

Numerische Untersuchung eines innovativen Drehgestellrahmens aus Glasfaserverbundwerkstoff für Schmalspurbahnen

Schönhuber, Paul¹; Lekue, Jagoba¹; Bruns, Albert²; Schindler, Christian¹

¹Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme, RWTH Aachen

²Novacom Verstärkte Kunststoffe GmbH

Zusammenfassung

Der Einsatz moderner Werkstoffe in Drehgestellkonstruktionen bietet enormes Potential hinsichtlich Leichtbau, Lärmreduktion und Funktionsintegration. Im Rahmen eines langjährigen Vorhabens wurde ein innovatives Schmalspurbahndrehgestell aus Glasfaserverbundwerkstoff auf seine Festigkeit und sein dynamisches Verhalten rechnerisch untersucht. Die Ergebnisse belegen die Praxistauglichkeit und stellen die kommerzielle Anwendung in Aussicht.

Keywords: Fahrwerke; Leichtbau; Lärmreduktion

1 Einleitung

Dem Wort „Eisenbahn“ entsprechend sind seriengefertigte Drehgestellrahmen aus metallischen Werkstoffen hergestellt. Die Gründe dabei sind offensichtlich: Der Werkstoff ist zuverlässig und preiswert und es ist reichlich Erfahrung in der Konstruktion, Fertigung, Instandhaltung und im Betrieb vorhanden.

Um die angestrebten Ziele hinsichtlich Leichtbau und Energieeinsparung zu erreichen, können nichtmetallische Werkstoffe eine Alternative sein. So sind beispielsweise Glasfaserverbundwerkstoffe in der sicherheitskritischen Luftfahrt lange etabliert [1]. Im Bereich der Schienenfahrzeugtechnik sind bislang nur Prototypen getestet worden.

2 Stand der Technik

Der erste dokumentierte Prototyp ist im Zusammenhang mit der ICE 1-Entwicklung von MBB entwickelt und getestet worden [2, 3]. Im Zuge der Drehgestellauswahl für den ICE 2 ist das HDL-300 von AEG mit einem Faserverbundwerkstoffrahmen untersucht worden [4]. Diese und auch weitere Konstruktionen haben sich nicht durchgesetzt. Ein werkstoffgerechtes Design existiert mit dem efWING von Kawasaki [5].

Das Potential einer Drehgestellrahmenkonstruktion aus Glasfaserverbundwerkstoff ist hoch. Unter anderem lassen sich damit folgende Vorteile erzielen:

- Gewichtseinsparung
- Bauteilreduktion durch Integration der Feder- und Dämpferfunktion in den Rahmen
- Lärminderung durch Entkoppelung der Radsätze und des Wagenkastens bei Güterwagen

3 Ein Prototyp für die Schmalspur

Im Rahmen eines europäischen Projekts ist ein Drehgestellprototyp mit einem glasfaserverstärktem Kunststoffrahmen für die Welsh Highland Railway (Porthmadog, UK) entwickelt worden. Die aus diesem für die Schmalspurbahn angedachten Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen für zukünftige kommerzielle Anwendungen auf die Normalspur übertragen werden.

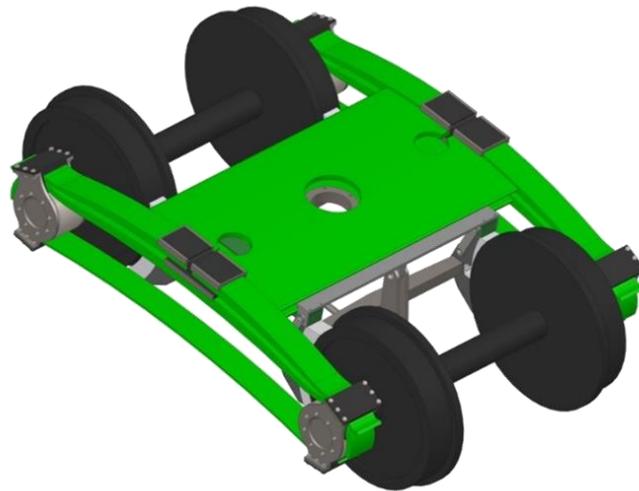


Abbildung 1: Schmalspurbahndrehgestell aus Glasfaserverbundwerkstoff für die Welsh Highland Railway.

