthetischen Testszenarien auf einem abgeschlossenen Gelände durchgeführt werden, als auch Evaluationsstudien im unkontrollierten Umfeld des öffentlichen Verkehrs. Im Rahmen der Arbeiten kamen beide Verfahren zum Einsatz. Dabei stellt sich stets die Kernaufgabe eine vertrauenswürdige Referenzbildung sicherzustellen. Möglichkeiten ergeben sich dabei durch manuelle Verfahren, wie zum Beispiel durch Analyse des aufgezeichneten Videomaterials. Allerdings hat sich dieses Verfahren als gleichsam fehleranfällig wie aufwendig erwiesen. In der Praxis wurden daher Referenzfahrzeuge mit einer hochgenauen Eigenortungslösung eingesetzt. Die Testverfahren umfassten dabei das mehrmalige Durchfahren des Sensorraums nach vorgegebenen Mustern mit einer daran anschließenden Vergleichsanalyse der korrespondierenden Messungen aus Fahrzeug und Infrastruktur.

Die zentrale Anforderung für die Nutzbarkeit der Systeme im gegebenen Anwendungsspektrum ist natürlich eine möglichst hohe Passung zwischen einer Trajektorie und der tatsächlichen Bewegungspfad eines Verkehrsteilnehmers. Die Konzeption der technischen Umsetzung und Dimensionierung richteten sich daher eng an der zu erwartenden Güte mit Bezug zu den jeweiligen

Anforderungen aus. Beispielhaft zeigt Tabelle 2 das Ergebnis einer Messkampagne aus dem Arbeitskontext des Projekts XCYCLE (European Commission 2019). Im Rahmen dieses Projekts wurde die AIM Forschungskreuzung eingesetzt und dabei um die beiden integrierten Stereo-Video-Messsysteme aus Abbildung 45 erweitert. Durch die zusätzlichen Sensorstandorte konnte die Qualität der Trajektorien deutlich gesteigert werden. Die in der Tabelle aufgeführten Testresultate zeigen dabei Positionsfehler für beide Varianten in einem ähnlichen Leistungsspektrum, wie die in Kapitel 4.1 dargestellte Lösung aus dem Ko-FAS-Kontext. Ähnliche Datengüten lassen sich mit den AIM Mobilien Aufbauten erreichen.

Tabelle 2: Testresultate aus einer Messkampagne zur Datenqualität im Feld aus (XCYCLE Konsortium 2016)

# Testlauf	Mittlere Standardabweichung in Fzg.-Längsrichtung [m]					Mittlere Standardabweichung in Fzg.-Querrichtung [m]				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Grundsystem	0,41	0,31	0,28	0,37	0,33	0,35	0,30	0,36	0,24	0,33
Erweiterter Aufbau	0,33	0,26	0,26	0,22	0,26	0,16	0,11	0,13	0,15	0,10

Das gegebene Beispiel zeigt dabei die großen Vorzüge auf, der mit dem grundlegenden Ansatz dieser Arbeit verbunden ist: so ermöglicht die skalier- und erweiterbare Systemarchitektur eine sehr effiziente Anpassung der Systemlösungen im Projektkontext auf die entsprechend benötigten Leistungsparameter. Die Freiheitsgrade hierfür sind vielfältig und umfassen dabei die Erweiterung der Messsysteme mit weiteren oder leistungsfähigeren Sensoren sowie neuen Sensortechnologien bis hin zur Nutzung größer dimensionierter Hardware als Grundlage einer Leistungssteigerung der ressourcenabhängigen Algorithmen und Verfahren.

Wie bereits in der Einleitung zu diesem Abschnitt geschildert, lässt sich die Qualität der erzeugten Daten nicht an einem einzelnen Kriterium wie der Positionstreuung festmachen. So wurden im Zuge der Arbeiten Untersuchungen zu weiteren Fehlerformen und Artefakten durchgeführt. Diese umfassen diversen Facetten bei der Erfassung, Verfolgung und Klassifikation von Objekten wie zum Beispiel Split- und Mergeeffekte, False Positives und False Negatives wie auch Probleme bei der Wiedergabe hochdynamisch wechselnder Geschwindigkeitsverläufe oder engen Kurvenfahrten. Entsprechende Erkenntnisse finden sich beispielsweise in (Gimm 2014), wo neben der Aufarbeitung bekannter Fehlerformen auch eine Diskussion über deren Auswirkungen auf Anwendbarkeit und Validität der Situationserfassung stattfindet.

6.4 Verkehrliche Anwendungsbeispiele

Die im Rahmen der Arbeit entstandenen Systeme haben in den letzten Jahren Verwendung in diversen Forschungsprojekten gefunden. Die folgenden Abschnitte geben einen gebündelten Einblick in unterschiedliche Einsatzformen und Verwendungsmöglichkeiten der Systeme auf Basis von ausgewählten projektbasierten Aktivitäten. Die Motivation besteht dabei darin die grundlegende Eignung für die Tragfähigkeit der Konzepte und Ausgestaltungen im vorgegebenen Fachkonzept für den Leser aufzuzeigen und zu plausibilisieren.

6.4.1 Interaktionsanalysen im Rahmen der verkehrlichen Sicherheit

Die Verkehrsabwicklung an größeren Knotenpunkten in urbanen Verkehrsräumen wird maßgeblich mit Lichtsignalanlagen durchgeführt. Grundsätzliche Kriterien für die Einrichtung von Lichtsignalanlagen (LSA) liegen nach der maßgeblichen Richtlinie RiLSA (FGSV 2010) dann vor, wenn „Unfälle zu erwarten sind oder sich ereignet haben, die durch eine LSA hätten vermieden werden können [...]“. Wie in (Scholz 2010) ausgeführt, erfolgt deren Auslegung dabei stets im Spannungsfeld sich widersprechenden Anforderungen: Einerseits soll ein sicheres Verkehrsgeschehen

ermöglicht werden, so dass die Anzahl von sicherheitskritischen Ereignissen oder gar Unfällen möglichst reduziert wird. Andererseits liegt ein weiteres Ziel in einer effizienten Abwicklung des verkehrlichen Geschehens, um Überlastungen der Knotenpunkte entgegenzuwirken. Dieser grundsätzliche Zielkonflikt führt in der Praxis zu Auslegungen von Lichtsignalsteuerungen, die eine Restmenge an konfliktbehafteten Verkehrsströmen zulässt.

Ein Beispiel hierfür findet sich an der AIM Forschungskreuzung, wie in Abbildung 51 schematisch aufgezeigt. Es bildet sich unter anderem durch die zeitgleiche Freigabe von bevorrechtigtem Längsverkehr mit der Fahrtrichtung Ost-West und wartepflichtigen Linksabbiegern aus West mit Fahrtziel Nord eine Konfliktzone im Innenbereich des Knotenpunkts. Diese ist in der Abbildung als Konfliktzone 1 markiert.

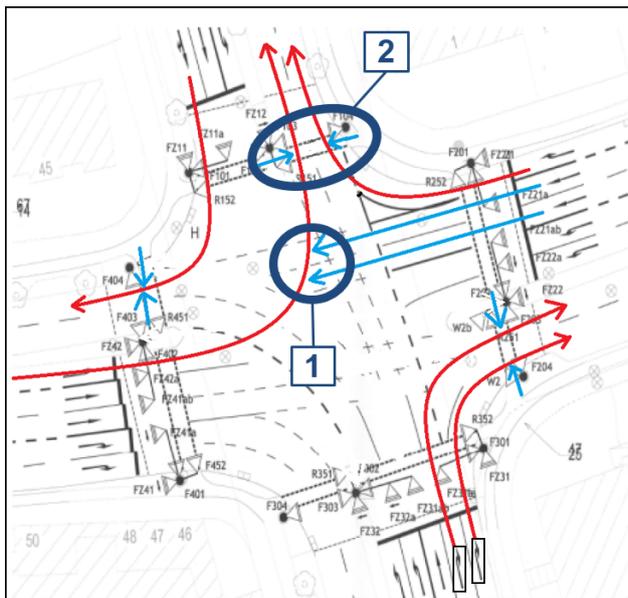


Abbildung 51: Verkehrsströme an der AIM Forschungskreuzung mit zwei ausgewiesenen Konfliktzonen

Dabei wird die konfliktbehaftete Konstellation noch verschärft durch die zusätzliche nachgelagerte Konfliktzone 2 der Linksabbieger mit den ebenfalls bevorrechtigten Fußgängern und Radfahrern auf der nördlichen Überquerung, welche ebenfalls zeitgleiche Freigabezeiten aufweisen. Bei der geschilderten Konstellation ergibt sich die grundsätzliche Frage, welche Auswirkungen die bedingt verträglichen Ströme auf den Bereich der verkehrlichen Sicherheit haben. Eine denkbare Alternative wäre zum Beispiel die Einführung einer Sonderphase für die Linksabbieger. Zahlen und Ausprägungen des Unfallgeschehens liefern keine eindeutigen Hinweise für die gegebene Kreuzung. Aus verkehrswissenschaftlicher Sicht bietet sich daher eine Analyse der verkehrlichen Bewegungen an, mit der Zielstellung eine quantifizierte Abschätzung zu sicherheitskritischen Ereignissen zu ermöglichen.

6.4.1.1 Einzelfallanalyse

Die automatisierte Erfassung von Bewegungsverläufen der Verkehrsteilnehmer ermöglicht hierbei die Analyse einzelner Interaktionsverläufe in ihrem zeitlichen Ablauf. Ein Beispiel hierfür findet sich in Abbildung 52. Nebeneinander sind hier die gemessenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe zweier interagierender Verkehrsteilnehmer über die Zeit aufgetragen. Der linke Graph zeigt die Daten eines LKWs, welcher die Kreuzung in Ost-West-Richtung passiert. Der rechte Graph zeigt die Daten eines linksabbiegenden PKW. Der PKW durchfährt die gemeinsame Konfliktzone zeitlich vor dem LKW. Die roten senkrechten Markierungen weisen dabei jeweils das entsprechende Zeitfenster vom Ein- bis zum Austrittszeitpunkt aus. Der LKW erreicht die Konfliktzone zeitlich nachgelagert, was durch die grüne senkrechte Markierung dargestellt wird.

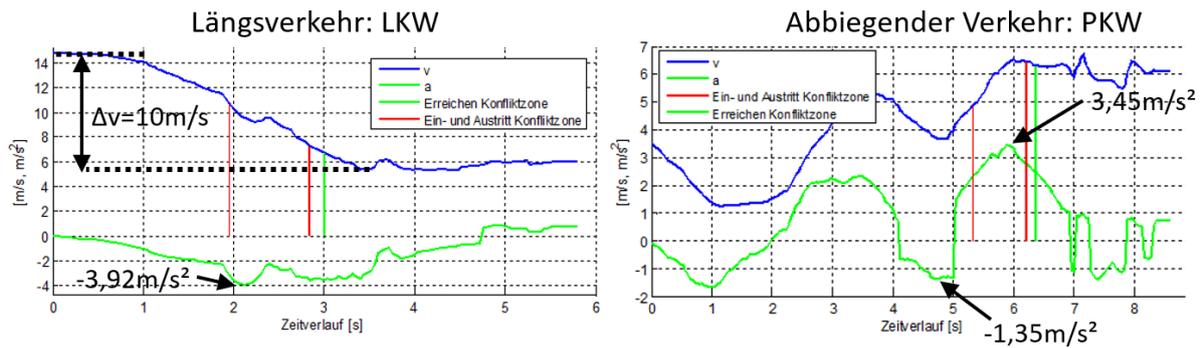


Abbildung 52: Zeitliche Verläufe der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der interagierenden Verkehrsteilnehmer. Links: vorfahrtsberechtigter LKW, rechts: abbiegender PKW

Zu erkennen ist, dass die Situation von einer hohen Längsdynamik auf beiden Seiten geprägt ist. So weist die Trajektorie des LKW eine deutliche Verzögerung mit einem maximalen Wert von über $3,9 m/s^2$ auf, welche kurz vor dem eigenen Erreichen der Konfliktzone einsetzt. Parallel dazu kommt es beim PKW erst ebenfalls zu einer Verzögerung, um dann kurz vor Erreichen der Konfliktzone schlagartig in eine ausgeprägte Beschleunigungsphase mit einem Spitzenwert von $3,45 m/s^2$ umzuschlagen, die bis zum Verlassen der Konfliktzone anhält.

Anhand des Geschilderten lässt sich der zeitliche Verlauf der Ereignisse einordnen und interpretieren. Die Verläufe zeigen, dass das Verhalten des PKW zu einem ungewollten Kontakt hätte führen können. Es steht durch die zeitlichen Verläufe außer Frage, dass nur durch das beiderseitige aktive Eingreifen der Konfliktpartner in die Fahrdynamik ein Unfall vermieden werden konnte. Auf Basis der Einzelfallanalyse wurde der vorliegende Situationsverlauf als Beinaheunfall klassifiziert, was durch das vorliegende korrespondierende Szenenvideo gestützt wird. Zu vermuten ist, dass dieser den herannahenden LKW nicht wahrgenommen hatte oder die Annäherungsgeschwindigkeit falsch einschätzte und deshalb diesem die Vorfahrt nahm.

Das vorliegende Beispiel der Einzelanalyse zeigt auf, welchen Wert die feingranulare Erfassung und Verfolgung der verkehrlichen Bewegungen erwirkt. So schlüsselt diese Form der Analyse quantitative Aussagen auf, die Aussagen zu sicherheitsrelevanten Ereignissen über das tatsächliche Unfallgeschehen hinweg ermöglicht. Darüber hinaus erlaubt sie einen tiefen Einblick in den Zeitablauf der Geschehnisse und hebt sich damit deutlich von den eingeschränkten Möglichkeiten ab, die eine grob diskretisierte Informationslage erlaubt. Aus den Einblicken der phänomenologischen Ergebnisebene lassen sich natürlich noch weitere interessante Einblicke sowie Ansätze für neue Forschungsfragen generieren. Ansatzpunkte hierfür finden sich beispielsweise in (Krüger 1985). Hier wird verdeutlicht, dass der Durch- und Abfluss von bedingt verträglichen Strömen nicht ohne Störung auf den Hauptstrom erfolgt. Probleme durch die Grenzen menschlicher Wahrnehmung wurden durch das Analysebeispiel bereits adressiert. Zusätzlich ist die Bereitschaft für die Wahl einer Zeitlücke bei Fahrzeugführern recht unterschiedlich ausgeprägt, so dass sich abbiegende Fahrzeuge im Abfluss gegenseitig behindern können. Daneben sind weitere Phänomene benannt, wie zum Beispiel, dass Fahrzeugführer im abbiegenden Strom mit längerer Wartezeit zu riskanterem Verhalten neigen. Dagegen kommt es im bevorrechtigten Strom zu Unsicherheiten und daraus resultierenden unerwarteten Reaktionen, was die Sicherheit nachfolgender Fahrzeuge im Hauptstrom negativ beeinflusst. Hieraus ergibt sich insgesamt die Frage, ob die für die Bemessungsverfahren von Knotenpunkten nach (FGSV 2015) durchgeführten Berechnungsgrundlagen alle Aspekte der gegenseitigen Einflussnahme im ausreichenden Maße abdecken. So erfolgt beispielsweise die Berechnung der Sättigungsverkehrsstärke im durchfahrtsberechtigten Strom ohne die Annahme von Rückkopplungen durch den Abbiegestrom, welche allerdings wiederum als Bemessungsgrundlage für die Einführung von Sonderphasen dienen. Es wäre folglich ein interessanter Gegenstand möglicher weiterer Untersuchungen, ob diese Größen durch die reale Verminderung aufgrund von auftretenden Interaktionen nicht systematisch überschätzt werden.

