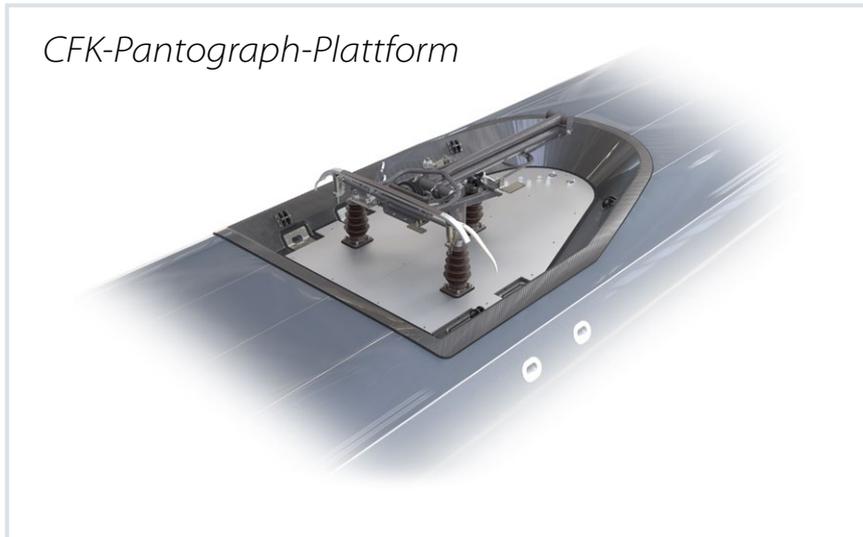
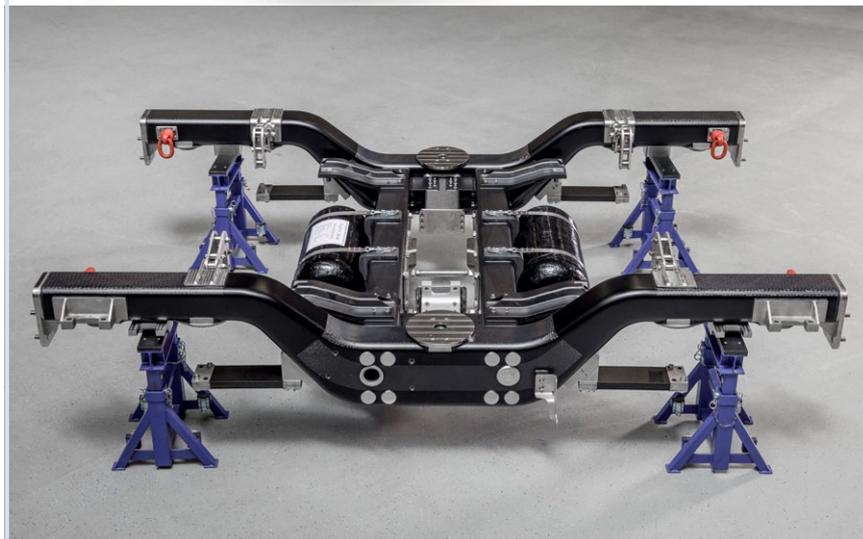
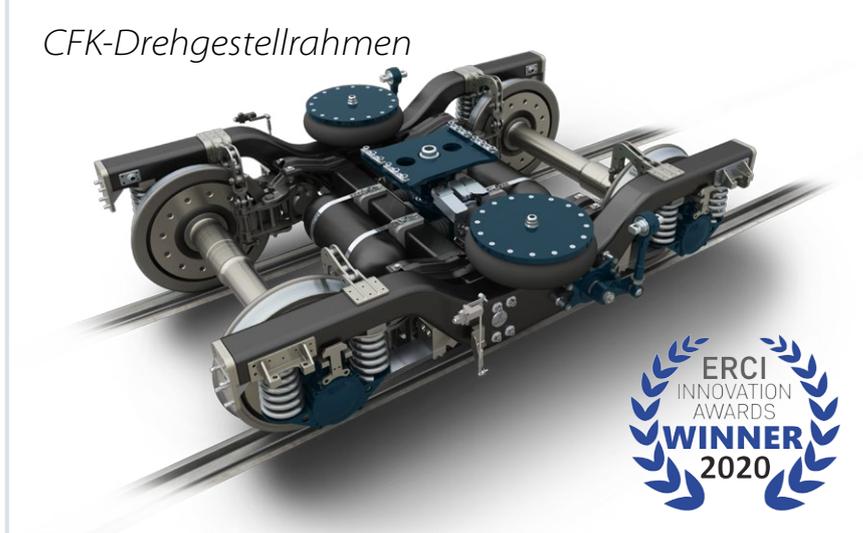


CFK-Pantograph-Plattform



CFK-Drehgestellrahmen



# DER **EI** EISENBAHN INGENIEUR

INTERNATIONALE FACHZEITSCHRIFT  
FÜR SCHIENENVERKEHR & TECHNIK

6|21

## CFK-Leichtbaulösungen für die Schienen- fahrzeugtechnik

Strukturelle Anwendung von CFK  
in Schienenfahrzeugen eröffnet  
enorme Leichtbaupotentiale

ANDREAS ULBRICHT | FRANZ BILKENROTH | SEPP RENNER

CG Rail 

CG Rail GmbH  
Freiberger Straße 33  
D-01067 Dresden  
[www.cgrail.de](http://www.cgrail.de)  
[info@cgrail.de](mailto:info@cgrail.de)

**SONDERDRUCK**



# CFK-Leichtbaulösungen für die Schienenfahrzeugtechnik

Werkstoffgerechter Einsatz von kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen in hochbelasteten Schienenfahrzeugstrukturen eröffnet enorme Leichtbaupotenziale.