Die in Abb. 1 dargestellte innovative Konstruktion orientiert sich an den Anforderungen des Y25-Drehgestells und ist das Ergebnis eines langjährigen Prozesses, in dessen Ver-

lauf eine stark skalierte Version erfolgreich eingesetzt worden ist [6]. Die Normalspurvariante ist rechnerisch, jedoch bisher nicht auf Testfahrten untersucht worden [7]. Die Realisierung auf der Schmalspur ermöglicht die Verbindung von Simulationen, Prüfstandversuchen und Testfahrten bei vertretbarem Aufwand.

3.1 Drehgestellkonzept

Das Drehgestellkonzept ist das Ergebnis einer Zusammenführung der Anforderungen hinsichtlich der Anwendung, der Fertigung und der Ausnutzung der Materialeigenschaften.

In seiner normalspurigen Variante als Alternative zum Y-25 angedacht, weist es eine vertikale zweistufige Anordnung auf. Abb. 2 zeigt wie sich die Last je nach Beladungszustand nur auf dem obersten oder auf den beiden oberen Rahmenelementen verteilt.

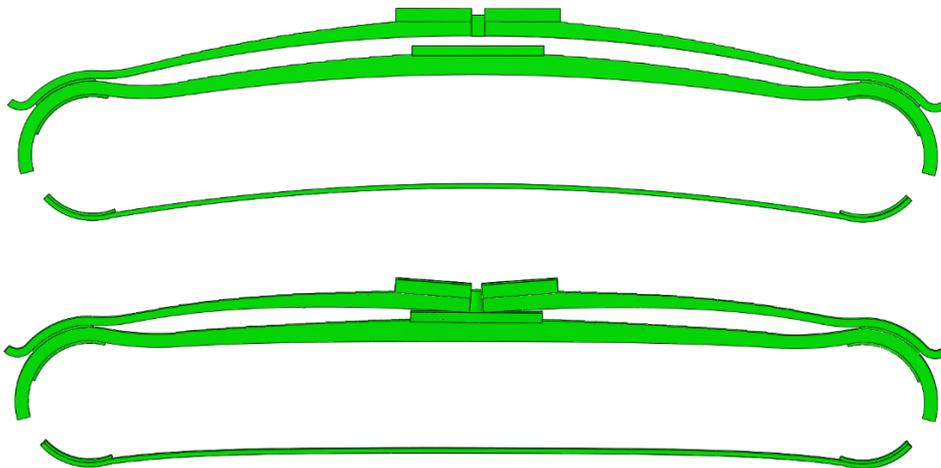


Abbildung 2: Rahmenganordnung in unbeladenem (oben) und beladenem Zustand (unten).

Jedes dieser Elemente besteht aus zwei Längsträgern, die über einen torsionsweichen Querträger miteinander verbunden sind. Die vertikale Last wird direkt vom Wagenkasten über seitliche Gleitstücke in die Längsträger eingeleitet. Diese sind außerdem auch für die Federungsfunktion verantwortlich. Die Querträger übertragen Längs- und Querkräfte und sind geeignet, Gleisverwindungen auszugleichen. Die unteren Bindeglieder zwischen Vorder- und Hinterachse ermöglichen eine stark progressive Längssteifigkeit um den Achsabstand zu begrenzen.

Die seitlichen Gleitelemente sind auch zur Sicherstellung der Drehbewegung zwischen den Längsträgern des obersten Rahmenelementes und dem Wagenkasten vorgesehen. Die Längs- und Querkräfte werden über einen Drehzapfen übertragen. An der Achslagerung ist ein metallisches Gehäuse vorgesehen, welches die beiden oberen Elemente sowie die

Bindeglieder über eine Klemmverbindung aufnimmt. Gummielemente ermöglichen dabei noch eine geringe Relativbewegung.

