

((Fahrzeuge | Rolling Stock))

Next Generation Train Fahrwerk: Fertigung eines prototypischen Radträgers im Rahmen des Projekts „Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk“ (FuN)

Next Generation Train Bogie: Production of a Prototype Axle Bridge for the “NGT Bogie Research Facility” (FuN)

David Krüger B. Eng. (McGill University), Dr.-Ing. Andreas Heckmann, Dr.-Ing. Daniel Lüdicke, M.Sc. Christian Gomes Alves

Zusammenfassung

Im Rahmen des Next Generation Train (NGT) Projekts entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) das Zugkonzept NGT High Speed Train (HST), ein 400 km/h schneller doppelstöckiger Triebwagenzug für den Hochgeschwindigkeitspersonenverkehr. Ein Teil der Konzeption der NGT HST Mittelwagen ist die Entwicklung eines leichtbauoptimierten, radial einstellbaren, angetriebenen Einzelrad-Einzelfahrwerks. Für den Aufbau eines ersten Prototypen diese NGT HST Fahrwerks wird eine DLR-Großinvestition „Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk“ (FuN) von mehreren DLR Instituten gemeinsam vorangetrieben. Erster Schritt für den Aufbau der Strukturen des Fahrwerks ist die Schweißbaugruppe des Radträgers. Die Berechnung, fertigungsgerechte Auslegung und Herstellung dieser Baugruppe ist erfolgt. Die gefertigten und im Rahmen des Artikels beschriebenen Bauteile werden für Belastungstests und den Zusammenbau in einem Prototypenfahrwerk verwendet.

Abstract

In the course of the Next Generation Train (NGT) project, the German Aerospace Center (DLR) is developing the train concept NGT High Speed Train (HST). NGT HST is a 400 km/h double deck electrical multiple unit. Part of the development of this train's carriages has been the design of a lightweight single axle independently rotating wheel bogie. As part of the DLR investment “NGT Bogie Research Facility” (“Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk“, FuN), a prototype of this bogie is being built, starting with the axle bridge weldment. The analysis, production optimized design and manufacture of this assembly have been completed and the finished parts are ready for testing and incorporation into the prototype bogie.

1 Einleitung: Next Generation Train

Im Projekt Next Generation Train erforscht das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt kontinuierlich seit 13 Jahren neuartige technologische Lösungsansätze für zukünftige

Schienenfahrzeuge. Es ist das Ziel des NGT-Projekts, die Eisenbahn zukünftig effizienter, schneller, leiser, komfortabler und damit noch attraktiver zu machen, womit ein wichtiger Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors und zur Bekämpfung der Klimakrise geleistet wird.

Die Züge der NGT-Familie dienen als Träger für die neuen Technologien, Strategien und Methoden, die das Erreichen dieser Ziele ermöglichen [1]. Um eine möglichst breite Anwendbarkeit der Technologien zu erreichen, werden die Forschungsaktivitäten von zurzeit elf verschiedenen DLR Instituten anhand einer Familie von bisher drei Fahrzeugkonzepten, NGT HST (Hochgeschwindigkeitspersonenzug, Bild 1) [2], NGT LINK (Zubringerzug) [3] und NGT CARGO (automatisch-fahrender Triebwagen-Güterzug) [4], gebündelt und demonstriert. Dieses Vorgehen fokussiert die Erarbeitung ganzheitlicher, in sich stimmiger Entwürfe. Der zweite Pfeiler der Forschungsstrategie ist die zeitnahe Umsetzung einzelner Technologien und Anwendungen in Projekten mit Industrie und Betreibern.



Bild 1 – Designbild des NGT HST Zugkonzeptes auf freier Strecke

Aus den genannten Projektzielen wurden konkrete Anforderungen für das Zugkonzept des NGT HST abgeleitet, z.B. eine Reisegeschwindigkeit von 400 km/h und Doppelstock-Mittelwagen in Leichtbauweise. Die hohe Reisegeschwindigkeit sorgt für eine konkurrenzfähigere und ressourcenschonendere Reisekette über mittlere Distanzen bis ca. 1000km gegenüber dem Individual- und Flugverkehr. Doppelstock-Mittelwagen, die auf beiden Ebenen über die gesamte Länge des Zuges stufenlos begehbar sind, ermöglichen ein größeres Platzangebot für Fahrgäste bei gleicher Fahrzeuglänge und stellen ein Optimum hinsichtlich Fahrzeugmasse pro Fahrgast dar [5]. Die Erfüllung dieser und weiterer Anforderungen wird durch angetriebene Einzelrad-Einzelradfahrwerke ohne durchgehende Radsatzwelle mit einer mechatronischen Spurführung sowie einem radnahen Direktantrieb ermöglicht. Das aus diesen Anforderungen

abgeleitete Fahrwerkskonzept entstand parallel zur Entwicklung des leichtbauoptimierten NGT HST Wagenkastens [6].

In zahlreichen Veröffentlichungen lassen sich verschiedene Aspekte der Fahrwerksentwicklung im Rahmen des NGT-Projekts bereits nachlesen. So sind erste Arbeiten zum Regelungskonzept des Fahrwerks bereits 2011 beschrieben [2] und die Weiterführung dieser Arbeiten 2020 dargestellt [7]. Veröffentlichungen zu den Entwicklungsarbeiten an den Strukturen des Fahrwerks beginnen mit der Entwicklungsmethode aus 2017 [8] und werden fortgeführt mit Berichten der Leichtbauoptimierung der Strukturen [9], der Konstruktion des Konzepts [10; 11] und der Ableitung einer schweißgerechten Konstruktion [12] in 2018.

Der vorliegende Artikel beschreibt die Fortschritte am Fahrwerk des NGT HST Mittelwagens sowie die Arbeiten an der Weiterentwicklung des Konzepts bis hin zur prototypischen Fertigung im Rahmen der DLR-Großinvestition „Forschungsinfrastruktur NGT Fahrwerk“ (FuN). Es werden zudem die ersten gefertigten Schweißbaugruppen vorgestellt und die FEM-Analysen dieser Baugruppen dargestellt.