ANDREAS ULBRICHT | FRANZ BILKENROTH | SEPP RENNER

**Aktuelle Trends in der Schienenfahrzeugtechnik wie etwa die Realisierung von Hybridantrieben für eine höhere Einsatzflexibilität oder die Integration zusätzlicher Komfort- und Informationssysteme für Passagiere führen zu steigenden Strukturmassen, jedoch ist die Gesamtmasse der Fahrzeuge durch die maximal zulässigen Radsatzlasten limitiert. Die Entwicklung von modernen CFK-Leichtbaulösungen (CFK, kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe) für hochbelastete Strukturen bietet hier eine attraktive Möglichkeit zur signifikanten Massereduzierung, wobei die Schienenfahrzeugtechnik für CFK-Werkstoffe noch ein relativ junges Anwendungsgebiet darstellt. Das Leichtbaupotenzial von CFK sowie die Lösung der damit verbundenen Herausforderungen wurden durch die CG Rail GmbH (CG Rail) bereits für verschiedene Schienenfahrzeugstrukturen erfolgreich nachgewiesen.**

## Potenziale von CFK im Schienenfahrzeugbereich

Der werkstoffgerechte Einsatz von endlosfaserverstärkten Kunststoffen für hochbelastete Tragstrukturen in Schienenfahrzeugen erlaubt die Erschließung von enormen Leichtbaupotenzialen. Die größte technische Bedeutung besitzen dabei glasfaser- bzw. kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (GFK bzw. CFK) mit ihren außergewöhnlich hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten im Vergleich zu metallischen Konstruktionswerkstoffen. Im Diagramm in Abb. 1 sind diese auf die Dichte bezogenen Leichtbaukennzahlen für verschiedene Werkstoffe gegenübergestellt, wobei die Werte für Verbundwerkstoffe ausschließlich in Faserrichtung gelten. Diese Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) der Werkstoffeigenschaften ist bei der Entwicklung von GFK- bzw. CFK-Leichtbaulösungen besonders zu berücksichtigen, um das volle Werkstoffpotenzial zu erschließen. Darüber hinaus sind im gesamten Gestaltungsprozess von der Konzept- bis hin zur Ausarbeitungsphase die speziellen fertigungs- und fütetechnischen Restriktionen von endlosfaserverstärkten GFK bzw. CFK zu beachten [1].

Die strukturelle Anwendung von Faserverbundwerkstoffen in der Schienenfahrzeugtechnik beschränkt sich allerdings bisher zumeist auf

Komponenten mit geringer Belastung wie etwa Frontkabinenstrukturen oder Verkleidungsbaueteile im Innen- und Außenbereich. Dabei kommen gewöhnlich glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) mit Kurz-, Lang- oder Endlosfaserverstärkung zum Einsatz. Die wesentlichen Vorteile von GFK gegenüber metallischen Werkstoffen liegen dabei in der ausgeprägten Designfreiheit bei gleichzeitig niedrigen Kosten für Material und Herstellung sowie der sehr guten Korrosionsbeständigkeit.

Die werkstoffgerechte Verwendung von CFK ermöglicht bei hochbeanspruchten Schienenfahrzeugstrukturen im Vergleich zu Metallen und auch GFK außergewöhnlich hohe Masseneinsparungen von bis zu 50 %, was in ausführlichen Studien und Grundlagenprojekten bereits erfolgreich nachgewiesen wurde [2, 3, 4]. Weiterhin erlauben Faserverbundwerkstoffe wie CFK, im Unterschied zu Metallen, die direkte Integration von Sensorelementen in den Werkstoff während des Urformprozesses [5, 6]. Damit sind die Sensorelemente hervorragend vor Umgebungseinflüssen geschützt, wodurch die Dehnungen in Bauteilen im Betrieb zuverlässig erfasst werden können. Diese kontinuierliche Online-Strukturüberwachung eröffnet zudem die Chance zu einer zustandsbasierten Wartung von CFK-Strukturen. Zu weiteren Vorteilen von CFK- als auch GFK-Werkstoffen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen zählen u.a. die hohe Werkstoff-

dämpfung, die niedrigere Wärmeleitung senkrecht zur Faserrichtung (Wärmeisolation), die hervorragende Korrosionsbeständigkeit und das zumeist gutmütige Versagensverhalten.

## Ausgewählte Herausforderungen für CFK im Schienenfahrzeugbereich

Der kommerzielle Serieneinsatz von CFK-Werkstoffen in Schienenfahrzeugen beschränkt sich derzeit allerdings auf nur sehr wenige Anwendungen wie etwa für Leichtbau-Antennenträger bei Drehgestellen. Als ein Hauptgrund für die noch zögerliche Anwendung von CFK werden häufig die hohen Materialkosten für Kohlenstoffasern (CF) angeführt, die neben dem Kunststoff den Hauptbestandteil des Verbundwerkstoffs CFK ausmachen. Die maßgeblichen Kostenanteile für die CF-Herstellung resultieren dabei aus dem Vorprodukt (Precursor) – der Polyacrylnitril-Faser (PAN) – mit etwa 50 % sowie den Energiekosten für die Stabilisierung, Karbonisierung und optionale Graphitisierung der PAN-Faser während der CF-Herstellung mit etwa 20 % [7]. Die weltweit stetig steigenden CF-Produktionskapazitäten und die damit einhergehenden Skaleneffekte haben in den vergangenen Jahren allerdings bereits zu deutlich fallenden Preisen für die reine Kohlenstofffaser von bis zu unter 20 EUR/kg geführt [8]. Darüber hinaus gibt es aussichtsreiche Entwicklungen zum sukzessiven Ersatz des teuren, erdöl-

