

# Innovationsbericht 2024

## Innovation Report 2024

---

Institut für Systemleichtbau  
Institute of Lightweight Systems

# INHALT

## Contents

### 6 **DAS INSTITUT IM ÜBERBLICK**

*The institute at a glance*

### 8 **MATERIAL**

*Material*

- 10 [Mehr als nur ein Klebstoff - Sensorische Klebefugen zur Strukturüberwachung von Windkraftrotorblättern](#)  
*More than just an adhesive - sensory adhesive joints for structural monitoring of wind turbine rotor blades*
- 12 [Technologie im Test: Leckagesichere Wasserstofftanks dank Bulge-Prüfstand](#)  
*Testing new technology: Leak-proof hydrogen tanks thanks to the Bulge test rig*
- 14 [Strukturelles Kleben hält den Flüssigwasserstofftank im Flugzeug zusammen](#)  
*Adhesive bonding ensures structural integrity of airworthy liquid hydrogen tanks*
- 16 [Messen mit Licht – Glasfasern ermitteln Verformung von Faserverbundbauteilen](#)  
*Measuring with light - glass fibres determine deformation of fibre composite components*

### 18 **METHODEN**

*Methods*

- 20 [PeriLab - Next Generation Peridynamic Simulation](#)  
*PeriLab - Next Generation Peridynamic Simulation*
- 22 [Unter Druck: Verlängerte Lebensdauer von Wasserstoffdrucktanks](#)  
*Under pressure: Extended service life of hydrogen pressure tanks*
- 24 [Schadentoleranz verbessern: Neue Methoden für ein optimiertes Flugzeugdesign](#)  
*Improving damage tolerance: New methods for optimized aircraft design*
- 26 [Eiskalt durchschaut – KI-basierte Risserkennung in der Kryomikroskopie](#)  
*Ice cold vision - AI-based crack detection in cryomicroscopy*
- 28 [Ich sehe was, was Du nicht siehst - Vorhersage von Brandprüfungsergebnissen mittels KI](#)  
*I spy with my little eye - Predicting fire test results with AI*

### 30 **KONSTRUKTION**

*Construction*

- 32 [Funktionsintegrierte und hybride Bauweisen für zukünftige Rumpfsegmente](#)  
*Functionally integrated and hybrid designs for future fuselage segments*
- 34 [Leichte Strukturen, starke Verbindungen: Das Elektrische-System-Netzwerk in multifunktionaler Bauweisen](#)  
*Lightweight structures, strong connections: The electrical system network in a multifunctional design*
- 36 [Windkraftanlagen > Wolkenkratzer? Design für Rotorblätter > 150 m](#)  
*Wind turbines > skyscrapers? Design of rotor blades > 150 m*
- 38 [Diese Hinterkantenklappe für ein Winglet ist FAMoUS – Druckaktuierte Steuerflächen für bessere Effizienz](#)  
*This Winglet-Tab is FAMoUS - Pressure actuated control surfaces for higher efficiency*

40

### **PRODUKTION**

*Production*

- 42 [Großes fängt oft klein an: Systemleichtbau als Kleinflugzeugtechnologie](#)  
*Big things often start small: lightweight systems as small aircraft technology*
- 44 [Die AFP-Welt rotiert – LH2-Tankstrukturen aus CFK](#)  
*The AFP world rotates - LH2 tank structures made of CFRP*
- 46 [Plug & Play – Mühelos zur digitalisierten Fertigung mit DigiDAQ](#)  
*Plug & Play - Digitalized production simplified with DigiDAQ*
- 48 [Komplexe, hochintegrierte Leichtbausysteme – Additive Funktionalisierung macht's möglich](#)  
*Complex, highly integrated lightweight construction systems - Additive functionalisation makes it possible*

50

### **SYSTEM**

*System*

- 52 [Überwachung von hochbelasteten Bolzenverbindungen](#)  
*Monitoring of highly stressed bolt connections*
- 54 [Adaptive Rotorblätter mit STAR-Qualitäten gegen Lärm und Vibrationen](#)  
*Adaptive rotor blades with STAR qualities against noise and vibrations*
- 56 [Smarte Verkleidungsteile für die Flugzeugkabine der Zukunft](#)  
*Smart linings for the aircraft cabin of the future*
- 58 [Innovative Schallschutzlösungen mit akustischen Metamaterialien](#)  
*Innovative soundproofing solutions with acoustic metamaterials*

60

### **NACHHALTIGKEIT**

*Sustainability*

- 62 [Kreislaufwirtschaft und Leichtbau im Bausektor: Viel Potenzial für rezyklierte Kohlenstofffasern](#)  
*Circular economy and lightweight design in the building sector: A multitude of potential applications for recycled carbon fibres.*
- 64 [Luftfahrt im Wandel: Green Deal-Meilenstein für nachhaltige Bauteil-Wiederverwendung](#)  
*Aviation in transition: Green Deal milestone for sustainable component reuse*

66

### **TRANSFER**

*Transfer*

- 68 [Transfer im Systemleichtbau – Neue Produkte durch Anwendungsforschung](#)  
*Transfer in lightweight system construction - new products through application research*
- 70 [Systemleichtbau international – Das DLR auf der JEC World 2024](#)  
*International lightweight systems - DLR at the JEC World 2024*

72

### **DAS INSTITUT IM DETAIL**

*The institute in detail*

- 88 [Veröffentlichungen 2023/2024](#)  
*Publications*
- 90 [Patente 2023/2024](#)  
*Patents*

# VORWORT

Liebe Leserinnen und Leser unseres Innovationsberichts 2024!

Wir freuen uns, Ihnen auch dieses Jahr neueste Forschungsergebnisse aus dem Systemleichtbau präsentieren zu können.

Vor fast zwei Jahren haben wir einen bedeutenden Schritt in der Entwicklung unseres Instituts unternommen: Mit einem neuen Namen und einer neuen Organisationsstruktur haben wir uns für die Herausforderungen der Zukunft neu aufgestellt. Die Erfolge, die wir während dieser Zeit erzielt haben, bestätigen uns in unserem eingeschlagenen Weg.

Systemleichtbau, die Kombination von Materialeichtbau, konstruktivem Leichtbau und Funktionsintegration, macht bewegte Strukturen noch leichter und damit effizienter im Energieverbrauch und sorgt zusätzlich für eine Minimierung des Ressourceneinsatzes. Zugegeben, da liegt ein Spannungsfeld vor: Hochwertiger Leichtbau benötigt hochwertige Werkstoffe und Funktionsintegration bedeutet für eine spätere sortenreine Auftrennung der Strukturen eine Herausforderung. Andererseits können die von uns eingesetzten Werkstoffe über sehr lange Zeiträume genutzt werden. Darum forschen wir auch auf dem Gebiet der Nachhaltigkeitstechnologien und beschäftigen uns mit Methoden zur genauen Bewertung des Lebenszyklus.

Die Speicherung von Wasserstoff für die klimaverträgliche und nachhaltige Luftfahrt der Zukunft ist ein Thema, das uns im vergangenen Jahr intensiv beschäftigt hat und auch weiterhin einen hohen Stellenwert einnimmt. In unseren Fertigungsanlagen in Stade haben wir gezeigt, dass große Tankstrukturen erfolgreich im Automated Fibre Placementverfahren hergestellt werden können. Durch das Lufo-Projekt UpLift haben wir die Gelegenheit erhalten, unsere Testinfrastruktur mit einzigartigen Versuchsständen zur Bewertung von Werkstoffen und Strukturen unter kryogenen Bedingungen auszubauen.

Ganz besonders geht es uns darum, gemeinsam mit Ihnen, unseren Forschungspartnern aus Wissenschaft und Wirtschaft, die besten Ergebnisse schnellstmöglich in die Anwendung zu bringen. Dafür möchten wir Sie mit diesem Innovationsbericht ebenso wie über unseren [Leichtbaublog](#) zeitnah und anschaulich über neue Potenziale des Systemleichtbaus informieren. Wir hoffen, Ihnen mit den Beiträgen dieses neuen Innovationsberichts Anregungen geben zu können für neue Produkte oder Lösungsansätze auf dem Gebiet des Systemleichtbaus und freuen uns über Ihre Rückmeldungen.



Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
Institutsdirektor



Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach  
Stellvertretender Institutsdirektor



Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider  
Innovationsmanager

## Preface

Dear readers of our Innovation Report 2024!

We are delighted to be able to present the latest research results from lightweight system to you again this year.

Almost two years ago, we took a significant step in the development of our institute: With a new name and a new organisational structure, we repositioned ourselves for the challenges of the future. The successes we have achieved during this time confirm that we are on the right track.

Lightweight system construction, the combination of lightweight materials, lightweight design and functional integration, makes moving structures even lighter and therefore more efficient in terms of energy consumption and also minimises the use of resources. Admittedly, there is an area of tension here: High-quality lightweight construction requires high-quality materials and functional integration poses a challenge for the subsequent separation of the structures by type. On the other hand, the materials we use can be utilised over very long periods of time. This is why we are also conducting research in the field of sustainability technologies and are working on methods to precisely assess the life cycle.

