ZEV rail
Zeitschrift für das gesamte System Bahn

A 20420 E

SONDERDRUCK Juni-Juli 2019 6-7

Entwicklung und technologische Umsetzung der weltweit ersten CFK-Hochgeschwindigkeits-Metro in innovativer Leichtbauweise

Konzeption, Konstruktion und Realisierung werkstoffgerechter Anlagentechnik mit hohem Automatisierungspotential

CG Rail

World Trade Center Dresden
Freiberger Straße 33, 01067 Dresden
E-Mail: info@cgrail.de
Internet: www.cgrail.de

143. Jahrgang Organ der DMG www.zevrail.de

Entwicklung und technologische Umsetzung eines Schienenfahrzeugs in neuartiger Faserverbund-Leichtbauweise

Development and technological realization of an innovative lightweight rail vehicle in composite design

Prof. Dr.-Ing. Andreas Ulbricht, Dresden (Deutschland)

Zusammenfassung

Ständig steigende Anforderungen an Schienenfahrzeuge wie etwa Mehrsystemfähigkeit, Crashverhalten und Passagierkomfort führen zu immer größeren Strukturmassen. Deshalb gewinnt der Systemleichtbau auch in der Schienenfahrzeugindustrie zunehmend an Bedeutung. Allerdings sind die oft noch manuellen Fertigungstechnologien bislang mit hohen Prozesskosten und unzureichender Reproduzierbarkeit verbunden. Die CG Rail GmbH und ihre Partner in Dresden haben im Auftrag des chinesischen Schienenfahrzeugherstellers CRRC weltweit erstmals eine komplette U-Bahn in carbonintensiver Leichtbauweise als Prototyp umgesetzt, wobei insbesondere hoch automatisierte Fertigungstechnologien eine wichtige Zielsetzung darstellten. Ein neuartiger Flechtprozess für CFK-Komponenten des Drehgestellrahmens sowie ein innovatives Pultrusionsverfahren zur kontinuierlichen Fertigung von multiaxial verstärkten CFK-Mehrkammerprofilen für den Leichtbau-Wagenkasten bilden eindrucksvolle Beispiele für den technologischen Fortschritt.

Abstract

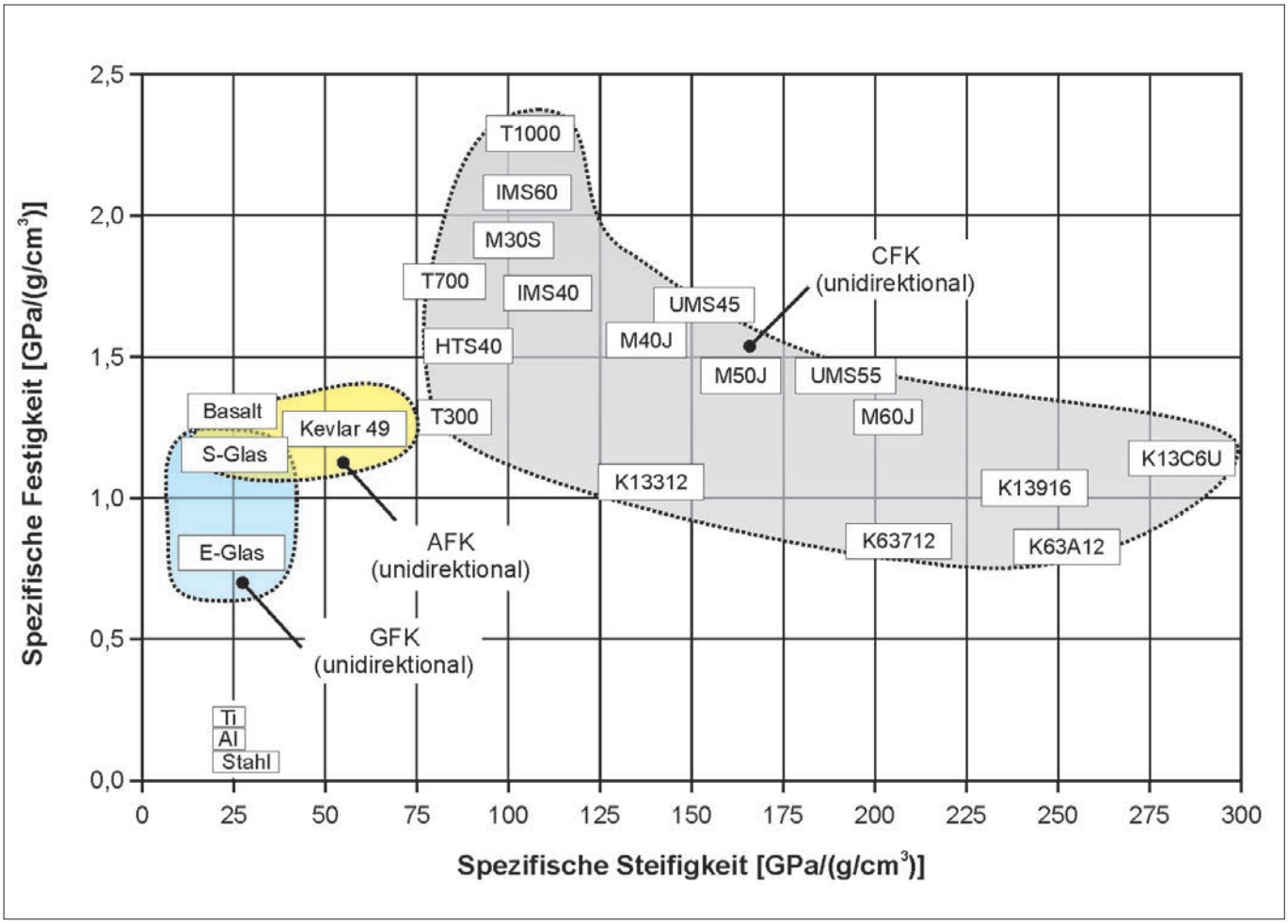
The increasing complex demands on rail vehicles regarding multi-system capability, crash behavior and passenger comfort result in ever greater structural masses. Thus, lightweight design with high-tech materials like carbon fibre reinforced plastic (CFRP) is becoming increasingly important in the rail-vehicle industry. But high costs and low repeatability resulting from commonly used manual manufacturing processes usually form an obstacle for a wider application of CFRP. CG Rail GmbH and its Dresden based partners developed the world's first complete metro train in carbon-intensive lightweight design and built it as a prototype using manufacturing processes with a very high degree of automation in a pilot project on behalf of Chinese rail-vehicle manufacturer CRRC. This work presents impressive examples for the technological progress like the novel braiding process for CFRP components of the bogie frame and the innovative pultrusion technology for complex CFRP beams of the railcar body.

1 Leichtbau im Schienenfahrzeugbereich

Die steigenden und immer komplexeren Anforderungen an Schienenfahrzeuge wie etwa Mehrsystemfähigkeit, Crashverhalten und Passagierkomfort führen zu immer größeren Strukturmassen [1]. Jedoch ist die Gesamtmasse der Fahrzeuge durch die maximal zulässigen Radsatzlasten der Infrastruktur limitiert, sodass eine höhere Strukturmasse in der Regel zu geringeren Nutzlasten führt. Darüber hinaus führt ein Anstieg der Strukturmasse üblicherweise auch zu einem höheren Energieverbrauch und Verschleiß am Oberbau. Deshalb gewinnt der Systemleichtbau in der Schienenfahrzeugindustrie zunehmend an Bedeutung [2 bis 3].