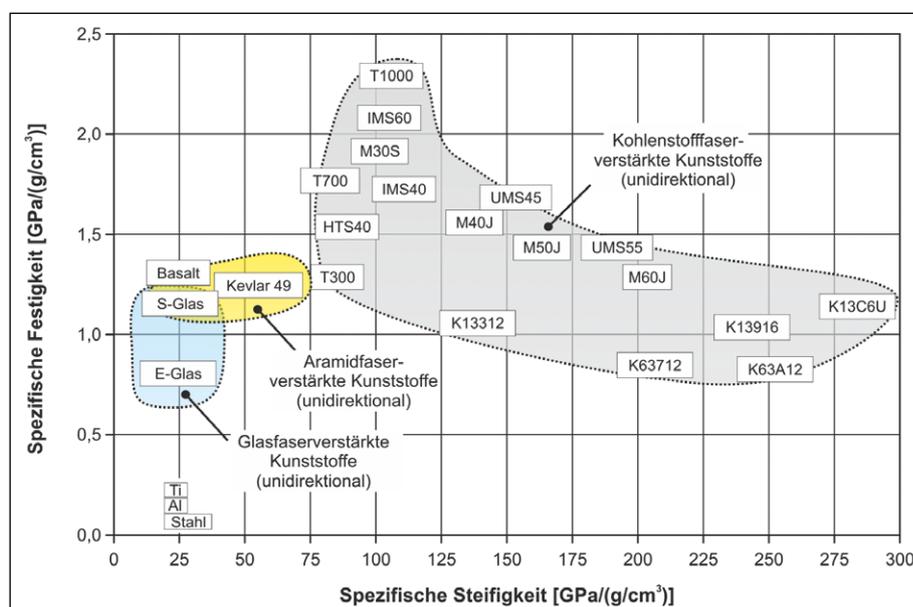


Abb. 1: Leichtbaupotenzial verschiedener Werkstoffe im Vergleich

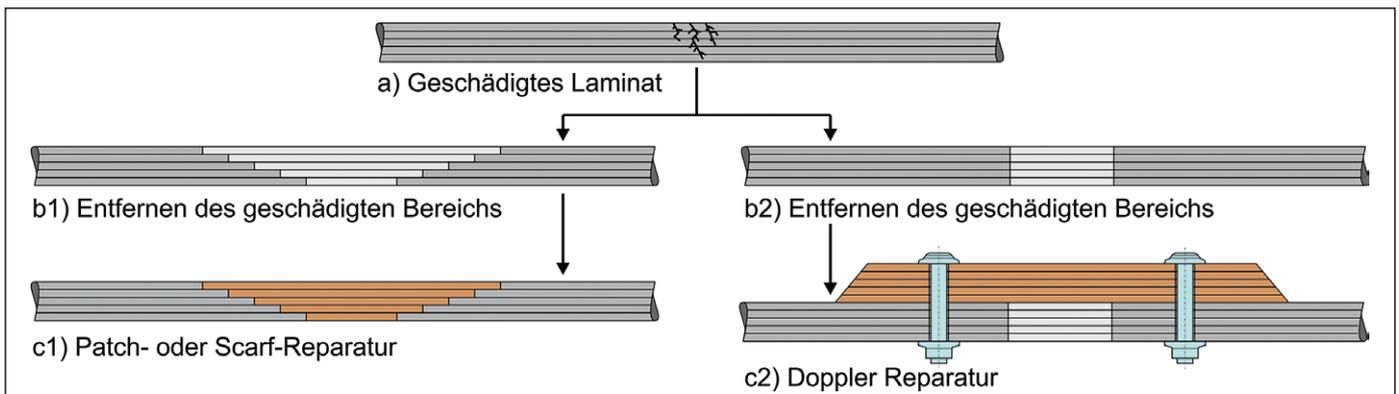


Abb. 2: Grundprinzipien ausgewählter Reparaturverfahren für CFK-Werkstoffe

basierten Precursors PAN durch kostengünstige und nachhaltig produzierte Werkstoffe wie etwa Lignin, das bei der Papierproduktion als Abfallprodukt anfällt. Dadurch sind zukünftig weitere Kostenreduktionen zu erwarten [9].

Hohe Fertigungskosten durch arbeitsintensive manuelle Prozesse werden in der Praxis oft ebenfalls als kritischer Punkt benannt. Diese können durch einen höheren Automatisierungsgrad signifikant reduziert werden, womit gleichzeitig die Bauteilqualität und Reproduzierbarkeit verbessert werden. Die Wirtschaftlichkeit einer Prozessautomatisierung muss aufgrund der höheren Anfangsinvestitionen allerdings immer im Hinblick auf das geplante Produktionsszenario geprüft werden. Außerdem muss eine Automatisierung bereits frühzeitig in der Konzeptphase von CFK-Komponenten berücksichtigt werden, da der gewählte Fertigungsprozess gewöhnlich wichtige Faktoren wie etwa verwendbare Halbzeuge und realisierbare Gestalt beeinflusst [1].

Im Allgemeinen ist die monetäre Bewertung von CFK-Leichtbaumaßnahmen bei Schienenfahrzeugen allerdings nicht nur isoliert für die Herstellungskosten, sondern vielmehr systemisch für die gesamten Lebenszykluskosten durchzuführen, wobei der Materialpreis und die Fertigungskosten zumeist nur einen untergeordneten Anteil bilden. So kann durch den Einsatz von

werkstoffgerechten CFK-Leichtbausystemen u.a. eine signifikante Verringerung der Energiekosten (Massenreduzierung), der Instandhaltungskosten (Verschleißreduzierung am Schienenfahrzeug, hervorragende Korrosionsbeständigkeit) sowie der Trassengebühren (Reduzierung der Beanspruchung des Oberbaus) erzielt werden [10, 11].