6.4.1.2 Verlaufsanalyse

Die grundlegende Aufgabe für die Realisierung einer automatisierten Form der Situationsinterpretation im Bereich der Verkehrskonflikttechnik liegt wie in Abschnitt 2.4 ausgeführt in der Definition und Anwendung von adäquaten Modellen zur Bestimmung einer situationspezifischen Kritikalität. Ein seit vielen Jahren etabliertes Bewertungsmaß ist für die vorliegende Situation mit der Gefahr von Auffahrunfällen ist die PET, wie sie in Abschnitt 2.4.1 eingeführt wurde. Ein großer Vorteil der Metrik liegt in der simplen Form der Berechnung, so dass sie sich auch für die Implementierung im Rahmen einer echtzeitfähigen und automatisiert ausgelegten Situationserfassung anbietet. Für die Einzelfallanalyse aus dem letzten Abschnitt liegt der Wert bei 0,22 s und damit deutlich unterhalb eines Schwellwerts von 1 s, welcher in Abschnitt 2.4.1 als Obergrenze für potentiell kritische Situationen genannt wurde.

Die Implementierung einer solchen Metrik für die automatisierte Auswertung ermöglicht deren Nutzung im Rahmen von Verlaufsanalysen. Diese erschließen die Möglichkeit einer quantifizierten Aussage zu Häufung und Ausprägung von potentiell sicherheitskritischen Situationen, wie der im vorigen Abschnitt dargestellte, über einen längeren Erhebungszeitraum hinweg. Abbildung 53 zeigt das aggregierte Ergebnis einer vierwöchigen Verlaufsstudie an der AIM Forschungskreuzung in Form eines Histogramms, welche alle detektierten Ereignisse für die definierte Konfliktform darstellt.

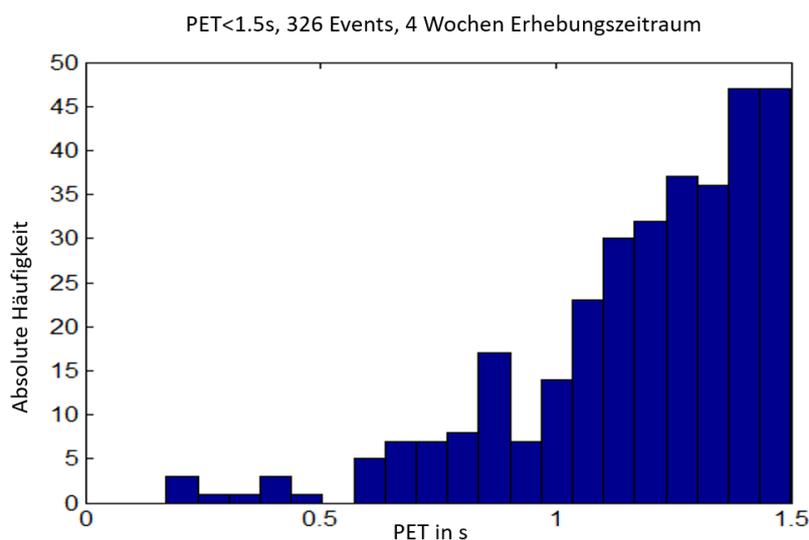


Abbildung 53: Verlaufsanalyse unter Nutzung der PET als Ersatzgröße für die Konfliktschwere. Histogramm für einen Erhebungszeitraum von 4 Wochen

Innerhalb der vier Wochen wurden durch das System insgesamt 326 Ereignisse im gegebenen Konfliktbereich detektiert, bei denen eine PET von 1,5 s oder darunter auftrat. Der Verlauf des Graphen macht deutlich, dass die Anzahl der Ereignisse im Erhebungszeitraum in Richtung kleinerer PET abnahm. Dieser Zusammenhang erscheint plausibel, finden Ereignisse mit höherem Risikopotential doch vergleichsweise seltener statt. Damit bestätigt sich für die durchgeführte Untersuchung grundlegend die Modellannahme von Hydén aus Abbildung 1.

6.4.2 Infrastrukturgestützte Erfassung als Baustein kooperativer Systemansätze

In Abschnitt 1.2.3 wurde die Nutzung intelligenter Infrastruktur zur Erfassung und Analyse des Verkehrs als Baustein für Konzepte im Bereich von C-ITS-Lösungen motiviert. Ein Haupteinsatzfeld für diese Ansätze ist dabei wiederum das urbane verkehrliche Geschehen an komplexen Knotenpunkten. In den Unfallstatistiken tritt dabei immer wieder der Rechtsabbiegeunfall von LKW mit

Radfahrern in Erscheinung, was den Bedarf von Maßnahmen zum Schutz der nicht motorisierten Verkehrsteilnehmer aufzeigt.

Im Förderprojekt XCYCLE wurde daher ein Systemkonzept erarbeitet und untersucht, wie es schematisch in Abbildung 54 dargestellt wird. Der Ansatz besteht hierbei aus dem Aufbau eines vernetzten Systemverbunds als Grundlage für ein infrastrukturell gestütztes Assistenzsystem. Das Konzept umfasst die Einbindung einer messtechnischen Infrastruktur für die Erfassung von Verkehrsteilnehmern und darauf basierender Situationsinterpretation, welche über ein Kommunikationsgateway Informationen mit entsprechend ausgerüsteten Verkehrsteilnehmern austauschen kann. Das System kann dabei Positionsinformationen aus dem umgebenden Verkehr mit seiner eigenen Informationslage verschneiden und in Verbindung mit den aktuellen Zuständen der Lichtsignalanlagen in ein bruchfreies und konsistentes verkehrliches Gesamtlagebild zusammenführen. Hieraus lassen sich auf Basis von Prädiktionen des zukünftigen Situationsverlaufs mögliche Risiken ableiten und in eine Risikoeinschätzung zusammenführen, die dann als Grundlage für entsprechend ausgelegte Warnstrategien genutzt wird.

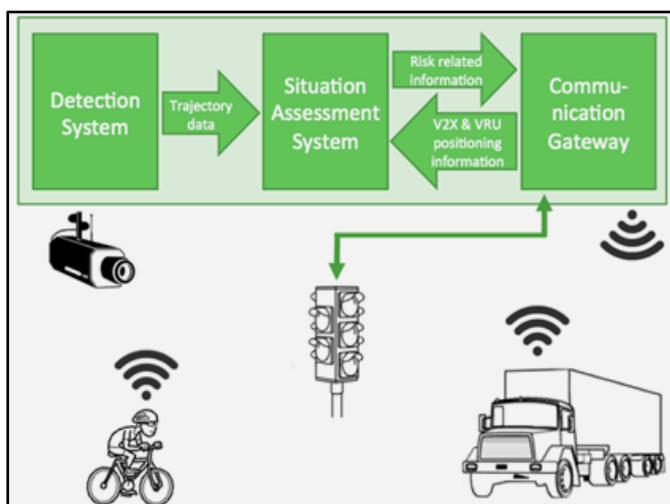


Abbildung 54: Symboldarstellung des XCYCLE Systemkonzepts aus (XCYCLE Konsortium 2018b)

Die prototypische Umsetzung und Validierung des Konzepts erfolgten unter Nutzung des Testfelds AIM. Die Forschungskreuzung wurde hierbei einerseits als Teil einer echtzeitfähigen Systemausgestaltung für die infrastrukturelle Erfassung und Risikoprädiktion genutzt und funktional mit dem Dienst AIM Referenzstrecke gekoppelt, um die Kommunikation mit den Verkehrsteilnehmern über eine Road Side Unit sicherzustellen. Darüber hinaus ermöglichte die AIM Forschungskreuzung die Aufzeichnung von verkehrlichen Bewegungen als Grundlage einer Validierung des XCYCLE Konzepts. Im Rahmen des letzten Abschnitts wurde bereits auf einen Teilaspekt der in Abbildung 51 ausgewiesene Konfliktzone 2 hingewiesen. Die gegebenen Lichtsignalschaltprogramme sehen dabei zusätzlich eine zeitgleiche Grünphase für die von Ost ankommenden Radfahrer und rechtsabbiegenden motorisierten Fahrzeuge mit Fahrtziel Nord vor. Der betreffende Radweg ist in abgesetzter Form ausgeführt, um die Radfahrer von der Hauptfahrbahn zu trennen. Hierdurch kommt es im Bereich der Nordquerung der Kreuzung zu einem Fahrtverlauf der Radfahrer, welcher von der Hauptfahrbahn aus schwer wahrzunehmen und antizipieren ist. Infolgedessen kommt es hier gehäuft zu sicherheitskritischen Ereignissen durch ein Übersehen der Radfahrer seitens des motorisierten Verkehrs. Die Strategie eines rein fahrzeuggestützten Abbiegeassistenten greift hier nur bedingt, da dieser eine gemeinsame Verkehrsführung beider Konfliktpartner ohne bauliche Trennung als Grundlage vorsieht.

Abbildung 55 zeigt beispielhaft eine konfliktbehaftete Interaktion aus der Perspektive des nördlichen Mastes sowie in der Draufsicht. Erkennbar sind die beteiligten Konfliktpartner. Die Draufsicht zeigt farblich markiert die beiden detektierten Trajektorien sowie in grau die entsprechend

prädierten Bewegungspfade. Im vorliegenden Fall klassifizierte die Risikoprädiktion die Situation als mittelkritisch.

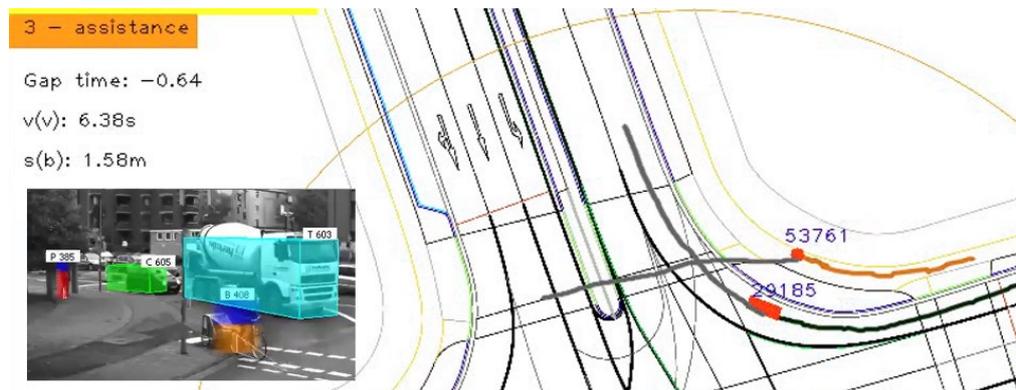


Abbildung 55: Konfliktbehaftete Interaktion an der AIM Forschungskreuzung aus der Perspektive des Nordmasten und in der Draufsicht aus (Gimm, Knake-Langhorst et al. 2018)

Die Umsetzung des XCYCLE Konzepts sah verschiedene Strategien für die Verwertung der gegebenen Risikoeinschätzung vor. Zum einen diente sie als Grundlage für ein fahrzeuggestütztes Warnsystem im projekteigenen LKW-Demonstrator, welches durch spezielle Visualisierungselemente im Führerhaus des Fahrzeugs auf einen drohenden Konflikt hinwies. Analog dazu wurde ein fahrradbasiertes System ausgelegt. Zusätzlich wurde ein adaptiv ausgelegter Schutzblinker entwickelt und in den Verkehrsraum integriert, um damit auch die große Menge an nicht ausgestatteten Verkehrsteilnehmern adressieren zu können (vgl. Abbildung 56). Der Schutzblinker konnte dabei drei Zustände annehmen (Aus, An und Blinkend mit einer Frequenz von 6 Hz) die in Richtung steigender Risikopotentiale automatisch geschaltet wurden.



Abbildung 56: Warnsysteme des integrierten XCYCLE Demonstrators. Oben: fahrzeuggestützte Warnsysteme für LKW und Radfahrer, unten: adaptiver Schutzblinker aus (XCYCLE Konsortium 2018a, 2018b)

Während die eingeschränkte Verfügbarkeit der fahrzeuggestützten Systeme im Rahmen des Projekts lediglich den Nachweis der technischen Machbarkeit ermöglichten, konnte der adaptive Schutzblinker auf Basis einer vierwöchigen Einsatzkampagne auf seine Wirksamkeit hin validiert werden. Hierfür wurden die detektierten Interaktionen, die durch das Erfassungssystem aufgezeichnet wurden, analysiert. Diese Analyse ergab Hinweise auf positive Wirkeffekte. Abbildung 57 zeigt eine wochenweise aggregierte Häufigkeitsverteilung der detektierten Risikoausprägungen in fünf Stufen. Die linke der fünf Säulen entspricht einer Kontrollwoche vor Integration der Maßnahme, die anderen vier Säulen repräsentieren die eigentliche Kampagnendauer.

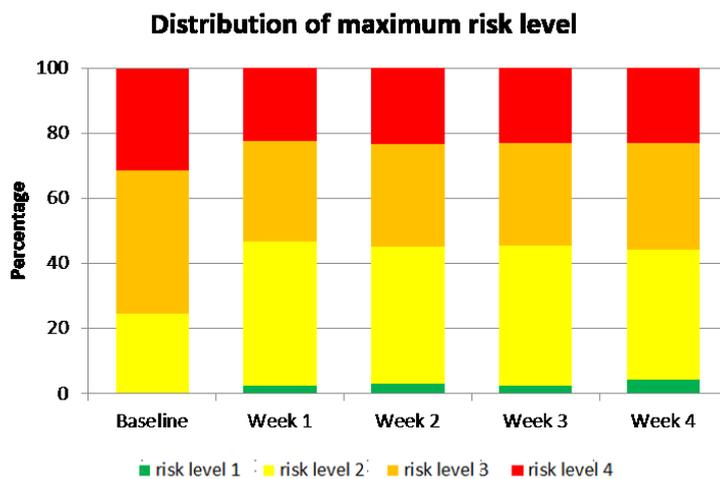


Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der detektierten Risikoausprägungen bezogen auf die jeweilige Gesamtmenge an detektierten Interaktionen aus (Dotzauer, Saul et al. 2018; XCYCLE Konsortium 2018c)

Es zeigt sich eine Änderung in der Verteilung zwischen der Baseline und der Einsatzzeit, der Anteil der kritischen Interaktionen reduzierte sich merklich. Eine Auswertung der Interaktionen auf Basis einer PET stützt diese Ergebnisse, wie in Abbildung 58 ausgeführt.