Die Entwicklung und technologische Umsetzung von zukunftsweisenden Systemleichtbaulösungen für Schienenfahrzeuge eröffnet in Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzprofil (Nah-, Regional-, Intercity- und Hochgeschwindigkeitsverkehr) enorme Vorteile in technischer wie auch ökonomischer Hinsicht [4 bis 7]. So können wichtige technische Eigenschaften wie der Energieverbrauch und die Nutzlast aber auch die Fahrdynamik deutlich verbessert werden. Ferner ergeben sich durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für Strukturbauteile auch neue Möglichkeiten zur Sensorintegration für die Strukturüberwachung im Betrieb. Aus ökonomischer Perspektive können durch intelligente Leichtbauweisen insbesondere die Montagekosten sowie die Betriebs- und Wartungskosten erheblich reduziert werden.

Die Entwicklung hochwertiger Leichtbaulösungen für den Schienenfahrzeugbau erfordert die symbiotische Anwendung verschiedener Leichtbaustrategien, vor allem des Form-, Stoff- und Bedingungsleichtbaus. Im Bereich des Stoffleichtbaus spielt der Einsatz von endlosfaserverstärkten Kunstoffen für Strukturbauteile in der Schienenfahrzeugtechnik – im Unterschied zu anderen innovativen Branchen wie der Flugzeug- und



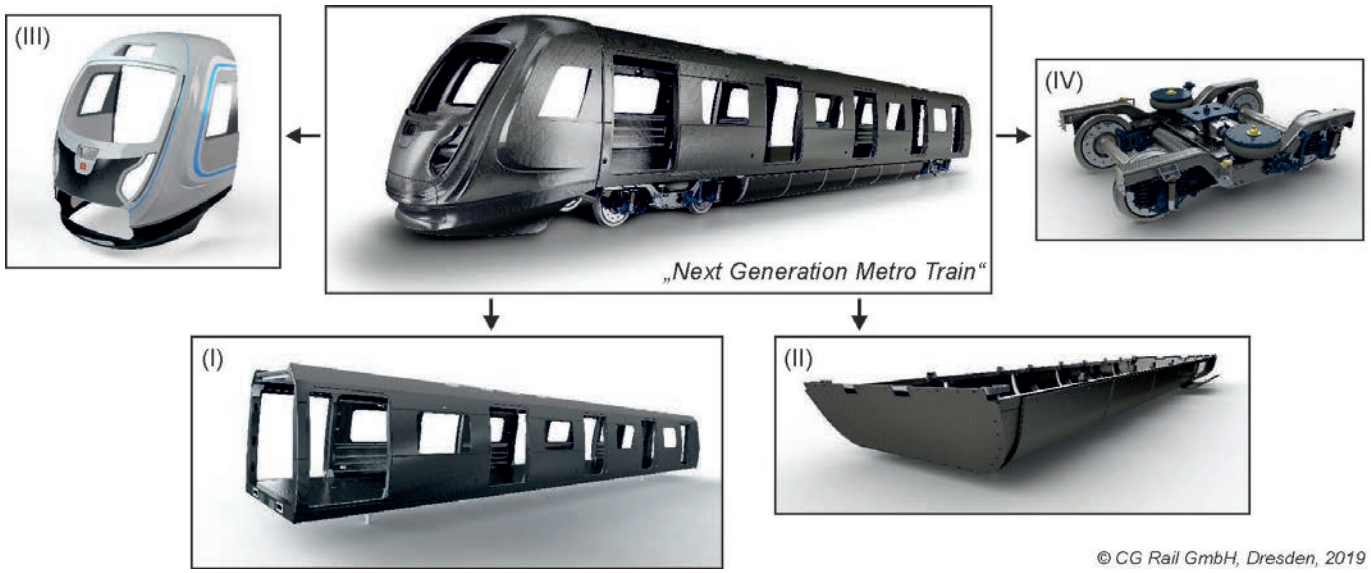
I **Bild 1: Leichtbaupotenzial Werkstoffe**

Automobilindustrie – bisher noch eine untergeordnete Rolle. Gerade für den modernen, innovativen Schienenfahrzeugbau eröffnen kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) mit ihren außergewöhnlich hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten im Vergleich zu klassischen metallischen Konstruktionswerkstoffen (Stahl, Aluminium) neue, noch nicht ausgeschöpfte Leichtbaupotentiale. In *Bild 1* sind die auf die Dichte bezogenen Leichtbaukennzahlen für verschiedene Werkstoffe dargestellt. Bei unidirektional verstärkten Kunststoffen sind die mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig (siehe etwa [6 bis 8]). Diese Anisotropie ist insbesondere auch bei der faserverbundgerechten Gestaltung von Leichtbaukomponenten zu berücksichtigen und zu nutzen (siehe etwa [11 bis 12]).

Die Anwendung von faserverstärkten Kunstoffen beschränkt sich im Schienenfahrzeugbau bisher zumeist auf Bauteile für den Innen- und Außenbereich, die aufgrund ihrer komplexen Gestalt bei gleichzeitig geringen mechanischen Anforderungen gewöhnlich aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) hergestellt werden. Die breite Verwendung von CFK für hochbeanspruchte Tragstrukturen hat sich im Schienenfahrzeugbau bisher allerdings noch nicht durchgesetzt, obwohl ausführliche Studien und Grundlagenprojekte zu CFK-Leichtbauweisen die technische Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit über die gesamte Lebensdauer prinzipiell bereits nachgewiesen haben (siehe etwa [13 bis 16]).

Wesentliche Hindernisse für den breiteren Einsatz von CFK für strukturelle Anwendungen im Schienenfahrzeugbau stellen unter anderem noch die Herstellungskosten und die Reproduzierbarkeit dar. Deshalb bildete die Nutzung hoch automatisierter Fertigungsverfahren mit hoher Effizienz und Qualität neben der Masseeinsparung eine weitere wichtige Zielstellung bei der Entwicklung einer neuartigen U-Bahn in CFK-Leichtbauweise im Rahmen des Projektes „Next Generation Metro Train“ (NGMT). Bei der Gestaltung der Tragstrukturen in CFK-Leichtbauweise mussten die beabsichtigten Fertigungsverfahren bereits frühzeitig in der Konzeptphase berücksichtigt werden, da insbesondere bei Faserverbundwerkstoffen mit der Auswahl der Fertigungstechnologie auch spezifische Restriktionen etwa hinsichtlich realisierbarer Gestalt oder Faserorientierung einhergehen [17].