Als weitere Herausforderung für CFK in Schienenfahrzeugen wird oft die Erfüllung der Brandchutzanforderungen gemäß der seit 2016 gültigen europäischen Norm EN 45545, insbesondere für die höchste Gefährdungskategorie HL 3 wie etwa bei U-Bahnen, angesehen [12]. Hierzu wurden bei der CG Rail bereits umfangreiche Brandtests an verschiedenen CFK-Strukturwerkstoffen mit duroplastischer als auch thermoplastischer Matrix durchgeführt, wobei durch spezielle Brandschutzmaßnahmen auch höchste Anforderungen gemäß HL3 R7 nach EN 45545-2 erfüllt werden. Zum einen kann dies durch Verwendung von inhärent flammwidrigen Kunststoffen wie etwa Phenolharzen erreicht werden. Zum anderen wird am Markt eine Vielzahl von unterschiedlichen Flammschutzadditiven angeboten, die dem Kunststoff beigemischt werden und je nach chemischer Zusammensetzung mit verschiedenen Wirkweisen das Brandverhalten beeinflussen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Integration speziell brandschutzmodifizierter Faserlagen oder

Harzschichten (sog. Gelcoats) auf der Außenseite von Faserverbundkomponenten direkt im eigentlichen Herstellungsprozess [13]. Nicht zuletzt können auch nach der Herstellung von Faserverbundbauteilen Brandschutzlacke aufgetragen werden, was allerdings zu zusätzlichen Fertigungsschritten und damit auch Kosten führt.

Bei der Entwicklung von CFK-Leichtbaustrukturen für Schienenfahrzeuge steht darüber hinaus sowohl das Impact- als auch das Betriebsfestigkeitsverhalten besonders im Fokus. Für durch Schotterflug impactgefährdete CFK-Leichtbaustrukturen in Schienenfahrzeugen können speziell angepasste Schichtaufbauten mit hoher Impacttoleranz und Energieaufnahmevermögen entwickelt werden. So etwa hat die CG Rail eine neuartige Unterflurverkleidung in CFK-Leichtbauweise entwickelt, deren CFK-Verkleidungselemente eine Masseinsparung von 55% im Vergleich zu den metallischen Referenzbauteilen bei gleichzeitig geringerem Bauraumbedarf aufweisen [14]. Das Betriebsfestigkeitsverhalten von endlosfaserverstärkten CFK-Werkstoffen wird durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst, wie etwa dem CF-Fasertyp, dem Kunststoff (Thermoplast, Duroplast), dem Herstellungsprozess und der Bauteilqualität [15]. Zur Erzielung einer hohen Lebensdauer ist bei der Gestaltung und Auslegung endlosfaserverstärkter CFK-Bau-