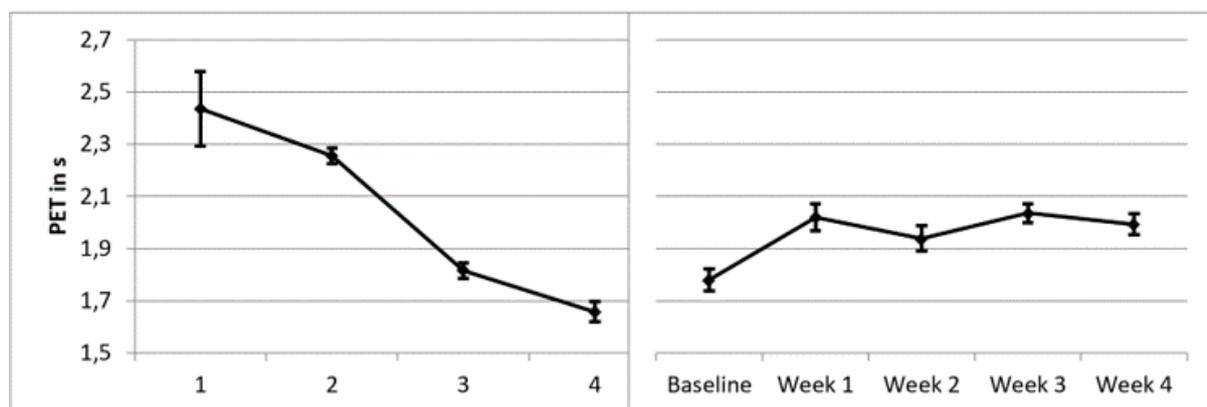


Abbildung 58: Analyseergebnisse der Interaktionen auf Basis der PET. Links: Durchschnitt der PET über die Risikostufen 1 bis 4, rechts: Durchschnittliche PET über die jeweilige Erhebungswoche aus (Dotzauer, Saul et al. 2018; XCYCLE Konsortium 2018c)

Es zeigte sich eine signifikante negative Korrelation zwischen der PET in Bezug auf die jeweils ermittelte Risikostufe, wie sie sich bereits in den deskriptiven Analyseergebnissen von Abbildung 53 andeutete ($r = -.288$, $p < .001$, $n = 2161$). Ebenso konnte auf Basis der wöchentlichen Mittelwerte der PET eine, wenn auch effektschwache, Erhöhung der durchschnittlichen PET unter Einsatzbedingungen des Schutzblinkers festgestellt werden ($r = .072$, $p = .003$, $n = 2161$).

Die dargestellten Arbeiten und Ergebnisse des Projekts belegen die erfolgreiche Nutzung der Infrastruktur in den gegebenen Aufgabefeldern bis hin zum Einsatzfeld des Echtzeitbetriebs.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der Bereich der Verkehrsforschung strebt seit jeher nach Lösungen zur Optimierung in Richtung Sicherheit, Effizienz und Nachhaltigkeit. Dabei kommen im gegebenen Forschungskontext verschiedene Fragestellungen und Zielsetzungen zusammen.

Der Bereich der verkehrlichen Sicherheit hat zum Ziel den Verkehr zu verstehen, also die Mechanismen und Abhängigkeiten zwischen den vielen wirkenden Faktoren zu verstehen und modellhaft zu fassen. Ein Hauptaugenmerk der Forschung liegt dabei insbesondere auf den komplexen urbanen Verkehrsräumen, die von Interaktionen zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern geprägt sind. Die Betrachtung von sicherheitskritischen Ereignissen und Beinaheunfällen verspricht dabei ein tiefergehendes Verständnis als durch die reine Betrachtung des historischen Unfallgeschehens. Der Fortschritt im Bereich der Sensorsysteme und Verarbeitung fördert den Wunsch nach sensorbasierten Systemen, die in der Lage sind sowohl auf einem Testgelände unter kontrollierten Bedingungen als auch insbesondere im realen Verkehr eine Vielzahl von Phänomenen beobachten und analysieren zu können. Es werden Lösungen benötigt, die eine automatisierte und objektive Erhebung der verkehrlichen Situationen in ihrem zeitlichen Verlauf ermöglichen. Diese Informationsebene bietet sich ebenfalls an, um damit Anforderungen für adäquate Auslegungformen von Lösungen im Bereich des vernetzten und automatisierten Fahrens ableiten zu können. Ebenso braucht es Methoden für die Validierung der erzeugten Systeme in ihrem eigentlichen Anwendungskontext als Grundpfeiler einer effizienten Absicherung der Systemlösungen. Darüber hinaus gibt es immer weitreichendere Konzepte für eine verteilte Umfelderkennung, so dass die infrastrukturellen Komponenten unter der Voraussetzung von Echtzeitbedingungen einen Einsatz im Anwendungsfeld kooperativer Assistenz und Automation ermöglichen. Die genannten Aufgabenstellungen stellen sich insbesondere im vorwettbewerblichen Forschungs- und Entwicklungsbereich, in dem Testfelder die professionalisierte Bereitstellung der Werkzeuge und Methoden sicherstellen sollen.

Die Zielsetzung der Arbeit lag in der Auseinandersetzung mit der Frage, wie eine Methode zur Erhebung von mikroskopischen Verkehrsdaten so gestaltet werden kann, dass sie alle gesteckten Anforderungen und Bedarfe erfüllt, wobei insbesondere die Erarbeitung einer generisch angelegten Systemarchitektur im Vordergrund stand. Dies umfasste die detaillierte Darstellung eines systematischen Herleitungsprozesses für Konzepte einer maschinellen und automatisierten Erhebung und Verarbeitung auf Basis von Trajektorien. Die Architektur sollte wiederum als Basis für die technische Ausgestaltung spezifisch ausgelegter Einzellösungen dienen, welche bis in deren physische Ausgestaltung entwickelt werden sollten. Es galt, die maßgeblichen Prinzipien für die Verknüpfung der technischen, betrieblichen und datenschutztechnischen Aspekte bereits auf Konzeptebene zu verankern, während die Tragfähigkeit der Konzepte und Systemlösungen auf Basis von Anwendungsbeispielen aus dem wissenschaftlichen Projektkontext aufgezeigt werden sollte.

Das vorliegende Kapitel gliedert sich in drei Abschnitte. Der erste Abschnitt umfasst dabei eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Arbeit. Im zweiten Abschnitt werden die Ergebnisse bezogen auf die in Kapitel 3 dargestellten Anforderungen evaluiert. Der letzte Abschnitt gibt einen Ausblick auf zukünftige mögliche Arbeitsfelder und Entwicklungsbereiche, die sich aus dem Ergebnis der Arbeit ableiten lassen.

7.1 Zusammenfassung

Die Literatur zeigt eine große Fülle von Beiträgen für den Bereich der sensorbasierten Erfassung von Verkehr und dessen Nutzung im Rahmen artverwandter Fragestellungen. Allerdings erwies sich, dass die Gesamtheit der Anforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit gestellt wurden, durch keinen bekannten Ansatz erfüllt werden konnten. In dieser Arbeit wurde daher ein eigener Lösungsansatz vorgeschlagen. Dieser sah die Herleitung einer Architektur unter Zuhilfenahme etablierter Verfahren aus der Softwareentwicklung vor. Diese Architektur wurde dafür systematisch aus einem generischen Grobentwurf entwickelt. Hierfür wurden verschiedene Sichten auf ein

System genutzt, die unterschiedlichen Aspekte der Architektur zu beschreiben und diese dabei schrittweise tiefer auszugestalten.

Ausgehend vom Grobentwurf teilte eine erste Systematisierung die systeminterne von systemexternen Bestandteilen und definierte grundlegende Datenformen und Flüsse. Eine funktionale Sichtweise auf die Architektur ermöglichte die tiefere Ausgestaltung der Systembausteine sowie die Definition von Systembereichen, die das System in unterschiedliche funktionale Anteile gliederte. Die Akteurssicht ermöglichte die Einführung von Rollen und eine Zuweisung zu deren Aufgaben- und Verantwortungsbereichen innerhalb eines betrieblichen Ablaufs im Rahmen vorwettbewerblicher Forschung und Entwicklung, woraus sich erste konkrete Ableitungen zur Ausgestaltung ableiten ließen. Dies war insbesondere die Trennung der jeweiligen Rollen von unnötigen Zugriffsmöglichkeiten in den Systemablauf und die funktionale Verarbeitungskette während des Regelbetriebs, was eine der Grundlagen für die datenschutzrechtliche Konformität darstellt. Für die Ausgestaltung der prozessualen Sicht wurden mit der Fusionsarchitektur ein zentraler funktionaler Kern des verarbeitenden Systembereichs definiert. Abgeleitet aus der entsprechenden Literatur wurde eine zentrale Merkmalsfusion ausgewählt, da diese in der Abwägung zwischen einer Skalier- und Erweiterbarkeit einerseits und ausreichender Systemperformanz andererseits einen guten Kompromiss zwischen grundlegenden Anforderungen versprach. Das Zusammenspiel mit der Situationserfassung und -interpretation wie auch den sekundären Verarbeitungsprozessen und der Betriebssteuerung wurde definiert. Die Erarbeitung der Betriebsphasen und -formen ermöglichte die Einbettung der Architektur in betriebliche Konzepte und Abfolgen in der Verwendung der abzuleitenden Systeme in einem projektbasierten Wissenschaftsbetrieb. Ungeachtet ihrer unterschiedlichen physischen Ausprägungen erfolgte für alle Systeme die gleiche Herangehensweise bei der Definition von Anwendungsszenarien. Hierbei wurden Offline- und Onlinebetrieb sowie der kombinierte Regelbetrieb voneinander unterschieden. Die physischen Architekturausgestaltungen zeigten gemeinsame Muster der technischen Umsetzung der Systeme auf, die im Rahmen dieser Arbeit in den Testfeldern AIM und Testfeld Niedersachsen entstanden sind und schlüsselte dabei das Prinzip der Verteilung von Systemprozessen und -bereichen auf die jeweils vorhandenen Hardwareressourcen auf. Während diese Systeme auf konzeptueller Ebene alle den gleichen erarbeiteten Architekturmustern und Prinzipien folgen, besitzen alle spezifische technische Ausprägungen. Diese zeigte sich allein schon in den Ausgestaltungen als stationäre oder mobile Lösungen, wie auch in der Nutzung unterschiedlicher Technologien zur Realisierung der Systemfunktionen. Als letzter Aspekt bei der Erarbeitung der Architektur wurden Systementwicklungsaspekte beleuchtet und Verfahren rund um virtualisierte Entwicklungsumgebungen dargestellt, die im Rahmen der Arbeit entwickelt wurden, um die Aspekte von Verifikation und Validierung im Entwicklungsbetrieb auf allen Systemebenen sicherzustellen.

Aufbauend auf dem Geschilderten zeigten Anwendungsbeispiele die Nutzung der tatsächlichen Systeme im wissenschaftlichen Betrieb. Dabei wurden die grundlegenden Systemeigenschaften herausgestellt und die Eignung der Systeme zur Beantwortung von wissenschaftlichen Fragestellungen herausgearbeitet. Der Umfang dieser Arbeiten ging von der Einzelfallanalyse sicherheitskritischer Ereignisse durch Interaktionen von Verkehrsteilnehmern im urbanen Knotenpunktbereich über die Darstellung der Möglichkeiten im Bereich von Verlaufsanalysen bis hin in den Anwendungsbereich für die aufgebauten Systeme als Baustein infrastrukturell gestützter Assistenz und Automation. In allen Anwendungsbeispielen zeigte sich die Tragfähigkeit der gewählten Konzepte und Ausgestaltungen zur Erreichung eines performanten und qualitativ hochwertigen Systembetriebs.

7.2 Bewertung des Erreichten

Der Ausgangspunkt für die Bewertung des Erreichten liegt in den Kernanforderungen, wie sie in Kapitel 3 formuliert wurden. Diese teilen sich in unterschiedliche Teilaspekte auf, welche sich auf die Architektur, die Systemausgestaltung, den Kernbereich der Objekt- und Situationsanalyse sowie betriebliche und Datenschutzaspekte beziehen. Die genannten Teilaspekte bilden damit die

Grundlagen der Struktur für die folgenden Abschnitte, die in Tabelle 3 als gebündelter Überblick dargestellt ist und die Verortung der Aspekte in den jeweiligen Textabschnitten wiedergibt.

Tabelle 3: Kernanforderungen mit gebündelter Zusammenfassung der Nachweisführung

Teilaspekt	Anforderung		Nachweis	Textabschnitt
Architektur	K1	Unterschiedliche physische Architekturen	Aufgebaute Systemlösungen	6.1
	K2	Horizontale und Vertikale Skalierbarkeit	Kopplungsfähigkeit der Systeme Anforderungsbezogene Erweiterung und Umgestaltung in XCYCLE	6.1.1 6.3.2
	K3	Sensortechnologie-unabhängige Verarbeitung	Paralleler Einsatz unterschiedlicher Sensortechnologien	6.1.2
	K4	Flexibles Diensteschema im Testfeldeinsatz	Einsatz im Kontext AIM (u.a. in XCYCLE und PEGASUS)	6.4
Systemausgestaltung	K5	Hohe Betriebsbereitschaft	Erfolgreicher Feldeinsatz der Infrastrukturen seit 2014	6.3.1
	K6	Datenqualitätsmanagement	Systembereich konzeptuell und operativ ausgestaltet	5.2.3 6.2.3
Objekt- erfassung und Situations- interpretation	K7	Räumlich und zeitlich fein aufgelöste Zustandsinformationen	Trajektorien- und Zustandsdaten mit entsprechenden Eigenschaften	6.2.1
	K8	Automatisierte Verarbeitung	Anwendungsbeispiele	6.4
	K9	Echtzeitfähigkeit	Einsatzform im Bereich XCYCLE	6.4.2
Betriebs- formen, Rollen und Verant- wortlich- keiten	K10	Hoher Service Level	Daten- und Informationsmanage- ment Wartungs- und Instandhaltungs- konzept	6.2.3 6.3.1
	K11	Betriebsverständnis	Betriebsphasen und Betriebsformen	5.4.5 5.4.6
Daten- schutz	K12	Datenschutzrechtlich konformer Systement- wurf	Technische und organisatorische Maßnahmen im Umgang mit der Rohdatenebene	5.3.2 6.2.2

7.2.1 Generisches Architekturkonzept

Die grundlegenden Anforderungen an das Architekturkonzept lagen in der Forderung, dass es möglich sein sollte verschiedene skalierte und ausgelegte Systemlösungen daraus abzuleiten. Anders als bei den meisten der in der Literatur verfügbaren Ansätze konnte erfolgreich belegt werden, dass das Architekturkonzept die Fähigkeit aufschlüsselt in verschiedensten Ausprägungen implementiert zu werden.