The storage of hydrogen for the climate-friendly and sustainable aviation of the future is a topic that has occupied us intensively over the past year and continues to be a high priority. At our production facilities in Stade, we have shown that large tank structures can be successfully manufactured using the automated fibre placement process. The Lufo project UpLift has given us the opportunity to expand our test infrastructure with unique test rigs for evaluating materials and structures under cryogenic conditions.

We are particularly keen to work with you, our research partners from science and industry, to bring the best results into application as quickly as possible. With this innovation report and our [lightweight blog](#), we would like to provide you with timely and clear information about the new Potenzial of lightweight system construction. We hope that the articles in this new innovation report will provide you with ideas for new products or solutions in the field of lightweight system construction and look forward to your feedback.

# DAS INSTITUT IM ÜBERBLICK

Das DLR-Institut für Systemleichtbau entwickelt und erprobt neue Leichtbautechnologien für ressourcenschonende und klimafreundliche Strukturen in Luft- und Raumfahrt, Verkehr und im Energie- und Sicherheitsbereich. Unsere Vision ist der **Intelligente Systemleichtbau für ein emissionsfreies Morgen.**

Drei Säulen bilden den Systemleichtbau: Materialeichtbau, konstruktiver Leichtbau und Funktionsintegration. Im Materialeichtbau sind die auf die Materialdichte bezogenen Festigkeiten und Steifigkeiten von maßgeblicher Bedeutung, im konstruktiven Leichtbau wird durch eine geschickte Konstruktion möglichst wenig Material optimal genutzt und die Integration von aktiven und passiven Zusatzfunktionen in die tragende Struktur erlaubt weitere Masseinsparungen. Damit wird die Leichtbaustruktur vom Systemträger zum System.

Unser Forschungsportfolio umfasst leistungsstarke Werkstoffe, Analysemethoden für den ganzen Lebenszyklus, Funktionen integrierende Leichtbaukonstruktionen, effiziente Fertigungsverfahren für Faserverbundstrukturen im Industriemaßstab, adaptive Struktursysteme sowie die durchgehende Digitalisierung der gesamten Prozesskette. Für die Klärung von Fragen der Materialeigenschaften, Stabilität, Festigkeit sowie des thermischen und akustischen Verhaltens von Komponenten und Bauteilen betreiben wir umfangreiche Versuchseinrichtungen. Dies umfasst ein nach DIN ISO EN 17025 und NADCAP zertifiziertes Prüflabor, thermomechanische Prüfstände, eine Anlage für dynamisches Beulen sowie einen akustischen Transmissionsprüfstand.

Das Institut bildet die Brücke zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung.

Aufseiten der universitären Forschung sind wir durch Professuren, Lehraufträge, Kooperationen und Partnerschaften mit der Technischen Universität Braunschweig, der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, der Technischen Universität Clausthal, der Universität Bremen und der TU Delft verbunden.

Aufseiten der anwendungsorientierten Forschung ist durch die Schaffung des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade, durch das Engagement in einem Kundenzentrum mit Airbus sowie dem virtuellen Produkthaus (VPH) in Bremen, also durch die Forschung „vor Ort“ die Nähe zum industriellen Kunden gewährleistet.

Das Institut engagiert sich auch mit wissenschaftlichem Personal auf dem DLR-Plateau für Kleinflugzeuge in Aachen-Merzbrück, unterstützt die Entwicklung unbemannter Vehikel in Cochstedt und arbeitet aktiv mit im DLR-Forschungswindpark in Krummendeich.



[www.dlr.delsy](http://www.dlr.delsy)



[www.dlr.delzlp](http://www.dlr.delzlp)



[Leichtbau.dlr.de](http://Leichtbau.dlr.de)

# The institute at a glance

The DLR Institute of Lightweight Systems develops and tests new lightweight construction technologies for resource-saving and climate-friendly structures in the aerospace, transport, energy and security sectors. Our vision is **intelligent lightweight system for an emission-free tomorrow.**

Three pillars make up lightweight system construction: lightweight material construction, lightweight design and functional integration. In lightweight material construction, the strengths and stiffnesses related to the material density are of decisive importance; in lightweight design, skilful construction makes optimum use of as little material as possible and the integration of active and passive additional functions into the load-bearing structure allows further mass savings. This turns the lightweight structure from a system carrier into a system.

Our research portfolio includes high-performance materials, analysis methods for the entire life cycle, function-integrating lightweight constructions, efficient manufacturing processes for fibre composite structures on an industrial scale, adaptive structural systems and the end-to-end digitalisation of the entire process chain. We operate extensive testing facilities to clarify issues relating to material properties, stability, strength and the thermal and acoustic behaviour of components and parts. This includes a DIN ISO EN 17025 and NADCAP-certified test laboratory, thermomechanical test benches, a dynamic buckling facility and an acoustic transmission test bench.

The institute forms the bridge between basic research and industrial application.

On the university research side, we are linked to the Technical University of Braunschweig, Otto von Guericke University Magdeburg, Clausthal University of Technology, the University of Bremen and Delft University of Technology through professorships, teaching assignments, co-operations and partnerships.

On the application-oriented research side, the creation of the Centre for Lightweight Production Technology (ZLP) in Stade, the involvement in a customer centre with Airbus and the Virtual Product House (VPH) in Bremen, i.e. research "on site", ensures proximity to industrial customers.

The institute is also involved with scientific personnel on the DLR small aircraft platform in Aachen-Merzbrück, supports the development of unmanned vehicles in Cochstedt and is actively involved in the DLR research wind farm in Krummendeich.

Anlagen und Einrichtungen (von oben nach unten)  
Facilities and equipment (top down):

Faserablage-Anlage (AFP & ATL) GroFi®  
Fibre placement facility (AFP and ATL) GroFi®

Ein Einblick in das 3D-Druck-Labor  
An insight into the 3D printing laboratory

Laborautoklav  
Research autoclave

ECOMAT – Heimat des VPH  
ECOMAT – Home of the VPH

Prüflabor; Airbus-zertifiziert und nach DIN ISO EN/IEC 17025 akkreditiert  
Testing lab; Airbus-certified and accredited according to DIN ISO EN/IEC 17025

Forschungsauroklav BALU®  
Research autoclave BALU®

DLR Wissenswelt Leichtbau – Begegnungsraum für kreative Workshops  
DLR Wissenswelt Leichtbau – Meeting place for creative workshops



## Kontakt / Contact

DLR - Institut für Systemleichtbau

Telefon: +49 531 295-2301  
Telefax: +49 531 295-2875

E-Mail: [leichtbau@dlr.de](mailto:leichtbau@dlr.de)

# MATERIAL

*Material*

CFK-Faserstrang  
*CFRP fibre strand*

10

Mehr als nur ein Klebstoff -  
Sensorische Klebefugen zur Strukturüberwachung von Windkraftrotorblättern  
*More than just an adhesive -  
sensory adhesive joints for structural monitoring of wind turbine rotor blades*

12

Technologie im Test:  
Leckagesichere Wasserstofftanks dank Bulge-Prüfstand  
*Testing New Technology: Leak-Proof Hydrogen Tanks to Bulge Test Rigs*

14

Strukturelles Kleben hält den Flüssigwasserstofftank im Flugzeug zusammen  
*Adhesive bonding ensures structural integrity of airworthy liquid hydrogen tanks*

16

Messen mit Licht – Glasfasern ermitteln Verformung von Faserverbundbauteilen  
*Measuring with light - glass fibres determine deformation of fibre composite components*

# Mehr als nur ein Klebstoff - Sensorische Klebefugen zur Strukturüberwachung von Windkraftrotorblättern

More than just an adhesive - sensory adhesive joints for structural monitoring of wind turbine rotor blades

Autoren:

Dr. rer. nat Thorsten Mahrholz  
Dipl.-Ing. Maximilian Jux



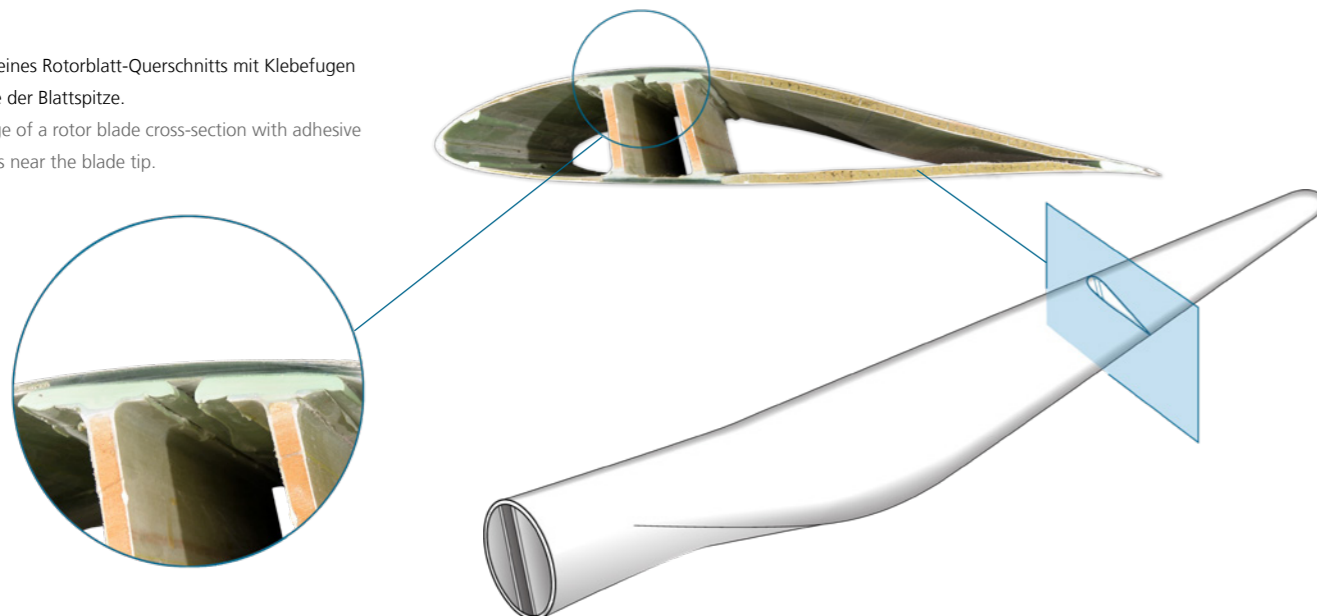
## Summary

Further reduction in energy generation costs in the wind energy sector is closely linked to the increase in the aspect ratio and length of rotor blades. However, the resulting increase in the output and yield of wind turbines also leads to new demands on the strength of the blade structure and thus also on the quality of the manufacturing process. This applies in particular to the load-bearing adhesive joints, which are susceptible to initial damage that is often difficult to detect. However, damages must be recognised early and reliably during maintenance and inspection. As part of a joint project, DLR and partners (Uni Hannover ISD, INVENT, Zeisberg Carbon, ALTRAN) develop sensor-based adhesive joints for the continuous structural health monitoring of rotor blades in operation. This reduces maintenance costs and system down-times. The incorporation of electrically conductive particles into the adhesive material is a promising concept, so that the adhesive joint is accessible for damage detection through changes in resistive and capacitive material properties.

**Um die Energieerzeugungskosten in der Windenergiebranche weiter zu senken, geht der Trend zu Rotorblättern mit immer größerer Streckung und Länge. Die damit einhergehende Steigerung von Leistung und Ertrag der Windkraftanlagen, führt jedoch auch zu neuen Anforderungen an die Festigkeit der Blattstruktur und damit auch an die Qualität des Fertigungsprozesses. Insbesondere gilt dies für die lasttragenden Klebeverbindungen, die anfällig für häufig schlecht detektierbare Initialschäden und somit Ausgangspunkte für progressive Schadensverläufe sind. Bei Wartung und Inspektion müssen Schäden früh und sicher erkannt werden.**

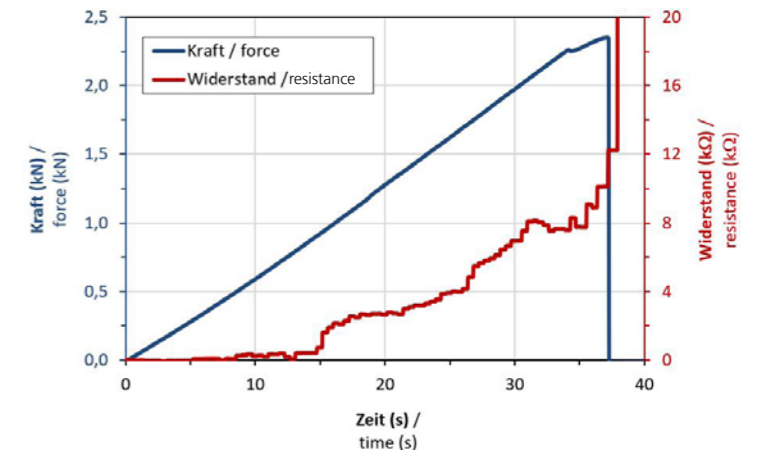
Die Inspektion der Rotorblätter erfolgt gegenwärtig durch Industriekletterer, deren Einsatz mit zunehmender Anlagengröße zeit- und kostenintensiver wird und darüber hinaus mit Stillstandzeiten verbunden ist. Als innovativen Lösungsansatz verfolgt das DLR im Rahmen des BMWK-Verbundprojekts Func2Ad (FKZ: 03EE3069B) in Kooperation mit Forschungspartnern (Uni Hannover ISD) und Industriepartnern (INVENT, Zeisberg Carbon und ALTRAN) die Entwicklung und Prüfung von sensorischen Klebefugen zur kontinuierlichen Strukturüberwachung von Rotorblättern im Betrieb. Die neuartigen Klebefugen kombinieren herkömmliche Klebstoffeigenschaften und inhärente Sensorfunktion. Erforscht wird die Einbringung von elektrisch leitfähigen Partikeln in das Klebstoffmaterial, so dass die Klebefuge durch Veränderungen resistiver und kapazitiver Materialeigenschaften einer Schadensdetektion zugänglich ist. Zur Modifikation eignen sich besonders kohlenstoffbasierte Füllstoffe wie Leitrübe, deren Vorteile in den geringen Dichten gegenüber metallischen Partikeln liegen und zudem als nachhaltige Nebenprodukte bei der Wasserstoffherstellung anfallen. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass die Füllstoffe die Verarbeitungseigenschaften nicht beeinträchtigen und auch zu keiner Verschlechterung der mechanischen Werkstoffeigenschaften führen.

Bild eines Rotorblatt-Querschnitts mit Klebefugen nahe der Blattspitze.  
Image of a rotor blade cross-section with adhesive joints near the blade tip.

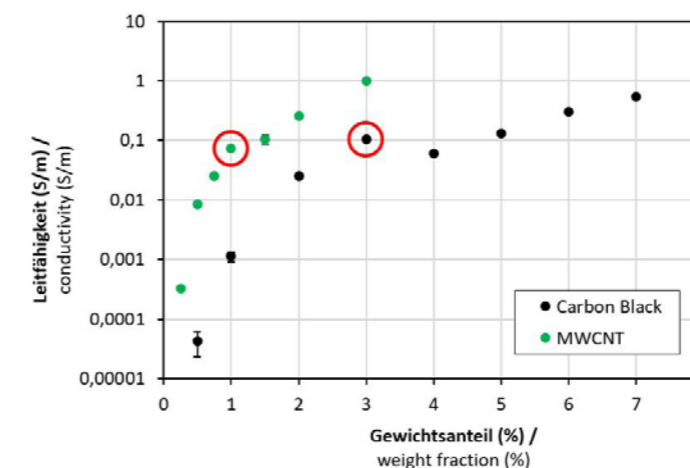


## Schadensermittlung mit leitfähigen Klebstoffen – das Konzept

Grundvoraussetzung für die Detektion von Schäden innerhalb einer Klebeverbindung mittels resistiver Messungen ist eine ausreichend hohe elektrische Leitfähigkeit des Klebstoffs, die durch Zugabe von geeigneten Füllstoffen erreicht wird. Je nach verwendetem Füllstoff baut sich ab einem bestimmten Füllstoffgehalt (Perkulationsgrenze) ein leitfähiges Netzwerk auf. Bei welchem Füllstoffgehalt dies eintritt, ist abhängig von der Füllstoffverteilung (Dispersionsqualität) sowie von Füllstoffanteil, -art und -form. Ist der Grenzwert überschritten, ändert sich die elektrische Leitfähigkeit nur noch geringfügig. Das Detektieren von Schäden erfolgt über eine Aufzeichnung des elektrischen Widerstands (kontinuierlich oder sequenziell). Das Schadensereignis ist an einem sprunghaften Anstieg des elektrischen Widerstands erkennbar. Dieser Effekt ist in der Nähe der Perkulationsgrenze besonders stark ausgeprägt. Neben der Funktionalisierung des Klebstoffs, der auch spezifische Werkstoff- und Applikationseigenschaften erfüllen muss, sind insbesondere geeignete Elektroderungs- und Kontaktierungskonzepte für die Klebefuge zu entwickeln.



Ergebnisse aus Zug-Scher-Versuchen mit Carbon Black-funktionalisiertem Klebstoff. Zeitlicher Verlauf von Kraft und elektrischem Widerstand.  
Results from lap shear tests with carbon black functionalized adhesive. Development of force and electrical resistance over time.



Elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Füllstoffanteils für Carbon Black (Perkulation bei 3 Gew.%) und MWCNT (Perkulation bei 1 Gew.%), jeweils in demselben epoxidbasierten Harzsystem.  
Electrical conductivity as a function of filler content for carbon black (percolation at 3 wt.%) and MWCNT (percolation at 1 wt.%), both in the same epoxy-based resin system.