Im NGMT-Projekt wurden durch die CG Rail GmbH aus Dresden gemeinsam mit deutschen und europäischen Partnern aus Wissenschaft und Industrie neuartige CFK-Leichtbauweisen für die insgesamt vier wesentlichen Subsysteme einer U-Bahn erfolgreich entwickelt und technologisch als Prototypen umgesetzt *(Bild 2)*: Wagenkasten (I), Unterflurverkleidung (II), Frontkabine (III) und Drehgestellrahmen (IV). Wichtige Parameter für die Gestaltung und Auslegung wie etwa die Zugkonfiguration, das Design der Außenhaut, die Bauräume und Schnittstellen sowie die Lastfälle und Normen waren durch eine kundenseiti-



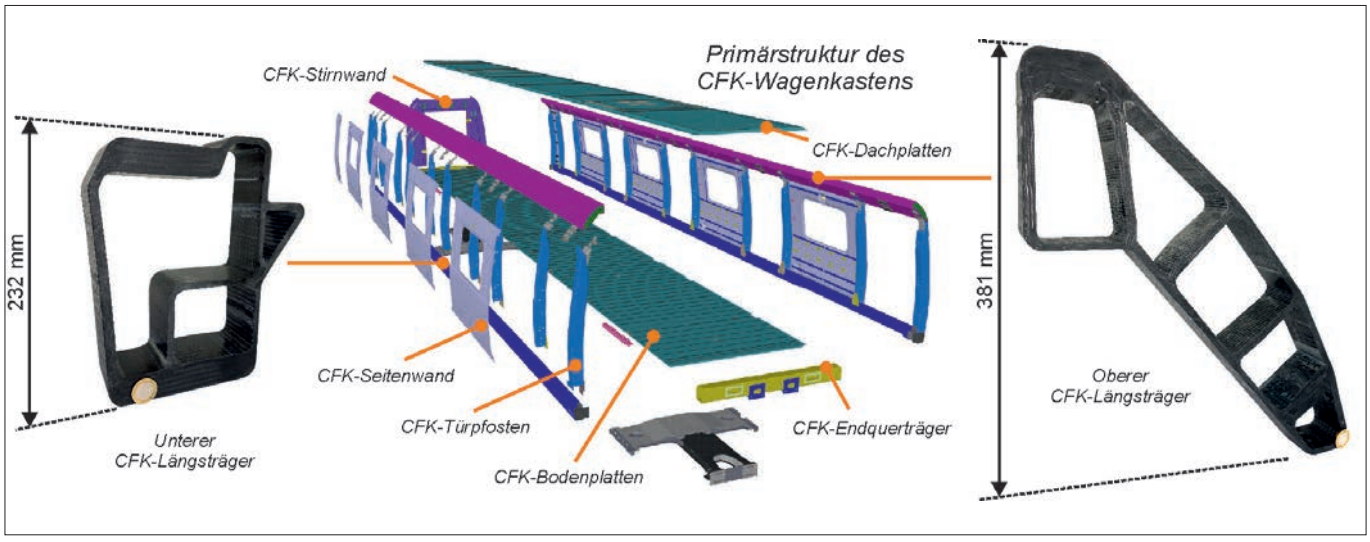
I Bild 2: NGMT Teilprojekte

ge Spezifikation vorgegeben, welche die Grundlage für die Entwicklung bildete. Der Freiraum zur Gestaltung der Parameter mit Einfluss auf den Leichtbaugrad beschränkte sich durch diese Vorgaben in der Spezifikation auf die faserverbundgerechte Gestaltung der Haupttragstrukturen.

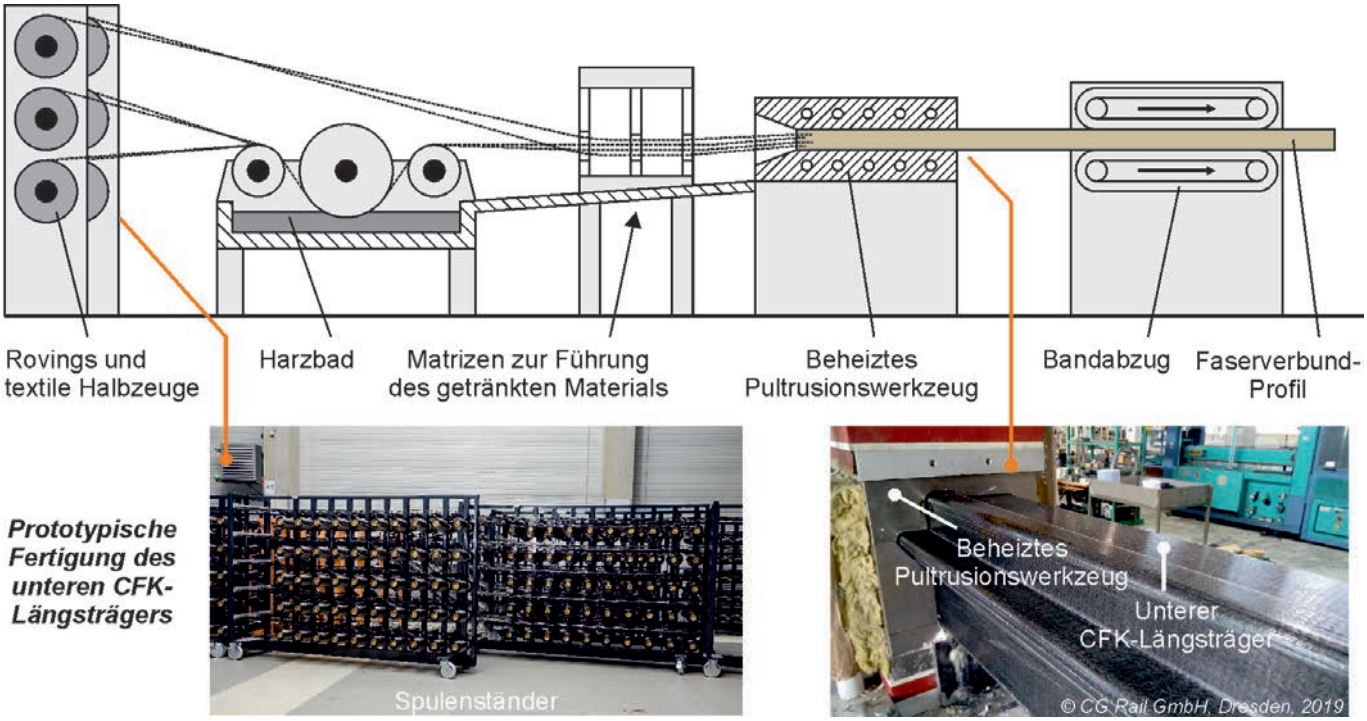
Insbesondere für die beiden besonders sicherheitskritischen Subsysteme „Wagenkasten“ und „Drehgestellrahmen“ wurden für die Herstellung und Montage der höchstbeanspruchten CFK-Einzelkomponenten maßgeblich hoch automatisierte Fertigungsprozesse berücksichtigt und teils auch neu entwickelt, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

2 Wagenkasten in CFK-Leichtbauweise

Der Wagenkasten in CFK-intensiver Leichtbauweise wurde nach ausführlicher Diskussion und Bewertung aller relevanten Kriterien in einer mehrteiligen Differentialbauweise realisiert [18]. Die zur Übertragung der Hauptlasten dienende Primärstruktur des Wagenkastens weist dabei ein Rahmentragwerk aus CFK-Profilen auf, das durch flächige CFK-Sandwichelemente mit Schubfeldfunktion ausgesteift wird *(Bild 3)*. Die Außenhaut im Dach- und Seitenwandbereich bildet die Sekundärstruktur des Wagenkastens und besteht maßgeblich aus dünnwandigen CFK-Paneelen, die mithilfe verzugsarmer Fügeverfahren und eigens entwickelter Hilfsvorrichtungen mit der Primärstruktur des Wagenkasten verbunden werden. Dadurch reduzieren sich die gewöhnlich hohen Aufwände für die vorbereitenden Arbeiten des anschließenden Lackierprozesses wie etwa für Spachteln und Schleifen signifikant. Die Tertiärstruktur des Wagenkastens besteht maßgeblich aus Funktionselementen wie etwa dem metallischen Erdungskäfig sowie einer Vielzahl kleinerer Verbindungselemente, welche die Schnittstellen zwischen der lasttragenden Primärstruktur in CFK-Leichtbauweise und der Innenraumausstattung wie etwa Sitzen und Handläufen bilden.