2 Forschungsinfrastruktur NGT Fahrwerk (FuN)

Die Arbeiten bezüglich des Fahrwerks im Projekt NGT stützen sich bisher auf virtuelle Entwurfswerkzeuge wie CAD, FEM und Mehrkörpersimulationen (MKS) sowie auf Experimente im Maßstab 1:5 [13]. Die damit erzielten Ergebnisse in den Bereichen strukturoptimierter Leichtbau, mechatronischer Spurführung und radnahem Direktantrieb sind jedoch so vielversprechend, dass das DLR, im Rahmen seines Auftrages als Bereitsteller und Betreiber von Großforschungsanlagen, entschieden hat, einen Prototypen des NGT-Einzelrad-Einzelfahrwerks im Maßstab 1:1 zu bauen.

Inhaltlich dient FuN der Validierung und Demonstration der bisherigen NGT-Projekt-Ergebnisse und soll diese für den Technologie-Reifegrad (TRL) 6 ertüchtigen. Zusätzlich soll FuN eingesetzt werden, um in Projekten mit Industrie und Betreibern zeitnah Lösungsansätze zum Beispiel in Bezug auf mechatronische Fahrwerkskomponenten oder Monitoring und zustandsabhängige Wartung zu erproben.

Bis 2022 wird FuN in einem Integrationsprüfstand für qualitative Experimente mit herabgesetzter Leistungsaufnahme im DLR zur Verfügung stehen. In der darauf folgenden zweijährigen Projektphase sind Erprobungen des Fahrwerks auf externen Rollprüfständen mit schrittweise gesteigerten Lasten, Leistung und Fahrgeschwindigkeiten bis über 300 km/h vorgesehen. Anschließend ist der Einbau des Fahrwerks in einem Schienenfahrzeug zur Erprobung in einem Testzentrum geplant.

Die momentanen Arbeiten konzentrieren sich auf die experimentelle Qualifizierung der Einzelkomponenten. Zur Erprobung der Regelungs- und Automatisierungstechnik des NGT-Fahrwerks wird eine Hardware-in-the-Loop Umgebung aufgebaut. Der Antriebsmotor wird

zunächst einzeln auf einem Motorprüfstand getestet. Jeweils drei Prototypen der wesentlichen leichtbauoptimierten Schweißbaugruppen sind bereits oder werden derzeit gefertigt. Zwei der Baugruppen werden einzeln auf statische und dynamische Festigkeit geprüft während die dritte Ausfertigung für den Einbau in das Fahrwerk vorgesehen ist. Die formal getrennten Projekte NGT und FuN sind dabei inhaltlich eng verzahnt.

3 Mechanische Architektur des NGT-Fahrwerks

Das Projekt FuN realisiert das bereits im NGT Projekt entwickelte Konzept eines leichtbauoptimierten mechatronischen Einzelrad-Einzelfahrwerks. Im Zuge der prototypischen Umsetzung des Fahrwerks müssen eine Vielzahl an Komponenten und Systeme hergestellt und aufgebaut werden. Für die Struktur des Fahrwerks bedeutet dies in erster Linie die Realisierung der zwei Hauptschweißbaugruppen, nämlich den Radträger sowie der physikalisch größten Baugruppe, den Sekundärrahmen.

In Bild 2 ist die vereinfachte Grundstruktur des Fahrwerkes dargestellt. In der Mitte des Fahrwerkes befindet sich der Radträger, der die zwei von hochpoligen Permanentmagnet-Synchronmotoren angetriebenen Einzelräder führt. Der Radträger läuft mit den Rädern ungefedert im Gleis. Die Motoren (hellblau) stützen sich mit elastischen Füßen auf dem Radträger ab und sind über flexible Laschenkupplungen mit den Rädern verbunden. In grün sind auf beiden Innenseiten die aktiven Blattfedern als Primärstufe dargestellt, die den Radträger mit dem umschließenden Sekundärrahmen (schwarz) verbindet. An den vier Ecken des Sekundärrahmens sind die Sekundärfedern (pink) angeordnet.

