

Hybridbauweise als Beitrag zur Nachhaltigkeit

Die Forschungsaktivitäten des Instituts für Leichtbau mit Hybridsystemen (ILH) fokussieren sich auf die Erforschung von Hybridsystemen, bestehend aus der Kombination artverschiedener Werkstoffe. Dies zielt darauf ab die jeweiligen Vorteile spezifischer Werkstoffe zu kombinieren und etwaige Nachteile zu kompensieren. Grundlage dafür ist eine methodische Materialauswahl, eine gewichtsoptimierte sowie beanspruchungsgerechte Konstruktion, ein energieeffizienter Fertigungsvorgang für optimale Bauteileigenschaften, die Wiederaufbereitung und -verwendung der Werkstoffe nach Ende des Lebenszyklus und eine fortlaufende Bilanzierung der Energieströme.

Im Zuge der Dekarbonisierung des Personen- und Güterverkehrs sind Leichtbaumaßnahmen ein geeignetes Mittel die Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen zu minimieren. Durch die Verwendung von Werkstoffen mit hohem Leichtbaupotential ergeben sich Einsparungsmöglichkeiten in der Nutzungsphase. Zusätzliches Potential zur Reduktion der Energieströme ergibt sich über eine energieeffiziente Verarbeitung (Herstellungsphase) der Werkstoffe und die Wiederverwertung bzw. Aufbereitung von Werkstoffen nach Beendigung der Nutzungsphase (Materialbereitstellung) [1].

Im Sinne des Werkstoffleichtbaus kommt faserverstärkten Kunststoffen (FVK) durch ihre hervorragenden spezifischen mechanischen Eigenschaften eine große Bedeutung zu. Ein hohes Energieeinsparpotential kann hier durch die Reduktion bewegter Massen wie im Straßen- und Schienenverkehr oder aber in der Luft- und Raumfahrt erzielt werden. Weitere Anwendungsfälle von FVK befinden sich im Bereich der nachhaltigen Energieerzeugung, sowie im Bausektor [2, 3].

Das moderne Flugzeug A350 XWB besteht bspw. zu 53% aus kohlenfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Obwohl die Herstellung von FVK im Vergleich zu Metallwerkstoffen energieintensiver ist, kann der Einsatz von CFK eine Reduktion der CO₂-Emissionen

von bis zu 15-20 % über die gesamte Lebensdauer ermöglichen [4].

Während solitäre CFK-Strukturen aufgrund des hohen Kosteneinsatzes oftmals Hochleistungsanwendungen vorbehalten sind, kann durch die Kombination von metallischen Werkstoffen mit FVK ein Einsatz in Industriezweigen mit hohem Kostendruck ermöglicht werden. Das Einsparpotential pro Bauteil ist dabei zwar geringer, jedoch ergeben sich umso bedeutendere Effekte bei der Umsetzung in großen Stückzahlen. Bekannt ist dies u. a. aus der Automobilbranche vom 7er BMW (G12) mit Applikationen z. B. im Bereich der B-Säule [5]. Im Rahmen der Hybridbauweise werden die Vorteile der jeweiligen Werkstoffklassen kombiniert und etwaige Nachteile kompensiert. Bspw. lassen sich offene Blechprofilstrukturen durch den Einsatz von FVK verstärken. Etablierte Anwendungsfälle sind CFK-Patches in B-Säulen zur Minimierung der Intrusion im Crashlastfall, oder die Versteifung von Frontend-Trägern. Letztere lässt sich durch die hohe Gestaltungsfreiheit von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) erreichen. Wird die Verbindung der Werkstoffe in einem Prozessschritt durchgeführt, ergeben sich neben dem verbesserten Eigenschaftsprofil Kostenvorteile [6, 7].

Damit die Marktdurchdringung der Hybridtechnik - und damit der Beitrag zur Nachhaltigkeit - optimiert werden kann, forschen

die Wissenschaftler*innen des Instituts für Leichtbau mit Hybridsystemen (ILH) der Universität Paderborn an vorherrschenden Herausforderungen. Neben der Entwicklung und Optimierung von Verarbeitungstechniken, werden Technologien zur Aufbereitung und geeignete Anwendungsmöglichkeiten rezyklierter Kohlenstofffasern (rCF) analysiert sowie Methoden zur Ökobilanzierung (englisch: Life Cycle Assessment, kurz LCA) von hybriden Leichtbaulösungen entwickelt. Denn die Anwendung der Hybridtechnik ist nur dann sinnvoll, wenn Hybridbauteile im Spannungsfeld aus mech. Eigenschaftsprofil, Kosten und ökologischem Fußabdruck ein Optimum aufweisen.