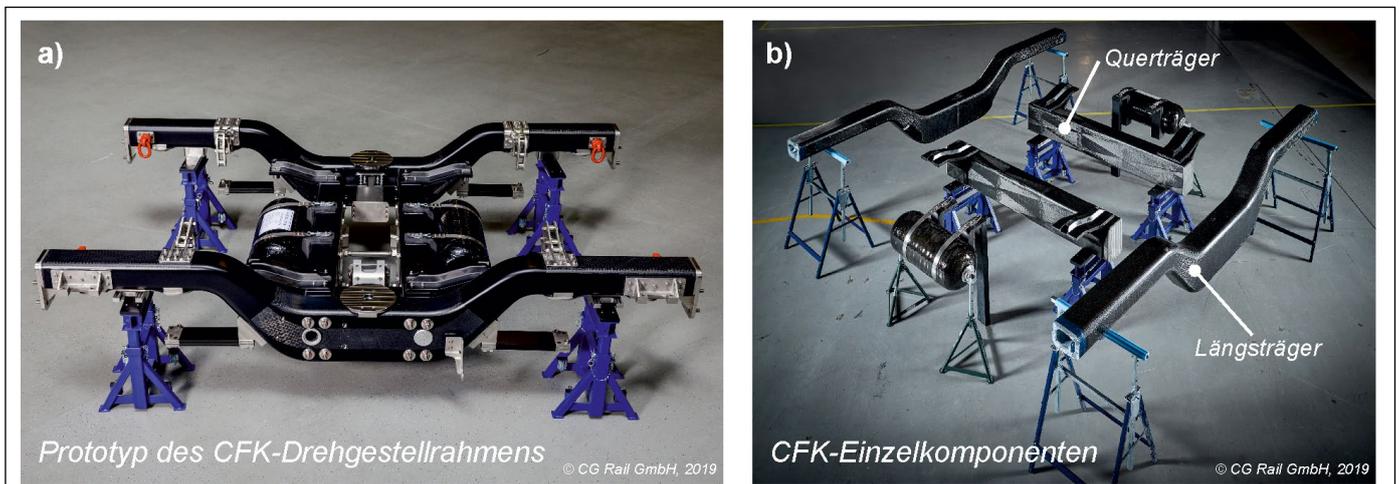


Abb. 3: Leichtbau-Drehgestellrahmen in CFK-Differentialbauweise

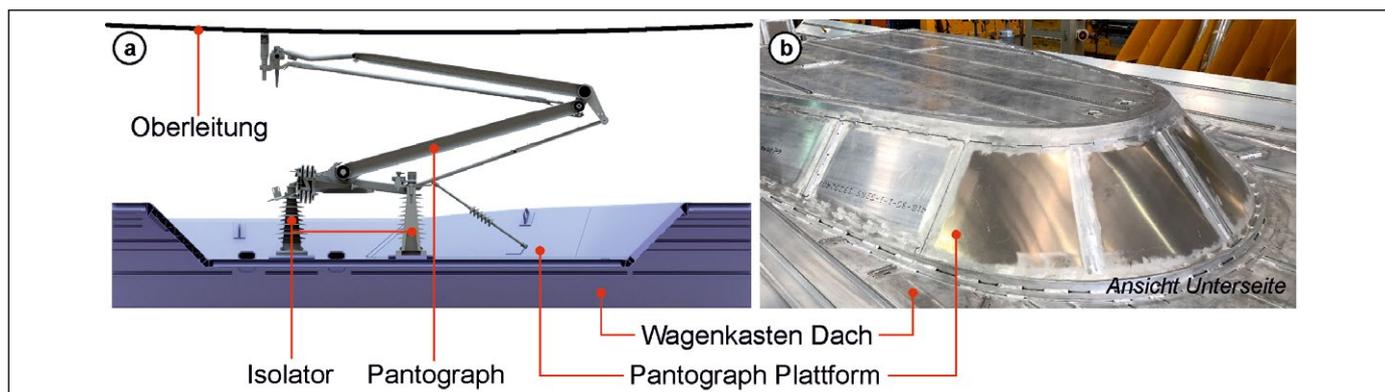


Abb. 4: Pantograph-Plattform

teile insbesondere darauf zu achten, dass in allen wesentlichen Betriebszuständen eine maßgebliche Beanspruchung in Faserrichtung erzielt wird, um das ausgezeichnete Betriebsfestigkeitsverhalten unidirektional verstärkter CFK-Werkstoffe in dieser Richtung bestmöglich auszunutzen.

Für die Schadensdetektion und die Reparatur von Schäden bei CFK-Leichtbaustrukturen gibt es etablierte Verfahren aus dem Luftfahrtbereich, die zum Teil synergetisch auf den Schienenfahrzeugbereich übernommen werden können. Für die Schadensdetektion in CFK-Strukturen eignen sich u. a. das Ultraschallverfahren, die Schallemissionsprüfung, die Thermographie oder das Röntgenverfahren, wobei sich die Verfahren im Hinblick auf diverse Kriterien wie etwa der Detektierbarkeit verschiedener Schädigungsarten unterscheiden [16]. Ferner bietet die Integration von Sensorelementen mit verschiedenen Wirkprinzipien große Potenziale für eine kontinuierliche Strukturüberwachung bei CFK-Leichtbaukomponenten [17]. Für die Reparatur von CFK-Komponenten mit Duromer-Matrix im Luftfahrtbereich haben sich ebenfalls verschiedene zugelassene Technologien etabliert wie etwa das Ausfräsen des Schadens und anschließende Auflaminieren eines Reparaturpatches (auch „Scarf repair“ bzw. „Patch repair“) oder die Doppler-Reparatur (auch „Doubler repair“ bzw. „Bolted repair“), deren Prinzipien in Abb. 2 dargestellt sind [18, 19, 20].

Das außerordentlich hohe Leichtbaupotenzial und die gleichzeitig löslichen Herausforderungen beim strukturellen Einsatz von CFK in Schienenfahrzeugen eröffnen zahlreiche Ansatzpunkte für die Entwicklung und technologische Realisierung von innovativen Leichtbaukomponenten. Im Folgenden werden exemplarisch zwei neuartige CFK-Leichtbaustrukturen vorgestellt, die unter Federführung der CG Rail entwickelt wurden.

#### Drehgestellrahmen in CFK-Leichtbauweise

Bei Fahrwerken können sich durch innovative CFK-Leichtbaulösungen vielzählige Vorteile wie etwa eine Verbesserung der fahrdynamischen Eigenschaften durch verringerte Trägheitskräfte, ein reduzierter Rad-Schiene-Verschleiß durch geringere Lasten sowie ein geringerer Energiever-

brauch ergeben. Ein eindrucksvolles Beispiel für den vorteilhaften Einsatz von CFK in Fahrwerken bildet der von CG Rail entwickelte und mit dem europäischen „ERCI Innovation Award 2020“ ausgezeichnete Leichtbau-Drehgestellrahmen, der im Vergleich zum Stahl-Referenzrahmen eine Masseersparnis von fast 50 % aufweist [21].

Die klassische H-Form dieses Leichtbau-Drehgestellrahmens resultiert aus der Forderung zur Übernahme aller Schnittstellen, Bauräume und Anbaukomponenten vom Stahl-Referenzrahmen (Abb. 3a). Bei der konkreten Gestaltung des H-Rahmens wurde bereits frühzeitig in der Konzeptphase die beabsichtigte hochautomatisierte Fertigung berücksichtigt, die eine sehr hohe Bauteilqualität bei gleichzeitig geringen Fertigungskosten ermöglicht. Da die komplexe Gestalt des H-Rahmens eine einteilige CFK-Integralbauweise technisch und ökonomisch nahezu unmöglich macht, wurde eine neuartige CFK-Differentialbauweise mit intelligenter Aufteilung in vier CFK-Einzelkomponenten mit einfacherer Geometrie entwickelt (Abb. 3b).

Der neuartige CFK-Drehgestellrahmen wurde in umfangreichen Tests sowohl unter statischer als auch zyklischer Belastung erfolgreich erprobt. Die zyklische Erprobung erfolgte auf Grundlage der DIN EN 13749:2011 und verlief über insgesamt 12 Mio. Lastwechsel, wobei das Lastniveau nach dem erfolgreichen Abschluss von 6 Mio. Lastwechseln stufenweise von 100 % auf 160 % Prüflast erhöht wurde [21].