Der Glasfaserverbundwerkstoff sowie die Gummielemente weisen im Vergleich zu Stahl eine höhere Materialdämpfung auf, sodass das Drehgestellkonzept keine zusätzlichen Dämpferelemente vorsieht.

Die Fertigung der Drehgestellrahmen erfolgt durch Resin Transfer Moulding. Die zurechtgeschnittenen einzelnen Glasfaserlagen werden in die Negativform eingelegt. Die Form wird anschließend geschlossen und Harz unter Druck hinzugefügt. Nach dem Aushärten ist keine weitere Nachbehandlung erforderlich. Dieses Verfahren ist somit ressourcenschonend und wirtschaftlich.

4 Numerische Untersuchung

Am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme wurden in einer ersten grundlegenden Untersuchung die Strukturintegrität unter vertikaler Betriebslast sowie das Laufverhalten hinsichtlich Wellenlauf und kritischer Geschwindigkeit analysiert. Dazu wurden die entsprechenden Normen DIN EN 13749 [8] beziehungsweise DIN EN 14363 [9] herangezogen.

4.1 Finite-Elemente-Modell

Neben der Geometrie der Drehgestellrahmen hat auch der Lagenaufbau des eingesetzten Verbundwerkstoffs einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Das Modell beinhaltet eine vollständige Geometrie- und Materialbeschreibung jeder einzelnen Schicht des komplexen Lagenaufbaus, mit dem Ziel einer präzisen Ermittlung aller auftretenden Spannungskomponenten, sowohl innerhalb als auch zwischen den Lagen. Dies ermöglichte die Berechnung der verhältnismäßig kritischen intralaminaren Schubspannungen, die eine Ablösung der Schichten verursachen könnten.

Der Lagenaufbau basiert auf den durch die üblichen Lastfälle auftretenden Spannungen. So bestehen die Bindeglieder ausschließlich aus unidirektionalen und die Querträger aus gekreuzten Lagen. Die Längsträger hingegen weisen einen kombinierten Lagenaufbau aus unidirektionalen und aus den Querträger kommenden gekreuzten Lagen auf. Durch die unterschiedliche Länge der einzelnen Lagen wird eine spannungsoptimierte Verjüngung erzielt.

Beide obere Rahmenelemente sowie beide Bindeglieder haben gemeinsame Schnittstellen in den Klemmverbindungen der Achslagergehäuse. Die relative Verschiebung zwischen den Längsträgern ist an diesen Stellen unterbunden. Entsprechende kinematische Bedingungen verknüpfen den Achslagermittelpunkt mit Drehgestellrahmen und sorgen

dafür, dass Verschiebungen und Verdrehungen des Achslagers gleichermaßen auf den Rahmen übertragen werden. Die Freiheitsgrade der Achsmittelpunkte wurden so beschränkt, dass eine statische Bestimmtheit vorliegt und eine Quer- und Längsverformung des Rahmens zugelassen wird. Die durch die Lastaufbringung entstehende Interaktion zwischen beiden Längsträgern wurde durch eine entsprechende Kontaktbeschreibung berücksichtigt.

Um die Eignung des ausgewählten Werkstoffes und der geometrischen Anordnung in der vorgesehenen Anwendung sicherzustellen, wurde zunächst der in der DIN EN 13749 beschriebene vertikale Lastfall mit auf beiden Gleitstücken gleichmäßig verteilter Betriebskraft untersucht.

4.2 Mehrkörpersystem

Ein klassisches Mehrkörpermodell beinhaltet die Masseigenschaften sämtlicher Körper und zwischen ihnen liegenden Bindungen und Krafterelemente. Bedingt durch die Federfunktion des Rahmens ist es notwendig, dass diese Bauteilflexibilität im Mehrkörpermodell erhalten bleibt. Technisch ist die durch eine Reduktion des Finite-Elemente-Modells nach Craig-Bampton möglich. Dabei wird die zunächst sehr hohe Anzahl an Freiheitsgraden auf die wesentlichen reduziert, wobei die dynamischen Eigenschaften durch modale Eigenformen weitgehend erhalten bleiben.