Intrinsische Herstellung duroplastbasierter Hybridbauteile

Duroplastische Werkstoffe sind in der Regel härter und steifer als thermoplastische FVK. Zusätzliche Vorteile ergeben sich durch eine hohe Wärmebeständigkeit, geringe Wasseraufnahme und Entflammbarkeit. In Kombination mit CFK sind sie daher prädestiniert für Hochleistungsanwendungen [8]. Im Rahmen des ILH gibt es eine Vielzahl an Forschungsprojekten in Bezug auf diese Werkstoffklasse.

Im Rahmen des durch die DFG geförderten Projektes „HerKoLas“ wurde ein dreidimensionales hybrides Bauteil bestehend aus einem laserstrukturierten Aluminiumblech und einem epoxidharzbasiertes CFK-Prepreg (Kurzform für englisch: pre-impregnated, deutsch: vorimprägniert) intrinsisch hergestellt. Dabei erfolgt die Aushärtung des Harzsystems, die Formgebung sowie der Fügeprozess in einem Schritt, sodass ein zusätzlicher Verbindungsprozess der unterschiedlichen Werkstoffe vermieden werden kann.

Bei Bauteilen in hybrider Bauweise sind die durch die Prozessparameter resultierenden

Haftungseigenschaften von großer Bedeutung. Zur Bestimmung eines Optimums wurden ebene Probenkörper unter Variation der Oberflächenstruktur mittels Laser und der Aushärtungsparametern hergestellt. Dabei wurde die Aushärtungstemperatur und -zeit sowie der Pressdruck variiert. Die Hafteigenschaften wurden anschließend mittels eines Druck-Scherversuchs (Shear Edge-Methode) getestet, die im Vergleich zum Scherzug- oder Kurzbalkenbiegeversuch durch eine einfache Probenvorbereitung und homogene Spannungskonzentration gekennzeichnet ist [9–11]. Durch die Analyse der ermittelten Kennwerte konnte für die Herstellung des Hutprofils eine optimale Kombination von Prozessparametern ermittelt werden [12].

Zur Herstellung des dreidimensionalen Hutprofils wurde ein Presswerkzeug konzipiert, welches ein Austritt des Harzes während der Herstellung durch ein angepasstes Dichtungskonzept vermeidet. Ein optimales Eigenschaftsprofil der CFK-Komponente wurde mittels numerischer Methoden über eine geeignete Ausrichtung der Fasern ermöglicht. Ein hergestelltes Hutprofil ist in Abb. 1 dargestellt.

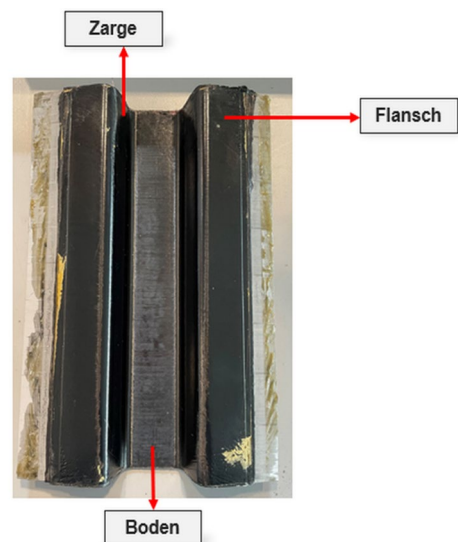


Abbildung 1: Intrinsisch hergestelltes Hybrid-Hutprofil

Aus den hergestellten Hutprofilen wurden Proben aus verschiedenen Bereichen (Zarge, Flansch u. Boden) extrahiert (siehe Abb. 1), um die Haftungseigenschaften zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Haftung aus dem Hutprofil (ca. 41 MPa) höher als die aus den ebenen Probenkörpern ist (ca. 16 MPa). Grund dafür könnte der angepasste Lagenaufbau sein, da bei den ebenen Probenkörpern eine unidirektionale Faserausrichtung vorliegt.

Eine weitere Herausforderung bei hybriden Bauteilen sind die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe. Bei einer intrinsischen Verbindungsausbildung entstehen Eigenspannungen in den hergestellten FVK-Metall Schichtverbunden. Diese Herausforderung wird im DFG-Vorhaben „*Eigenspannung I + II*“ sowohl numerisch als auch experimentell analysiert.