So zeigt schon allein die Spannweite der erzeugten Systemlösungen, ausgehend von einem Einzelmastbetrieb der mobilen Aufbauten, über deren Verschaltung und Kombination bis hin zu der ungleich komplexeren AIM Forschungskreuzung eindrucksvoll auf, welche horizontale Skalierbarkeit in dem gewählten Architekturansatz liegt. Obgleich nicht im Detail dargestellt, erfolgte zum Beispiel die Auslegung der über 7 km langen Erfassungstrecke des Testfeld NDS mit über 70 Maststandorten und 284 Einzelsensoren grundlegend den hier erarbeiteten Architekturprinzipien, was verdeutlicht, dass auch weitaus komplexere Systemkonfigurationen möglich werden. Da die Systeme grundlegend als verteilte Systeme konzipiert sind, lassen sie sich extrem flexibel auf eine gegebene Ressourcenlage mappen und auf diese anpassen. Dies wiederum bildet eine der wichtigsten Grundlagen für die vertikale Skalierbarkeit des Ansatzes und die hierdurch erreichbare Flexibilität, die notwendig ist, um ein messtechnisches Set-Up an sich wandelnde Anforderungen aus dem Anwendungsfeld anpassen zu können, beispielsweise durch die Integration performanterer Rechnersysteme, die es erlauben eine genauere oder leistungsfähigere Sensordatenverarbeitung sicherzustellen oder den Einsatz leistungsfähigerer Sensorik. Ein entsprechendes Beispiel erfolgte im Rahmen des Förderprojekts XCYCLE mit der zielgebundenen Erweiterung der AIM Forschungskreuzung zur Verbesserung der Datenqualität im für das Projekt maßgeblichen örtlichen Bereich. Der konzeptuelle Ansatz der sensortechnologieunabhängigen Verarbeitung unter Nutzung performanterer Segmentationsansätze ermöglicht die Nutzung und Integration unterschiedlichster Systemausprägungen und Anwendungsszenarien.

Über die ausgewiesenen Anwendungsbeispiele konnte plausibel dargelegt werden, dass die Architektur ein flexibel ausgestaltbares infrastrukturelles Diensteschema für eine Nutzung im Testfeldeinsatz erlaubt. So wurden unterschiedliche Einsatzszenarien aufgezeigt und die Einbindung der Systeme in funktionaler Kopplung mit weiteren Testfelddiensten erfolgreich demonstriert.

7.2.2 Systemausgestaltung

Eine Kernanforderung im Bereich der Systemausgestaltung lag in der Forderung einer hohen Betriebsbereitschaft, die eine Verwendung der Systeme im Bereich der vorwettbewerblichen Forschung und Entwicklung erlaubt. Diese Betriebsbereitschaft wurde in allen Aspekten erreicht.

Die Kopplung der systemeigenen Verarbeitungsprozesse erfolgt in asynchroner Form unter Wahrung von weichen Echtzeitanforderungen. Dies ermöglicht eine Aufrechterhaltung des Systembetriebs, selbst wenn systemrelevante Teilprozesse scheitern, zum Beispiel bei Ausfall eines Sensorsystems oder eines einzelnen Verarbeitungsmoduls der Objekterfassung. Sicherlich gibt es im Bereich der Systemausgestaltung noch viele verbleibende Freiheitsgrade eine weitere Steigerung der Betriebsfähigkeit zu erreichen, wie durch die Einführung von Redundanzen im Verarbeitungsprozess oder der dynamischen Reallokation von Systemprozessen auf vorab definierten Systemressourcen, um nur zwei mögliche zu nennen. Allerdings fand die Entscheidungsfindung zu spezifischen Maßnahmen und Ausgestaltungen in den Aufbauphasen der Systeme stets im natürlichen Spannungsfeld zwischen dem Mehrwert im Spiegel der Verhältnismäßigkeit zum monetären und organisatorischen Aufwand statt. Die bisherigen Erfahrungen machen deutlich, dass die Ausfallzeiten der Systeme auf jeden Fall die Nutzung im wissenschaftlichen Kontext erlauben und in manchen Belangen das Niveau industrieller Lösungen erreichen.

Eine Grundlage für die schnelle und erfolgreiche Umsetzung von Korrekturmaßnahmen von Fehlerfällen schafft das bereits im grundlegenden Systemkonzept verankerte Datenqualitätsmanagement. Dieses erlaubt es sowohl Hardware- als auch Softwareausfälle auf unterschiedlichen

Systemebenen zu erkennen und den Systemverantwortlichen jederzeit im Regelbetrieb einen möglichst transparenten Einblick in den historischen und aktuellen Systemzustand zu ermöglichen. Unweigerlich auftretende Degradationsprozesse, insbesondere durch alternde Hardware, wurde durch das Aufstellen entsprechender Wartungsplanungen entgegengewirkt, die prädiaktive Maßnahmenpakete zur Stabilisierung des Systembetriebs erlauben.

7.2.3 Objekterfassung und Situationsinterpretation

Ein Hauptaugenmerk bei der Evaluation des Erreichten lag in den Anforderungen an den funktionalen Kernbereich, also der Objekterfassung und dem Applikationsbereich. Die Systeme wurden technisch so ausgelegt, dass sie Trajektorien erzeuge, welche bei einer Frequenz von 25 Hz eine Positionstreue von deutlich unter einem halben Meter Standardabweichung für alle differenzierten 5 Klassen von Verkehrsteilnehmern ermöglichen. Als wichtige Systemeigenschaft stellte sich dabei die Fähigkeit heraus, neben der Position eines Verkehrsteilnehmers auch Angaben zu den räumlichen Abmaßen zu machen. Erst diese Datenlage ermöglicht eine tiefere Analyse von verkehrlichen Bewegungen und damit den erfolgreichen Einsatz in den intendierten Anwendungsbereichen bis hin zur echtzeitfähigen Erfassung und Prädiktion von Interaktionsmustern. Die Automatisierung der Objekterfassung und Situationsinterpretation ermöglicht dabei einerseits eine effiziente und aufwandsminimale Langzeitanalyse auf Basis naturalistischer Studien im natürlichen Verkehrsumfeld. Zudem schlüsselt sie die Möglichkeit auf, die infrastrukturellen Systeme als Baustein kooperativer Systemkonzepte einzusetzen.

7.2.4 Betriebsformen, Rollen und Verantwortlichkeiten

Neben der eigentlichen Zielfunktionalität lagen die Kernanforderungen in einem hohen Service Level zur Sicherstellung eines professionalisierten Systembetriebs sowie in der Sicherstellung eines Betriebsverständnisses unter Einbeziehung aller relevanten Rollen und Verantwortlichkeiten. Die Grundlage für deren erfolgreiche Umsetzung setzten verschiedene Maßnahmenbereiche. Auf architektonischer Ebene war dies einerseits die Einführung des sekundären Systembereichs in expliziter Verknüpfung mit der Betriebssteuerung. Dieses stellte die Basis für die adäquate Ausgestaltung einer transparenten Sicht auf den betrieblichen Status der verschiedenen Systembereiche unter Einbeziehung der Hard- und Softwareebene. Entsprechend ausgelegte Wartungs- und Instandhaltungskonzepte mit definierten Prädiktivmaßnahmen ermöglichten einen Umgang mit unweigerlich auftretender Systemdegradation. Darüber hinaus erfolgte im Rahmen der Architektur- ausgestaltung eine Einbindung der organisational geprägten Akteurssicht, die maßgebliche Aufgaben und Verantwortungen im Betrieb definierten und im Zusammenspiel mit der Definition der Betriebsphasen und -formen ein rollenbasiertes Betriebskonzept ermöglichten.

7.2.5 Datenschutzaspekte

Das Vorgehen der schrittweisen Architekturentwicklung unter Einbeziehung auch nichttechnischer Sichten ermöglichte den Aufbau von datenschutzrechtlich konformen Systemausgestaltungen, belegt durch die erfolgreiche Erstellung von Datenschutzkonzepten sowie weiterer Pflichtdokumentation gemäß aktuell geltender Rechtsstandards. Wie bereits in Abschnitt 2.5 ausgeführt, erstrecken sich die notwendigen Maßnahmen auf technische sowie organisatorische Ebene und zogen sich damit durch den gesamten Rahmen der Architektur- und Systemausgestaltung. Die maßgeblichsten Aspekte auf technischer Seite war das Konzept von echtzeitfähigen Verarbeitungsprozessen zur Trajektoriengenerierung. Hierdurch müssen im Regelbetrieb der Systeme keine datenschutzrechtlich relevanten Datenbestände (allen voran hochaufgelöste Kameradaten) gespeichert werden. Die korrespondierend zu den Trajektorien erhobene Szenenvideos sind nur für den visuellen Abgleich eines Szenenverlaufs angelegt und konnten damit datenschutzkonform ausgelegt werden. Daneben ermöglichte die Erarbeitung des Rollenmodells im Bereich der Akteurssicht eine adäquate Reduktion der Zugänge zu den definierten Systembereichen.

7.3 Fazit

Die Diskussion des Erreichten zeigt auf, dass die Anforderungen aus Kapitel 3 vollumfänglich erfüllt werden konnten. Übergreifend lässt sich festhalten, dass die in der Einleitung dieser Arbeit festgelegten Ziele erreicht wurden. So erfolgte der geforderte systematisch aufgebaute Entwicklungsprozess einer Architektur für die maschinelle und automatisierte Erhebung und Verarbeitung von Trajektorien sowie eine Darstellung der abgeleiteten Systeme bis in deren physische Ausgestaltung. Die Prinzipien zur Verknüpfung der technischen, betrieblichen und datenschutztechnischen Aspekte im Kontext des gegebenen Wissenschaftsbetriebes wurden umfassend an den verschiedenen relevanten Stellen aufgezeigt und diskutiert. Die Präsentation von Ergebnissen aus dem wissenschaftlich geprägten Einsatz der Systeme dient als Nachweis der technischen Machbarkeit der aufgebauten Konzepte sowie der geforderten Systemeigenschaften auf Basis der Systemnutzung im intendierten Anwendungskontext.

7.4 Ausblick

Die Ergebnisse der Arbeit ermöglichen eine gute Grundlage für sich anschließende weitere Forschung und Entwicklung. Einige mögliche Zielrichtungen werden in dem folgenden Abschnitt aufgearbeitet und diskutiert.

Die Ergebnisse der Arbeit machen deutlich, dass die zugrundeliegenden Konzepte eine performante technische Ausgestaltung in der vorliegenden Form ermöglichen. Allerdings muss klargestellt werden, dass sich diese auf weitreichende Möglichkeiten im Bereich der technischen Ressourcenlage abstützen. Wie in Kapitel 4 dargestellt, gibt es über den Bereich der Forschungswelt hinaus bereits heute erste Vorstöße für eine Einbindung infrastruktureller verkehrlicher Erfassung als Teil einer produktbasierten Palette an Lösungen für das Einsatzfeld der fortschreitenden Digitalisierung im Verkehrsbereich. Ungeachtet der Skalierungsfähigkeiten der hier vorgestellten und genutzten Konzepte erscheint es schwer vorstellbar, dass eine großräumige Abdeckung mit technisch gleichartig ausgestalteten Systemen im öffentlichen Verkehrsgeschehen erfolgt, da den möglichen Anreizen vergleichsweise hohe technische und monetäre Aufwände gegenüberstünden. Ungeklärt bleibt, wie gut die gewählten Konzepte auf eingeschränktere technische Rahmenbedingungen anwendbar sind, wie sie in einem produktnäheren Anwendungsumfeld vorliegen. Die grundlegende Fragestellung wäre hier welche Anforderungen im Bereich des Produktwesens zusätzlich anzusetzen sind und was diese für Auswirkungen auf die Nutzung und Implementierungsfähigkeit der Konzept- und Ausgestaltungsebene haben. Maßgebliche Systemeigenschaften wie Baugröße und Energieeffizienz erscheinen hier ebenso relevant wie eine tiefere Integration softwareseitiger Verarbeitungsaspekte in hardwarenahe Verarbeitungsschichten, wie FPGA, zur Verringerung der Latenzen in der Prozessierung. Es wäre dabei zu prüfen, ob die Anwendung von Stereovideosystemen, die sich im Bereich der DLR Testfelder als performanteste und damit favorisierte Lösung herausgearbeitet hat, gegebenenfalls durch eine sinnhafte Einbindung und Kombination anderer Technologien ersetzt werden müsste, da die technischen Aufwände zur Verarbeitung doch vergleichsweise hoch einzustufen sind.

Das Geschilderte führt auf weitere interessante Fragestellungen im Bereich der vernetzten kooperativen Systeme. Die Idee liegt dabei in der optimaleren Verknüpfung der infrastrukturellen Erfassung mit weiteren Verkehrsteilnehmern. Wie in Abschnitt 1.2.3 eingeführt, basiert der aktuell verfolgte Weg im Bereich der verkehrlichen Vernetzung insbesondere auf Nutzung von Broadcast-Nachrichten wie die durch die ETSI standardisierten Protokolltypen, welche insbesondere die Weitergabe von Informationen auf Objektebene vorsehen (sowohl zum eigenen Fahrzeugstatus als auch zu erkannten Objekten). Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erörtert, erschwert eine Fusion von objektbasierten Informationen auf dieser hohen Verarbeitungsebene allerdings die performante Einbindung in die entsprechenden Systemprozesse auf Seiten des Informationsempfängers. Die Folge ist oftmals, dass fahrzeugexterne Informationen lediglich als Plausibilisierung genutzt werden. Eine wirkliche Einbeziehung der zusätzlichen Informationen für die Trajektorienplanung eines automatisierten Fahrzeugs findet nur in begrenztem Maße statt. Es stellt sich die Frage, ob eine

sinnvollere Form der Informationsverteilung nicht auf Basis von sensortechnologieunabhängigen Merkmalen erfolgen sollte, wie sie in dieser Arbeit als zentrale Fusionsebene zum Einsatz kommt. Die Vorteile eines solchen Vorgehens lassen sich einfach herausarbeiten. Es lässt sich festhalten, dass eine deutlich höhere Informationsdichte in der Merkmalsebene enthalten ist. Insbesondere lassen sich Uneindeutigkeiten in der messtechnischen Erfassung, die auf Ebene der Objekthypothesen aufgelöst sein müssen, transportieren. In jedem Fall könnte auf Basis des geschilderten Ansatzes eine völlig neue Form von verteilter Fusionsarchitekturen gedacht und erarbeitet werden, welche viele neue denkbare Anwendungen und Vorteile bietet, bis hin zu Strategien einer dynamischen Übernahme von infrastrukturellen Informationen im Falle von Verdeckungen oder Sensorausfall an einem Fahrzeug. Obgleich die Merkmalsebene vergleichsweise kompakte Modelle erzeugt, wäre allerdings zu prüfen, ob die aktuell geltenden Rahmenbedingungen der Drahtloskommunikation über 802.11p entsprechende Bandbreiten zur Verfügung stellt. Falls hier Engpässe deutlich werden, könnte die Anwendung von 5G-Technologien weitergehende Möglichkeiten aufschlüsseln.