## Experimentelles Vorgehen für einen Eignungsnachweis – die Umsetzung

Der erste Schritt ist die Ermittlung der füllstoffspezifischen Perkulationsgrenze für ein Klebstoffsystem. Hierfür werden Harzdispersionen mit kohlenstoffbasierten Füllstoffen in variierenden Anteilen hergestellt und anschließend an den gehärteten Couponproben Widerstandsmessungen (Vierleitermessung) durchgeführt. Als Füllstoffe kommen ein Leitrübe und Multi Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) zum Einsatz. Es zeigt sich, dass der Leitrübe eine Perkulationsgrenze von ca. 3 Gew.% aufweist. Für die industriellen MWCNT liegt die Perkulationsgrenze mit ca. 1 Gew.% sogar deutlich niedriger. Mit den beiden optimierten Füllstoffsystemen erfolgten Zug-Scherversuche an einschnittigen Prüfkörpern zur Charakterisierung der Klebefugeneigenschaften. Eine begleitende Widerstandsmessung ermöglicht es Kraftverlauf und Änderung des elektrischen Widerstands zu korrelieren. Den Messkurven ist zu entnehmen, dass eine beginnende Verformung und Schädigung des Probekörpers zu einem Widerstandsanstieg führen, der bei Versagen des Probekörpers gegen unendlich geht. Ursächlich hierfür ist die Unterbrechung des leitfähigen Netzwerks oder der Kontaktierung des funktionalisierten Klebstoffs. Die hier gewählten Füllstoffe sind vielversprechende Kandidaten für die sensorische Strukturüberwachung von Klebefugen. Ergänzend zu den statischen Zug-Schubversuchen sind Rissversuche (Glc-Prüfung) und zyklische Versuche vorgesehen. Auf diesem Wege lassen sich auch kleinere Schäden, die mit fortschreitender Betriebszeit nur langsam wachsen, kontinuierlich überwachen.

# Technologie im Test: Leckagesichere Wasserstofftanks dank Bulge-Prüfstand

Testing new technology: Leak-proof hydrogen tanks thanks to the Bulge test rig

Autoren:

Dr.-Ing. Josef Koord  
Dipl.-Ing. Roman Beck



## Summary

Global climate goals necessitate a massive reduction in greenhouse emissions in aviation. Hydrogen is a promising alternative energy source for aircraft as it produces minimal direct emissions compared to kerosene. A major challenge is storing liquid hydrogen (LH<sub>2</sub>) at cryogenic temperatures. Efficient and safe storage systems are crucial, with carbon fibre-reinforced plastics (CFRP) playing a key role. To ensure leak-proof tanks, concepts like liners, thin-ply laminates, and cryo-optimized materials are explored. The Bulge test offers a novel way to test CFRP for microcracks and leaks, using helium and liquid nitrogen to simulate conditions, accelerating the development of reliable LH<sub>2</sub> tanks.

**Die weltweiten Klimaziele erfordern u. a. eine massive Reduktion von Treibhausgasemissionen auch in der Luftfahrt. Wasserstoff als alternativer Energieträger für Flugzeuge ist eine vielversprechende Lösung, da er im Gegensatz zu Kerosin kaum direkte klimaschädliche Emissionen verursacht. Eine der größten Herausforderungen dabei ist die Speicherung von flüssigem Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) bei extrem niedrigen Temperaturen. Effiziente und sichere LH<sub>2</sub>-Speichersysteme sind entscheidend und dabei spielt der Leichtbau mit carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) eine wichtige Rolle.**

## Herausforderungen des CFK-Tanks

Aktuelle LH<sub>2</sub>-Flugzeugtankkonzepte setzen auf das bewährte Prinzip der Thermoskanne: Ein Vakuum zwischen zwei Tankwänden mit spezieller Isolation (z. B. mittels Multi-Layer) koppelt die Umgebung thermisch ab und minimiert Wärmeverluste. So wird eine hohe Speichereffizienz sichergestellt.

Außerdem sind Leckagen am Tank unbedingt zu verhindern. Die große Temperaturdifferenz zwischen der Herstellung der Tankstruktur im Autoklav bei bis zu 180 °C und dem Betrieb bei -253 °C bewirkt erhebliche thermische Eigenspannungen im Faserverbund. So können Mikrorisse entstehen. Kombinierte thermo-mechanische Belastungen können sogar Mikrorissnetzwerke mit Leckagepfaden durch die Tankwand verursachen. Tritt flüssiger Wasserstoff aus, führt die hohe Expansionsrate beim Übergang in die Gasphase zu einem erheblichen Druckanstieg in der Isolation bis hin zum strukturellen Versagen.

Es gibt drei Hauptkonzepte, um Wasserstofftanks leckagedicht zu gestalten:

- 1. Liner-Konzept:** Hier wird eine Metall- oder Kunststoffbarriere eingesetzt. Allerdings löst diese Methode das eigentliche Problem der Mikrorisse nicht. Weiterhin erhöht ein Liner zusätzlich das Gewicht des Tanks und die Komplexität in der Fertigung und Montage.
- 2. Thin-Ply-Konzept:** Dieses Konzept verwendet besonders dünne Laminatschichten (Thin-Plies), die aufgrund ihrer erhöhten Risszähigkeit die Rissentstehung verhindern sollen.
- 3. Kryooptimierte Materialien:** Dies ist das vielversprechendste Konzept, da es darauf abzielt, mit speziell entwickelten Materialien Mikrorissnetzwerke von vornherein zu verhindern. Dadurch entfallen zusätzliche Barrierschichten, was Gewicht und Fertigungskosten spart.

Die Kombination aus thermischen und mechanischen Belastungen im Betrieb stellt eine große Herausforderung für die Tankentwicklung dar – gerade auch, wenn es darum geht diese Bedingungen an einem Prüfstand genau nachzubilden, zumal diese Belastungen in verschiedene Richtungen wirken und sowohl zyklisch als auch konstant auftreten. Klassische Universalprüfmaschinen stoßen hier an ihre Grenzen, weshalb neue Testmethoden notwendig sind.



Detailansicht des Bulge-Prüfstands  
Detailed view of the bulge test rig

## Der Bulge-Prüfstand

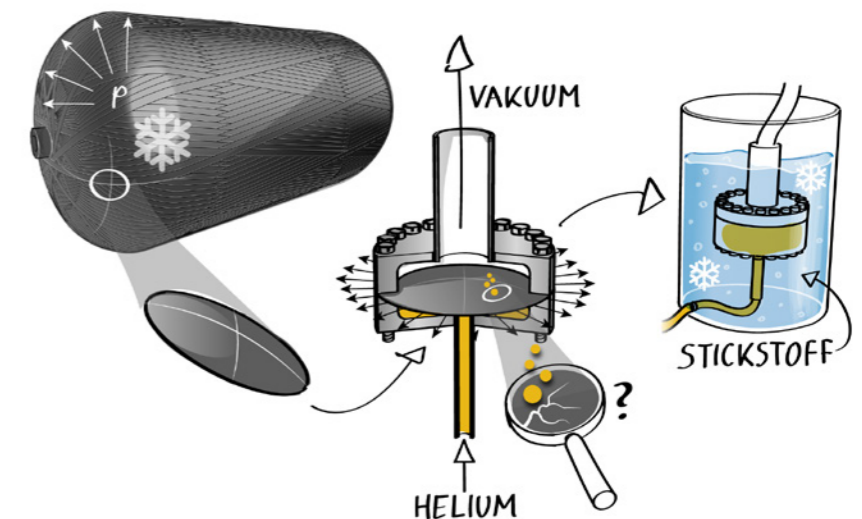
Mikrorisse und Mikrorissnetzwerke in der Tankstruktur nachzuweisen ist extrem schwierig. Mit traditionellen Methoden wie Mikroskopie oder CT-Analyse ist es oft Glückssache, die richtige Stelle zu finden. Der Bulge-Prüfstand bietet hier einen entscheidenden Vorteil. Er ermöglicht es, die Dichtigkeit von CFK-Probekörpern zuverlässig zu testen. Der Probekörper wird dazu in eine Klemmvorrichtung gespannt und auf kryogene Temperaturen abgekühlt. Dann wird Helium bei bis zu 20 bar in eine Kammer gespeist, während in der anderen Kammer Vakuum (1E-02 mbar) vorherrscht. Durch den entstehenden Druckunterschied verformt sich der Probekörper ähnlich wie in einem echten Tank. Ein Massenspektrometer misst den Helium-Leckagestrom, sobald der Probekörper undicht wird. So lassen sich die Grenzen des Materials präzise ermitteln. Der Clou ist die Verwendung von Helium als Ersatzgas für gasförmigen Wasserstoff für die Leckageerkennung und Flüssigstickstoff (LN<sub>2</sub>) als Ersatzmedium für LH<sub>2</sub> zum Kühlen. Ähnliche Molekül- bzw. Atomgrößen und vergleichbare Siedepunkte (-253 °C vs. -196 °C) stellen eine Übertragbarkeit der Ergebnisse mit deutlich reduziertem Aufwand sicher. Mit diesem vereinfachten Vorgehen können schnell wichtige Erkenntnisse, z.B. in Hinblick auf die Bewertung der oben beschriebenen Konzepte für einen leckagefreien LH<sub>2</sub>-Tank, gewonnen werden. Die so entwickelten Lösungen müssen dann unter LH<sub>2</sub>-Bedingungen abschließend ihre Tauglichkeit nachweisen.



Gesamtansicht des Bulge-Prüfstands  
Total view of the bulge test rig

## Zukunftsperspektiven

Die Entwicklung von LH<sub>2</sub>-Tanks aus CFK wirft viele Fragen auf. Der hier vorgestellte Ansatz hilft, grundlegende Fragestellungen sicher, kostengünstig und zeiteffizient zu beantworten und die Tankentwicklung zu beschleunigen. Neben der Beantwortung von Fragestellungen zum Material können mit dem Bulge-Prüfstand auch Konzepte für Durchführungen am Tank erprobt werden.