Ausgehend von einer heterogenen Mikrostruktur wurde ein thermo-chemisch-mechanisches Modell erstellt. Dabei wurden die aushärtungsabhängigen Eigenschaften wie die Elastizität, die chemische Schwindung sowie der Wärmeausdehnungskoeffizient berücksichtigt, um die Eigenspannungen in hybriden Metall-CFK-Platten zu analysieren. Mit dem erstellten Modell wurde die intrinsische Herstellung einer Stahl-CFK-Platte simuliert und die resultierenden Eigenspannungen analysiert. Die Ergebnisse wurden ebenfalls experimentell mittels der Bohrlochmethode validiert. Dabei stimmten die Simulationsergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen gut überein [13, 14].

Darüber hinaus wurde in einem weiteren Forschungsprojekt erforscht, wie die Eigenspannungen von hybriden Strukturen reduziert werden können. Im Projekt „*SMPS*“ der

Förderlinie progres.nrw – RESEARCH wurden im Vorfeld Druckspannungen in das Aluminiumblech eingebracht, um die im Rahmen der intrinsischen Verbindungsausbildung entstehenden Zugspannungen im Metall auszugleichen. Dadurch kann die thermische Durchbiegung einer dreidimensionalen hybriden Struktur aus CFK und Aluminium um bis zu 70% reduziert werden.

Neben der Verstärkung von Blechstrukturen wurde die prozessintegrierte Hybridisierung von rotationssymmetrischen Bauteilen im ERDF-Vorhaben „*sediWe*“ erforscht. Genutzt wird dafür ein Injektionsverfahren (engl.: Resin-Transfer-Molding, kurz: RTM) zur Verarbeitung eines epoxidbasiertes Harzsystems mit einem CFK-Gellege. Forschungsschwerpunkte liegen auf einer Oberflächenstrukturierung der Stahlwelle zur Optimierung der Adhäsion, unterschiedlichen Dichtungskonzepten für den Injektionsprozess und Reinigungssystemen für die Aufbereitung des verwendeten Werkzeugs. Eine Anwendung des Verfahrens ist für gewichtsoptimierte Antriebswellen denkbar [15, 16].

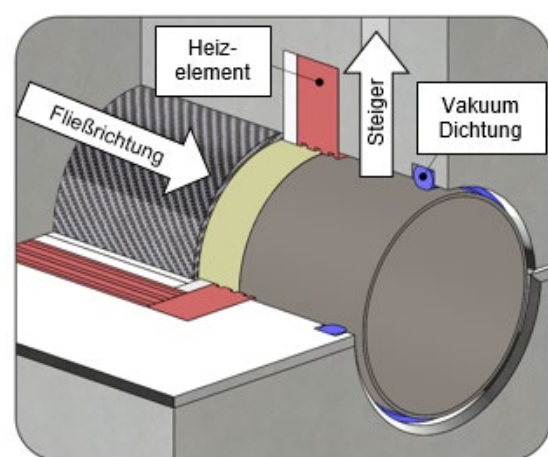


Abbildung 2: Herstellungsprinzip der Hybridwelle mit innovativem Dichtungskonzept [16]

Nachhaltige Heizelemente auf Basis rezyklierter Carbonfasern

Auf dem globalen Markt zeigt sich die hohe Bedeutung von CFK für Leichtbauanwendungen durch eine stetige Zunahme der prognostizierten Nachfrage nach Kohlenstofffasern von rund 10 % innerhalb der nächsten Jahre [17]. Analog dazu ist damit zu rechnen, dass in den nächsten Jahren auch der Anteil von CFK-Altbauteilen ansteigt. Je nach Bauweise enthalten z. B. Rotorblätter von Windkraftanlagen 5 – 20 % CFK. Für Deutschland werden dadurch pro Jahr eine reine Abfallmenge von CFK im Bereich von 1.000 – 3.000 Tonnen erwartet [18].

Vor dem Hintergrund steigender CFK-Abfallmengen ist es im Sinne der Kreislaufwirtschaft deshalb von essentieller Bedeutung die Akzeptanz dieser Sekundärmaterialien zu steigern, indem innovative Anwendungsfelder erschlossen werden. Besonders solche Anwendungen sind vielversprechend, in denen neben mechanischen Eigenschaften weitere, inhärente Merkmale der Kohlenstofffaser nutzbar gemacht werden. Hierzu zählt etwa die Beständigkeit gegen Chemikalien, die Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung oder die elektrische Leitfähigkeit. Aufgrund ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit können Kohlenstofffasern durch das Anlegen einer elektrischen Spannung als Widerstandsheizelement für Infrartheizungen genutzt werden.