Der wissenschaftliche Alltag ist von einer vergleichsweise hohen Fluktuation von Fachpersonal bei einer gleichzeitig teamgebundenen und verteilten Arbeitsform gezeichnet. Damit ist üblicherweise ein stets wechselnder Stamm an Mitarbeitenden mit der Entwicklung von Fachfunktionen in den projektspezifischen Aktivitäten betraut. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass das wissenschaftliche Personal je nach Prägung und Vorlieben unterschiedliche Werkzeuge und Workflows im Bereich ihrer Arbeit nutzt und entwickelt. Hierdurch entsteht die Gefahr, dass bereits erarbeitete Kompetenzen verfallen, zum Beispiel dadurch, dass Softwareprojekte nicht sauber übergeben oder weitergenutzt werden. Daneben erweist sich, dass ein erheblicher Arbeitsaufwand durch die notwendige Portierung von Fachfunktionen aus spezifisch ausgelegten Entwicklungsframeworks in die produktiv genutzte Echtzeitverarbeitung entstehen kann. Dies alles führt auf den Wunsch einer einheitlich genutzten und gut dokumentierten Entwicklungsumgebung, welche alle Anforderungen aus dem kombinierten Regelbetrieb der Systeme in sich vereint. Wird eine solche Umgebung dann noch entsprechend ausgestaltet, so ergibt sich die Möglichkeit eines gemeinsam genutzten und ausreichend dokumentierten Repositories an Funktionen, welches im Denkmuster von Funktionsbibliotheken eine gemeinsame und sich stets entwickelnde Arbeitsgrundlage für projektspezifische Aktivitäten darstellt. Dabei spielt die Integrationsform der Erfassungssysteme in die restliche Dienstelandschaft eine entscheidende Rolle für erweiterte technische Ausgestaltungsmöglichkeiten eines gemeinsamen Workflows. Ein Beispiel hierfür bietet das Testfeld Niedersachsen mit der dort aufgebauten Erfassungstechnik. Während die Konzeption des Systembereichs der Trajektoriengenerierung den bereits bekannten Schemata folgt, wurden für die weiteren Systembereiche teils andere physische Ausgestaltungslösungen gefunden. So ermöglicht – anders als im Testfeld AIM – eine hoch performante glasfasergestützte Anbindung der Erfassungstrecke an die Hintergrundsysteme eine direkt im Backendbereich realisierte Verarbeitung weiterer Systembereiche, allen voran dem Applikationsbereich mit der darin enthaltenden Situationserfassung und -interpretation. Abbildung 59 zeigt die systemarchitektonischen Zusammenhänge auf.

Diese Lösung ermöglicht neben den bereits genannten Vorteilen die Anwendung von moderneren Technologien, wie der Anwendung von Datenstrommanagementverfahren auf Basis von Apache Kafka (Apache Software Foundation 2017), und damit einhergehend erweiterte Möglichkeiten für eine testfeldübergreifende Verarbeitungskette, welche den Bereich der Hintergrundsysteme architektonisch enger mit dem Bereich der Feldeinrichtungen koppelt. Diese Kopplung wiederum schlüsselt erweiterte Möglichkeiten der Aufarbeitung und Verschneidung von verkehrlichen Datenlagen mit diversen weiteren äußeren Einflussgrößen auf. Einerseits lässt sich so der Kommunikationsbereich einfacher und höher skalierbar mit der verkehrlichen Erfassung kombinieren. Gleiches gilt für parallel zum realen Verkehrsgeschehen ablaufende Simulationen. Interessant ist ebenfalls die Einbindung eines digitalen Katasters, welches basierend auf hochgenauen Kartendaten spezifische und teils dynamisch wechselnde Rahmenbedingungen der Verkehrsführung aufschlüsselt, wie zum Beispiel Schäden in der Fahrbahn, abgenutzte Fahrstreifenmarkierungen, Wanderbaustellen oder andere äußere Einflussgrößen auf das Fahrverhalten.

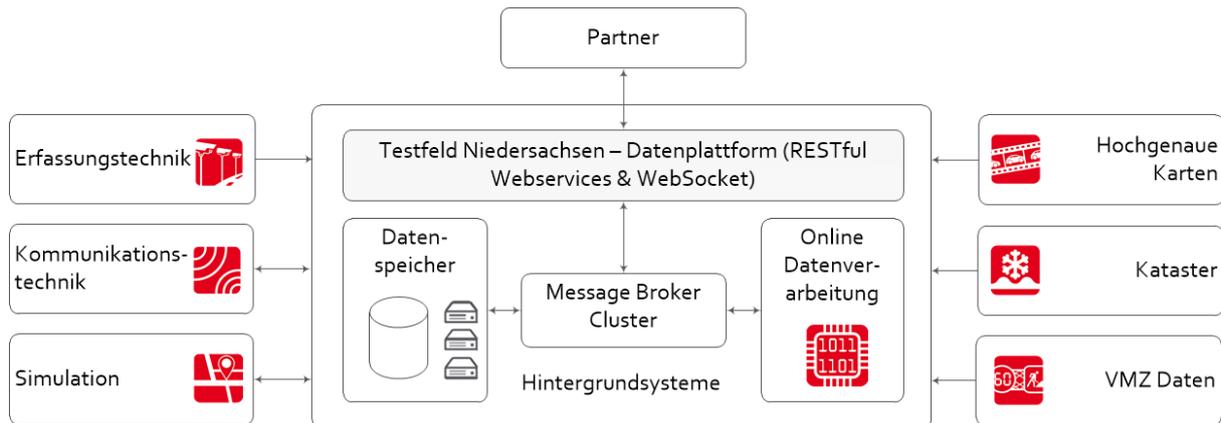


Abbildung 59: Testfeld Niedersachsen, Systemarchitektonische Ansicht aus (DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik 08.01.2020)

In den vergangenen Jahren kam es im Bereich der signalverarbeitenden Systementwicklung zu einer immer stärkeren Etablierung von Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz, insbesondere des überwachten Lernens neuronaler Netzstrukturen. Eine grundsätzliche Voraussetzung für die Entwicklung von KI-Funktionalität nach diesen Verfahren besteht in der Erhebung und der Annotation entsprechender Lerndatensätze. Gerade für die erfolgreiche Umsetzung objekterfassender KI-Methoden ist dabei eine große Menge unterschiedlicher Lerndaten unerlässlich. Die im Rahmen der Arbeit erarbeiteten Systeme (und dabei insbesondere die stationären Anlagen) bieten herausragende Möglichkeiten für die Sammlung und Speicherung von Informationen zur späteren Nutzung in der KI-Algorithmenerwicklung. Hieraus ergeben sich diverse Anwendungsmöglichkeiten: Zum einen könnten diese Daten genutzt werden, um eine Weiterentwicklung grundlegender Systemfunktionen zu ermöglichen. Ein vielversprechendes Anwendungsfeld für KI-Verfahren liegt in der Anwendung auf die erzeugten Trajektorien als mögliche Alternative zu den vorgestellten regelbasierten Ansätzen zur Situationserfassung oder für die Erarbeitung von aussagekräftigen Prädiktionsmodellen. Hier könnte die große Menge an verfügbarem historischem Material im Zusammenspiel mit den relevanten Zusatzinformationen (wie LSA-Zuständen und Witterungseinflüssen) zu einer extrem guten Performanz führen und somit eine völlig neue Dimension in der Güte zum Beispiel für die Anwendung im Bereich der Risikoprädiktion erschließen. Erste studentische Arbeiten und Pilotanwendungen waren ermutigend. Allerdings zeigte sich ebenso, dass es einer entsprechenden Bearbeitungstiefe bedarf, um eine wissenschaftlich fundierte Vorgehensweise sicherzustellen. So liegt die Grundmotivation dieser Arbeit in der Erarbeitung von explizitem Wissen zu verkehrlichen Phänomenen und diesen zugrunde liegenden Wirkmechanismen. Während sich KI-Architekturen gut dazu eignen statistische Zusammenhänge wiederzugeben, liegt ein wohlbekanntes und grundlegendes Problemfeld in der Rückgewinnung expliziten Wissens aus den erzeugten Netzen.

Die Nutzung von KI-Algorithmen würde sich aber ebenso für neue Formen für die Kategorisierung von Verkehrsteilnehmern eignen und verspräche deutliches Verbesserungspotential in Bezug auf die Performanz und eine deutlich stärkere Differenzierung unterschiedlicher Klassen, bis hin zum Beispiel zu einzelnen Fahrzeugmodellen. Ein zu erarbeitendes Framework für die Erhebung und Nutzung der entsprechenden Rohdaten könnte dabei die bereits verfügbare Datenlage nutzen. Dabei könnte eines der Erfassungssysteme entsprechendes (Rohdaten-)Material von Verkehrsteilnehmern automatisiert und rund um die Uhr erarbeiten, welches aus unterschiedlichsten Blickwinkeln während des Durchfahrens des Erfassungsbereichs erzeugt wurde. Während die übliche Form der Annotation von Bilddaten ein zeitraubendes und aufwändiges Verfahren beinhaltet, könnte so auf der Basis einer einzelnen aussagekräftigen Aufnahme gleich eine ganze Serie von Bildausschnitten für das Anlernen von Klassifikatoren erzeugt werden. Neben der Verbesserung der Eigenschaften des bekannten Systems ergäbe sich so auch die Möglichkeit einen Klassifikator in die Systeme zu integrieren, welcher direkt bei der ersten Erfassung eines Verkehrsteilnehmers

eine korrekte Zuweisung zu einem bekannten Klassifikationsmodell erzeugt. Das könnte somit das in Abschnitt 5.4.7 beschriebene Problem der anfänglich unbekanntem Fahrzeugdimensionen auflösen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verkehrssicherheitspyramide nach (Hydén 1987).....	12
Abbildung 2: Das Automationsspektrum nach SAE J3016 aus (Shuttleworth 2019).....	13
Abbildung 3: V-Modell aus (Törngren, Sellgren 2018) als systematischer Prozessablauf für die Entwicklung eines CPS.....	19
Abbildung 4: Die PEGASUS Gesamtmethode aus (PEGASUS Projektkonsortium 2020).....	21
Abbildung 5: V2X Roadmap für C-ITS aus (Thiel, Makridis et al. 2017).....	22
Abbildung 6: Grundlegendes Vorgehen im Rahmen der Arbeit.....	24
Abbildung 7: Modell der manuellen Fahrzeugführungsaufgabe aus (Löper 2019).....	27
Abbildung 8: Die Zusammenhänge zwischen den Szenen, Situationen sowie Zielen und Werten aus (Ulbrich, Menzel et al. 2015).....	28
Abbildung 9: Ein Szenario (blau gestrichelt) als zeitliche Abfolge von Aktionen/Ereignissen (Kanten) und Szenen (Knoten) aus (Ulbrich, Menzel et al. 2015).....	29
Abbildung 10: Abstraktionsebenen am Beispiel des Szenarios "Auffahren auf Stauende" aus (Bagschik, Menzel et al. 2017).....	29
Abbildung 11: Fusionsarchitekturformen nach (Liggins, Chong et al. 1997) aus (Haberjahn 2013).....	31
Abbildung 12: Abstraktionsebene der Fusion. a) sensornah, b) Objektfusion, c) Informationsfusion aus (Catalá Prat 2010).....	32
Abbildung 13: Mit Stixeln annotiertes Kamerabild einer Fahrszene aus (Badino, Franke et al. 2009).....	33
Abbildung 14: Konfliktschwerediagramm aus (Laureshyn, Várhelyi 2018).....	35
Abbildung 15: Auswahl von Surrogate Safety Measures in der Literatur aus (Gimm 2014).....	36
Abbildung 16: Symbolhafte Darstellung der PET.....	36
Abbildung 17: Überblick über das Ko-PER Kreuzungsperzeptionssystem aus (Wertheimer 2014).....	47
Abbildung 18: SAFESPOT Aufbauschema der Plattformlösung aus (SAFESPOT Konsortium 2009).....	48
Abbildung 19: Kommunikationsschema des MEC-View Konzepts aus (MEC-View Konsortium 2017).....	49
Abbildung 20: Architektur der lokalen intelligenten Infrastruktur im TAF-BW aus (Fleck, Daaboul et al. 2018).....	50
Abbildung 21: Visualisierung des Systemkonzepts von DIGINET-PS aus (Technische Universität Berlin 2019a).....	51
Abbildung 22: Pyramide als Grundstruktur für Gestaltungskontexte von ITS nach (FGSV 2012a).....	53
Abbildung 23: Architekturprinzipien des VRZ-/UZ-Systems Links: Funktionsebenen des Systems Verkehrsbeeinflussung, rechts: Technische Architektursicht mit Kapselungsprinzip über den „Daten- und Dienstevermittler“ aus (BMVI 2018).....	54
Abbildung 24: Grobarchitektur des Signalverarbeitungssystems mit generischen Systembausteinen.....	58
Abbildung 25: Übersicht über die grundlegenden Datenflüsse auf Grobarchitekturebene.....	59