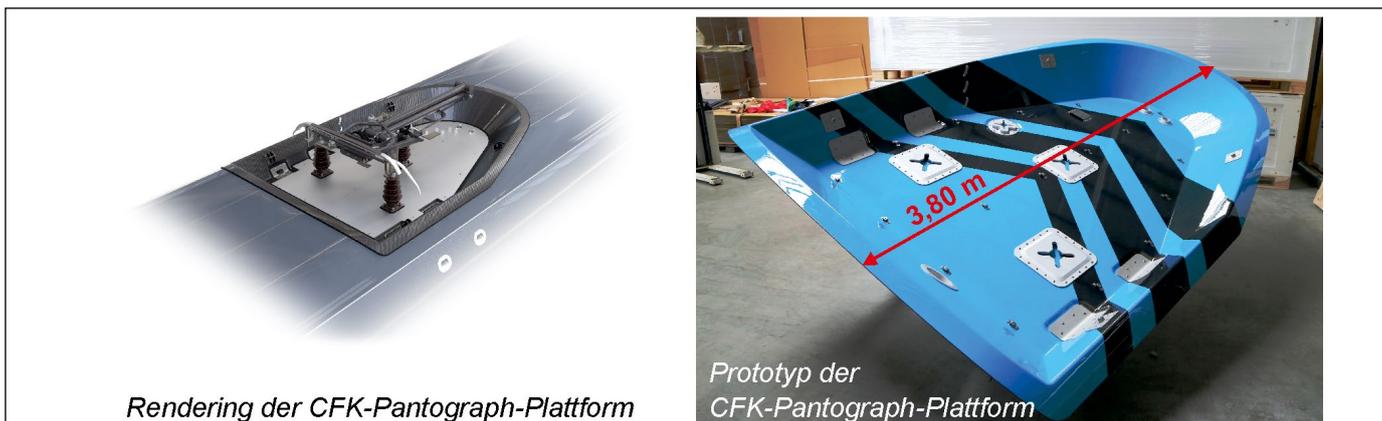
#### Pantograph-Plattform in CFK-Leichtbauweise

Der Pantograph kann bei Hochgeschwindigkeitszügen entweder direkt auf dem Wagenkastendach oder in einer vertieften Position montiert werden. Dabei sind in beiden Fällen üblicherweise zusätzliche Verkleidungen zur Reduzierung des Luftwiderstandes und von Verwirbelungen vorgesehen [22]. Die Montage des Pantographen in einer muldenartigen Dachvertiefung kann die Wagenkasten-Querschnittsfläche verringern und damit besonders bei sehr hohen Geschwindigkeiten von über 300 km/h zu einer Reduzierung des Luftwiderstandes beitragen (Abb. 4a). Durch eine aerodynamisch günstige Gestaltung der Vertiefung können zudem Verwirbelungen und die da-

raus resultierenden Schallemissionen vermindert werden, welche durch den Pantographen insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten erzeugt werden [23, 24, 25, 26]. Deshalb muss die Gestalt dieser sogenannten Pantograph-Plattform an die speziellen aerodynamischen Erfordernisse angepasst werden. Dies resultiert zumeist in geometrisch komplexen Außenflächen, die bei einer klassischen metallischen Bauweise gewöhnlich nur über sehr aufwendige Schweißkonstruktionen mit vielzähligen Einzelteilen dargestellt werden können (Abb. 4b). Neben den damit verbundenen sehr hohen Fertigungskosten bildet die Einhaltung der geforderten Toleranzen eine weitere Herausforderung.

Die extrem hohe Designfreiheit im Urformprozess sowie die Möglichkeit zur Fertigung eines Integralbauteils in nur einem Fertigungsschritt prädestinieren hier den Einsatz von CFK für die Pantograph-Plattform. Darüber hinaus bietet CFK die Möglichkeit zu einer deutlichen Reduzierung der Masse und damit auch des Massenträgheitsmoments im besonders relevanten Dachbereich. Einen weiteren Aspekt bildet die Möglichkeit zur Geräuschreduzierung im Innenraum durch eine bessere Schallisolierung und damit verminderten Körperschall über das gezielt einstellbare Eigenschaftsprofil von CFK-Werkstoffen (insbesondere Schichtaufbau und Faserorientierung im Laminat).

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde deshalb durch die CG Rail die weltweit erste CFK-Pantograph-Plattform in neuartiger Integralbauweise entwickelt und technologisch realisiert, die eine Masseersparnis von 30 % gegenüber der Referenzplattform aus Aluminium aufweist (Abb. 5). Die unter aerodynamischen Gesichtspunkten gestaltete Außenfläche der Plattform wurde hierbei vom Kunden vorgegeben [23]. Die einteilige CFK-Sandwichstruktur der Plattform mit einer maximalen Abmessung von 3,80 m wird mittels Vakuuminfusionsverfahren in nur einem einzigen Prozessschritt mit einer Toleranz von lediglich  $\pm 2$  mm hergestellt, wodurch der Arbeits- und Vorrichtungsaufwand in der Herstellung signifikant reduziert werden konnte. Außerdem konnte durch einen speziell angepassten Sandwichtaufbau die Schallisolierung im hörbaren Frequenzbereich deutlich verbessert



Rendering der CFK-Pantograph-Plattform

Prototyp der CFK-Pantograph-Plattform

Abb. 5: Prototyp der CFK-Pantograph-Plattform

Quelle aller Abb.: CG Rail GmbH

werden. Die Erfüllung der geforderten Brandschutzklasse HL3 R8 nach EN 45545-2 wurde durch den Einsatz von Brandschutzsystemen erreicht und in umfangreichen Brandschutztests an bauteilnahen Probekörpern nachgewiesen. Die Plattform in integraler CFK-Leichtbauweise wurde zudem in umfangreichen Tests sowohl unter statischer als auch zyklischer Belastung über 10 Mio. Lastwechsel erfolgreich erprobt.