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojekt „carboHEAT“ wurde ein mehrschichtiges, leichtbaugerechtes Hybridsystem mit funktionsintegriertem Flächenheizelement entwickelt. Das Flächenheizelement besteht aus einem Vlies aus recycelten Kohlenstofffasern und duromerem Matrixsystem. Die Funktionsweise basiert auf der Nutzung der

elektrisch leitfähigen Kohlenstofffasern als Heizwiderstand. Die hybride Leichtbaustruktur kommt beispielhaft als Bodenstruktur in Campingfahrzeugen zum Einsatz. In der nachfolgenden Abbildung wird eine schematische Darstellung der Hybridstruktur mit dem jeweiligen Anforderungsprofil der Einzelwerkstoffe dargestellt.

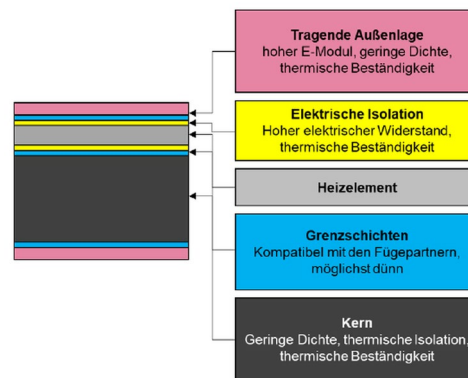


Abbildung 3: Anforderungen an die Einzelwerkstoffe des Hybridverbunds

Durch die gezielte Ausrichtung der rCF-Lagen, der Grammatur sowie die Art der Kontaktierung kann der Widerstand der Heizelemente je nach geforderter Randbedingung angepasst werden, so dass für die Funktion der Beheizung ein niedriger Widerstand erreicht werden konnte. Bei der Bestromung der kontaktierten rCF-Vliesen konnte das thermische Potential gezeigt werden. Bereits beim Anlegen niedriger Spannungen von 12 V wurden Temperaturen von über 100 °C erreicht.

Weiterhin wurde ein aus anwendungsgerecht ausgewählten solitären Werkstoffe bestehender hybrider Demonstrator mit integriertem Heizelement ausgelegt, hergestellt und getestet. Im Vergleich zur Referenzstruktur aus Grobspanplatten weist der Demonstrator ähnliche Steifigkeitswerte auf. Durch den Einsatz ausgewählter Werkstoffe kann im Vergleich zur Referenz eine deutliche Massensparnis von bis zu 44 % erzielt werden.

Wirtschaftlicher Leichtbau auf Basis von Thermoplasten

Duroplastische FVK sind aufgrund hoher Materialkosten, einem kosten- und zeitintensiven Fertigungsprozess sowie einer begrenzten Recyclingfähigkeit Hochleistungsanwendungen vorbehalten. Im Vergleich dazu können thermoplastische FVK für Großserienanwendungen eingesetzt werden, da sich diese Werkstoffe kosten- und zeiteffizient verarbeiten lassen. Ein essentieller Vorteil ergibt sich dadurch, dass thermoplastische Matrixwerkstoffe nahezu beliebig oft wiederaufgeschmolzen werden können, sodass der Werkstoff nach Beendigung des Lebenszyklus aufbereitet und der Wertschöpfungskette erneut zugeführt werden kann [19].

Im Rahmen des ILH beschäftigen sich eine Vielzahl an Forschungsprojekten mit dem Einsatz von Glasfasermattenverstärkten Thermoplasten (GMT). Im Vergleich zur Anwendung von kurzfaserverstärkten Thermoplasten im Spritzgussverfahren, können durch das GMT größere Faserlängen eingesetzt werden. Dies resultiert in einem verbesserten mechanischen Eigenschaftsprofil bei einer hohen Gestaltungsfreiheit [8]. In Kombination mit metallischen Blechwerkstoffen können gewichtsoptimierte Bauteile durch eine beanspruchungsgerechte Gestaltung des GMT realisiert werden. Aufgrund der schlechten Affinität des Kunststoffes zum Metall ist dazu eine haftvermittelnde Schicht notwendig. Erste Ansätze finden sich dazu in der Entwicklung eines hybriden Vorderachsträgers (vgl. Abb. 4) im Fördervorhaben „*IFiH*“ (Ziel2.NRW). Gegenüber der Referenz aus konventioneller Stahlbauweise lässt sich eine Gewichtseinsparung von bis zu 30 % verzeichnen. Jedoch erfolgt die Fertigung der Oberschale aus Aluminium und Unterschale aus GMT

getrennt voneinander, sodass ein zusätzlicher Prozessschritt zum Fügen notwendig ist [20].