I Bild 3: Wagenkasten Aufbau



I **Bild 4: Pultrusion**

Der massebezogene Gesamtanteil von CFK-Werkstoffen an der Primär-, Sekundär- und Tertiärstruktur beträgt circa 70 %.

2.1 Neuartiges Pultrusionsverfahren

Das Rahmentragwerk der CFK-Primärstruktur des Wagenkastens ist insbesondere durch die speziellen CFK-Mehrkammerprofile in den Ecken des Boden- und Dachbereichs gekennzeichnet, die wesentlich zur Übertragung der hohen Lasten in Längsrichtung wie auch zur Aufnahme der hohen Biegelasten dienen *(Bild 3)*. Diese geraden CFK-Profile mit konstantem Querschnitt sind für eine technologische Umsetzung mittels des effizienten Pultrusionsverfahrens geradezu prädestiniert, welches auch Potential für eine breitere Anwendung bei CFK-Strukturkomponenten im Schienenfahrzeugbau besitzt. [19]

Die Pultrusion stellt ein kontinuierliches Verfahren zur Fertigung von Endlos-Profilen aus GFK oder CFK dar. Dabei werden „trockene" Rovings („Faserbündel") direkt von der Spule zuerst durch ein Harzbad zur Tränkung und anschließend durch ein formgebendes beheiztes Metall-Werkzeug zur Aushärtung geführt *(Bild 4)*. Bislang werden mit diesem Verfahren typischerweise einfache kleinere Hohl- oder Vollprofile mit ausschließlich unidirektionaler Verstärkung in Längsrichtung gefertigt. Allerdings erfordern bei den CFK-Längsträgern die auftretenden mehrdimensionalen Beanspruchungszustände sowie die vielfältigen Fügebereiche mit anderen Komponenten die Anordnung der Fasern in verschiedene Richtungen. Darüber hinaus führen die engen Bauraumanforderungen sowie andere funktionelle Anforderungen im NGMT-Projekt zu komplexen Querschnittsgeometrien der Längsträger mit mehreren Kammern und variierenden Wandstärken von 7 mm bis hin zu 25 mm. Deshalb hat die CG Rail GmbH zusammen mit Partnern das Pultrusionsverfahren weltweit erstmals so weiterentwickelt, dass sich mithilfe von speziellen Zuführeinrichtungen und Kernsystemen auch äußerst komplexe Mehrkammerprofile mit textiler Verstärkung in Form von Multiaxialgelegen realisieren lassen. Die Umsetzbarkeit dieses Verfahrens wurde in einem ersten Schritt erfolgreich durch die Prototypenfertigung der oberen und unteren CFK-Längsträger des Leichtbau-Wagenkastens mit einer Länge von mehr als 20 Metern nachgewiesen *(Bild 4)*.

2.2 Effiziente Montageprozesse

Eine weitere wichtige Herausforderung bei der Entwicklung des Leichtbau-Wagenkastens bestand in der Realisierung eines effizienten und präzisen Montageprozesses, der wie auch die Fertigungstechnologien bereits während der Konzeption des Wagenkastens berücksichtigt werden musste. Bei der Montage der CFK-Komponenten der Primärstruktur werden kombinierte Niet-/Klebverbindungen zum Fügen verwendet, wobei die Klebverbindungen maßgeblich aus rein funktionellen Gründen zur Abdichtung gegenüber Medien vorgesehen sind.

Die entwickelte Differentialbauweise des Wagenkastens erlaubt im ersten Schritt eine effiziente und ergonomische Vormontage der beiden Seitenwände (CFK-Längsträger, CFK-Türpfosten und CFK-Seitenwandmodule) in einer horizontalen Position, wobei eigens durch die CG Rail GmbH entwickelte Montagevorrichtungen zum Einsatz kommen *(Bild 5 A)*. Diese Montagevorrichtungen ermöglichen das Fügen der Einzelkomponenten in einem vorgekrümmten Zustand der Seitenwand, um unter späterer Belastung durch Eigengewicht ein optisch gerades Erscheinungsbild des Wagenkastens zu erzielen. In einem zweiten Montageschritt werden die Seitenwände aufgerichtet und in einer Endmontagevorrichtung fixiert, in der die restlichen Komponenten der Primärstruktur wie etwa CFK-Boden- und Dachplatten montiert werden *(Bild 5 B)*. Alle Arbeitsschritte für die Vormontage der Seitenwände und die Endmontage der Primärstruktur können für eine späte-

I **Bild 5: Wagenkasten Endmontage**

re Serienfertigung entsprechend der Leitlinie von Industrie 4.0 potentiell automatisiert und digitalisiert werden.

Die Machbarkeit und Effizienz der entwickelten Fertigungstechnologien und Montageprozesse wie auch die vorausberechnete Masseeinsparung des Wagenkastens in CFK-Differentialbauweise von 30 % im Vergleich zur klassischen Metallbauweise konnten erfolgreich an mehreren Prototypen nachgewiesen werden *(Bild 6)*. Die hergestellten Prototypen befinden sich bereits in China, um weitere Erkenntnisse aus praktischen Fahrversuchen auf der Teststrecke zu gewinnen.

I **Bild 6: Wagenkasten**

3 Drehgestellrahmen in CFK-Leichtbauweise

Der Drehgestellrahmen repräsentiert bei Schienenfahrzeugen eine äußerst sicherheitskritische Komponente im Fahrwerk und muss deshalb höchste Anforderungen in Bezug auf die Bauteilqualität erfüllen. Ferner sind bei der betrachteten U-Bahn wie bei den meisten Zugkonfigurationen jeweils zwei Drehgestellrahmen pro Wagenkasten verbaut, was in einer höheren Anzahl von produzierten Gleichteilen resultiert. Diese beiden Faktoren sprechen insbesondere bei der Fertigung des Leichtbau-Drehgestellrahmens für den Einsatz von automatisierten Herstellungsverfahren mit exzellenter Reproduzierbarkeit und hoher Effizienz. Diese Zielstellung wurde daher konsequent bereits während der Konzept- und Designphase verfolgt.