### Zusammenfassung

Die CG Rail und ihre Partner haben im Rahmen mehrerer Projekte das enorme Leichtbaupotenzial von CFK-Werkstoffen für den Einsatz in Tragstrukturen von Schienenfahrzeugen erfolgreich nachgewiesen. Dazu zählen unter anderem eine Pantograph-Plattform in CFK-Integralbauweise mit einer Masseersparnis von 30 % und ein Leichtbau-Drehgestellrahmen in CFK-Differentialbauweise mit einer Masseersparnis von fast 50 %. Alle schienenfahrzeugspezifischen Anforderungen wie etwa bei Brandschutz oder Betriebsfestigkeit wurden bei der Entwicklung durchgängig von der Konzeptphase bis hin zur technologischen Realisierung der Prototypen berücksichtigt. Das in den Projekten gewonnene Know-how zum Einsatz von endlosfaserverstärkten CFK in Schienenfahrzeugen bildet eine wichtige Grundlage für die zukünftige Realisierung und Zulassung von Serienanwendungen bei Neufahrzeugen als auch Modernisierungsmaßnahmen. ■

### QUELLEN

- [1] Hufenbach, W.; Helms, O.: Zum methodischen Konstruieren von Leichtbaustrukturen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe (62) Heft 10/2010, S. 69-74
- [2] Nickel, J.; Fischer, F. et al.: Einsatz von CFK Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau. Projektstudie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2016
- [3] Seo, S. I.; Kim, J. S.; Cho, S. H.: Development of a hybrid composite bodysell for tilting trains. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit (2008) 222 (1), S. 1–13
- [4] Hillebrecht, M.; Orlo, S.; Brandhorst, M.; Kuhn, D.: Leichtbau durch Multimaterialsysteme im ultraleichten Wagenkasten. Lightweight Design (2016) Volume 9 Issue 4, S. 32-37
- [5] Geller, S.; Gude, M.: Process-Integrated Manufacturing and Embedding of Novel Piezoelectric Sensor Modules into Glass Fibre-Reinforced Polyurethane Composite Structures. Materials Science Forum 825–826 (July 2015), S. 563-570, 2015

- [6] Hufenbach, W.; Böhm, R.; Thieme, M.; Tyczynski, T.: Damage monitoring in pressure vessels and pipelines based on wireless sensor networks. Procedia Engineering 10 (2011), S. 340-345, 2011

- [7] Lässig, R. et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen – Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Roland Berger Studie für den VDMA, 2012. Online: [https://www.industrial-production.de/upload\\_weka/Studie\\_894791.pdf](https://www.industrial-production.de/upload_weka/Studie_894791.pdf), 03.03.2021 um 12:00

- [8] Schüppel, D.: 18 EURO/KG CFK - Spitzencluster MAI Carbon erreicht Kostenziel. Carbon Composites Magazin, 1/2018, S. 21-22

- [9] Al Aiti, M. et al.: Dry-Jet Wet Spinning of Thermally Stable Lignin-Textile Grade Polyacrylonitrile Fibers Regenerated from Chloride-Based Ionic Liquids Compounds. Materials 13(17): 3687, 2020

- [10] Wennberg, D.; Stichel, S.; Wennhage, P.: Lohnt sich eine Gewichtsreduzierung bei Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen?, ZEVrail, Jahrgang 137, Heft 3/2013, S. 77-87

- [11] Mannsbarth, H.: Moderne innengelagerte Drehgestelle für den Vollbahnbereich. Vortrag auf IFS-Seminar am 09.12.2014 an der RWTH Aachen. Online: [http://www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag\\_mannsbarth.pdf](http://www.dmg-berlin.info/page/downloads/vortrag_mannsbarth.pdf), 28.02.2021 um 15:00

- [12] DIN EN 45545-2: Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten, Beuth Verlag GmbH, Berlin Oktober 2020

- [13] Bünker, J.: Brandhemmend ausgerüstete Faserverbundbauteile nach DIN SPEC 91326, EI-DER EISENBAHNINGENIEUR 7/2016, S. 44-48

- [14] Ulbricht, A. et al.: Entwicklung von Leichtbaustrukturen in CFK-Sandwichbauweise mit hoher Impactbeständigkeit, ZEVrail, Jahrgang 144, Heft 6-7/2020

- [15] Alam, P. et al.: The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – A review, Composites Part B: Engineering, Volume 166, 2019, S. 555-579

- [16] Towsyfyan, H.; Biguri, A.; Boardman, R.; Blumensath, T.: Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 33, No. 3, 2020, S. 771-791

- [17] Giurgutiu, V.: Structural Health Monitoring of Aerospace Composites, Academic Press Verlag, 2015

- [18] Wang, C.-H.; Duong, C.-N.: Bonded Joints and Repairs to Composite Airframe Structures, Elsevier-Verlag, 2016

- [19] Dutton, S.; Kelly, D.; Baker, A.: Composite Materials for Aircraft Structures, American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2004

- [20] Sinapius, M.; Holzhüter, D.: Infusion Technology for Bonded CFRP Repairs. 11. DECEMA Kolloquium "Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik", 23.2.2011, Frankfurt a.M. Online: [https://elib.dlr.de/69524/1/CFRP-Repair\\_Vortrag\\_DLR.pdf](https://elib.dlr.de/69524/1/CFRP-Repair_Vortrag_DLR.pdf), 26.02.2021 um 18:00