Abbildung 4: Hybrider Vorderachsträger [20]

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde im Projekt „*IMA-Fließpressen*“ (progres.nrw – RESEARCH) ein für Biegebelastungen optimierter hybrider Versuchsträger entwickelt (vgl. Abb. 5). Durch die Anordnung des Metalls in den Randschichten kann die Steifigkeit enorm gesteigert werden. Im Vergleich zum Vorderachsträger erfolgt die Verbindungsausbildung simultan zur Formgebung des GMT, sodass sich für potentielle Anwendungen Einsparungen in der Anlagentechnik sowie im Energie- und Kosteneinsatz ergeben [21].

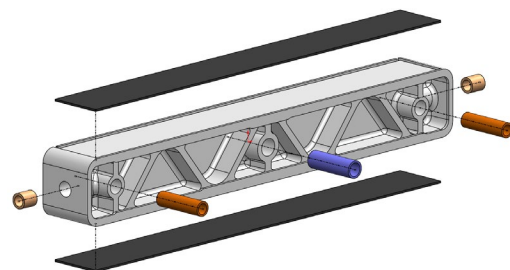


Abbildung 5: Hybrider Biegebalken [21]

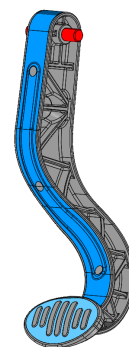


Abbildung 6: Hybrides Bremspedal [22]

Biegeoptimierte Strukturen im Kontext von thermoplastischen FVK – Metall Hybriden können im Automobil bspw. für Bremspedale eingesetzt werden. Im ZIM-Kooperationsprojekt „HyBend“ wurde das Prinzip aus [21] auf die komplexe Struktur des Bremspedals erweitert (vgl. Abb. 6). Über einen mehrteiligen Einfallkern im Werkzeug können auch Hinterschnitte erzeugt werden, sodass für die Aufnahme der Koppelstange zum Bremskraftverstärker keine zusätzlichen Funktionselemente benötigt werden [22]. Über weitere Studien wird untersucht inwiefern die Grenzschicht zwischen dem Metall und FVK optimiert werden kann, um eine bestmögliche Verbindungsfestigkeit zu erzielen [23].

Ökobilanzierung (LCA) als Werkzeug zur Bewertung der Umweltwirkungen hybrider Bauweisen

Die Bewertung der ökologischen Eigenschaften von hybriden Bauteillösungen bedarf einer ganzheitlichen Analyse des Produktlebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zum Lebenszyklusende. Der größte Hebel zur Minimierung der Umweltwirkungen liegt in der Produktentwicklungsphase und in der Entscheidung über die verwendeten Werkstoffe und Verarbeitungsprozesse. In einem Kooperationsprojekt wurden daher methodische Ansätze entwickelt, um Ökobilanzierungen (LCAs) in den Produktentwicklungsprozess von Leichtbaulösungen zu integrieren. Da entscheidende LCA-Einflussparameter, wie bspw. der Strommix und die Materialherstellungsrouten, sich in den kommenden Jahren voraussichtlich verändern werden, bestand ein Ziel der Untersuchung darin, zukünftige Entwicklungsszenarien dieser Einflussparameter in der LCA-Untersuchung zu berücksichtigen. Als

Untersuchungsgegenstand diente ein Crash-Management-System als sicherheitsrelevante Baugruppe in Automobilen (vgl. Abb. 7). Basierend auf einer Stahlreferenz wurden durch Finite-Elemente-Simulationen verschiedener Lastfälle eine Aluminium- und eine hybride Leichtbauvariante mit gleichen mechanischen Eigenschaften, aber geringeren Massen (10 – 48 %) abgeleitet [24].