Die Forderung zur Beibehaltung der Schnittstellen und Bauräume des Referenz-Drehgestellrahmens aus Stahl konnte nur durch die Realisierung eines klassischen H-Rahmens erfüllt werden. Bereits in der Konzeptphase erfolgte eine ausführliche Bewertung der Ausführung dieses H-Rahmens in einer einteiligen CFK-Integralbauweise oder in einer mehrteiligen CFK-Differentialbauweise vor dem Hintergrund der beabsichtigen automatisierten Fertigung. Die komplexe Gestalt eines H-Rahmens macht die technologische Umsetzung einer CFK-Integralbauweise mittels automatisierter Herstellungstechnologien wie etwa durch automatisiertes Tapelegen (ATL) technisch und ökonomisch jedoch nahezu unmöglich. Aus diesem Grund wurde eine neuartige CFK-Differentialbauweise mit einer intelligenten Aufteilung in vier CFK-Einzelkomponenten entwickelt, deren einfachere Geometrie eine automatisierte Herstellung ermöglicht. Der weltweit einzigartige Drehgestellrahmen besteht dabei aus zwei geraden CFK-Querträgern und zwei doppelt gekröpften CFK-Längsträgern, die mittels eigens entwickelter, lösbarer Verbindungstechnologien miteinander gefügt sind *(Bild 7)*.

3.1 Auswahl und Entwicklung der Fertigungstechnologien

Die CFK-Einzelkomponenten des Drehgestellrahmens sind demzufolge dickwandige mehrschichtige CFK-Hohlprofile, deren Außenflächen für eine präzise Montage hochgenau definiert sein müssen. Darüber hinaus müssen die Fasern in den einzelnen Schichten verschiedene Orientierungen aufweisen, um die entsprechend den Simulationsergebnissen auftretenden Beanspruchungszustände zu ertragen. Zur Erzielung eines hohen Leichtbaugrades muss ferner ein möglichst hoher Faservolumengehalt erreicht werden.

Für die automatisierte Fertigung von CFK-Hohlprofilen mit einem derartigen Eigenschaftsprofil bietet sich in der Faserverbundtechnik ein zweistufiges Verfahren an. In einem ersten Schritt wird die trockene textile Verstärkungsstruktur aus Kohlenstofffasern (CF) – die sogenannte Preform – mittels eines CNC-gesteuerten Verfahrens hergestellt, wobei sich für Hohlprofile mit verschiedenen Faserorientierungen das Flechten oder Wickeln anbietet. Den zweiten Schritt bildet das sogenannte Resin-Transfer-Moulding (RTM), bei dem die Preform in ein allseitig geschlossenes RTM-Werkzeug mit integriertem Heizsystem eingelegt wird, um den duroplastischen Kunststoff zu infiltrieren und auszuhärten. Dadurch können hochpräzise Außenflächen realisiert werden. Ferner ermöglicht die zusätzliche Verpressung der Preform im RTM-Werkzeug die Erzielung eines sehr hohen Faservolumengehalts und damit sehr gute mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig geringer Masse.

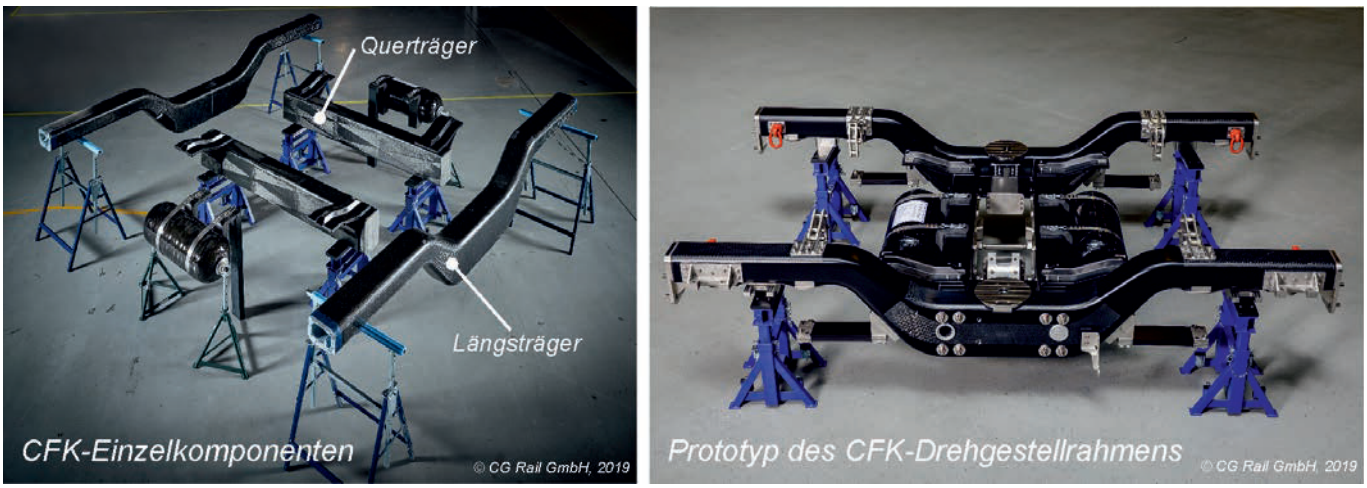
Für den ersten Prozessschritt – das sogenannte Preforming – wurden für den CFK-Längsträger mit seiner komplexeren Geometrie umfangreiche experimentelle Voruntersuchungen zum Flechten wie auch zum Wickeln durchgeführt, um das am besten geeignete Verfahren zu identifizieren. *(Bild 8 A* und *Bild 8 B)*. In diesen Vorversuchen hat sich gezeigt, dass die starke Kröpfung des Längsträgers die im Wickelverfahren realisierbaren Faserorientierungen zu sehr einschränken würde. Die Ursache dafür liegt im unerwünschten seitlichen Wegrutschen der Fasern auf dem Wickelkern bei komplexeren Geometrien, da die Fasern im Unterschied zum Flechten keine starke textile Bindung untereinander aufweisen [20 bis 22]. Deshalb wurde für die Fertigung der textilen Preforms der Längsträger das Flechtverfahren favorisiert. Die insgesamt zehn Längsträger wurden auf einer Hochgeschwindigkeits-Radialflechtanlage mit insgesamt 288 Klöppeln mit robotergeführtem Flechtkern an der TU Dresden hergestellt *(Bild 8 C* und *Bild 8 D)*.

Nach Fertigstellung im RTM-Verfahren wurden die Durchbiegung für einen Teil der gefertigten CFK-Längsträger im 3-Punkt-Biegeversuch unter einer Last von 100 kN ermittelt, um die Berechnungsmodelle zu verifizieren und die Reproduzierbarkeit der entwickelten Technologie nachzuweisen. Die in der Finite-Elemente (FE) Simulation ermittelte Durchbiegung von 3,54 mm weicht lediglich um etwa 9 % vom experimentell am Prototypen ermittelten Wert in Höhe von 3,25 mm ab *(Bild 9)*. Darüber hinaus zeigt ein Vergleich der experimentell ermittelten Durchbiegungen der prototypisch gefertigten Längsträger nur äußerst geringe Abweichungen von maximal 5 % vom Mittelwert. Diese Ergebnisse belegen einerseits die hohe Güte der erstellten Material- und Berechnungsmodelle und anderseits die exzellente Reproduzierbarkeit der entwickelten Fertigungstechnologie für den CFK-Längsträger.