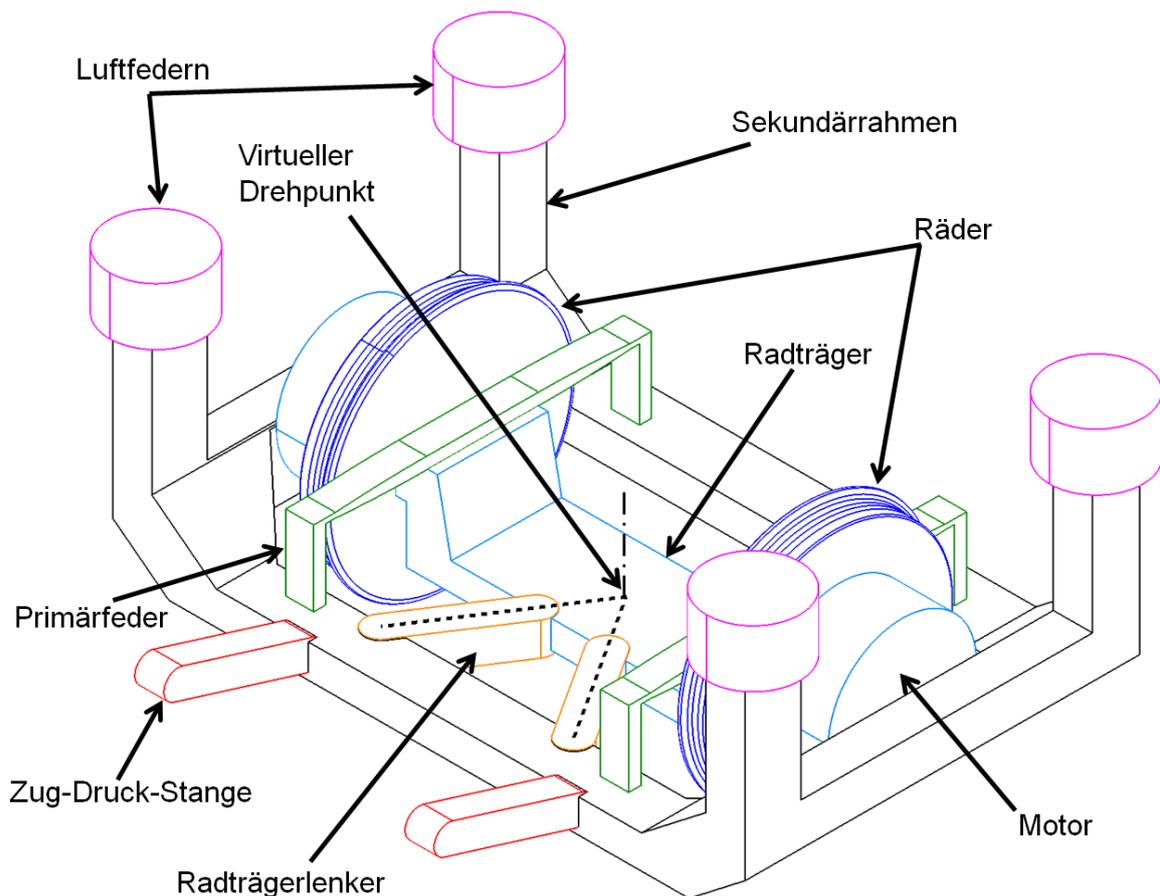


Bild 2 – Vereinfachte, prinzipielle Darstellung des NGT HST-Fahrwerks

Das Radpaar kann sich mit dem Radträger in Gleisbögen einlenken, wobei der Sekundärrahmen durch die Zug-Druck-Stangen (rot) (nahezu) parallel zum Wagenkasten geführt wird. Die zwei Radträgerlenker (orange) halten die Position des Radträgers in der Fahrwerksmitte und geben die Drehung um einen virtuellen Drehpunkt frei. Die Primärfederung gibt über Lenker und verschiedene Drehgelenke ebenfalls die Drehbewegung frei, wobei sich die aus der Vertikalkraft ergebenden Reaktionskräfte (nahezu) kompensieren.

Das mechatronische Spurführungsprinzip dieses Fahrwerkes basiert auf einer Regelung der Einzelradantriebe, um durch Differenzmomente den Radträger aktiv einzulenken. Hierdurch können eine Vielzahl von modernen Regelungsverfahren angewendet werden, um ein Verschleißminimum und weitere Kriterien bestmöglich zu erreichen.

Die Bauform des Fahrwerks erlaubt einen Niederflurdurchgang im Fahrwerksbereich, womit die doppelstöckigen NGT-Personenzüge den Anforderungen entsprechend über die gesamte Länge der Wagen auf beiden Ebenen stufenlos begehbar sind.

Um aus der Konzeptkonstruktion des Fahrwerks ein reales Bauteil herzustellen, wurden viele Detailarbeiten, Analysen, Fertigungsvorbereitungen und Herstellungsverfahren sorgfältig geplant und durchgeführt. Alle diese Schritte bauen auf die Anwendung einer neuartigen Methode zur Entwicklung leichtbauoptimierter Fahrwerke auf, die am DLR für dieses Fahrwerk erstellt wurde [8].

4 Entwicklung und Optimierung des Fahrwerks

Die Neuentwicklung eines leichtbauoptimierten, unkonventionellen Fahrwerks wie dem NGT-Fahrwerk ist aufgrund der zusätzlichen konzeptionellen Freiheitsgrade noch anspruchsvoller als eine evolutionäre Weiterentwicklung eines bestehenden Fahrwerks. Die in [8] vorgestellte Methode, die speziell für die Entwicklung des NGT-Fahrwerks erstellt wurde, verkettet verschiedene Ingenieurswerkzeuge miteinander. Sie ermöglicht eine zielgerichtete Leichtbauoptimierung komplexer Fahrwerksstrukturen mit möglichst wenigen Arbeitsschritten. Enthalten sind dabei Untersuchungen zur konzeptionellen Komponentenanordnung, zur Fahrwerksdynamik und zur kraftflussgerechten Strukturausbildung mit bauweisenneutralen Masseabschätzungen, sowie Konstruktionsableitungen und Form- und Größenoptimierungen.

Kern der Leichtbauoptimierungen sind Topologieoptimierungen, die auf der Finiten-Elemente-Methode basieren. Sie ermöglichen eine Ableitung kraftflussoptimierter Formen für die Strukturen des Fahrwerks (Bild 3). Bei Topologieoptimierungen werden Bereiche des Bauteilvolumens ermittelt, die stärker oder schwächer belastet sind. Die relative Dichte der stärker belasteten Elemente wird erhöht, damit diese mehr Last tragen, und die relative Dichte der schwächer belasteten Elemente im Gegenzug reduziert. Dieser Vorgang wird iterativ wiederholt, bis die gesetzten Zielgrößen (z.B. Masserestriktion) erreicht werden. Die Topologieoptimierungen dienen als Vorschlag für eine kraftflussoptimierte Konstruktion, die schließlich mittels Wanddicken- und Formoptimierungen in leichtbauoptimierter Form zielgerichtet detailliert werden kann.

Bild 3 zeigt einen stark vereinfachten Ablauf der verwendeten Entwicklungsmethode. Von einem vorgegebenen Bauraum ausgehend (links) wird zunächst der Radträger (oben) konzeptionell untersucht. Die Erkenntnisse über die Struktur des Radträgers fließen zusätzlich in die nachfolgenden Untersuchungen zur Struktur des Sekundärrahmens ein (unten). Diese beiden Untersuchungen werden letztlich kombiniert und weiteren Detailauslegungen unterzogen, um eine detaillierte Konstruktion des Fahrwerks zu generieren (rechts).