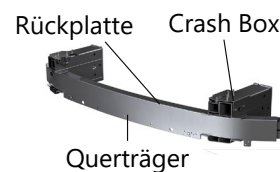


Abbildung 7: Exemplarisches Crash-Management System mit Kennzeichnung der Komponenten [24]

Unter Berücksichtigung aktueller Prozessrouten zur Herstellung dieser Materialvarianten, einer Nutzung in einem batterieelektrischen Mittelklassefahrzeug und einem äquivalenten Verwertungsprozess am Lebenszyklusende wurden die Umweltwirkungen ermittelt und analysiert. Diese Analyse diente als Grundlage, um die LCA-Hauptinflussfaktoren für die drei Materialvarianten zu identifizieren. Dazu zählen, neben dem verwendeten Strommix, die Herstellungsprozesse von Stahl, Aluminium sowie von Kohlenstofffasern und Matrixwerkstoff für die Hybridlösung. Bei den Prozessschritten zur hybriden Bauteilherstellung erweisen sich die Prozessschritte der CFK-Prepreg-Herstellung, das Umformen und Aushärten sowie die Kathodische Tauchlackierung (KTL) als wesentliche Treiber der Umweltwirkungen. Auf Basis einer umfassenden Literaturstudie zu zukünftigen Entwicklungen der identifizierten Hauptinflussfaktoren wurden potentielle Umweltwirkungen für die drei Materialvarianten bis zum Jahr 2050 abgeschätzt [24].

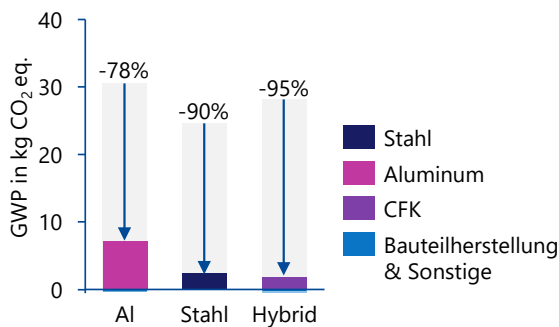


Abbildung 8: Potentiell Entwicklung des Treibhauspotentials der Produktionsphase bis 2050 im Vergleich zu heute [24]

Dabei zeigte sich, dass durch Energieeffizienzmaßnahmen, die Umstellung der Faser- und Matrixherstellungsrouten sowie die umfassende Verwendung regenerativer Energien die Treibhausgasemissionen in der Produktionsphase der hybriden Leichtbauvariante um bis zu 95% verringert werden können [24].

Zusammenfassung

Im Rahmen diverser Forschungsvorhaben konnte nachweislich gezeigt werden, dass die Kombination von artverschiedenen Werkstoffen zu einem Hybridsystem zu vorteilhaften Bauteileigenschaften führt. Ein entscheidender Beitrag zur Nachhaltigkeit kann allerdings nur gewährleistet werden, wenn der resultierende Energiebedarf während der Materialbereitstellung, der Produktion und der Nutzungsphase geringer ist, als bei vergleichbaren Komponenten aus homogenen Werkstoffsystemen. Darüber hinaus müssen energieeffiziente und materialschonende Methoden zur Trennung des hybriden Werkstoffsystems erarbeitet werden, sodass die Werkstoffe wiederaufbereitet und erneut der Wertschöpfungskette hinzugefügt werden können.

Das [Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen \(ILH\)](#), bestehend aus Fachgruppen aus den Ingenieurs- und Naturwissenschaften, ist bestrebt sich den vorliegenden Heraus-

forderungen zu stellen und über kooperative Forschungsvorhaben Lösungswege zu erarbeiten. Dies basiert zunächst auf Beiträgen zur Grundlagenforschung zur Erlangung eines fundierten Verständnisses über das Materialverhalten der jeweiligen Werkstoffsysteme und insbesondere der agierenden Interaktionen in der Grenzschicht des Hybridverbunds. Folgend kann das Materialverständnis auf Demonstrationsstrukturen und reale Anwendungsobjekte transferiert werden, um die Wirkungsweise in einem serienähnlichen Zustand zu demonstrieren. Über ein großes Netzwerk zu klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) bis hin zu Großunternehmen wie diverser OEMs erfolgt ein fortlaufender Austausch zu den vorherrschenden Anforderungen aus der Industrie. Mittels kooperativer Fördervorhaben können die Unternehmen mit dem [ILH](#) zusammenarbeiten und den Serieneinsatz innovativer Bauteilstrukturen vorbereiten.