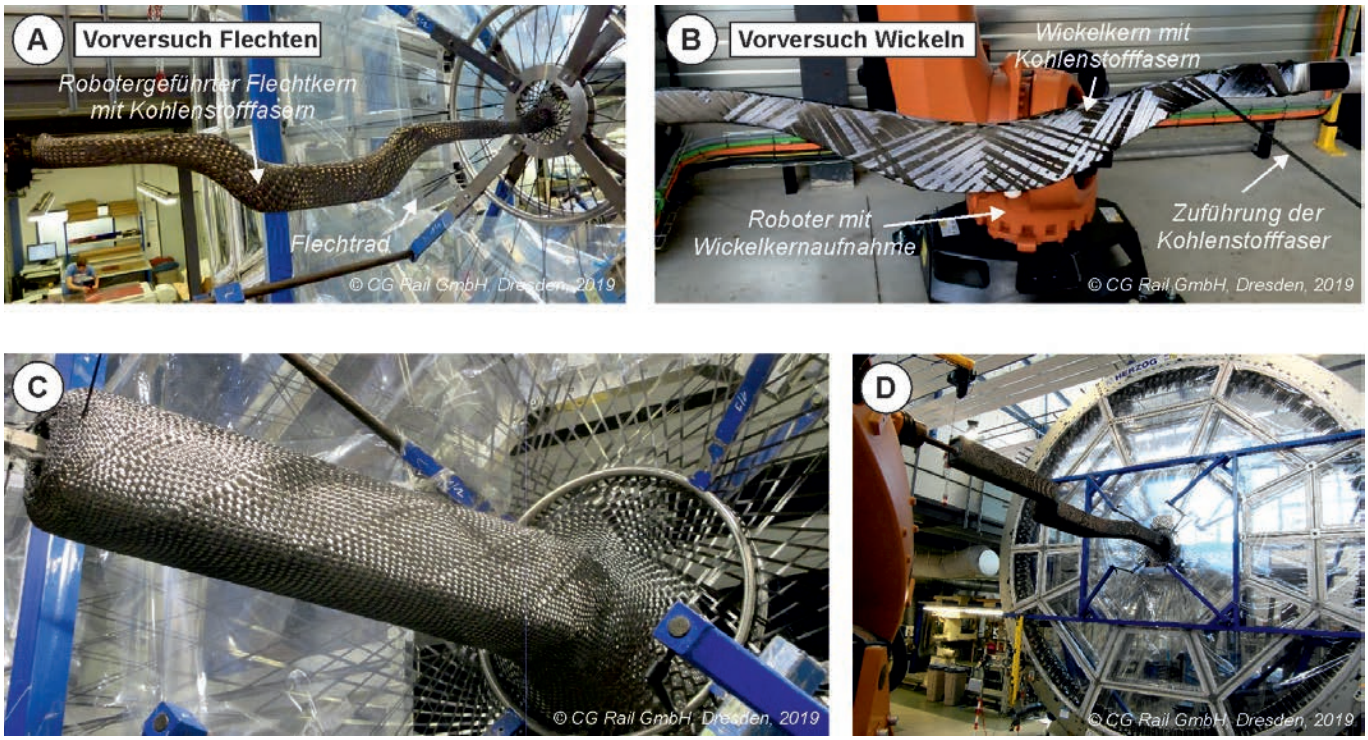
3.2 Experimentelle Erprobung des CFK-Drehgestellrahmens

Der Leichtbau-Drehgestellrahmen in neuartiger CFK-Differentialbauweise wurde in umfassenden Tests bei einem externen Partner in Dresden unter statischer wie auch zyklischer Belastung erfolgreich erprobt. Die zyklische Erprobung erfolgte auf Grundlage der DIN EN 13749:2011 und verlief über insgesamt 12 Millionen Lastwechsel, wobei eine Unterteilung in Intervalle von je 1 Million Lastwechsel mit jeweils nachfolgender Prüfung des Strukturzustandes vorgenommen wurde. Dabei wurde das Lastniveau nach dem erfolgreichen Abschluss von 6 Millionen Lastwechseln stufenweise von 100 % auf 160 % der Prüflast erhöht.

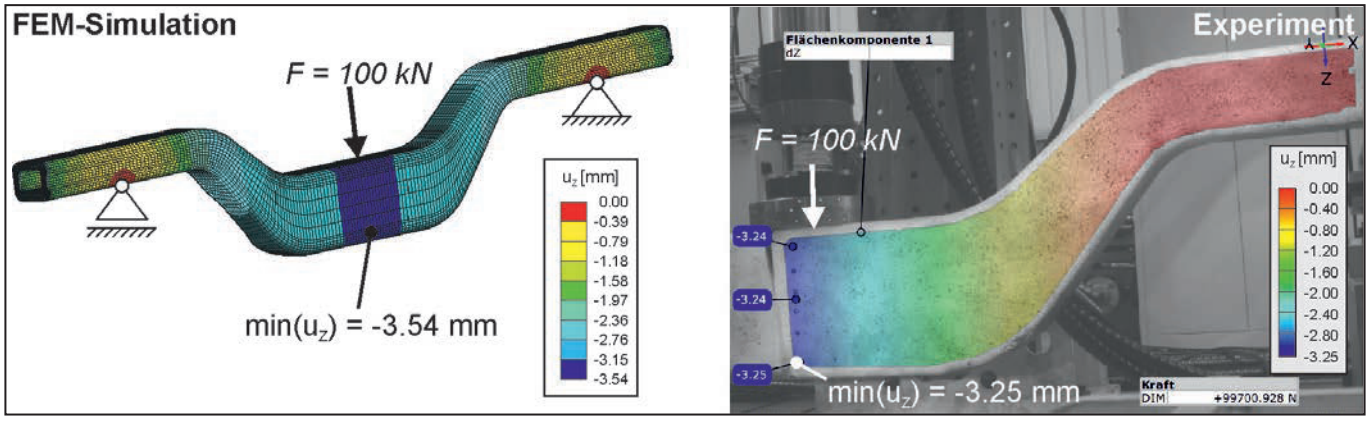
Während des zyklischen Tests wurden die Dehnungen an mehreren Positionen permanent mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) überwacht. *Bild 10* zeigt den Verlauf der gemessenen Dehnungen an einigen ausgewählten Positionen über den gesamten Zyklus von 12 Millionen Lastwechseln. Die schrittweise Erhöhung des Lastniveaus ab 6 Millionen Lastwechseln spiegelt sich auch in entsprechend proportional ansteigenden Dehnungen an den betroffenen Strukturbereichen wieder, wobei sich alle Dehnungen trotz des Anstiegs immer noch auf einem deutlich unterkritischen Niveau bewegen. Ein Effekt trat wiederholt auf, bei dem die Dehnungen trotz gleich hoher Belastung zum Start des neuen Intervalls im Vergleich zum vorherigen Intervall niedriger ausfielen. Dies ist auf unkritische Kriecheffekte nach einer länger andauernden Pause zwischen zwei Intervallen wie etwa nach 2 Millionen Lastwechseln zurückzuführen. Zusätzlich zu den DMS wurden Akustiksensoren auf dem CFK-Drehgestellrahmen installiert, die eine kontinuierliche Ortung und Identifikati-