- [21] Ulbricht, A.: Entwicklung und technologische Umsetzung eines Schienenfahrzeugs in neuartiger Faserverbund-Leichtbauweise, ZEVrail, Jahrgang 143, Heft 6-7/2019, S. 220-227

- [22] Thompson, D.-J.; Iglesias, E.-L.; Liu, X.; Zhu, J.; Hu, Z.: Recent developments in the production and control of aerodynamic noise from high-speed trains. International Journal of Rail Transportation, Vol. 3, No. 3 (2015), S. 119-150

- [23] Lin, P.; Zhang, Y.; Guo, D.: Optimal Design of Pantograph Platform for High-Speed Trains. International Journal of Mechanics Research, Vol. 7 No. 2, 2018, S. 27-35. Online: [www.hanspub.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=25347](http://www.hanspub.org/journal/PaperInformation.aspx?paperID=25347), 20.02.2021 um 09:00

- [24] Thompson, D.: Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control, Elsevier-Verlag, 2009

- [25] Böhm, J. et al.: Review on the results of the requirement analysis and assessment. Projektbericht des Shift2Rail Projekts DESTINATE, 2017. Online: [https://projects.shift2rail.org/s2r\\_ipCC\\_n.aspx?p=DESTINATE](https://projects.shift2rail.org/s2r_ipCC_n.aspx?p=DESTINATE), 10.02.2021 um 11:00

- [26] Kümmlitz, S.: Emissionsortdetektion im Schienenverkehr mit einer akustischen Kamera. Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung (DZSF), Bericht Nr. 4 (2020), 2020. Online: [https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/Forschungsbericht\\_2020-04.html?sessionid=1D1A9FB3DE0FAFCA80E00B419DED50B.live113122nn=2203708](https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/Forschungsbericht_2020-04.html?sessionid=1D1A9FB3DE0FAFCA80E00B419DED50B.live113122nn=2203708), 01.03.2021 um 15:00



**Prof. Dr.-Ing. Andreas Ulbricht**  
Geschäftsführer  
andreas.ulbricht@cgrail.de



**Dipl.-Ing. Franz Bilkenroth**  
Projektleiter  
franz.bilkenroth@cgrail.de



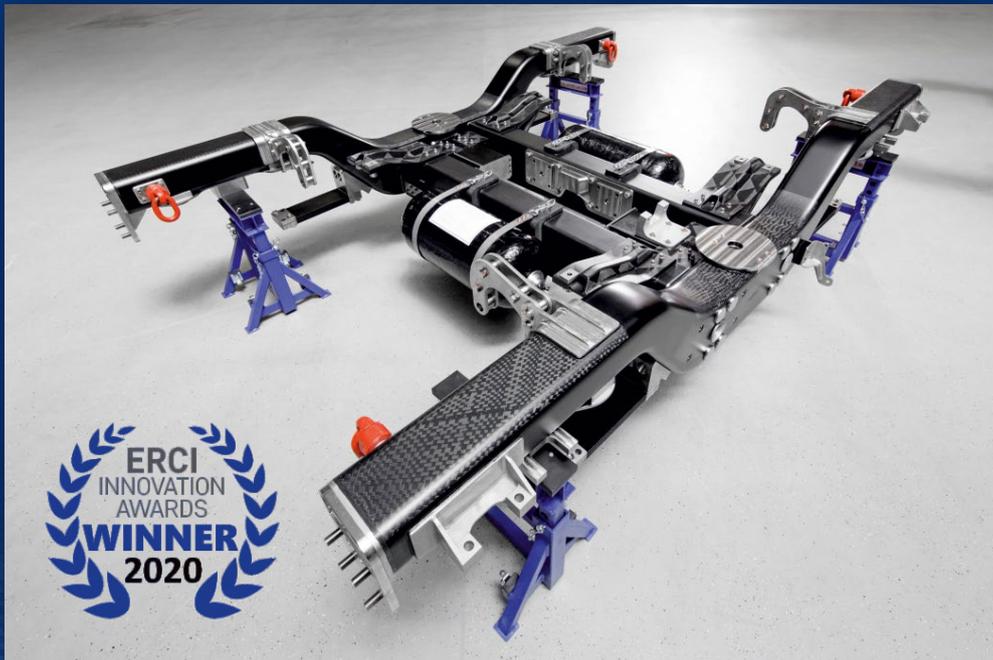
**Dipl.-Ing. Sepp Renner**  
Projektleiter  
sepp.renner@cgrail.de

alle Autoren:  
CG Rail GmbH, Dresden



## Leichtbausystemlösungen für Schienenfahrzeuge

- Machbarkeits- und Konzeptstudien
- Konstruktion und Simulation von Leichtbausystemlösungen in Multi-Material-Design
  - Werkstoffgerechte Konstruktion
  - Gestaltung und Auslegung von Fügeverbindungen
  - Finite-Elemente-Simulation
  - Erstellung von Fertigungsdokumenten
- Bau und Test von Prototypen
- Mechanische Werkstoffprüfung
- Projektmanagement (IPMA® zertifiziert)



*Weltweit erster Leichtbau-Drehgestellrahmen  
in CFK-Differentialbauweise*

*Ausgezeichnet mit dem „ERCI Innovation Award 2020“*

**Kontaktieren Sie uns:**

Adresse: Freiberger Straße 33, 01067 Dresden  
E-mail: [info@cgrail.de](mailto:info@cgrail.de) · Web: [www.cgrail.de](http://www.cgrail.de)