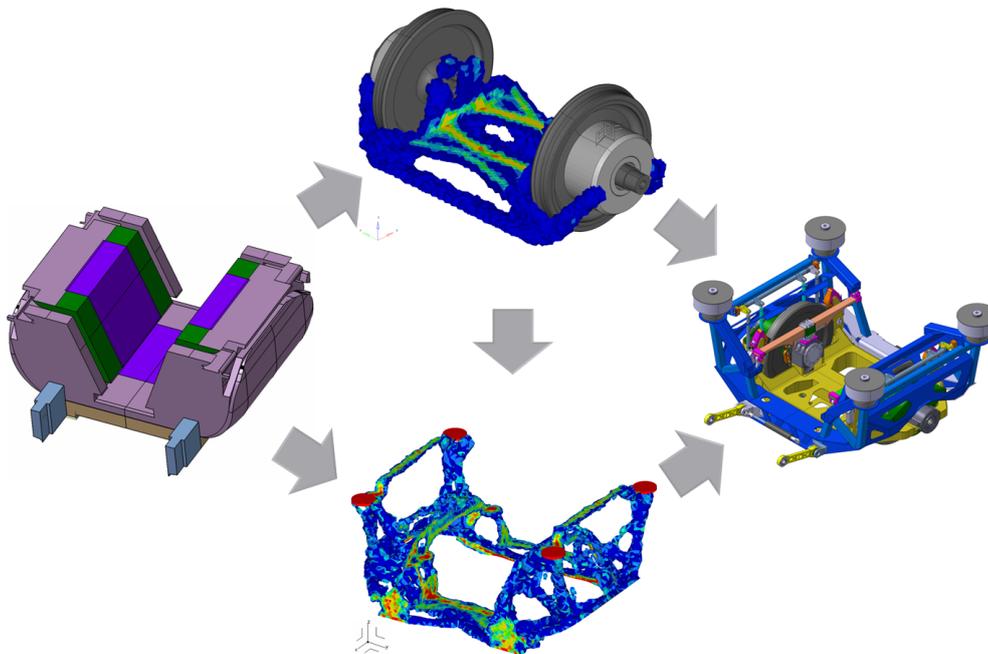


Bild 3 – Ableitung einer kraftflussgerechten Konstruktion

5 Fertigungsgerechte Gestaltung des Radträgers

In Zusammenarbeit mit Partnern aus Forschung und Industrie wurde ein Fertigungskonzept für den Radträger abgeleitet. Die fertigungs- bzw. schweißgerechte Konstruktion weist eine ausreichende Zeitfestigkeit auf und erfüllt die Leichtbauziele des NGT-Projekts. Im Rahmen dieser fertigungstechnischen Optimierung wurde die Konstruktion des Radträgers vereinfacht und die Grundstruktur des Radträgers so angepasst, dass die darin enthaltenen Schweißnähte möglichst gerade Verläufe bzw. einfache Geometrien haben. Hierdurch wird eine spätere Automatisierung des Schweißprozesses im Falle einer Serienfertigung erleichtert.

Fahrwerke sind Baugruppen, die nach EN 15085, der Norm für Schweißen an Schienenfahrzeugen, zur höchsten Zertifizierungsstufe CL1 gehören und verfügen zudem über viele Schweißnähte mit hohem Sicherheitsbedürfnis und einem hohen Beanspruchungszustand [14]. Die Schweißbaugruppen des Fahrwerks müssen daher strenge Anforderungen bezüglich Zugänglichkeit und konstruktiver Gestaltung erfüllen. Um eine entsprechend hohe Schweißnahtqualität zu erreichen ist es vorteilhaft die Konstruktion so zu gestalten, dass möglichst viele Schweißnähte entweder in einer Wannelage oder leicht steigend geschweißt werden können (Bild 4).

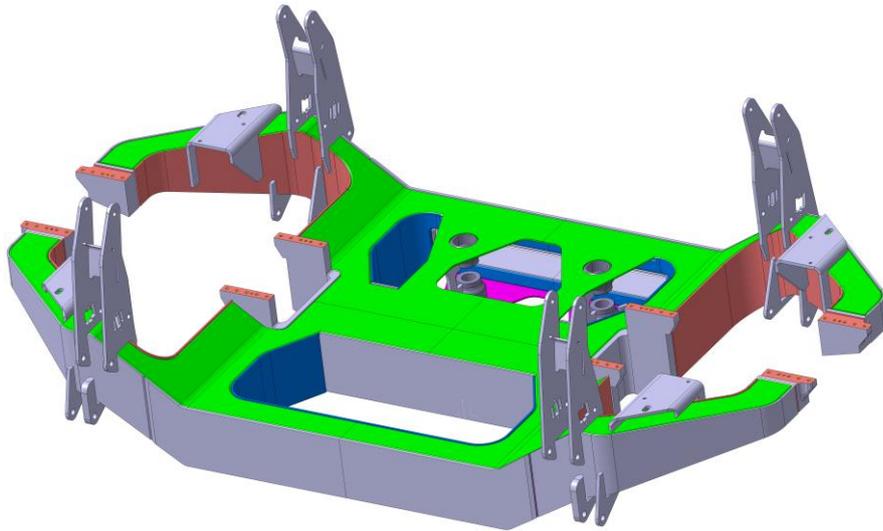


Bild 4 – Radträgerschweißbaugruppe

Bei der Umsetzung des Prototyps wurde darauf geachtet, dass die Grundstruktur der Schweißbaugruppe ausschließlich aus geschlossenen Profilen und Querschnitten besteht, wodurch eine (torsions-)steife Struktur entsteht. Die komplette Baugruppe wird luftdicht geschweißt sowie außen beschichtet und lackiert, um Korrosion zu verhindern. Schweißnähte in besonders verzugsempfindlichen Bereichen werden in der Regel annähernd symmetrisch zum Schwerpunkt des Profilquerschnitts ausgeführt, um den Verzug zu minimieren (Bild 5).

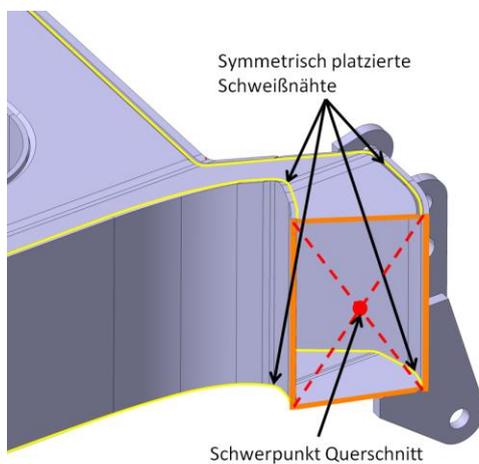


Bild 5 – Minimierung des Verzugs durch symmetrisches Schweißen entlang der Kanten des Profilquerschnitts

An der Radträger-Schweißbaugruppe werden Lagerschalen für die Kegelrollenlager der Einzelräder an dafür vorgesehenen Flächen angeschraubt (Bild 6). Trotz allen Maßnahmen, um den Schweißverzug zu minimieren, ist der zu erwartende Verzug gegenüber den notwendigen Toleranzen verhältnismäßig groß. Auf Grund dessen werden an den Anschraubflächen für die

Radlager sowie an den Anbindungsstellen der Radträgerlenker Bearbeitungsaufmaße vorgesehen und diese Stellen anschließend mit geringeren Toleranzen spanend bearbeitet.