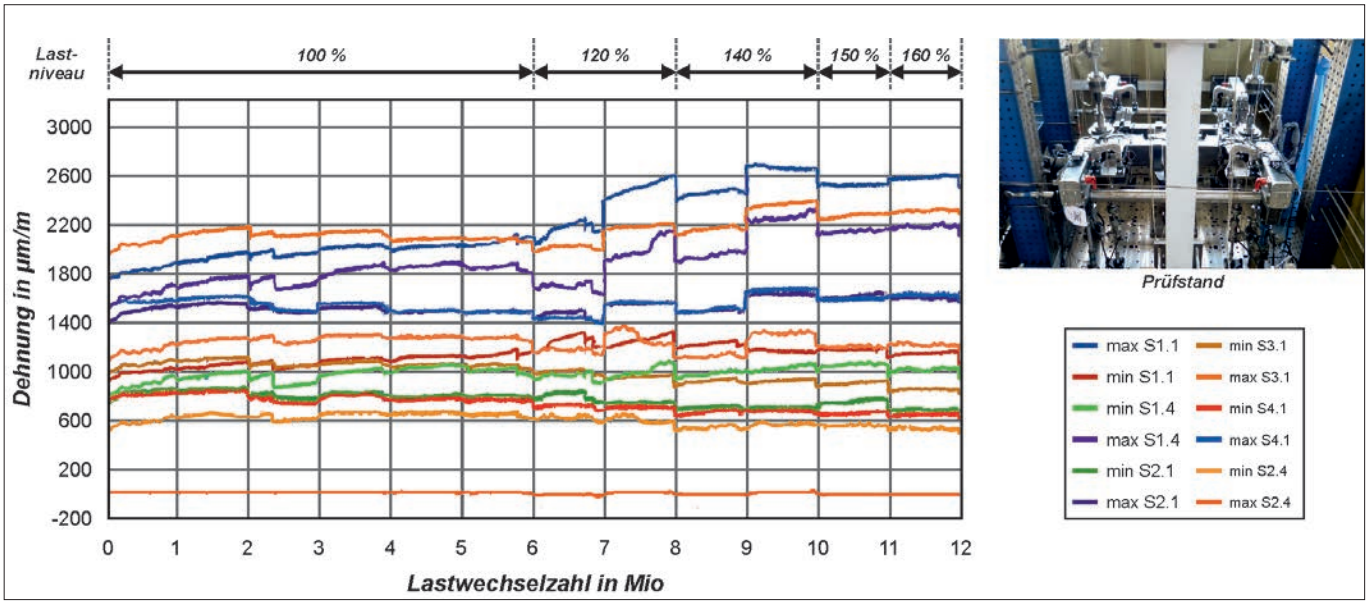
I **Bild 7: Drehgestellrahmen**



I Bild 8: Längsträgerfertigung



I Bild 9: Test Längsträger



I Bild 10: DMS zyklischer Test

on von potentiellen Schadensereignissen erlauben [23].

Nach Beendigung der zyklischen Erprobung über 12 Millionen Lastwechsel – davon 6 Millionen bei stark überhöhtem Lastniveau – konnte keine systemkritische Schädigung festgestellt werden. Die erzielten Ergebnisse bestätigen die außerordentlich robuste Bauweise des entwickelten CFK-Drehgestellrahmens und sein enormes Anwendungspotential. Die erzielte Masseeinsparung im Vergleich zu dem Referenzdrehgestellrahmen aus Stahl liegt beim ersten Prototypen bei fast 50 %, wobei aufgrund der hervorragenden Testergebnisse bereits jetzt noch weiteres Leichtbaupotential deutlich wird.

4 Zusammenfassung

Durch die CG Rail GmbH und ihre einschlägig ausgewiesenen Partner wurde im Rahmen des NGMT-Projektes erstmals ein ganzer Zug in neuartiger CFK-Leichtbauweise erfolgreich entwickelt und technologisch als Prototyp umgesetzt, wobei für die Subsysteme Masseeinsparungen von bis zu 50 % erzielt wurden. Zur technologischen Umsetzung ausgewählter CFK-Einzelkomponenten wurden speziell angepasste automatisierte Fertigungsverfahren zur Erzielung hoher Bauteilqualität und Kosteneffizienz erarbeitet, wie etwa das Flechtverfahren zur Herstellung der textilen Verstärkungsstruktur für die CFK-Längsträger des Leichtbau-Drehgestellrahmens. Darüber hinaus wurde eine Vielzahl von serienfähigen Füge- und Montagetechnologien mit zugehörigen Vorrichtungen für carbonintensive Großstrukturen von Schienenfahrzeugen entwickelt und erfolgreich realisiert. Die notwendigen Anforderungen zur Umsetzung dieser Fertigungsverfahren sowie Füge- und Montagetechnologien wurden bereits frühzeitig in der Konzeptphase und nachfolgend konsequent über den gesamten Entwicklungsprozess berücksichtigt. Diese Entwicklungen finden ihren Niederschlag auch in 15 Patentanmeldungen. Dieses gewonnene Wissen kann synergetisch auch für andere Anwendungsgebiete wie etwa für große Nutzfahrzeuge (Lastkraftwagen, Busse) vorteilhaft genutzt werden.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Herrn Yunshuang Ma, Präsident von CRRC Qingdao Sifang, sowie Herrn Sansan Ding, Direktor des Forschungs- und Entwicklungszentrums bei CRRC Qingdao Sifang, für die finanzielle Unterstützung des zukunftsweisenden NGMT-Projektes. Mein besonderer Dank gilt ferner dem chinesischen-deutschen Entwicklungsteam der CG Rail GmbH in Dresden und allen Beteiligten für die hervorragende Leistung und das großartige Engagement im NGMT-Projekt.

#580_A2

(Bildnachweis: 1 bis 10; Verfasser)

Literatur

[1] *Bernicke, S.*: Leichtbaustudie im Auftrag der DMG – Teilprojekt A – Vollbahnfahrzeuge. Online: www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag_bernicke.pdf, aufgerufen am 26.04.2019

[2] *Protiwa, F.-F.*: Neue Zugkonzepte als Antwort auf die Herausforderungen der Eisenbahn von morgen. Vortrag auf der VDI-Veranstaltung „Innovative Eisenbahnkonzepte" an der TU Dresden, 6. Juni 2018, Dresden.

[3] *Köhn, R.*: Siemens zeigt seinen Plan für den ICE 5, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ), Donnerstag, 14. Juni 2018, S. 22.

[4] *Dittus, H.; Pagenkopf, J.; Friedrich, H.-E.*: Energiebedarfs- und Kostenreduktion durch Leichtbau bei Schienenfahrzeugen. ZEVrail (2013) 11-12, S. 445-453.

[5] *Wennberg, D.; Stichel, S.; Wennhage, P.*: Lohnt sich eine Gewichtsreduzierung bei Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen?. ZEVrail (2013) 3.