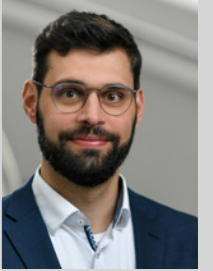
Wirkprinzip des Bulge-Prüfstands  
Working principle of the bulge test rig

# Strukturelles Kleben hält den Flüssigwasserstofftank im Flugzeug zusammen

Adhesive bonding ensures structural integrity of airworthy liquid hydrogen tanks

Autor:

Thomas Gesell, M. Sc.



## Summary

The German government's Climate Protection Plan 2050 demands radical CO2 reductions from the aviation sector, pushing for a transition to hydrogen-based propulsion systems, such as fuel cells with electric propellers or hydrogen-powered gas turbines. This shift presents new challenges, especially an integrating hydrogen storage solutions like lightweight CFRP tanks, currently under research for their Potenzial. Structural adhesives are being considered over traditional rivets for joining these tanks due to their ability to meet strict requirements, such as ensuring leak-tightness and accommodating different thermal expansion coefficients of various materials. The CryoTAST testing facility is used to evaluate adhesives under extreme conditions, providing crucial data for the safe and effective design of bonded joints in liquid hydrogen tanks, considering factors like adhesive thickness variations and their effects on joint performance.

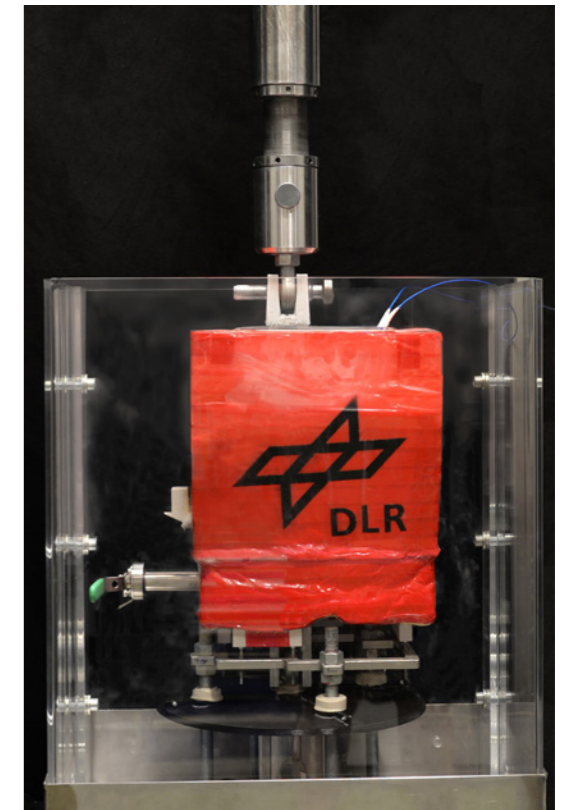
**Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung fordert auch vom Flugzeugbau und -betrieb radikale CO2-Einsparungen. Ein Weg dahin führt von konventionellen hin zu wasserstoffbasierten Antriebssystemen, sei es die Brennstoffzelle mit Elektropropeller oder die wasserstoffbetriebene Gasturbine. Die Integration solcher Antriebssysteme und deren Komponenten, wie insbesondere die Wasserstoffspeicherung, stellt KonstrukteurlInnen vor ganz neue Herausforderungen. Flüssigwasserstofftanks aus CFK werden derzeit am Institut für Systemleichtbau als vielversprechende Leichtbaulösung untersucht. In Kooperation mit Industriepartnern stehen hierbei insbesondere differenzielle Konzepte im Fokus. Wie der Flugzeugrumpf wird auch der CFK-Tank in aktuellen Forschungsprojekten aus einzelnen Segmenten zusammengesetzt.**

## Warum strukturelles Kleben?

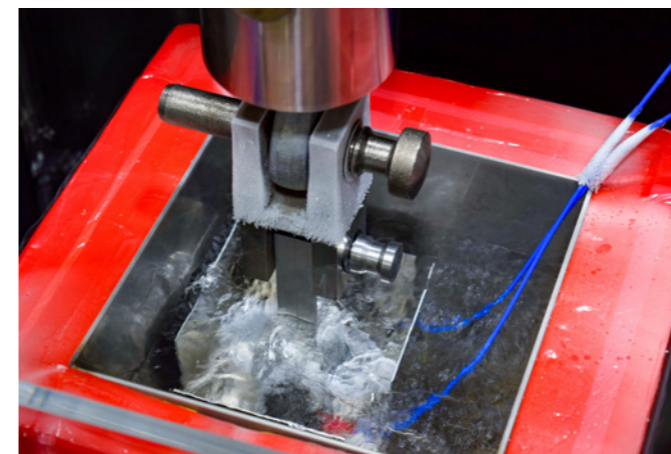
Wohl jeder, der schon einmal etwas verkleben musste, hat die leidvolle Erfahrung gemacht, dass Klebungen unerwartet versagen können. Diese Enttäuschung ist meist auf die Wahl eines ungeeigneten Klebstoffsystems, eine inadäquate Oberflächenvorbehandlung der Fügeteile, ein nicht ausreichendes Verständnis des thermomechanischen Belastungszustands oder Umwelteinflüssen wie Feuchte und Temperaturen zurückzuführen. Aufgrund der Komplexität im Bereich Konstruktion, Dimensionierung, Prozesstechnik und Qualitätssicherung von Klebverbindungen setzt der klassische Flugzeugbau nach wie vor auf Nietverbindungen, wie man sie sonst nur noch an alten Bahnbrücken aus dem 19. Jahrhundert findet. Selbst bei modernsten CFK-Rümpfen setzt man im Bereich der Primärstrukturen aus bewerteten Konservatismus auf Vernietungen zu Lasten von Leichtbaupotenzialen. Im Falle eines luftfahrttauglichen Flüssigwasserstofftanks in duromerer CFK-Bauweise führen neben dem Leichtbaugedanken insbesondere Sicherheitsüberlegungen und Funktionsanforderungen an die Struktur zur Auswahl des Klebens als Fügetechnologie. Hierzu zählen insbesondere strenge Anforderungen hinsichtlich Dichtigkeit (Permeation und Leckage) sowie die Verbindung unterschiedlichster Werkstoffen, wie GFK und CFK mit Aluminium- und Stahllegierungen, sowie die Applikation von Isolationsmaterialien. Neben der reinen strukturellen Tragfähigkeit übernehmen Verklebungen also weitere sicherheitskritische Aufgaben, wie die Gewährleistung von Dichtigkeit, die Überbrückung unterschiedlicher Wärmeausdehnungen im Fügebereich, sowie den gezielten Einsatz und Abbau von thermischen Widerständen in Fügestellen, je nach Erfordernis. Ein hoher Umfang an Funktionsanforderungen und Fügepartnern erfordert eine Vielzahl an Spezialklebstoffen, welche die extremen Temperaturbedingungen von -253 °C ertragen können. Trotz des Einsatzes bewährter Konstruktionsphilosophien, wie „fail-safe“ und „damage tolerance“ bleiben die Verklebungen am Wasserstofftank sicherheitskritisch. Die Auswahl der verwendeten Klebstoffe muss deshalb auf einer umfangreichen und verlässlichen Datenbasis erfolgen. Hierfür wird der CryoTAST-Prüfstand eingesetzt.

## Für was steht eigentlich CryoTAST?

CryoTAST steht für **Cryogenic Thick Adherent Shear Test** und bezeichnet einen am Institut entwickelten Prüfstand zum Screening potenziell geeigneter Klebstoffe bei -196°C. In Anlehnung an die [ASTM D 5656](#) werden mit diesem Prüfstand Dicke-, Zug-, Scherproben getestet. Hierbei handelt es sich um verklebte Aluminiumprobekörper. Mit Hilfe des Prüfstands werden neben dem Schubmodul, die Schubfestigkeit und die charakteristische Spannungsdehnungskurve eines Klebstoffes bestimmt. Diese Datenbasis ist entscheidend zur sicheren Gestaltung und Dimensionierung von geklebten Fügestellen am Flüssigwasserstofftank. Der CryoTAST-Prüfstand ist hierbei die erste Auswahlstufe in einer Kaskade von Klebstofftests. In Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung wird der CryoTAST-Prüfstand derzeit eingesetzt, um das Potenzial von speziellen Kryoklebstoffen im Vergleich zu in der Luft- und Raumfahrt etablierten Strukturklebstoffen zu bewerten. Aus Sicht der Industrie ist heute bereits absehbar, dass Fertigungstoleranzen der Segmente dazu führen werden, dass einheitliche Klebspalte wie im Labor in der Praxis nicht zu realisieren sind. Mit Hilfe des CryoTAST-Prüfstandes wird der Einfluss variierender Klebschichtdicken für einzelne Klebstoffe experimentell ermittelt. Die hieraus abgeleiteten Kennwerte dienen als Eingangsgrößen für FE-Simulationen. Auf Grundlage dieser Simulation werden wiederum zulässiger Fertigungstoleranzen am Flüssigwasserstofftank definiert.