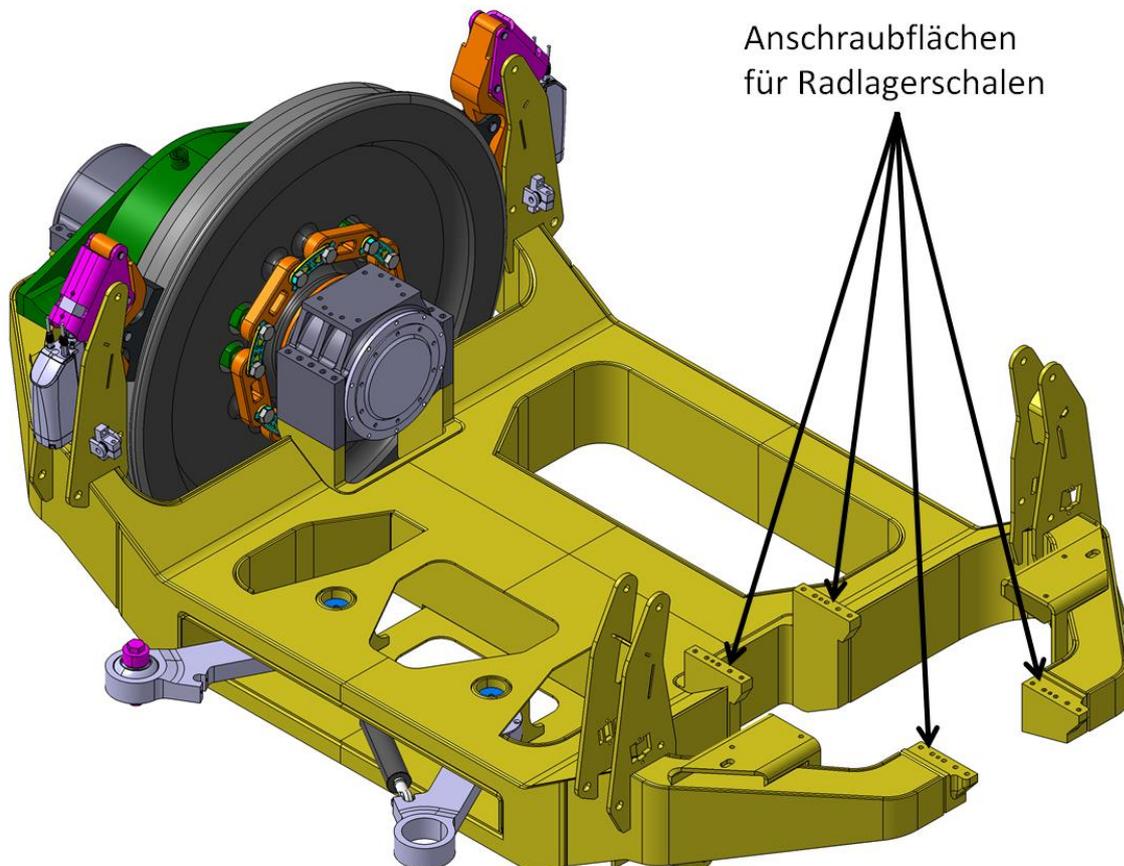


Bild 6 – Detailansicht: Radträgerschweißbaugruppe mit einer der zwei Radbaugruppen

Die Anschraubflächen der Radlager lassen sich in einem Arbeitsgang ohne Umspannen und mit einfacher Zugänglichkeit von oben bearbeiten, um eine ausreichende Positioniergenauigkeit der Räder zueinander zu gewährleisten. Passungen lassen sich im selben Arbeitsgang herstellen, wie die für die Anbindung der Radträgerlenker, deren Position relativ zu den Rädern besonders wichtig ist.

6 Rechnerischer Festigkeitsnachweis des Radträgers

Im Anschluss an die fertigungsgerechte Gestaltung der Konstruktion muss für die Schweißbaugruppen ein Festigkeitsnachweis mittels FEM erstellt werden. Vor der Realisierung der Fahrwerkskomponenten und Systeme wird im Zuge dieser Nachweiserstellung jedes realistische Szenario simulativ untersucht, damit ein sicheres Verhalten während der späteren Nutzung gewährleistet werden kann. Bei der Nutzung des NGT-Fahrwerksprototypen werden zunächst verschiedene Versuche im Vordergrund stehen, die die Regelung, den Antrieb und die gesamte mechanische Architektur des Fahrwerks erproben sollen.

Die mechanische Architektur wird mit Hilfe von FEM-Analysen mit allen relevanten außergewöhnlichen und betrieblichen Lastfällen aus den einschlägigen Normen sowie

ausgewählter nicht normativ vorgeschriebener Lastfälle untersucht. Vom Radträger wurden beispielsweise FEM-Analysen mit Lastfällen unter anderem nach EN 13749 und EN 13103 durchgeführt [15; 16]. Bild 7 zeigt die maximalen örtlich auftretenden Spannungen über alle untersuchten außergewöhnlichen Lastfälle. Lokal, vor allem an Kraftflussumlenkungen, zeigen sich erhöhte Spannungswerte, die jedoch stets unter der maximal ertragbaren Spannung von 308 MPa bei einem Sicherheitsfaktor von 1,15 zur Streckgrenze liegen. Die Orte der Spannungserhöhungen ergeben sich hauptsächlich aufgrund der beengten geometrischen Verhältnisse im verfügbaren Bauraum im Fahrzeug. Die Bereiche mit schwacher Auslastung lassen hingegen ein nicht realisiertes Leichtbaupotenzial vermuten, weitere Masseinsparungen in dieser Baugruppe, z.B. durch geringere Blechdicken, sind allerdings aufgrund des erhöhten Fertigungsaufwands und der notwendigen Robustheit gegen Eis- und Schotter Schlag nur bedingt umsetzbar.