[6] *Schwab Castella, P.; Blanc, I.; Gomez Ferrer, M.; Ecabert, B.; et al.*: Integrating life cycle costs and environmental impacts of composite rail car bodies for a Korean train (Berücksichtigung von Lebenszykluskosten und Umwelteinflüssen bei Wagenkästen aus Verbundwerkstoffen für einen koreanischen Zug). The International Journal of Life Cycle Assessment (2009) Volume 14 Issue 5, S. 429-442.

[7] *Schindler, C.; Löffler, G. et al.*: Handbuch Schienenfahrzeuge – Entwicklung · Produktion · Instandhaltung. DVV Media Group GmbH, Hamburg 2014.

[8] *Jones, R.-M.*: Mechanics of Composite Materials (Mechanik der Verbundwerkstoffe). Scripta Book Company, Washington 1975.

[9] *Altenbach, H.; Altenbach, J.; Rikards, R.*: Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart 1996.

[10] *Whitney, J.-M.*: Structural Analysis of Laminated Anistropic Plates (Strukturanalyse von laminierten anisotropen Platten). Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster 1987.

[11] *Schürmann, H.*: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2007.

[12] *Ulbricht, A.*: Zur Gestaltung und Dimensionierung von zylindrischen Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Metall-Mischbauweise. Dissertation, Technische Universität Dresden 2011.

[13] *Nickel, J.; Fischer, F. et al.:* Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau. Projektstudie des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). 2016.

[14] *Winter, J.; Friedrich, H. E..; König, J.; Kopp, G.*: Konsequente und neuartige Leichtbauansätze bei Schienenfahrzeugen des Personenverkehrs. ZEVrail (2016) 10, S. 432-439.

[15] *Hillebrecht, M.; Orloff, S.; Brandhorst, M.; Kuhn, D.*: Leichtbau durch Multimaterialsysteme im ultraleichten Wagenkasten. Lightweight Design (2016) Volume 9 Issue 4, S. 32-37.

[16] *Seo, S. I.; Kim, J. S.; Cho, S. H.*: Development of a hybrid composite bodyshell for tilting trains (Entwicklung von Wagenkästen in hybrider Metall-Faserverbund-Bauweise für Neigezüge). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (2008) 222 (1), S. 1–13.

[17] *Hufenbach, W.; Helms, O.*: Zum methodischen Konstruieren von Leichtbaustrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe (2010) 62 Heft 10, S. 69-74.

[18] *Ulbricht, A.*: Schienenfahrzeug in CFK-intensiver Bauweise. Lightweight Design (2019) 2, S. 34-39.

[19] *Prockat, J.*: Developing Large Structural Parts for Railway Application using Fibre Reinforced Polymer Design (Entwicklung von großen Faserverbund-Strukturbauteilen für Schienenfahrzeuge). Dissertation, Technische Universität Berlin 2005.

[20] *Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.*: Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1996.

[21] *Hufenbach, W.; Gruhl, A.; Lepper, M.; Renner, O.:* Verfahren für die Fertigung komplexer Faserverbund-Hohlstrukturen. Lightweight Design (2013) 2, S. 44-48.

[22] *Hufenbach, W.; Gude M. et al.*: Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. SDV – Die Medien AG, Dresden 2007.

[23] *Schulze, E.; Pietzsch, A.; Schubert, L.; Ulbricht, A.*: Schallemissionsprüfung an einem neuartigen Leichtbau-Drehgestellrahmen aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff während statischer und dynamischer Ermüdungstests. 22. Kolloqium Schallemission, 27.-28. März 2019, Karlsruhe.

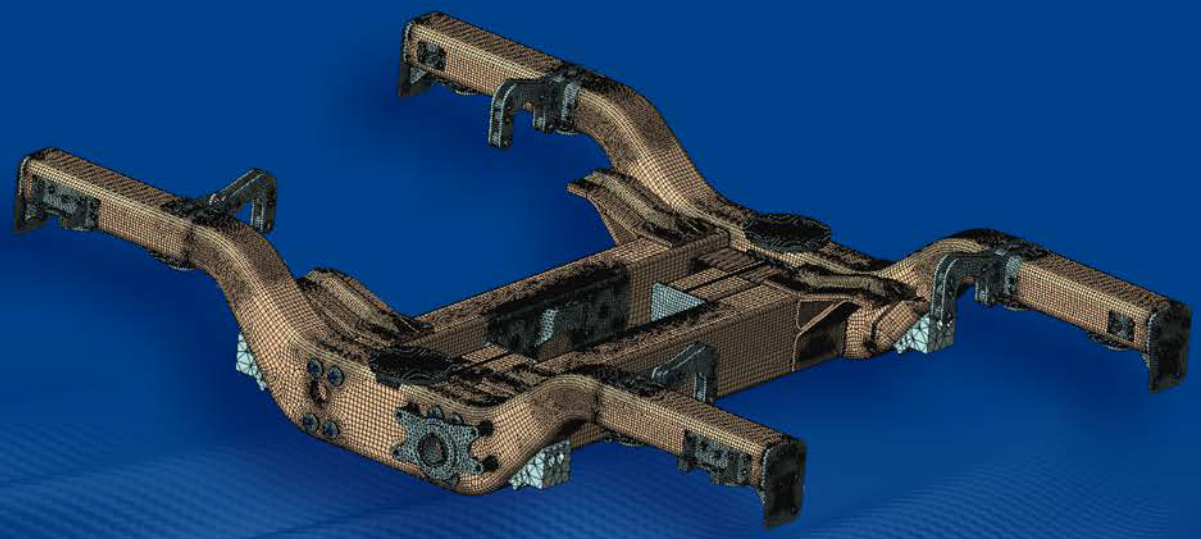
Prof. Dr.-Ing. Andreas Ulbricht (40), Studium des Wirtschaftsingenieurwesens, Vertiefungsrichtung Leichtbau, an der TU Dresden. Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden bis 2011, Promotion zum Dr.-Ing. in 2011. Projektleiter bei der Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH (LZS) von 2012 bis 2015. Seit 01.11.2015 Geschäftsführer der Chinesisch-Deutschen Forschungs- und Entwicklungszentrum für Bahn- und Verkehrstechnik Dresden GmbH (CG Rail GmbH). Seit 01.07.2018 Gastprofessor an der Tongji-Universität in Shanghai, China.

Anschrift: CG Rail GmbH, Freiberger Straße 33, 01067 Dresden, Deutschland

E-Mail: andreas.ulbricht@cgrail.de

CG Rail

- **Werkstoffcharakterisierung**
- **Konzeption von Leichtbausystemen**
- **Detailkonstruktion und Auslegung**
  - Werkstoffgerechte 3D-Konstruktion
  - Produktdatenmanagement-Software
  - Finite-Elemente Simulation (explizit und implizit)
  - Erstellung von Fertigungsunterlagen
- **Prozessentwicklung und Prototypenbau**
- **Weiterbildung und Schulungen (national und international)**



Weltweit erster CFK-Drehgestellrahmen in Differentialbauweise

CG Rail GmbH
Freiberger Straße 33
01067 Dresden
E-Mail: info@cgrail.de
Tel.: +49 (0) 351 41673000

SGS TÜV SAAR ISO 9001

www.cgrail.de