Dem Mehrkörpermodell wurden außerdem dynamische Merkmale in den Klemmverbindungen sowie die Dämpfungseigenschaften des Rahmens und der Gummielemente hinzugefügt. Auch die translatorische Reibung in den Gleitstücken wurde durch geeignete Krafterelemente berücksichtigt [10].

Mit dem Ziel einer grundsätzlichen Bewertung wurden das Verhalten in einer Gleisverwindung und die kritische Geschwindigkeit ermittelt.

5 Ergebnisse

Die zuvor beschriebenen Modelle wurden mit den kommerziellen Softwareprodukten Abaqus beziehungsweise Simpack simuliert und sind nachstehend visuell aufbereitet dargestellt.

5.1 Strukturintegrität

Die Auswertung der Finite-Elemente-Berechnung nach der Theorie der maximalen Spannung lässt die Identifizierung von zwei hochbeanspruchten Stellen zu.

Die erste Stelle befindet sich jeweils am Ende der unteren Längsträgerverjüngung und ist in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt. Die vertikale Last des Wagenkastens verursacht eine über die Trägerlänge konstante Querkraft, die sich durch die Verjüngung in höheren Spannungen widerspiegelt.

Die ausschließlich in Abb. 4 hervorgehobenen Stellen betreffen die Ausschnitte im oberen Querträger. Ursächlich für die hohen Schubspannungen sind die Unterbrechung des oberen Längsträgers und die im Querträger entstehende Verwölbung.

In beiden Fällen liegen die Spannungswerte jedoch unterhalb der in der Fachliteratur aufgeführten Festigkeitsgrenzwerte [11, 12].

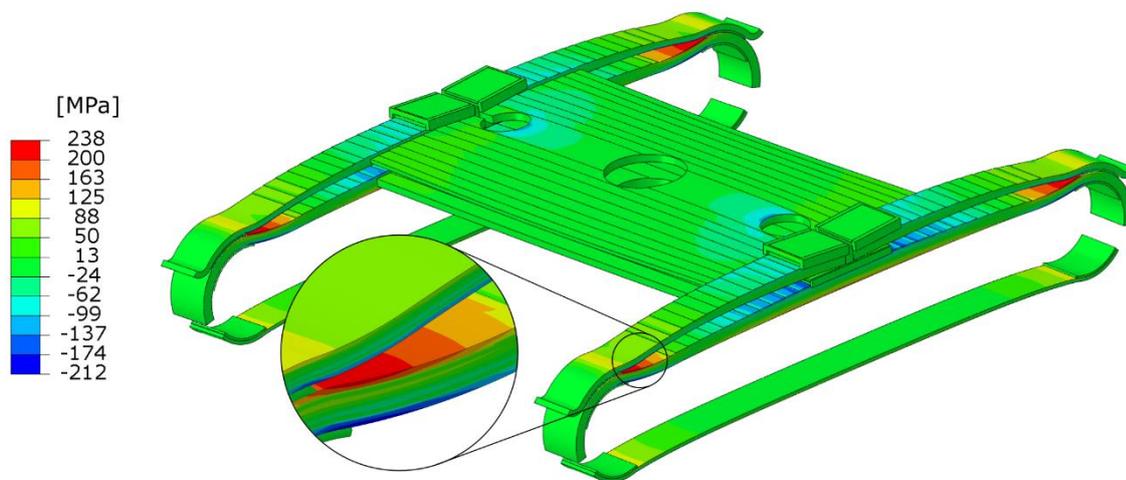


Abbildung 3: Zug- und Druckspannungen in Faserrichtung unter vertikaler Betriebslast.