CryoTAST Prüfstand zur Untersuchung von kryotauglichen Klebstoffen  
CryoTAST test stand for testing cryogenic adhesives



Extrembelastung für den Klebstoff! Vier Liter flüssiger Stickstoff kühlen die Probe auf -196 °C  
Extreme stress for the adhesive! Four litres of liquid nitrogen cool the sample to -196 °C

## Warum sind Blubberblasen ein Problem?

Um die Prüfbedingungen von -196 °C zu erreichen, besitzt der CryoTAST-Prüfstand ein Reservoir mit 4 Litern flüssigem Stickstoff. In diesem Stickstoffbad ist der Probekörper eingetaucht, während eine Zugkraft aufgebracht wird. Unter normalen atmosphärischen Bedingungen kocht flüssiger Stickstoff bei -196 °C. In dem Reservoir herrschen also ähnlich turbulente Bedingungen wie in einem Topf auf einem Herd in dem Leitungswasser bei 100 °C kocht. Gleichzeitig werden mit einem am Probekörper befestigten kapazitiven Extensometer im turbulenten Stickstoffbad Verformungen im Bereich weniger Mikrometer gemessen. Die Aufzeichnung reproduzierbarer, störungsfreier Dehnungssignale unter diesen extremen Bedingungen sowie das Verständnis von transienten Wärmeströmen und den damit verbundenen Temperaturgradienten im Prüfaufbau sind die wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung des Prüfstands.



# Messen mit Licht – Glasfasern ermitteln Verformung von Faserverbundbauteilen

Measuring with light - glass fibres determine deformation of fibre composite components

Autoren:

Yannick Boose, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Robert Prussak



## Summary

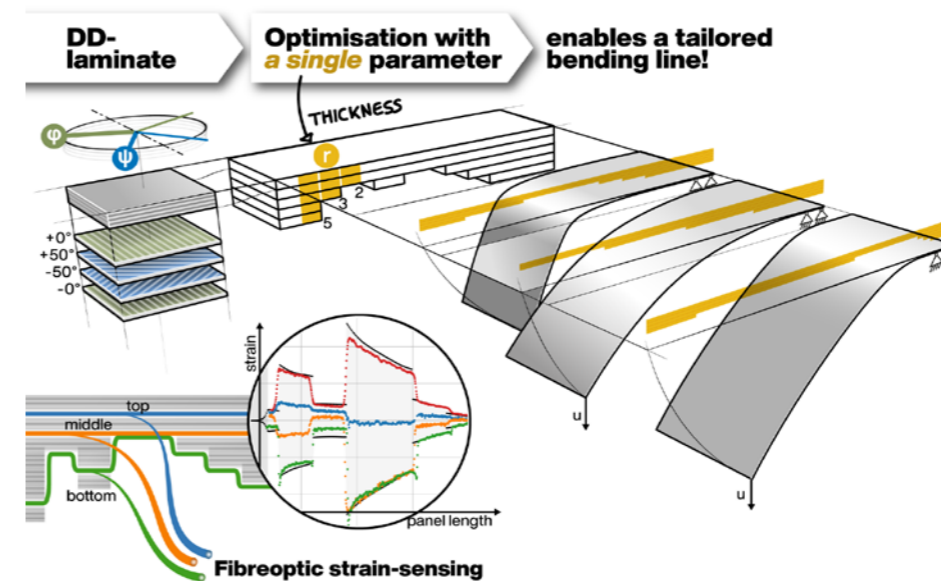
The measurement of strains in fibre composite components is complex due to the layered architecture of the composite and the anisotropy of the individual layers. The structure-integrated sensors of the fibre-optic sensor system (FOSS) make it possible to determine complex component deformations using high resolution strain measurement. The measuring fibres can be integrated into the fibre composite in such a way that they hardly affect the laminate architecture. A flexible panel with a widely varying wall thickness is used as a demonstrator, which is deflected by a load in the thickness direction. The strains determined by means of glass fibres in the laminate are compared with FE calculations and the ZEISS GOM ATOS optical measuring system (DIC).

Die Messung von Dehnungen in Faserverbundbauteilen gestaltet sich aufgrund der lagenweisen Architektur des Verbunds und der Anisotropie der Einzellagen komplex. Die strukturintegrierten Sensoren des faseroptischen Sensorsystems (FOSS) ermöglichen die Ermittlung von komplexen Bauteilverformungen anhand einer hochauflösenden Dehnungsmessung. Dabei lassen sich die Messfasern so in den Faserverbund integrieren, dass diese die Laminatarchitektur kaum beeinflussen. Als Demonstrator dient ein biegeweiches Paneel mit stark variiert Wandstärke, welches durch eine Belastung in Dickenrichtung ausgelenkt wird. Die dabei mittels Glasfasern im Laminat ermittelten Dehnungen werden mit FE-Rechnungen und dem optischen Messsystem (DIC) ZEISS GOM ATOS abgeglichen.

## Laminatarchitektur des biegeweichen Paneels

Das untersuchte Szenario leitet sich von einem zukünftigen Design einer Flügelvorderkante ab. Dabei können biegeweiche Paneele die Übergänge und Spalte zwischen beweglicher Vorderkante und starrer Flügelbox schließen, um eine aerodynamisch günstigere Umströmung der Tragfläche zu ermöglichen. Die Verformung (Biegung) wird durch eine definierte Auslenkung (Kraft in Dickenrichtung) hervorgerufen. Die CFK-Komponenten bilden einen Ausschnitt eines maßstabgetreuen Paneels nach. Die äußere Oberfläche des Paneels ist dabei der Luftströmung ausgesetzt.

Lokales Anpassen der Laminatzonenlängen und der zonenspezifischen Dicke ermöglicht es, die Verformung (Biegelinie) des Paneels unter Biegebelastung anzupassen. Das **Double-Double (DD)-Konzept** gewährleistet die Kompatibilität zwischen den einzelnen Zonen, da alle Laminata auf einem vordefinierten, ausgewogenen vierlagigen Stapel – auch als building-block bezeichnet – basieren. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Wandstärke beliebig zu variieren, ohne dafür Laminatübergänge in den Rampenbereichen gezielt designen zu müssen.



Flexpaneel mit DD-Konzept und FOS-Position im Laminat  
Flex-panel with DD-Concept and FOS-Positioning inside the laminate

## Validierung und Formbestimmung

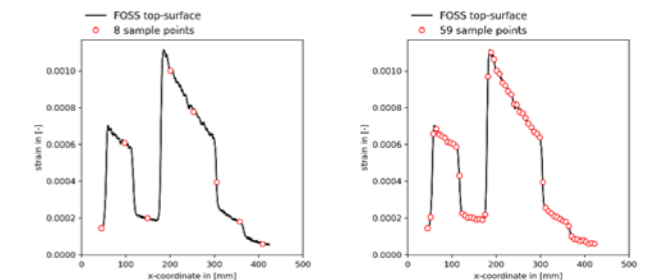
Die Messwerte von FOSS und DIC sowie die Ergebnisse der FE-Rechnung stellen eine hervorragende Übereinstimmung der Systeme fest und identifizieren den Einfluss der Faserposition innerhalb des Laminatstapels auf die Dehnung eindeutig. Beide Messverfahren erfassen die stark variiierende Dehnung und die daraus entstehenden Gradienten entlang des gestuften Paneels sehr gut. Die FE-Dehnungsdaten zeigen diskrete Stufen zwischen den einzelnen Zonen. Die Daten von FOSS und DIC nähern sich diesen Stufen an, wobei einzelne Messpunkte in den Übergängen vorhanden sind und dadurch die Gradienten abbilden.

Das Potenzial für die Formfassung zeigt sich mit dem FOSS: Damit ist es möglich – aus dem Dehnungssignal und der Geometrie des Bauteils – die Verformung eines belasteten Bauteils zu ermitteln, ohne diese vorher gekannt zu haben. Lokale Messungen, beispielsweise mit Dehnmessstreifen und Messsystemen mit geringerer Auflösung verzerren die Deformationsanalysen. Erst hochauflösende Messsysteme erfassen und quantifizieren auch große Gradienten ausreichend genau – wodurch das Materialverhalten detailliert untersuchbar ist. Den Unterschied und Einfluss einer niedrig und einer hochauflösenden Messung zeigt die nebenstehende Abbildung exemplarisch.

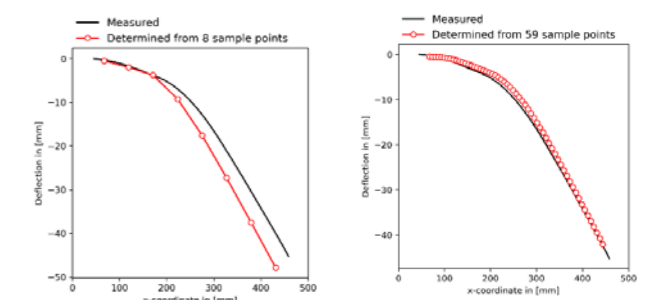
## FOSS-Messungen

Die faseroptischen Sensoren werden während der Herstellung in das DD-Laminat eingebettet. Diese liefern hochauflösende Dehnungsdaten über ihre gesamte Länge mit einer Ortsauflösung von 0,65 mm – pro integrierter Faser im Paneel sind das ca. 770 Messpunkte. Das 500 mm lange, einseitig eingespannte Paneel erfährt am freien Ende eine Auslenkung um 50 mm. Zeitgleich erfolgt die Dehnungsmessung. Das Ergebnis wird mit den FE-Daten und der DIC Messung verglichen.