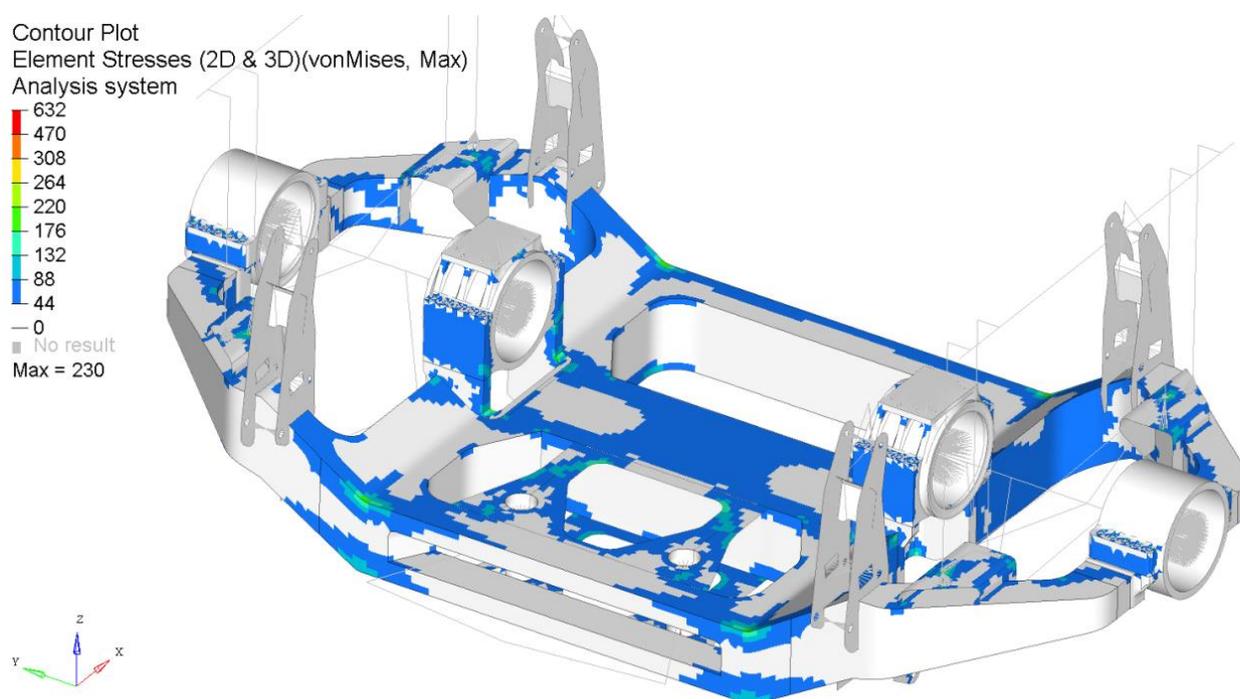


Bild 7 – Überlagerte Darstellung der maximalen außergewöhnlichen von Mises Spannungen aller untersuchter Lastfälle

Die Zeitfestigkeit der Konstruktion inklusive der Schweißnähte wird nach DVS 1612 unter Berücksichtigung aller Schweißnahtgeometrien in der Baugruppe analysiert [17]. An jeder Position werden die entsprechende Kerbklasse sowie das Grenzspannungsverhältnis zwischen höchster und niedrigster Spannung ausgewertet. Die Berechnung der Auslastungsgrade des Grundmaterials und der Schweißnähte zeigt maximale Werte von 0,63 bzw. 0,98 bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 99,5% ab 2×10^6 Lastwechsel (Bild 8).

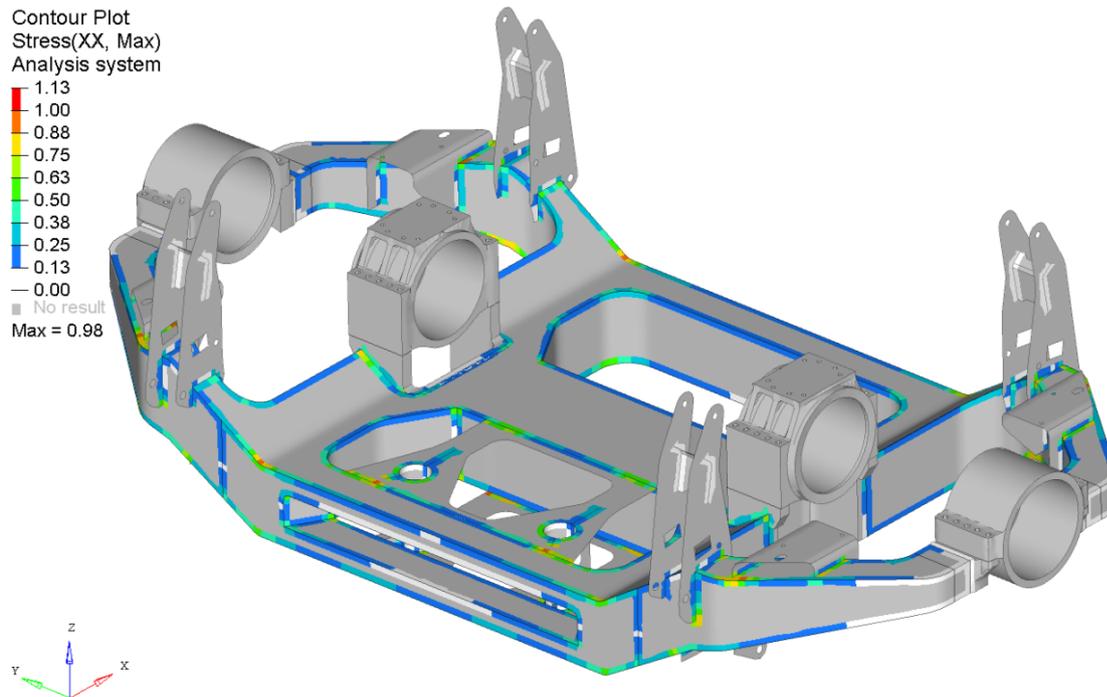


Bild 8 – Überlagerte Darstellung der betrieblichen Auslastungsgrade der Schweißnähte des Radträgers nach DVS 1612

7 Herstellung des Radträgers

Nach dem erfolgten Nachweis der Festigkeit und Abschluss der Fertigungsvorbereitung wurden die zwei Schweißbaugruppen Radträger und Sekundärrahmen gefertigt (Bild 9). Zwei Baugruppen werden für statische und dynamische Versuche zur Validierung der Berechnungsergebnisse verwendet, während die dritte Ausfertigung in den FuN Prototypen integriert wird.