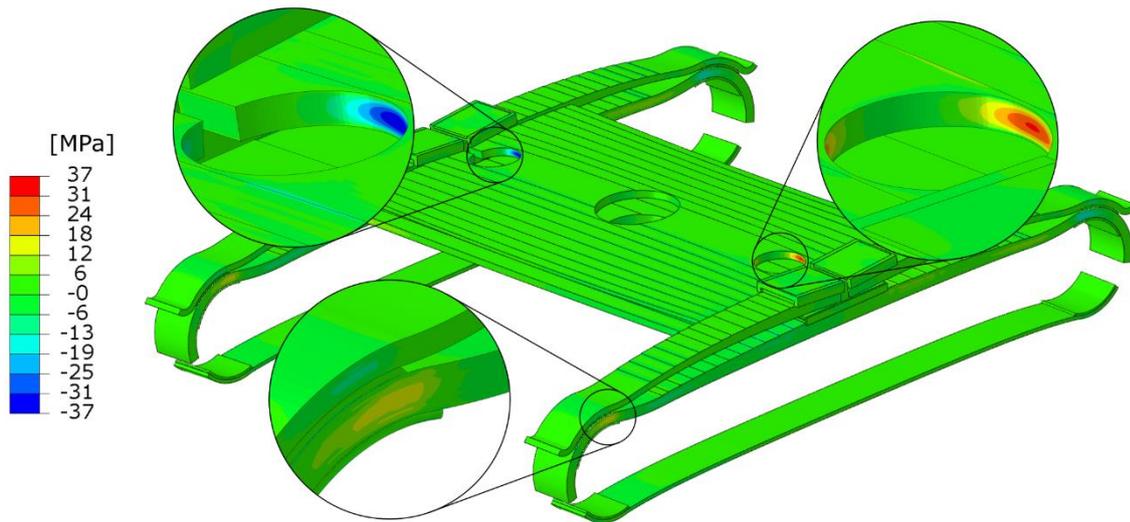


Abbildung 4: Intralaminare Schubspannung unter vertikaler Betriebslast.

5.2 Lauftechnik

Ein wesentliches Merkmal des Drehgestellkonzepts ist die in den Rahmen integrierte Federung. Um nun die Entgleisungssicherheit zu bewerten, ist in Abb. 5 die Verlagerung der Radaufstandskräfte dargestellt. Bei einer Gleisverwindung mit einem Gradienten von 3,1 ‰ beträgt die Laständerung 12 %. Die Querträger sind somit weich genug ausgeführt.