Abbildung 26: Funktionale Struktur der Trajektoriengenerierung.....	61
Abbildung 27: Funktionale Struktur der Applikationsebene.....	62
Abbildung 28: Funktionale Struktur der sekundären Verarbeitungsebene.....	63
Abbildung 29: Funktionale Gesamtstruktur mit ausgewiesenen Systembereichen.....	63
Abbildung 30: Visualisierung der Systembereiche im Aufgaben- und Rollenkontext.....	66
Abbildung 31: Prozessuale Sicht auf die Trajektoriengenerierung (Grobansicht).....	67
Abbildung 32: Prozessuale Sicht auf die Trajektoriengenerierung (Feinansicht).....	68
Abbildung 33: Prozessuale Sicht auf die Situationserfassung und -interpretation.....	69
Abbildung 34: Prozessuale Sicht auf den sekundären Verarbeitungsbereich.....	70
Abbildung 35: Prozessuale Sicht auf den Bereich der Betriebssteuerung.....	71
Abbildung 36: Systematisierung der seriell aufeinanderfolgenden Betriebsphasen.....	72
Abbildung 37: Online- und Offlinebetriebsabläufe.....	73
Abbildung 38: Prozessuale Sicht auf die Objektebene in paralleler Ausgestaltung.....	74
Abbildung 39: Schema der Systembereiche mit den durch DISCUs eingefassten Systembereichen.....	75
Abbildung 40: Verteilter Systemverbund unter Einbindung intelligenter Infrastrukturen nach (Knake-Langhorst, Köster 2018).....	79
Abbildung 41: AIM Mobile Aufbauten. Links: Abbildung eines Mastaufbaus, rechts: physisches Aufbauschema aus (DLR, Institute of Transportation Systems 2016b).....	81
Abbildung 42: Physische Architektur der AIM Mobilen Aufbauten.....	82
Abbildung 43: Prüfgeländetest auf dem VW-Testgelände Ehra-Lessin im Rahmen von PEGASUS.....	83
Abbildung 44: AIM Forschungskreuzung. Links: sensorischer Aufbau, rechts: exemplarischer Spurverlauf von Trajektorien.....	84
Abbildung 45: AIM Forschungskreuzung, eingesetzte Sensortechnologien Stand Februar 2020 aus (Arndt 2018b).....	85
Abbildung 46: Funktionsallokation auf die Rechnersysteme an der AIM Forschungskreuzung...86	86
Abbildung 47: Annotierte Verkehrsszene aus einer Messkampagne mit den AIM Mobilen Aufbauten.....	87
Abbildung 48: Viersektorenbild einer exemplarischen Fahrszene aus vier unterschiedlichen Blickwinkeln der AIM Forschungskreuzung.....	89
Abbildung 49: Screenshot des Web Interfaces aus dem Monitoringsystem der AIM Forschungskreuzung aus (Knake-Langhorst, Gimm et al. 2016).....	91
Abbildung 50: Konzept der Anwendungsvirtualisierung auf Basis einer integrierten Workstation aus (Arndt 2018b).....	93
Abbildung 51: Verkehrsströme an der AIM Forschungskreuzung mit zwei ausgewiesenen Konfliktzonen.....	97
Abbildung 52: Zeitliche Verläufe der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der interagierenden Verkehrsteilnehmer. Links: vorfahrtsberechtigter LKW, rechts: abbiegender PKW.....	98

Abbildung 53: Verlaufsanalyse unter Nutzung der PET als Ersatzgröße für die Konfliktschwere. Histogramm für einen Erhebungszeitraum von 4 Wochen	99
Abbildung 54: Symboldarstellung des XCYCLE Systemkonzepts aus (XCYCLE Konsortium 2018b)	100
Abbildung 55: Konfliktbehaftete Interaktion an der AIM Forschungskreuzung aus der Perspektive des Nordmasten und in der Draufsicht aus (Gimm, Knake-Langhorst et al. 2018).....	101
Abbildung 56: Warnelemente des integrierten XCYCLE Demonstrators. Oben: fahrzeuggestützte Warnelemente für LKW und Radfahrer, unten: adaptiver Schutzblinker aus (XCYCLE Konsortium 2018a, 2018b)	101
Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der detektierten Risikoausprägungen bezogen auf die jeweilige Gesamtmenge an detektierten Interaktionen aus (Dotzauer, Saul et al. 2018; XCYCLE Konsortium 2018c).....	102
Abbildung 58: Analyseergebnisse der Interaktionen auf Basis der PET. Links: Durchschnitt der PET über die Risikostufen 1 bis 4, rechts: Durchschnittliche PET über die jeweilige Erhebungswoche aus (Dotzauer, Saul et al. 2018; XCYCLE Konsortium 2018c)	102
Abbildung 59: Testfeld Niedersachsen, Systemarchitektonische Ansicht aus (DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik 08.01.2020).....	110

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: RACI-Matrix zur Aufgabenanalyse für DLR-typische Rollenverteilung	65
Tabelle 2: Testresultate aus einer Messkampagne zur Datenqualität im Feld aus (XCYCLE Konsortium 2016).....	96
Tabelle 3: Kernanforderungen mit gebündelter Zusammenfassung der Nachweisführung	105

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Geschwindigkeitsregelung
ACL	Aggregation and Concentration Layer
ADP	Autonomous Driving Playground Testbed
AIM	Anwendungsplattform Intelligente Mobilität
AVF	automatisiertes und vernetztes Fahren
BASt	Bundesamt für Straßenwesen
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
C-ITS	Kooperativ ausgelegte verkehrliche Systeme
CAM	Cooperative Awareness Message
CPS	Cyber-Physische Systeme
CS	Conflicting Speed
CSW	Kurvengeschwindigkeitswarnung
DISCUs	Data Interface and Service Control Units
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
ESP	Elektronisches Stabilisierungsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FCW	Kollisionswarnung
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GLOSA	Green Light Optimization Speed Advisory
HAF	Hochautomatisierte Fahrfunktionen
IKT	Informations- und Kommunikationsinfrastruktur
IPC	Interprozesskommunikation
ITS	Intelligente Verkehrssysteme
LDM	Local Dynamic Map
LDW	Spurverlassenswarnung
LSA	Lichtsignalanlage
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen
MTTF	Mittlere Ausfallzeit
PDM	Wahrscheinlichkeitsdichtekarte
PET	Post Encroachment Time

PMD	Predicted Minimum Distance
RiLSA	Richtlinien für Lichtsignalanlagen
RSU	Roadside Unit
SIG	Statistisches Informationsgitter
SSM	Surrogate Safety Measures
SSD	Solid State Drive
TA	Time to Accident
TAV-BW	Testfeld Autonomes Fahren Baden-Württemberg
TAVF-HH	Teststrecke für automatisiertes und vernetztes Fahren Hamburg
TF NDS	Testfeld Niedersachsen
THW	Time Headway
TPMD	Time to Predicted Minimum Distance
TRL	Technologischer Reifegrad
TS	Institut für Verkehrssystemtechnik
TTS	Time to Collision
UZ	Unterzentrale(n)
V&V	Verifikation und Validierung
VRZ	Verkehrsrechnerzentralen

Literaturverzeichnis

@City Konsortium (2020): @CITY - Automatisiertes Fahren in der Stadt. Online verfügbar unter: <https://www.atcity-online.de/>, Stand: 07.04.2020.

Achanta, R., Shaji, A., Smith, K., Lucchi, A., Fua, P., Süssstrunk, S. (2012): SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34, 11, 2274–2282.

Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S., Matros, K. (2016): Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: HB Produktentwicklung, Lindemann (Hrsg.), Carl Hanser Verlag, [Place of publication not identified], 541–569.

Alexander, Lee, Cheng, Pi-Ming, Donath, Max, Gorjestani, Alec, Menon, Arvind, Newstrom, Bryan, Shankwitz, Craig, Ward, Nic, Starr, Ray (2006): Rural Expressway Intersection Surveillance for Intersection Decision Support System. *Transportation Research Record*, 1944, 1, 26–34.

Alexander, L., Cheng, Pi-Ming, Gorjestani, A., Menon, A., Newstrom, B., Shankwitz, C., Donath, M. (2006): The Minnesota Mobile Intersection Surveillance System. In: 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 139–144.

Allen, B. L., Shin, B. T., Cooper, P. J. (1978): Analysis of Traffic Conflicts and Collisions. *Traffic Research Record*, 67–74.

Amundson, F. H., Hydén, C. (Hrsg.) (1977): Proceedings of First Workshop on Traffic Conflicts.

Apache Software Foundation (2017): Apache Kafka. A distributed streaming platform. Online verfügbar unter: <https://kafka.apache.org/>, Stand: 07.04.2020.

Arndt, R. (2018a): Testfeld Niedersachsen – Teilabschnitt Mitte – Autobahn A 39 – Lieferung der Softwarekomponenten. Technisches Grobkonzept (unveröffentlichter Bericht), Darmstadt.

Arndt, R. (2018b): Verteiltes digitales Messen zur Erkennung von Objekten im Straßenverkehr. Systemhandbuch (unveröffentlichter Bericht), Darmstadt.

Badino, H., Franke, U., Pfeiffer, D. (2009): The Stixel World - A compact medium level representation of the 3D-world. In: Pattern recognition. 31st DAGM symposium, Jena, Germany, September 9-11, 2009 : proceedings, Denzler, J., Notni, G., Süsse, H. (Hrsg.), Springer, Berlin, New York, 51–60.

Bagschik, G., Menzel, T., Reschka, A., Maurer, M. (2017): Szenarien für Entwicklung, Absicherung und Test von automatisierten Fahrzeugen. In: Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren.

Balzert, H., Balzert, H., Liggesmeyer, P. (2009): Lehrbuch der Softwaretechnik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Barnard, Y., Utesch, F., van Nes, N., Eenink, R., Baumann, M. (2016): The study design of UDRIVE: the naturalistic driving study across Europe for cars, trucks and scooters. *European Transport Research Review*, 8, 2, 1–10.

BAST (2017): GIDAS: den Verkehrsunfällen auf der Spur. Online verfügbar unter: https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Fahrzeugtechnik/Fachthemen/info-gidas.pdf?__blob=publicationFile&v=3, Stand: 14.03.2022.

BAST (2022): Digitale Testfelder und Erprobungsvorhaben. Aktivitäten im Bereich des automatisierten und vernetzten Fahrens in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.testfeldmonitor.de/>, Stand: 14.03.2022.

Bauer, S., Bretschneider, E., Rataj, J., Schumann, T. (2009): AIM - Application Platform Intelligent Mobility. In: 16th World Congress for ITS Systems and Services.

Bayerische Vermessungsverwaltung (2016): Abkürzungen und Begriffe. UTM - Abbildung und UTM - Koordinaten. Online verfügbar unter: <http://vermessung.bayern.de/file/pdf/1910/UTMAbbildungundKoordinaten.pdf>.

Beckmann, D., Vonk Noordegraaf, D., Jonkers, E., Vermassen, E., Rataj, J., Köster, F. (2011): Definition of the reference architecture. D 2.1 (unveröffentlichter Bericht).

- Benmimoun, M., Fahrenkrog, F., Benmimoun, A. (2010): Automatisierte Situationserkennung zur Bewertung des Potentials von Fahrerassistenzsystemen im Rahmen des Projektes "euroFOT". In: Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit. Tagungsband zur 26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung, VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), VDI-Verl., Düsseldorf, 231–245.
- Bishop, C. M. (2013): Pattern recognition and machine learning. Springer, New York.
- BMDV: Gestaltung und Regelung städtischer Knotenpunkte für sicheres und effizientes automatisiertes vernetztes Fahren in gemischtem Verkehr – Digitaler Knoten 4.0. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/digitaler-knoten-4-0.html>, Stand: 14.03.2022.
- BMDV (2015): Strategie automatisiertes und vernetztes Fahren. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/broschuere-strategie-automatisiertes-vernetztes-fahren.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 14.03.2022.
- BMDV (2017a): Digitales Testfeld Autobahn. Vorhaben für die Mobilität 4.0. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/digitales-testfeld-autobahn-internet.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 14.03.2022.
- BMDV (2017b): Kooperative Radarsensoren für das digitale Testfeld A9 – KoRA9. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/KoRA9.html>, Stand: 14.03.2022.
- BMDV (2020a): Automatisiertes Fahren im digitalen Testfeld Düsseldorf - KoMoDnext. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/komodnext.html>, Stand: 14.03.2022.
- BMDV (2020b): Digitale Testfelder für das automatisierte und vernetzte Fahren im Realverkehr in Deutschland (Stand: September 2020). Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/uebersicht-digitale-testfelder-avf-bmvi.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 14.03.2022.
- BMDV (2021a): Die digital vernetzte Protokollstrecke – urbanes Testfeld automatisiertes und vernetztes Fahren in Berlin – DIGINET-PS. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/diginet.html>, Stand: 14.03.2022.
- BMDV (2021b): Schaufenster: KI für die Mobilität der Zukunft auf Basis von Plattformökonomie – BeIntelli. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/beintelli.html>, Stand: 14.03.2022.
- BMVI (2018): Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen. MARZ, Berlin.
- Bodenheimer, R., Eckhoff, D., German, R. (2015): GLOSA for adaptive traffic lights: Methods and evaluation. In: 2015 7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM), 320–328.
- Brooks, R. R., Iyengar, S. S. (1998): Multi-sensor fusion. Fundamentals and applications with software. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, N.J.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017): Bundesdatenschutzgesetz. BDSG.
- Catalá Prat, Á. (2010): Sensordatenfusion und Bildverarbeitung zur Objekt- und Gefahrenerkennung.
- Chen, Y., Iyer, S., Liu, X., Milojevic, D., Sahai, A. (2007): SLA Decomposition: Translating Service Level Objectives to System Level Thresholds. In: Fourth International Conference on Autonomic Computing (ICAC'07), 3.
- Chin, H.-C., Quek, S.-T. (1997): Measurement of traffic conflicts. Safety Science, 26, 3, 169–185.
- Chong, C.-Y., Mori, S., Barker, W. H., Chang, K.-C. (2000): Architectures and algorithms for track association and fusion. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 15, 1, 5–13.

C-MoBILE Konsortium (2017): C-MoBILE - D3.1. Reference Architecture. Online verfügbar unter: <https://c-mobile-project.eu/wp-content/uploads/sites/19/2018/06/C-MoBILE-D3.1-ReferenceArchitecture-v1.1.pdf>, Stand: 14.03.2022.

Continental AG (2020): Intelligente Kreuzung. Online verfügbar unter: <https://www.continental.com/de/presse/messen-events/techshow-2019/48-volt-high-power-175880#>, Stand: 19.04.2020.

Ćorović, A., Ilić, V., Đurić, S., Marijan, M., Pavković, B. (2018): The Real-Time Detection of Traffic Participants Using YOLO Algorithm. In: 26th Telecommunications Forum. TELFOR 2018.

C-Roads Konsortium (2019): C-Roads Evaluation and Assessment Plan. Version 1.1. Online verfügbar unter: https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-Roads_WG3_Evaluation_and_Assessment_Plan_version_June19_adopted_by_Countries_Final.pdf, Stand: 14.03.2022.

DIN EN: 60529:2014-09. Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code). (IEC 60529:1989 + A1:1999 + A2:2013); Deutsche Fassung EN 60529:1991 + A1:2000 + A2:2013. Online verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-60529/206456159>.