Autor*innen des Lehrstuhls für Leichtbau im Automobil (LiA)

Caterina Linnig, M.Sc.

Dr.-Ing. Deviprasad C. Jayasankar

Julian Lückenkötter, M.Sc.

Moritz Ostermann, M.Sc.

Shuang Wu, M.Sc.

Informationen zum Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil (LiA)

Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Tröster promovierte 1994 im Bereich der Hochdruckphysik an der Universität Paderborn. Nach diversen Forschungsaufenthalten, seiner Habilitation im Jahr 2003 im Bereich der Experimentalphysik und einer Leitungsfunktion bei einem Automobilzulieferer ist er seit 2007 Gründer und Leiter des Lehrstuhls für Leichtbau im Automobil. Prof. Tröster erforscht verschiedene Inhalte des automobilen Leichtbaus und verwandten Branchen. Dazu gehören unter anderem die Prozessierung hochfester Stähle, die additive Fertigung von metallischen Strukturen, die Kombination von Faserverbundwerkstoffen mit metallischen Werkstoffen in Hybridsystemen und die numerische Abbildung der jeweiligen Fertigungsvorgänge und Bauteilstrukturen. Darüber hinaus ist Prof. Tröster Gründer und 1. Vorsitzender des Instituts für Leichtbau mit Hybridsystemen (ILH).

Referenzierte Forschungsvorhaben

- **HerKoLas** – Energieeffiziente Herstellung und mechanismenbasierte Charakterisierung des Korrosionsermüdungsverhaltens von laserstrukturierten Hybridverbunden (DFG, 01.03.2020 – 30.04.2024)
- **Eigenspannungen I** – Analyse und Bewertung von Eigenspannungen in intrinsisch gefertigten Kunststoff-Metall-Schichtverbunden (DFG, Phase 1, 01.06.2018 – 31.01.2021)
- **Eigenspannungen II** – Analyse und Bewertung der Auswirkungen von Eigenspannungen auf den Schädigungsverlauf in intrinsisch gefertigten Kunststoff-Metall-Schichtverbunden unter statischer und zyklischer Last (DFG, Phase 2, 01.01.2023 – 30.06.2025)
- **SMPS** – Reduzierung der thermischen Eigenspannungen von Faserkunststoff-Metall-Laminaten durch gezielte Metall-Vorspannung (progress.nrw – RESEARCH, 01.08.2022 – 31.01.2023)
- **sediWe** – Herstellung FKV-Bauteile und Metall-FKV-Hybridbauteile mit neuartigen selbstabdichtenden Werkzeugen (ERDF – European Regional Development Fund 2014-2020, 01.05.2018 – 31.07.2020)
- **carboHEAT** – Entwicklung einer hybriden Leichtbaustruktur mit funktionsintegriertem Flächenheizelement aus recycelten Kohlenstofffasern (DBU, 15.02.2021 – 14.02.2023)
- **IFiH** – Innovative Fahrwerkskomponente in Hybridbauweise (NRW Ziel 2-Programm, 01.10.2021 – 31.08.2015)
- **IMA-Fließpressen** – IMA-Fließpressen von hybriden GMT-Metall-Strukturen (progress.nrw – RESEARCH, 01.08.2020 – 31.01.2021)
- **HyBend** – Verfahrensentwicklung zur einstufigen Herstellung biegebelastungsoptimierter Hybridträger aus Metallgurten und GMT-Stützkern (ZIM/AiF, 01.05.2021 – 31.10.2023)