Bild 9 – Gefertigtes, unlackiertes Exemplar des Radträgers nach dem Richten und der spanenden Bearbeitung

Die Radträger wurden von einem nach EN 15085 zertifizierten Schweißbetrieb gefertigt. Die Grundstruktur des Radträgers besteht überwiegend aus 5 mm dickem S355J2+N Blech und größeren Blechstärken an wenigen Stellen wo dies auf Grund der Beanspruchung notwendig ist. Die Anbindungspunkte für Motoren, Konsolen der Feststellbremsen und linearen Wirbelstrombremsen bestehen, aufgrund hoher punktueller Lasten, aus 10 mm Blech. Die Anbindungsflächen für die Radlager werden für diese prototypische Umsetzung aus massiven Blechen zusammengeschweißt und anschließend überfräst, während die Aufnahmen für die Radträgerlenker aus rundem Halbzeug gedreht sind. Beide der letztgenannten Komponenten würden bei einer Serienfertigung des Fahrwerks voraussichtlich als Gussteile realisiert.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Über die vergangene Laufzeit des NGT Projekts sind viele der theoretischen Arbeiten am NGT-Fahrwerk seit 2007 auf Konferenzen vorgestellt und in der Fachliteratur veröffentlicht worden. In der DLR-Großinvestition „Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk“ (FuN) wird das NGT-Fahrwerk (Bild 10) nun real gebaut und in einem Integrationsprüfstand im Maßstab 1:1 getestet. Der Artikel stellt die praktische Anwendung der bereits 2018 veröffentlichten Leichtbau-Entwicklungsmethode dar, sowie die weiterführenden Arbeiten bis zur Herstellung der Radträger. Drei Radträgerschweißbaugruppen sind vollständig gefertigt worden und werden für Prüfstandsversuche und der Integration in FuN vorbereitet. Der Sekundärrahmen und diverse andere Komponenten befinden sich in der Berechnung, Fertigungsvorbereitung oder Fertigung.

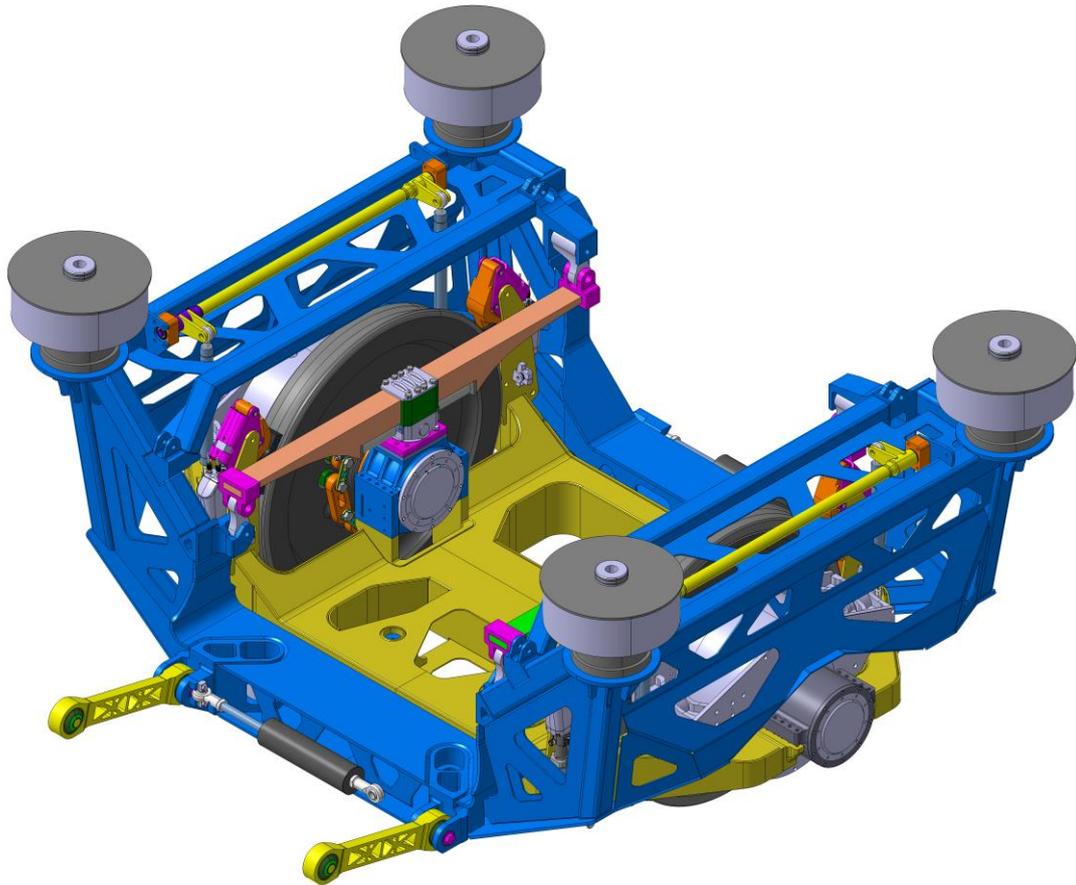


Bild 10 – Perspektivische Ansicht des gesamten Fahrwerks

Im Rahmen des Projekt FuN wird bis 2022 ein vollständiges NGT HST Fahrwerk mit einem Integrationsprüfstand erstellt und anschließend auf Rollprüfständen und in Testzentren auf freier Strecke getestet. Mit den hier vorgestellten Arbeiten am NGT-Fahrwerk werden weiterhin neue Erkenntnisse für die Entwicklung neuartiger, innovativer Schienenfahrwerke gewonnen, zusätzlich aber auch die tatsächliche Anwendbarkeit der Ergebnisse des NGT-Projekts betont und bestätigt.

9 Danksagung

Die Autoren möchten sich bei den Partnern aus Forschung und Industrie bedanken, die die bisherige Umsetzung der Fahrwerksbauteile unterstützt und ermöglicht haben: Die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle GmbH, insbesondere für die Beratung zum Schweißkonzept des Radträgers und die Begleitung dessen Fertigung, der Firma Hörmann Vehicle Engineering GmbH für Entwicklungs-, Konstruktions- und Berechnungsdienstleistungen, und der Maschinenbau und Service GmbH (MSG) Ammendorf für die Fertigung und Vermessung der Radträger.