DIN EN (2017): 61069-1:2017-07. Leittechnik für industrielle Prozesse - Ermittlung der Systemeigenschaften zum Zweck der Eignungsbeurteilung eines Systems. Teil 1: Terminologie und Konzepte. Online verfügbar unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-61069-1/269254643>, Stand: 14.05.2020.

DLR (2014): Anwendungsplattform Intelligente Mobilität. Online verfügbar unter: <https://www.dlr.de/ts/desktopdefault.aspx/tabid-6422/>, Stand: 14.03.2022.

DLR (2021): AIM Backend. DLR im Überblick - Großforschungsanlagen. Online verfügbar unter: <https://www.dlr.de/content/de/grossforschungsanlagen/aim-backend.html>, Stand: 14.03.2022.

DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik (08.01.2020): Präsentation zur Eröffnung des Testfelds NDS. Station 14, Backend-Architektur (unveröffentlichter Vortrag), Braunschweig.

DLR, Institute of Transportation Systems (2016a): AIM Research Intersection: Instrument for traffic detection and behavior assessment for a complex urban intersection. Journal of large-scale research facilities JLSRF, 2.

DLR, Institute of Transportation Systems (2016b): AIM Traffic Acquisition: Instrument toolbox for detection and assessment of traffic behavior. Journal of large-scale research facilities JLSRF, 2.

DLR, Institute of Transportation Systems (2017): AIM reference track - test site for V2X communication systems and cooperative ITS services. Journal of large-scale research facilities JLSRF, 3, A106.

Donges, E. (1982): Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie: Management, Entwicklung, Konstruktion, Fertigung: das Branchenmagazin, 27, 2, 183–190.

Dotzauer, M., Junghans, M., Gimm, K., Knake-Langhorst, S. (2017): Cycling through intersections: Situational factors influencing safety. In: TeaP 2017.

Dotzauer, M., Saul, H., Junghans, M., Gimm, K., Knake-Langhorst, S., Schießl, C. (2018): Online situation and risk assessment: Improving cyclists' safety in intersections? In: International Cycling Safety Conference 2018.

Dudenverlag: Duden Wörterbuch. Akteur. Online verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtsschreibung/Akteur>.

Enslow, P. H. (1978): What is a "Distributed" Data Processing System? Computer, 11, 01, 13–21.

Erke, H. (1982): Erweiterung der Verkehrskonflikttechnik auf den Zweiradverkehr, Braunschweig.

Erke, H., Gstalter, H. (1985): Verkehrskonflikttechnik. Handbuch für die Durchführung und Auswertung von Erhebungen. Im Auftrage des Bundesministers für Verkehr von der Bundesanstalt für Strassenwesen, Bereich Unfallforschung, Bergisch Gladbach.

Erke, H., Zimolong, B. (1978): Verkehrskonflikte im Innerortsbereich. Im Auftrage des Bundesministers für Verkehr von der Bundesanstalt für Strassenwesen, Bereich Unfallforschung, Bergisch Gladbach.

ETSI (2011): ETSI TS 102 637-2 v1.2.1 - Technical Specification. Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, Sophia Antipolis Cedex.

ETSI (2019): 3GPP TR 21.915 version 15.0.0 Release 15, Sophia Antipolis Cedex.

Europäisches Parlament und europäischer Rat (2016): Verordnung (EU) 2016/679 zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG. Datenschutz-Grundverordnung.

European Commission (2019): XCYCLE Project. Advanced measures to reduce cyclists' fatalities and increase comfort in the interaction with motorised vehicles. Online verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/635975>, Stand: 19.11.2020.

FGSV (2010): Richtlinien für Lichtsignalanlagen. RiLSA : Lichtzeichenanlagen für den Straßenverkehr. FGSV Verlag GmbH, Köln.

FGSV (2012a): Hinweise zur Strukturierung einer Rahmenarchitektur für intelligente Verkehrssysteme (IVS) in Deutschland - Notwendigkeit und Methodik, Köln.

FGSV (2012b): Merkblatt zur örtlichen Unfalluntersuchung in Unfallkommissionen. M Uko. Forschungsges. für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

FGSV (2015): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. HBS. FGSV Verlag GmbH, Köln.

Fleck, T., Daaboul, K., Weber, M., Schörner, P., Wehmer, M., Doll, J., Orf, S., Sußmann, N., Hub-schneider, C., Zofka, M., Kuhnt, F., Kohlhaas, R., Baumgart, I., Zoellner, R., Zöllner, J. (2018): Towards Large Scale Urban Traffic Reference Data: Smart Infrastructure in the Test Area Autonomous Driving Baden-Württemberg. In: Intelligent Autonomous Systems 15. Proceedings of the 15th International Conference IAS-15, Strand, M., Dillmann, R., Menegatti, E., Ghidoni, S. (Hrsg.).

Foegen, M., Atamaniuk, P. (2002): Modellierung von Architekturen. In: Software Management 2002: Fortschritt durch Beständigkeit. Fachtagung des GI-Fachausschusses Management der Anwendungsentwicklung und -wartung im Fachbereich Wirtschaftsinformatik (WIMAW), 6. bis 8. November 2002, Hamburg, Spitta, T., Borchers, J., Sneed, H. M. (Hrsg.), Gesellschaft für Informatik, Bonn, 119–130.

Forschungsinitiative Ko-FAS (2009): Forschungsinitiative Ko-FAS. Kooperative Sensorik und kooperative Perzeption für die Präventive Sicherheit im Straßenverkehr. Online verfügbar unter: <http://ko-fas.de/>, Stand: 14.03.2022.

Gačnik, J., Lemmer, K. (2012): Zur interdisziplinären Entwicklung sicherheitskritischer Assistenz- und Automationssysteme im Automobil. Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, 16.

Gebhardt, K. F. (2019): UML. Unified Modeling Language. Online verfügbar unter: <http://www.lehre.dhbw-stuttgart.de/~kfg/uml/uml.pdf>.

Geschäftsstelle Teststrecke automatisiertes und vernetztes Fahren Hamburg (2019): TAVF. Teststrecke für automatisiertes und vernetztes Fahren in Hamburg. Online verfügbar unter: https://tavf.hamburg/fileadmin/user_upload/PDFs/TAVF_Fact_Sheet_DE_191104.pdf, Stand: 18.04.2020.

Geschäftsstelle Teststrecke automatisiertes und vernetztes Fahren Hamburg (2021): MAP-Layering auf der TAVF erfolgreich umgesetzt und getestet. Online verfügbar unter: <https://tavf.hamburg/neues-von-tavf/news/map-layering-auf-der-tavf-erfolgreich-umgesetzt-und-getestet>, Stand: 30.03.2021.

Gimm, K. (2014): Analyse von Trajektorien Daten aus der Forschungskreuzung zur Ableitung der Kritikalität von Ereignissen (Masterarbeit). Technische Universität Braunschweig.

- Gimm, K., Knake-Langhorst, S., Bottazi, M. (2018): Increasing cycling safety by an adaptively triggered road instrumented warning element in EU project XCYCLE. Posterbeitrag. In: Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, Transport Research Arena (Hrsg.).
- Graichen, M. (2019): Analyse des Fahrverhaltens bei der Annäherung an Knotenpunkte und personenspezifische Vorhersage von Abbiegemanövern (Dissertation). Universität der Bundeswehr München.
- Great Britain: Cabinet Office (2013): Itil service strategy - [german translation]. Tso.
- Gronau, N., Becker, J., Kliewer, N., Leimeister, M., Overhage, S. (2016a): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik - Online-Lexikon. Middleware. Online verfügbar unter: <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/is-management/Systementwicklung/Softwarearchitektur/Middleware/index.html>, Stand: 14.03.2022.
- Gronau, N., Becker, J., Kliewer, N., Leimeister, M., Overhage, S. (2016b): Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik - Online-Lexikon. Systembetrieb. Online verfügbar unter: <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/uebergreifen-des/Globalisierung/Outsourcing/outsourcing-des-systembetriebs>, Stand: 14.03.2022.
- Haberjahn, M. (2013): Multilevel Datenfusion konkurrierender Sensoren in der Fahrzeugumfelderfassung (Dissertation). Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II.
- Hall, D. L., Llinas, J. (1997): An introduction to multisensor data fusion. Proceedings of the IEEE, 85, 1, 6–23.
- Hamburger Hochbahn AG (2021): Projekt HEAT. HOCHBAHN-Forschungsprojekt zu automatisiert fahrenden Kleinbussen. Online verfügbar unter: https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/de/Home/Naechster_Halt/Ausbau_und_Projekte/projekt_heat, Stand: 11.03.2022.
- Harding, J. (2007): Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs (Dissertation). Ruhr-Universität Bochum.
- Helbing, D. (1997): Verkehrsdynamik. Springer Berlin Heidelberg.
- Hendriks, B., Harms, C., Kürschner, M., Buhl, E., Christine, Z. (2019): Dominion - A Realtime Middleware for Connecting Functions in Highly Automated Vehicles. Internationales Verkehrswesen, 71, 1/2019, 29–33.
- Hesse, S., Schnell, G. (2012): Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Funktion -- Ausführung -- Anwendung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Hidas, P. (2005): Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. Transportation Research Part C: Emerging Technologies \$V 13, 1, 37–62.
- Hoiem, D., Efros, A. A., Hebert, M. (2005): Automatic photo pop-up. In: ACM SIGGRAPH 2005 Papers, 577–584.
- Horn, B. K. P., Schunck, B. G. (1981): Determining optical flow. Artificial Intelligence, 17, 1, 185–203.
- Hydén, C. (1987): The Development of a Method for Traffic Safety Evaluation. The Swedish Traffic Conflict Technique, Lund, Schweden.
- Ibler, A. (2015): Untersuchung der Verkehrssicherheit an Anschlussstellen mittels Mikrosimulation und SSAM (Masterarbeit). Technische Universität Graz.
- Icinga GmbH (2020): Icinga Monitoring. Online verfügbar unter: <https://icinga.com/products>, Stand: 14.03.2022.
- ICT4CART Konsortium (2020): ICT4CART Projektseite. Online verfügbar unter: <https://www.ict4cart.eu/>.
- IEEE (2010): 802.11p-2010 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Env. IEEE.

ISO/IEC/IEEE (2011): 42010:2011, Systems and software engineering - Architecture description. Recommended Practice for Architectural Description of Software-intensive Systems. Online verfügbar unter: <http://www.iso-architecture.org/42010/>, Stand: 07.04.2020.

ISO/TC 20/SC 14: 16290:2013. Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment. Online verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/56064.html>, Stand: 14.05.2020.

IT-Service24 Datenrettung (2020): Entwicklungssystem Definition & Begriffserklärung. Online verfügbar unter: <https://www.it-service24.com/lexikon/e/entwicklungssystem/>, Stand: 07.04.2020.

JENOPTIK Robot GmbH (2015a): Systembeschreibung für das Multi-Sensor-System (iSS-MSS) im Teilprojekt „iShared Space“ für die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM). Q-Gate 2.1 (unveröffentlichter Bericht), Monheim a.R.

JENOPTIK Robot GmbH (2015b): Systembeschreibung für das Multi-Sensor-System (MSS) im Teilprojekt „Forschungskreuzung“ für die Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM). Q-Gate 1.3 (unveröffentlichter Bericht), Monheim a.R.

Johannsen, H. (2013): Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Grundlagen der Unfallaufklärung ; mit 21 Tabellen. Springer Vieweg, Wiesbaden.

Jürgensohn, T. (1997): Hybride Fahrermodelle. Pro-Universitate-Verl., Sinzheim.

Kálmán, Rudolf E. (1960): A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME—Journal of Basic Engineering, 82 (Series D), 35–45.

Kamijo, S., Matsushita, Y., Ikeuchi, K., Sakauchi, M. (2000): Traffic monitoring and accident detection at intersections. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 1, 2, 108–118.

Karlsruher Verkehrsbetriebe GmbH (2019): Leistungskatalog für das Testfeld Baden-Württemberg (TAF BW). Online verfügbar unter: https://taf-bw.de/fileadmin/user_upload/Bilder/Leistungen-Preise/TAF-BW_Leistungskatalog_20191211.pdf, Stand: 14.03.2022.

Karoui, M., Freitas, A., Chalhoub, G. (2019): Impact of Driver Reaction and Penetration Rate on GLOSA. In: Communication Technologies for Vehicles. 14th International Workshop, Nets4Cars/Nets4Trains/Nets4Aircraft 2019, Colmar, France, May 16-17, 2019, Proceedings, Hilt, B., Berbineau, M., Vinel, A., Jonsson, M., Pirovano, A. (Hrsg.), 16–26.

Knake-Langhorst, S., Gimm, K., Frankiewicz, T., Köster, F. (2016): Test site AIM – toolbox and enabler for applied research and development in traffic and mobility. Transportation Research Procedia, 14, 2197–2206.

Knake-Langhorst, S., Köster, F. (2018): Künstliche Intelligenz in der DLR Verkehrsforschung. (unveröffentlichter Vortrag), Köln.

Kolrep, H. (Hrsg.) (2010): Fahrermodellierung - zwischen kinematischen Menschmodellen und dynamisch-kognitiven Verhaltensmodellen. VDI-Verl., Düsseldorf.

Köster, F. (2017): Testfeldaktivitäten in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://hypermotion-frankfurt.messefrankfurt.com/content/dam/messefrankfurt-redaktion/hypermotion/2017/events/presentation/its-frank-koester.pdf>, Stand: 14.03.2022.

Köster, F., Lang, H.-P., Naujoks, O., Schindler, C., Veit, P. (2016): Anwendungsplattform für Intelligente Mobilität - Dienstspektrum und Architektur. ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn, 8, 276–282.

Köster, F., Mazzega, J., Knake-Langhorst, S. (2018): Automatisierte und vernetzte Systeme – erprobt und evaluiert. ATZ extra, Juli 2018, 20–23.

Kraus, S. B. (2012): Fahrverhaltensanalyse zur Parametrierung situationsadaptiver Fahrzeugführungssysteme (Dissertation). Technische Universität München.

Kruchten, P. (1995): Architectural Blueprints - The “4+1” ViewModel of Software Architecture. IEEE Software, 12, 6, 42–50.