Literaturverzeichnis

- [1] K. Dröder and T. Vietor, *Technologies for economical and functional lightweight design*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [2] A. Ulbricht, "Schienenfahrzeug in CFK-intensiver Bauweise," *Lightweight Des*, vol. 12, no. 2, pp. 36–41, 2019, doi: 10.1007/s35725-019-0009-7.
- [3] E. Witten and V. Mathes, "Der Composites-Markt Europa: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Chancen," [Online]. Available: https://www.avk-tv.de/files/publications/files/avk_marktbericht_2023.pdf
- [4] J. Bachmann, C. Hidalgo, and S. Bricout, "Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review," *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 60, no. 9, pp. 1301–1317, 2017, doi: 10.1007/s11431-016-9094-y.
- [5] K. Pudenz, *Der neue BMW 7er mit Carbon Core: 130 kg leichter*. [Online]. Available: <https://www.springerprofessional.de/automobil---motoren/werkstoffe/der-neue-bmw-7er-mit-carbon-core-130-kg-leichter/6585360> (accessed: Nov. 28 2023).
- [6] K. Kavitha, R. Vijayan, and T. Sathishkumar, "Fibre-metal laminates: A review of reinforcement and formability characteristics," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 601–605, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.08.232.
- [7] G. Zhu, G. Sun, Q. Liu, G. Li, and Q. Li, "On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes," *Composite Structures*, vol. 175, pp. 58–69, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.04.072.
- [8] AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. (Hrsg.), *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [9] K. A. Weidenmann, L. Baumgärtner, and B. Haspel, "The Edge Shear Test - An Alternative Testing Method for the Determination of the Interlaminar Shear Strength in Composite Materials," *MSF*, 825-826, pp. 806–813, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.806.
- [10] F. Rosselli and M. H. Santare, "Comparison of the short beam shear (SBS) and interlaminar shear device (ISD) tests," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, no. 6, pp. 587–594, 1997, doi: 10.1016/S1359-835X(97)00009-2.
- [11] F. Behnisch, P. Rosenberg, K. A. Weidenmann, and F. Henning, "Investigation of the matrix influence on the laminate properties of epoxy- and polyurethane-based CFRPs manufactured with HP-RTM-process," in Lyon, France, 2017, p. 180003.
- [12] S. Wu *et al.*, "Adhesion properties of the hybrid system made of laser-structured aluminium EN AW 6082 and CFRP by co-bonding-pressing process," *The Journal of Adhesion*, pp. 1–29, 2023, doi: 10.1080/00218464.2023.2245758.
- [13] T. Wu *et al.*, "Experimental Analysis of Residual Stresses in CFRPs through Hole-Drilling Method: The Role of Stacking Sequence, Thickness, and Defects," *J. Compos. Sci.*, vol. 6, no. 5, p. 138, 2022, doi: 10.3390/jcs6050138.
- [14] S. Tinkloh, T. Wu, T. Tröster, and T. Niendorf, "The Effect of Fiber Waviness on the Residual Stress State and Its Prediction by the Hole Drilling Method in Fiber Metal Laminates: A Global-Local Finite Element Analysis," *Metals*, vol. 11, no. 1, p. 156, 2021, doi: 10.3390/met11010156.

- [15] D.C. Jayasankar, *Advances In RTM Manufacturing Of Metal-FRP Hybrids By Self-Sealing And In-Mold Cleaning Techniques*. Dissertation. Universität Paderborn., 2023.
- [16] T. Stallmeister, "Self-sealing tool concept for RTM-processes: Twenty-Second International Conference on Composite Materials (ICCM22)," Melbourne, Aug. 14 2019.
- [17] E. Witten and A. Schuster, "Der Composites-Markt Europa: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Chancen: Composites-Marktbericht 2019.,"
- [18] C. Kühne, D. Stapf, P. Holz, W. Baumann, S. Mülhopt, "Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter," 2022.
- [19] C. Hopmann, A. Böttcher, K. Fischer, "Untersuchungen von Haftverbundansätzen und Haftfestigkeit zur intrinsischen Herstellung flächig verbundener Hybride aus endlosfaserverstärktem Thermoplast und Metall," *Zeitschrift Kunststofftechnik*, no. 9, pp. 253–274, 2013.
- [20] S. Pöhler, *Konzeptionierung und Auslegung eines Vorderachsträgers in hybrider Leichtbauweise im C-Segment*. Dissertation. Aachen: Shaker Verlag, 2021.
- [21] T. Stallmeister, *Verfahrensentwicklung zur einstufigen Herstellung von biegebelastbaren Hybridstrukturen im Fließpressprozess: Dissertation*, 2022.
- [22] D.C. Jayasankar, T. Stallmeister, J. Lückenkötter, T. Tröster, "In-Mold Assembly of Hybrid GMT-Steel Brake Pedals by Compression Molding: 5th International Conference on Light Materials - Science and Technology LightMAT 2023," Trondheim, Jun. 21 2023.
- [23] J. Lückenkötter, S. Aydin, T. Marten, T. Tröster, "Analysis and Optimization of Joint Formation in Hybrid Compression Molding," 2023.
- [24] M. Ostermann *et al.*, "Integrating Prospective Scenarios in Life Cycle Engineering: Case Study of Lightweight Structures," *Energies*, vol. 16, no. 8, p. 3371, 2023, doi: 10.3390/en16083371.