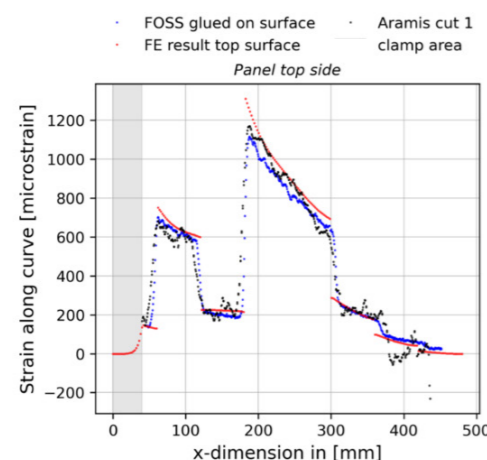
Die Diagramme zeigen die einzigartige und patentierte Fähigkeit vom FOSS, mittels Nutzung der Rayleigh-Rückstreuung der Glasfasern, hochauflösende Dehnungsdaten über die gesamte Länge eines Bauteils zu erfassen – und das sogar funktionsintegriert in der Struktur.



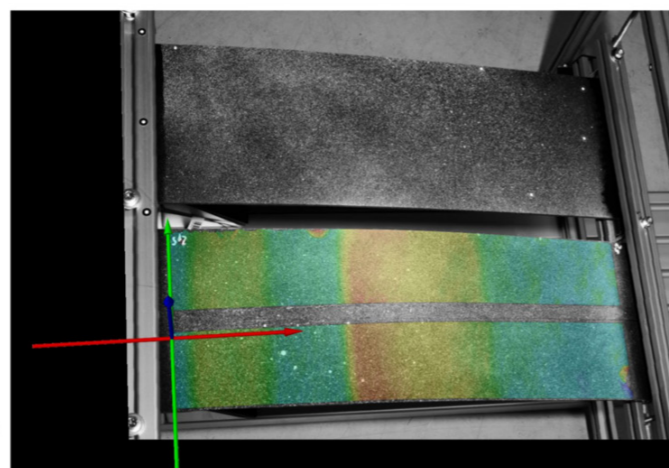
Dehnungsplots: Kontinuierlicher Dehnungsverlauf mit punktuell ausgelesenen Werten  
Continuous strain signal with punctually selected points



Rückgerechnete Verformung aus wenigen vs. vielen Messpunkten  
Recalculated deformation from a few vs. many measuring points



Dehnungswerte von FOSS, FE und DIC über Paneellänge  
Strain measurements from FOSS, FE and DIC over panel length



DIC Aufnahme der Oberflächendehnung (Entspricht „Aramis“-Dehnungen im Diagramm)  
Visualized surface strains from DIC (conforms to the „Aramis“ strains in the plot)

# Methoden

*Methodos*

Detailaufnahme des EmpowerAX Demonstrators  
*Close-up of the EmpowerAX demonstrator*

- 20 PeriLab - Next Generation Peridynamic Simulation  
*PeriLab - Next Generation Peridynamic Simulation*
- 22 Unter Druck: Verlängerte Lebensdauer von Wasserstoffdrucktanks  
*Under pressure: Extended service life of hydrogen pressure tanks*
- 24 Schadenstoleranz verbessern:  
Neue Methoden für ein optimiertes Flugzeugdesign  
*Improving damage tolerance: New methods for optimized aircraft design*
- 26 Eiskalt durchschaut – KI-basierte Risserkennung in der Kryomikroskopie  
*Ice cold vision - AI-based crack detection in cryomicroscopy*
- 28 Ich sehe was, was Du nicht siehst - Vorhersage von Brandprüfungsergebnissen mittels KI  
*I spy with my little eye - Predicting fire test results with AI*

# PeriLab - Next Generation Peridynamic Simulation

PeriLab - Next Generation Peridynamic Simulation

Autoren:

Dr.-Ing. Christian Willberg  
Jan-Timo Hesse, M.Sc.



## Summary

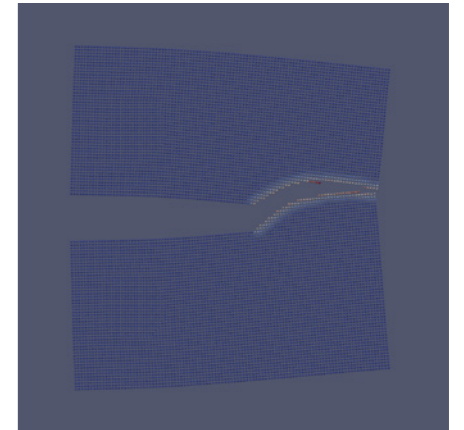
*In the world of research, the focus of many software codes is on solving problems. Usability by other people is rarely one of the criteria taken into account. Therefore, clarity, accessibility and the time it takes to produce an initial result hardly play a role. Whether new technologies or processes are used depends largely on how accessible they are. Many useful codes remain at a prototype level and are rarely applied or further developed by other users. This applies in particular to areas such as peridynamics with high performance requirements. PeriLab addresses this problem. With this peridynamic simulation code, we were able to reduce the time from hours to minutes for a person to generate their first solution without having to spend their time on new code. This means that our new methods can be tried out quickly. New methods are also easier to integrate and allow PhD students to make rapid progress in their work. The new peridynamic software PeriLab is one answer because it combines applicability with usability.*

**In der Welt der Forschung liegt der Schwerpunkt vieler Softwarecodes auf der Problemlösung. Die Nutzbarkeit durch weitere Personen gehören selten zu den berücksichtigten Kriterien. Daher spielen die Übersichtlichkeit, Zugänglichkeit und die Dauer bis zur Erstellung eines ersten Ergebnisses kaum eine Rolle. Ob neue Technologien oder Verfahren angewendet werden, hängt maßgeblich davon ab, wie zugänglich sie sind. Viele nützliche Codes bleiben auf einem Prototypenlevel und werden selten von anderen Nutzern angewendet oder weiterentwickelt. Das gilt insbesondere für Bereiche wie der Peridynamik mit hohen Anforderungen an die Performance. PeriLab adressiert dieses Problem. Mit diesem peridynamischen Simulationscode konnten wir die Zeit von Stunden auf Minuten reduzieren bis eine Person ihre erste Lösung generiert, ohne ihre Zeit für einen neuen Code verwenden zu müssen. So können unsere neuen Verfahren schnell ausprobiert werden. Neue Methoden sind ebenfalls einfacher integrierbar und erlauben Doktorand\*innen schnellen Fortschritt in ihrer Arbeit. Die neue peridynamische Software PeriLab ist eine Antwort, weil sie Anwendbarkeit mit Nutzbarkeit kombiniert.**

Ingenieur\*innen setzen heutzutage hauptsächlich auf die Finite Elemente Methode, wenn es um die Analyse von Strukturen geht. Dabei kommen eine Vielzahl von kommerziellen und nicht-kommerziellen Softwarelösungen zum Einsatz. Seit 2016 widmet sich das Institut einem vergleichsweise jungen Forschungsfeld – der Peridynamik. In diesem Bereich werden innovative Verfahren entwickelt und implementiert, bei denen Risse nicht das Problem, sondern ein integraler Bestandteil der Lösung sind. Trotz dieses klaren Vorteils im Vergleich zu etablierten Verfahren stellt sich die Frage: Warum wird diese Möglichkeit kaum genutzt?

## Zugänglichkeit als zentrales Hindernis

Ein wesentliches Hindernis liegt häufig in der Zugänglichkeit, was exemplarisch an der peridynamischen Software Peridigm deutlich wird. Obwohl sie vergleichsweise weit entwickelt und als Open Source verfügbar ist, bleibt ihre Verbreitung im Bereich der Peridynamik-Forschung begrenzt. Ein Grund ist unter anderem die enorme Herausforderung bei der Installation dieser Software. Trotz ausführlicher Dokumentation erfordert der Einrichtungsprozess Stunden an Zeitaufwand und schreckt potenzielle Nutzende ab. Die Erweiterung der Software und Implementierung neuer Verfahren ist ebenfalls schwierig und zeitintensiv. Aus diesem Grund greifen viele Doktorandinnen und Doktoranden auf eigene Codes zurück. Leider geraten diese häufig nach Abschluss der Doktorarbeit in Vergessenheit und erfüllen nur selten grundlegende Softwarequalitätsstandards. Dieser Zyklus der Selbstentwicklung und -implementierung führt nicht nur zu ineffizienter Nutzung von Ressourcen, sondern beeinträchtigt auch die Qualität und Fortschrittsrate in der Forschung erheblich.