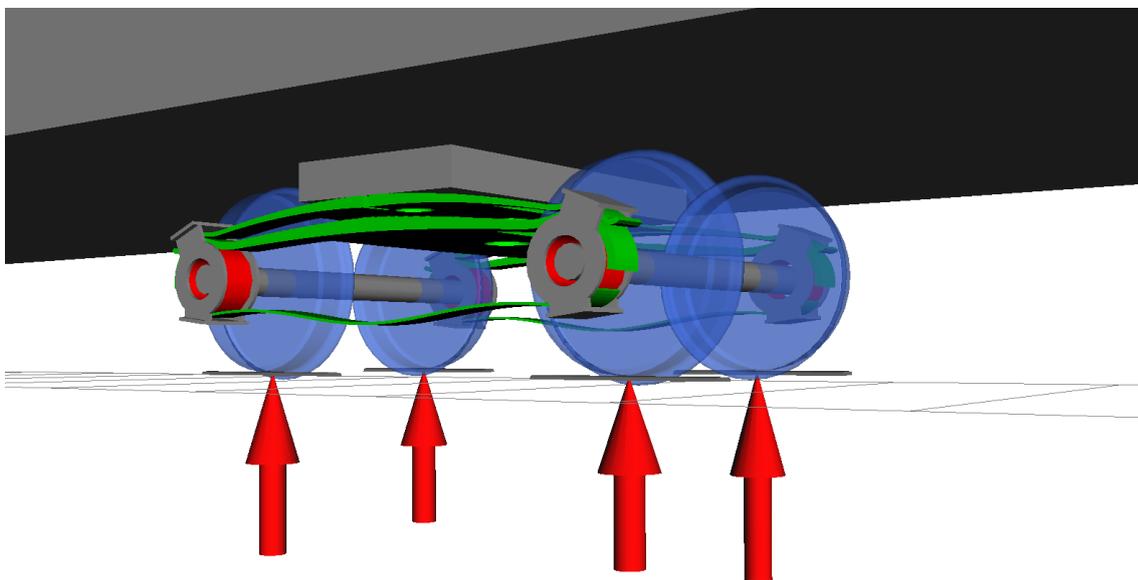


Abbildung 5: Aufstandskräfte in einer Gleisverwindung

Bei der Ermittlung der kritischen Geschwindigkeit wurde der relevante Geschwindigkeitsbereich sowohl aufsteigend als auch absteigend durchlaufen. Dabei ist das in der Fachliteratur beschriebene [13, 14], und in Abb. 6 dargestellte, hochgradig nichtlineare Verhalten aufgetreten: Während beim kontinuierlichen Erhöhen der Geschwindigkeit das Fahrzeug bis 17,5 m/s stabil bleibt, behält es beim Verringern der Geschwindigkeit einen nahezu ungedämpften Wellenlauf oberhalb von 11 m/s bei. Die Radsatzbewegung wird dabei nur durch den Spurkranz beschränkt.

Der stabile Bereich deckt jedoch die Betriebsgeschwindigkeit bei der Welsh Highland Railway ab.

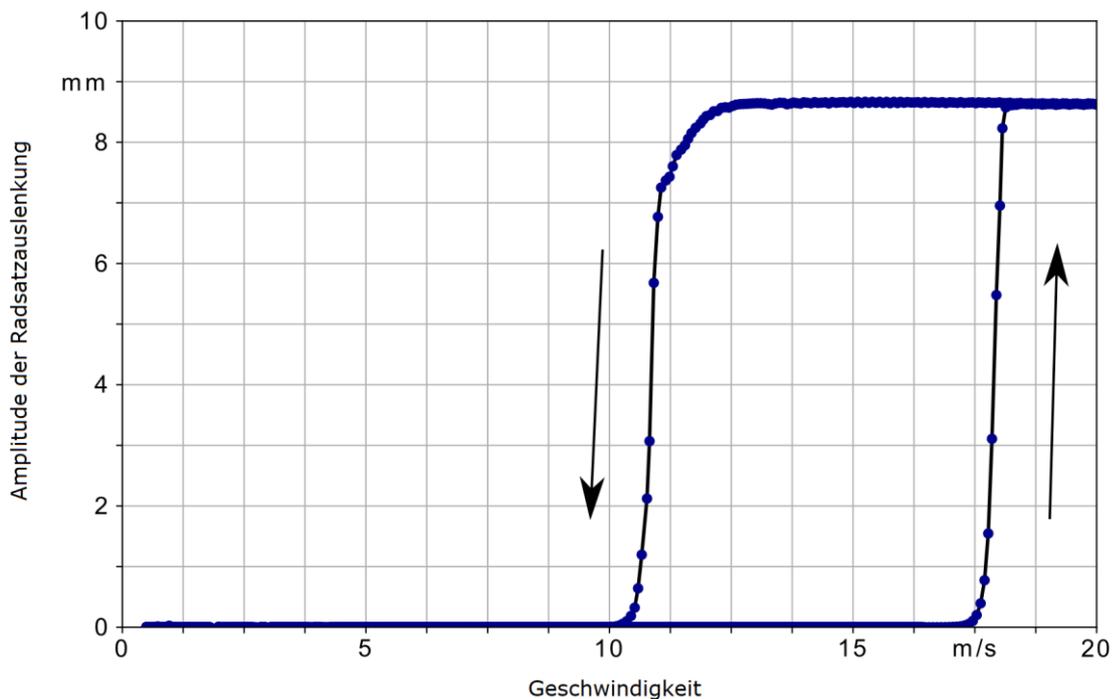


Abbildung 6: Amplitude der Radsatzauslenkung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die numerischen Untersuchungen zeigten, dass das Drehgestell im Hinblick auf den Einsatz bei der walisischen Schmalspurbahn geeignet ist, auftretende Betriebskräfte zu ertragen. Ebenso konnte ein stabiles Fahrverhalten für den vorgesehenen Geschwindigkeitsbereich erreicht werden.

Bislang durchgeführte Analysen verdeutlichen das Potential der vorgestellten Konstruktion. Anstehende Prüfstandsversuche und Testfahrten an von Novacom Verstärkte Kunststoffe GmbH gefertigten Prototypen sollen die Berechnungen validieren.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung und beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Projektträgerschaft.