10 Literaturverzeichnis

1. **Dr.-Ing. Winter, Joachim.** Next Generation Train - 20 Jahre Forschung für die Eisenbahn. *Eisenbahntechnische Rundschau.* 2019, 03.
2. **Dr.-Ing. Winter, Joachim et al.** NGT - Next Generation Train. *Rail Technology Review Special.* 2011.
3. **Krüger, David und Dr.-Ing. Winter, Joachim.** NGT LINK: Ein Zugkonzept für schnelle doppelstöckige Regionalfahrzeuge. *ZEVrail.* Oktober, 2014, Bd. 138, 10.
4. **Dr.-Ing. Winter, Joachim et al.** NGT CARGO - Schienengüterverkehr der Zukunft. *Internationales Verkehrswesen.* 2017, 2.
5. **König, Jens.** *Dissertation: Neuartige Leichtbaukonzepte und Bauweisen von Schienenfahrzeugen im Hochgeschwindigkeitsverkehr unter besonderer Berücksichtigung des Wagenkastenleichtbaus.* Stuttgart : Universität Stuttgart, 2016.
6. **Dr.-Ing. König, Jens et al.** Konsequente und neuartige Leichtbauansätze bei Schienenfahrzeugen des Personenverkehrs. *ZEVrail.* 2016, Bd. 140, 10 Oktober.
7. **Dr.-Ing. Heckmann, Andreas et al.** Nonlinear Observer Design for the Guidance and Traction of Railway Vehicles. *26th IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks.* Göteborg, Schweden : IAVSD, 2020.
8. **Krüger, David et al.** Next Generation Train Fahrwerk: Eine neuartige Methode für die Leichtbauoptimierung von Schienenfahrzeugfahrwerksstrukturen. *ZEVrail.* 2017, Bd. 141, Juni-Juli.
9. **Gomes Alves, Christian, Krüger, David und Rehermann, Michael.** Optimization and design of rail vehicle running gear components under dynamic loading. *Fourth International Conference on Railway Technology.* Sitges, Barcelona : Civil-Comp Press, 2018.
10. **Krüger, David et al.** Next Generation Train Fahrwerk: Ein leichtbauoptimiertes Fahrwerkskonzept für den Hochgeschwindigkeitsverkehr. *ZEVrail.* 2018, Bd. 142, März.
11. **Krüger, David et al.** Neuartige Methode zur Entwicklung leichtbauoptimierter Fahrwerksstrukturen am Beispiel des Next Generation Trains des DLR. *16. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden.* Dresden : DVV Media Group Eurailpress, 2018.
12. **Krüger, David et al.** Konstruktion und Entwicklungsmethode des leichtbauoptimierten Next Generation Train Fahrwerks. *13. Fachtagung Fügen und Konstruieren im Schienenfahrzeugbau.* Halle (Saale) : SLV Halle GmbH, 2018.
13. **Dr.-Ing. Kurzeck, Bernhard et al.** Potenziale aktiv geregelter Losradfahrwerke im Hochgeschwindigkeitsverkehr - Ergebnisse aus dem DLR-Projekt "Next Generation Train". *ZEVrail.* 2014, August.
14. *DIN EN 15085-2 - Bahnanwendungen - Schweißen von Schienenfahrzeugen und -fahrzeugteilen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2007.
15. *DIN EN 13103 Railway applications - Wheelsets and bogies - Non powered axles - Design method.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.

16. DIN EN 13749 Railway applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.

17. DVS 1612 Gestaltung und Dauerfestigkeitsbewertung von Schweißverbindungen im Schienenfahrzeugbau. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014.

((Bildunterschriften))

Bild 1 – Designbild des NGT HST Zugkonzeptes auf freier Strecke

Bild 2 – Vereinfachte, prinzipielle Darstellung des NGT HST-Fahrwerks

Bild 3 – Ableitung einer kraftflussgerechten Konstruktion

Bild 4 – Radträgerschweißbaugruppe

Bild 5 – Minimierung des Verzugs durch symmetrisches Schweißen entlang der Kanten des Profilquerschnitts

Bild 6 – Detailansicht: Radträgerschweißbaugruppe mit einer der zwei Radbaugruppen

Bild 7 – Überlagerte Darstellung der maximalen außergewöhnlichen von Mises Spannungen aller untersuchter Lastfälle

Bild 8 – Überlagerte Darstellung der betrieblichen Auslastungsgrade der Schweißnähte des Radträgers nach DVS 1612

Bild 9 – Gefertigtes, unlackiertes Exemplar des Radträgers nach dem Richten und der spanenden Bearbeitung

Bild 10 – Perspektivische Ansicht des gesamten Fahrwerks

((Viten))

David Krüger B. Eng. (McGill University) (38). Studierte 2001 bis 2006 Mechanical Engineering an der McGill University in Montréal, Kanada. Von 2005 bis 2008 Design Engineer (E.I.T.) bei Steelworks Design in Peterborough, Kanada. Von 2008 bis 2012 Entwicklungs- und Projektingenieur bei Vossloh High Speed Grinding (ehemals Stahlberg-Roensch) in Hamburg. Seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, seit 2017 im Forschungsfeld Fahrzeugarchitekturen und Leichtbaukonzepte. Seit 2014 Leiter des Projektknotens „NGT CARGO“ innerhalb des Projekts Next Generation Train. Anschrift: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland.

E-Mail: david.krueger@dlr.de

Dr.-Ing. Andreas Heckmann (58). 2005 Promotion, 1999 Abschluss im Studiengang Maschinenwesen an der Technischen Universität München nach Berufsausbildung, Fachhochschulabschluss und 5-jähriger Tätigkeit als Werkzeugonstrukteur. Seit 2000 am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., zuletzt als Abteilungsleiter Fahrzeug-Systemdynamik am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik in Oberpfaffenhofen. Seit 2007 im Projekt Next Generation Train mit den Schwerpunkten Fahrdynamik und Regelung sowie Projektleitung FuN.

Anschrift: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Münchner Str. 20, 82234 Weßling, Deutschland.

E-Mail: Andreas.heckmann@dlr.de

Dr.-Ing. Daniel Lüdicke (42) Studium des Maschinenbaus und Mechatronik von 1999 bis 2004 an der Technischen Universität Ilmenau. Anschließend Entwicklungsingenieur in der Automobilindustrie. Ab 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme der Universität RWTH Aachen mit dem Forschungsschwerpunkt Fahrzeugautomatisierung und erweiterter Odometrie mit Satellitennavigation.

Seit 2016 am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Tätig im Projekt Next Generation Train mit der laufdynamische Auslegung und Simulation der Fahrwerke. Seit 2019 Leiter des Teilprojektknotens NGT HST. Technische Projektleitung im Projekt FuN.

Anschrift: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Münchner Str. 20, 82234 Weßling/Oberpfaffenhofen, Deutschland.

E-Mail: daniel.luedicke@dlr.de

Christian Gomes Alves, M.Sc. (32). Studium des Maschinenbaus an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim und an der Universität Stuttgart. Seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter für Simulation und Berechnung von Schienenfahrzeugkomponenten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, im Forschungsfeld Fahrzeugarchitekturen und Leichtbaukonzepte.

Anschrift: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland.

E-mail: christian.gomesalves@dlr.de