- Krüger, J. (1985): Sicherheit und Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage in Abhängigkeit von der Anzahl der Phasen (Dissertation). Technische Hochschule Darmstadt.
- Krüger, P. (2013): Methodische und konzeptionelle Hinweise zur Entwicklung einer IVS-Rahmenarchitektur für Deutschland, Darmstadt.
- Laureshyn, A. (2010): Application of automated video analysis to road user behaviour. Lund University.
- Laureshyn, A., Várhelyi, A. (2018): The Swedish Traffic Conflict Technique. Observer's manual, Lund.
- Leich, A., Junghans, M., Kozempel, K., Saul, H. (2015): Road user tracker based on robust regression with GNC and preconditioning. In: IS&T/SPIE Electronic Imaging 2015, Loce, R. P., Saber, E. (Hrsg.), SPIE.
- Lemmer, K. (Hrsg.) (2019): Neue autoMobilität II. Kooperativer Straßenverkehr und intelligente Verkehrssteuerung für die Mobilität der Zukunft.
- Lewis, V., Dingus, T., Klauer, S., Sudweeks, J. (2005): An overview of the 100-car naturalistic study and findings. Proc. Int. Tech. Conf. Enhanced Safety Vehicles, 19.
- Liebig, T. (2013): Pedestrian Mobility Mining with Movement Patterns (Dissertation). Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Liers, H. (2019): Detailauswertung und Rekonstruktion von Verkehrsunfällen. Online verfügbar unter: https://www.dguv.de/medien/inhalt/praevention/fachbereiche_dguv/fb-verkehr/veranstaltung2019/vortrag-liers.pdf, Stand: 07.04.2020.
- Liggins, M. E., Chong, C.-Y., Kadar, I., Alford, M. G., Vannicola, V., Thomopoulos, S. (1997): Distributed fusion architectures and algorithms for target tracking. Proceedings of the IEEE, 85, 1, 95–107.
- Lill, G. (2015): Datenschutz Grundlagen – Personenbezogene Daten. Online verfügbar unter: <https://www.projekt29.de/datenschutz-grundlagen-personenbezogene-daten/>, Stand: 14.03.2022.
- Linnert, B. (2015): Architecture of distributed systems. Online verfügbar unter: http://www.inf.fu-berlin.de/inst/ag-se/teaching/V-NETZPR-2015/02_Communication_Architecture.pdf, Stand: 14.03.2022.
- Llinas, J., Bowman, C. L., Rogova, G., Steinberg, A., Waltz, E., White, F. (2004): Revisions and extensions to the JDL data fusion model II. Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion, 1218–1230.
- Löper, C. (2019): Manöverbasierte kooperative Automation für teil- und hochautomatisiertes Fahren. Technische Universität Braunschweig.
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., Wießner, E. (2018): Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, IEEE, 2575–2582.
- MEC-View Konsortium (2017): MEC-View Projektflyer. Mobile Edge Computing basierte Objekterkennung für hoch- und vollautomatisiertes Fahren. Online verfügbar unter: <https://www.uni-due.de/~hp0309/index.php/de/file-download?download=3:mec-view-flyer>, Stand: 14.03.2022.
- Mehne, J. (2019): doubleSlash Blog. Der Bias-Effekt im Machine Learning. Online verfügbar unter: <https://blog.doubleslash.de/der-bias-effekt-im-machine-learning/>, Stand: 14.03.2022.
- Meißner, D., Reuter, S., Strigel, E., Dietmayer, K. (2014): Intersection-Based Road User Tracking Using a Classifying Multiple-Model PHD Filter. Intelligent Transportation Systems Magazine, 6, 2, 21–33.
- Meysel, F. (2010): Map-based Multi-Object Dynamic Scene Description and Atypical Event Detection. DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - Forschungsberichte.

- Mosebach, H. H., Frankiewicz, T., Möckel, M., Kürschner, M., Detzer, S., Ruppe, S., Louis Calvin Touko Tcheumadjeu (2016): Forschungsprojekt UR:BAN - Vernetztes Verkehrssystem. DLR Schlussbericht. Online verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/104735/>, Stand: 14.03.2022.
- Neubert, P. (2015): Superpixels and their Application for Visual Place Recognition in Changing Environments (Dissertation). Technische Universität Chemnitz.
- Oestereich, B., Schröder, C. (2019): Agile Organisationsentwicklung. Handbuch zum Aufbau anpassungsfähiger Organisationen. Franz Vahlen, München.
- OTS1.0-Konsortium (2018): Schlussbericht OTS 1.0. Optimiertes Transportsystem Basierend auf selbstfahrenden Elektrofahrzeugen. Online verfügbar unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2019-01/OTS%201.0%20Abschlussbericht.pdf>, Stand: 14.03.2022.
- PEGASUS Projektkonsortium (2020): Schlussbericht für das Gesamtprojekt PEGASUS. Online verfügbar unter: https://www.pegasusprojekt.de/files/tmp/pdf/PEGASUS_Abschlussbericht_Gesamtprojekt.PDF, Stand: 14.03.2022.
- PEGASUS-Konsortium (2019): PEGASUS. Projekt-Website. Online verfügbar unter: <https://www.pegasusprojekt.de/de/>, Stand: 14.03.2022.
- Pekezou Fouopi, P. (2020): Holistische Modellierung und Interpretation von Szenen und Situationen Basierend auf Symbolischen, Probabilistischen und Subsymbolischen Modellen (Dissertation). Universität Oldenburg.
- Perkins, S. R., Harris, J. I., General Motors Corporation., Research Laboratories. (1967): Criteria for traffic conflict characteristics, signalized intersections. Research Laboratories, General Motors Corp, Warren, Mich.
- Pfeiffer, D. (2012): The Stixel World. A Compact Medium-level Representation for Efficiently Modeling Dynamic Three-dimensional Environments (Dissertation). Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II.
- Polychronopoulos, A., Tsogas, M., Amditis, A., Scheunert, U., Andreone, L., Tango, F. (2004): Dynamic situation and threat assessment for collision warning systems: the EUCLIDE approach. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2004, 636–641.
- Prokop, G. (2001): Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization. *Vehicle System Dynamics*, 35, 1, 19–53.
- Rauch, A. (2016): Entwicklung von Methoden für die fahrzeugübergreifende Umfelderkennung (Dissertation). Universität Ulm.
- Rohloff, M. (2011): Standards und Best Practices für das Application Management. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 48, 2, 5–16.
- SAE International: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. Online verfügbar unter: https://doi.org/10.4271/J3016_201806.
- SAFESPOT Konsortium (2009): SAFESPOT Integrated Project. SP2 - INFRASENS - SAFESPOT Infrastructure Platform - Deliverable N. D2.4.2. Online verfügbar unter: http://www.safespot-eu.org/documents/SF_D2.4.2.pdf, Stand: 14.03.2022.
- SAFESPOT Konsortium (2010): SAFESPOT Integrated Project. SP2 - INFRASENS - SAFESPOT Infrastructure Platform - Deliverable N. 2.5.2. Online verfügbar unter: http://www.safespot-eu.org/documents/SF_D2.5.2_Results_on_test_and_validation_v1.15.pdf, Stand: 14.03.2022.
- Salfner, F., Sommer, S. (2010): Weiche Echtzeit. Online verfügbar unter: https://www.informatik.hu-berlin.de/de/forschung/gebiete/rok/teaching/WS/EMES/Slides/06_softtr.pdf, Stand: 14.03.2022.
- Saul, H., Kozempel, K., Haberjahn, M. (2014): A Comparison of Methods for Detecting atypical Trajectories. In: 20th International Conference on Urban Transport and the Environment, C.A. Brebbia (Hrsg.), WITPress, 393–403.
- Saunier, N., Sayed, T. (2007): Automated Analysis of Road Safety with Video Data. *Transportation Research Record*, 2019, 1, 57–64.

- Saunier, N., Sayed, T., Ismail, K. (2010): Large-Scale Automated Analysis of Vehicle Interactions and Collisions. *Transportation Research Record*, 2147, 1, 42–50.
- Schnieder, L. (2017): Linguistisch fundiertes Requirements Management. Klare Worte, klares Ziel. *projektManagement aktuell*, 3, 43–47.
- Scholz, T. (Hrsg.) (2010): Verkehrstechnische Auswirkungen der Sonderphase für Linksabbieger an Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage. GDV; Unfallforschung der Versicherer, Berlin.
- Schulz, W. H., Joisten, N., Mainka, M.: Entwicklung eines Konzeptes für institutionelle Rollenmodelle als Beitrag zur Einführung kooperativer Systeme im Straßenverkehr.
- Shuttleworth, J. (2019): SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update. Online verfügbar unter: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>, Stand: 14.03.2022.
- Sjöberg, K., Andres, P., Buburuzan, T., Brakemeier, A. (2016): C-ITS Deployment in Europe - Current Status and Outlook. ArXiv, abs/1609.03876.
- Sommerville, I. (2012): *Software Engineering*. Pearson, München.
- Songchitruksa, P., Tarko, A. P. (2004): Using Image Technology To Evaluate Highway Safety. Publication FHWA/IN/JTRP-2004/27, West Lafayette, Indiana, USA.
- Starke, G. (2017): *Softwarearchitekturen*. 8. Auflage. Carl Hanser Verlag, München.
- Statistisches Bundesamt (2020): Verkehrsunfälle 2018. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-jahr-2080700187004.pdf?__blob=publicationFile, Stand: 14.03.2022.
- Stemmler, E., Kovaceva, J., Dotzauer, M. (2017): A probabilistic framework for identifying safety critical events in naturalistic driving time series data. In: NDRS 2017.
- Technische Universität Berlin (2019a): DIGINET PS. Die Protokollstrecke im Video. Online verfügbar unter: https://youtu.be/x_Ly9oUsxJU, Stand: 28.11.2020.
- Technische Universität Berlin (2019b): DIGINET-PS. Die digitale vernetzte Teststrecke.
- Technische Universität Berlin (2020): Autonomous Driving Playground. Online verfügbar unter: <https://dai-labor.de/testbeds/autonomous-mobility/>, Stand: 28.11.2020.
- Technische Universität Berlin (2021): BeIntelli: Schaufenster für Künstliche Intelligenz in der Mobilität. Online verfügbar unter: <https://www.tu.berlin/ueber-die-tu-berlin/profil/pressemitteilungen-nachrichten/2021/maerz/beintelli/>, Stand: 14.03.2022.
- Technische Universität München (2017): KoRA9. Projektbeschreibung und Lehrstuhlätigkeit. Online verfügbar unter: <https://www.bgu.tum.de/vt/forschung/projekte/projekte/aktuelle-projekte/kora9/>, Stand: 18.04.2020.
- Thiel, C., Makridis, M., Ciuffo, B., Alonso Raposo, M. (2017): The r-evolution of driving. From connected vehicles to coordinated automated road transport (C-ART).
- Törngren, M., Sellgren, U. (2018): Complexity Challenges in Development of Cyber-Physical Systems. In: Principles of modeling. Essays dedicated to Edward A. Lee on the occasion of his 60th birthday, Lohstroh, M., Derler, P., Sirjani, M., Lee, E. A. (Hrsg.), 478–503.
- TÜV Rheinland Consulting GmbH (2020a): SET Level 4to5. Simulationsbasiertes Entwickeln und Testen von Level 4 und 5 Systemen. Online verfügbar unter: <http://www.tuvpt.de/index.php?id=235>, Stand: 09.04.2020.
- TÜV Rheinland Consulting GmbH (2020b): VVMethoden. Verifikations- und Validierungsmethoden automatisierter Fahrzeuge Level 4 und 5. Online verfügbar unter: <http://www.tuvpt.de/index.php?id=vmethoden>, Stand: 09.04.2020.
- Ulbrich, S., Menzel, T., Reschka, A., Schuldt, F., Maurer, M. (2015): Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren. In: 10. Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz.

- UR:BAN-Konsortium (2016): UR:BAN - Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement. Ergebnisse. Online verfügbar unter: <http://urban-online.org/de/downloads-redirect/downloads-redirect.html?idcat36=&fid=1044>, Stand: 17.04.2020.
- van der Horst, R., Goede, M. de, Hair-Buijssen, S. de, Methorst, R. (2014): Traffic conflicts on bicycle paths: A systematic observation of behaviour from video. *Accident; analysis and prevention*, 62, 358–368.
- Verband der Automobilindustrie (2011): Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, Berlin.
- Verband der Automobilindustrie (2014): Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr. Teil 2.
- Verein Deutscher Ingenieure (2004): VDI 2206:2004-06. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie. Beuth Verlag GmbH.
- Wagner, R. (Hrsg.) (2007): Near miss. Systematischer Umgang mit Beinahe-Unfällen. Wagner, London, Wien.
- Walz, C. (22.08.2016): Verarbeitung und Visualisierung von Echtzeitdatenströmen in Mobile Cloud Computing Architekturen am Beispiel einer Flottenmanagement-App (Bachelorarbeit). Hochschule der Medien Stuttgart.
- Wang, S., Lu, H., Yang, F., Yang, M.-H. (2011): Superpixel Tracking. In: Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, IEEE Computer Society, USA, 1323–1330.
- Wasson, C. S. (2006): System Analysis, Design, and Development. Concepts, Principles, and Practices. Wiley, Hoboken.
- Watanabe, H., Tobisch, L., Rost, J., Wallner, J., Prokop, G. (2019): Scenario Mining for Development of Predictive Safety Functions. In: 2019 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 1–7.
- Wertheimer, R. (2014): Fahrerassistenz und präventive Sicherheit mittels kooperativer Perzeption. Partnerübergreifender Schlussbericht. Online verfügbar unter: http://ko-fas.de/files/19-S-9022_Ko-PER_partneruebergreifender-Schlussbericht.pdf, Stand: 14.03.2022.
- Wiltshko, T. (2004): Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit and Strassenknotenpunkten. VDI Verlag, Düsseldorf.
- Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., Singer, C. (2015): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
- Winner, H., Lenz, B., Gerdes, J. C., Maurer, M. (Hrsg.) (2015): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte. Springer Berlin Heidelberg.
- Wisselmann, D., Gresser, K., Spannheimer, H., Bengler, K., Huesmann, A. (2004): Connected-Drive - ein methodischer Ansatz für die Entwicklung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. In: 1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, TÜV Akademie München.
- XCYCLE Konsortium (2016): XCYCLE D 4.1. Simulator of Threat Assessment System and of Sensor System (unveröffentlichter Bericht).
- XCYCLE Konsortium (2018a): XCYCLE D5.2. Integration of In-Vehicle and On-Bicycle Demonstrator (unveröffentlichter Bericht).
- XCYCLE Konsortium (2018b): XCYCLE D5.3. Integration of stationary and quasi-permanent demonstrator - Integration of stationary demonstrator (unveröffentlichter Bericht).
- XCYCLE Konsortium (2018c): XCYCLE D6.2. Cycle Safety Evaluation Results (unveröffentlichter Bericht).

Zhao, H., Cui, J., Zha, H., Katabira, K., Shao, X., Shibasaki, R. (2009): Sensing an intersection using a network of laser scanners and video cameras. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 1, 2, 31–37.

Zheng, L., Ismail, K., Meng, X. (2014): Traffic conflict techniques for road safety analysis: open questions and some insights. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41, 7, 633–641.