Literatur

- [1] Horst, Peter; Wolf, Klaus: *Luftfahrzeugstrukturen*. In: Rossow, Cord-Christian, Wolf, Klaus und Horst, Peter (Hrsg.): *Handbuch der Luftfahrzeugtechnik*, Carl Hanser Verlag, 2016, S. 311–443
- [2] Geuenich, Werner; Günther, Christian; Leo, Rolf: *Neue Technologien für Drehgestelle*. ZEV-Glas. Ann. 109(2/3), 1985, S. 69–77
- [3] Leo, Rolf; Günther, Christian; Lang, Hans-Peter: *Neue Technologien für Drehgestelle: Prototyp des ersten Faserverbundwerkstoff (FVW)-Drehgestells*. ZEV-Glas. Ann. 110(6/7), 1986, S. 193–202
- [4] AEG Schienenfahrzeuge: *HLD-300 – Drehgestell mit Faserverbundrahmen*. In: Hochbruck, Hubert, Knothe, Klaus, Meinke, Peter (Hrsg.): *Systemdynamik der Eisenbahn*, Henningsdorf, 1994, S. 317–319
- [5] Kawasaki Heavy Industries, Ltd., *efWING - Weaving a New Future*. <http://global.kawasaki.com/en/mobility/rail/bogie/efwing.html>, aufgerufen am 15.03.2019
- [6] Mayer, Rayner: *Reduzierung der Gleisinstandhaltung durch eine neue Konstruktion eines umweltfreundlichen Drehgestells*. ZEVrail 140(5), 2016, S. 188–193
- [7] Hou, Jinping; Jeronimidis, George: *A Novel Bogie Design Made of Glass Fibre Reinforced Plastic*. *Materials & Design* 37, Elsevier, 2012, S. 1–7
- [8] DIN EN 13749: *Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Festlegungsverfahren für Festigkeitsanforderungen an Drehgestellrahmen*. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [9] DIN EN 14363: *Bahnanwendungen - Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen - Fahrverhalten und stationäre Versuche*. Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [10] Schönhuber, Paul; Walawalkar, Ashwin; Lekue, Jagoba; Schindler, Christian: *An Approach for More Efficient Simulation of Stick Slip Effects*. In: *Proceedings of the NAFEMS World Congress 2019*, Aufsatznummer 407.

- [11] Berthelot, Jean-Marie: *Composite Materials - Mechanical Behavior and Structural Analysis*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1999.
- [12] Barbero, Ever J.: *Introduction to Composite Materials Design*. 3. Auflage. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [13] Schindler, Christian (Hrsg.): *Handbuch Schienenfahrzeuge - Entwicklung, Produktion, Instandhaltung*. 1. Auflage. Hamburg: Eurail Press, 2014.
- [14] Iwnicki, Simon (Hrsg.): *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. 1. Auflage. Boca Raton: CRC Press, 2006.

Autoren



Schönhuber, Paul

Masterstudium Fahrzeugtechnik und Transport, Vertiefung Schienenfahrzeuge, an der RWTH Aachen. 2016 Lehrtätigkeit an der GUTech (Muskat, Oman). Seit 2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (IFS) der RWTH Aachen.



Lekue, Jagoba

Studium der Ingenieurwissenschaften an der Universität des Baskenlandes in Bilbao. 2014 bis 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Kaiserslautern. Seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (IFS) der RWTH Aachen.



Bruns, Albert

Dipl.-Ing. Albert Bruns studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen (mit der Vertiefungsrichtung Kunststofftechnik). 1991 gründete er in Aachen sein eigenes Unternehmen im Bereich der Entwicklung und Fertigung von langfaserverstärkten Kunststoffbauteilen. Glasfaserverstärkte Strukturkomponenten stellen einen besonderen Schwerpunkt seiner Tätigkeit dar.



Schindler, Christian

studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen und promovierte zum Thema Schienenfahrzeugdynamik. Nach zwölf Jahren in der Industrie wurde er 2004 zum Professor für Konstruktion an die TU Kaiserslautern berufen. Seit 2016 leitet er das Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme an der RWTH Aachen.