Anisotroper Schaden an einer Kompaktzugprobe  
Anisotropic damage of a compact tension specimen

## PeriLab als Schlüssel zur einfacheren Nutzung

PeriLab setzt sich zum Ziel, die Zugänglichkeit zu verbessern. Dies hat mehrere Gründe. Als Open Source Projekt bedeutet eine bessere Zugänglichkeit, dass mehr Personen die Software nutzen und möglicherweise weiterentwickeln können. Eine breitere Nutzung stärkt das Vertrauen in die Software und trägt dazu bei, Fehler zu identifizieren. Durch die Entwicklung durch verschiedene Personen wird der Funktionsumfang erweitert. Das langfristige Ziel ist der Aufbau einer sichtbaren Community, die im Bereich der Peridynamik in Deutschland bisher fehlt.

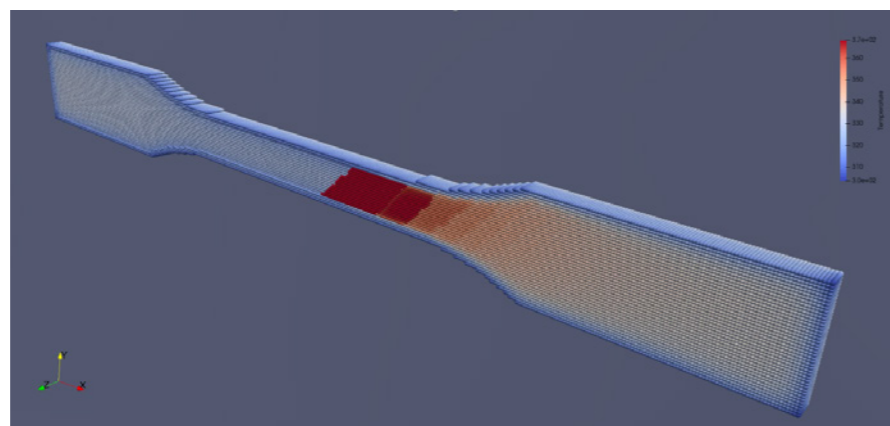
Um dieses Ziel zu erreichen, wurde die Programmiersprache Julia gewählt. Julia hat von Natur aus das Ziel, hochperformante Simulationscodes zu entwickeln. Aufgrund seiner modernen Struktur reduziert sich die Installationsdauer von PeriLab auf wenige Minuten, mit nur zwei erforderlichen Befehlen. Es besteht auch die Möglichkeit, die Berechnungen in der Cloud durchzuführen.

Die Implementierung neuer Verfahren gestaltet sich ebenfalls deutlich einfacher. Um beispielsweise ein neues Materialmodell zu integrieren, müssen in Peridigm mindestens fünf Dateien bearbeitet werden; in PeriLab genügt eine einzige. Der Code erlaubt bereits jetzt eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, darunter thermische Analysen, additive Fertigung sowie Schadens- und Materialmodellierung.

PeriLab steht als Julia-Paket zur Verfügung und lässt sich daher leicht installieren. Es kann auch als Paket aufgerufen werden und ist über eine API aufrufbar. Der Code ist parallelisiert und skaliert in seiner ersten Version sehr gut. Er steht unter einer BSD-Lizenz frei zur Verfügung und erste Nutzerinnen und Nutzer aus dem universitären Umfeld setzen die Software bereits ein. Der Vorteil besteht nicht nur in der Verbreitung unserer Entwicklungen. Externe Nutzende können diese anwenden, verbessern und erweitern, sodass sich die Qualität und der Umfang von PeriLab steigert. Der Ansatz, Software für diejenigen zu entwickeln, die Probleme lösen wollen, hat sich als erfolgreich erwiesen.



Probe für Dreipunkt-Biegeversuche  
Three point bending specimen



3D-Druck einer Dogbone-Probe  
3D printing of a dogbone specimen



# Unter Druck: Verlängerte Lebensdauer von Wasserstoffdrucktanks

Under pressure: Extended service life of hydrogen pressure tanks

Autoren:

Dr.-Ing. Daniel Schmidt  
Dr.-Ing. Caroline Lüders  
Sven Ropte; M.Sc.



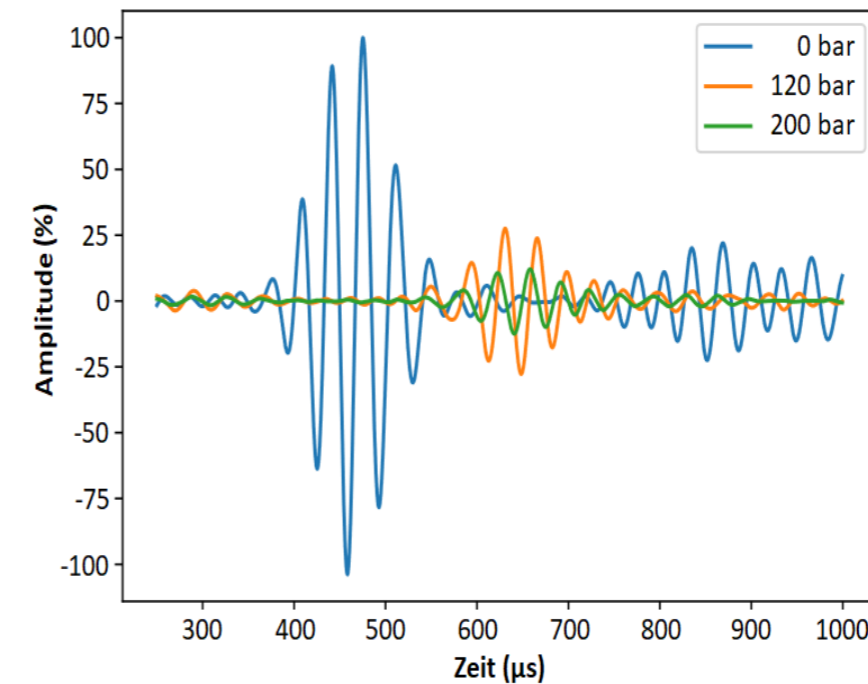
## Summary

In order to extend the service life of composite hydrogen pressure vessels, the Institute of Lightweight Systems researches for new simulation methods to more reliably predict the load-bearing capacity of composite vessels. In addition, the developed structural health monitoring system (SHM) detects damages during operation, evaluates the burst pressure and the fatigue life and adjusts the remaining service life of the vessel. The result: if there are still load-bearing reserves, the vessels remain in use for longer. The researchers are now verifying the developed optimization methodology and the SHM system in a burst pressure test.

Um die Betriebsdauer von Faserverbundbehältern zu verlängern, forscht das Institut für Systemleichtbau an neuen Auslegungsmethoden, die die Tragfähigkeit des Behälters zuverlässiger voraussagen. Zusätzlich detektieren die entwickelten Strukturüberwachungsmethoden (SHM) Schäden im Betrieb, bewerten sie strukturmechanisch und passen die verbleibende Betriebsdauer des Behälters individuell an. Ergebnis: Wenn noch Tragreserven vorhanden sind, verbleiben die Behälter länger im Einsatz. Die ForscherInnen verifizieren nun die entwickelte Auslegungsmethodik und das aufgebaute SHM-System im Berstdruckversuch.

Reale Basis für eine optimale Tankauslegung

Das entwickelte Optimierungstool tankoh2 legt den Tank entsprechend des geforderten Berstdrucks aus. Dafür nutzt es eine Wickelsimulation, die Faserverbundlagen virtuell auf dem Kunststoffliner ablegt, bis der Tank dem geforderten Berstdruck von 200 bar standhält. Durch Optimierung von Wickelwinkel und Position jeder Lage minimiert tankoh2 den erforderlichen Materialeinsatz. Die Optimierung nutzt die gemessene Ist-Kontur des gefertigten Kunststoffliners als Grundlage und berücksichtigt so mögliche Fertigungsabweichungen. Das Auslegungsergebnis ist dadurch zuverlässiger.



Sensorsignale des SHM-Systems bei unterschiedlichen Tankdrücken  
Sensor signals of the SHM systems at different pressure levels



Tank nach dem Berstdruckversuch  
Vessel after burst pressure test

## Structural Health Monitoring

Das SHM-System besteht aus einem Netzwerk von piezokeramischen Wandlern sowie aus Hard- und Softwarekomponenten zur Signalanregung, -verarbeitung und -analyse. Das SHM-System regt geführte Ultraschallwellen (Lambwellen) in der Tankstruktur an. Die Wellen breiten sich großflächig in der Struktur aus und interagieren mit Schäden. Verschiedene Interaktionsmechanismen erlauben Rückschlüsse auf Schadensort, -art und -größe. Die Herausforderungen eines SHM-Systems für Tankstrukturen bestehen in einer zuverlässigen Schadensdetektion unter stark schwankenden Betriebsbedingungen, wie Innendruck, Füllstand und Temperatur. Mit Algorithmen zur Mustererkennung lassen sich charakteristische Schadensmerkmale in den Sensorsignalen identifizieren, die möglichst unabhängig von den Betriebsbedingungen sind.

## Auf dem Prüfstand

Ein mit den neuen Methoden ausgelegter und mit dem SHM-System ausgestatteter Tank kommt auf den Prüfstand: Hier erzeugt eine Hochdruckpumpe Innendruck im wassergefüllten Tank. Bei verschiedenen Druck-Haltestufen regt das SHM-System den Tank mit Lambwellen an und wertet die zurückkommenden Signale aus. Die Amplituden und Laufzeiten der Sensorsignale variieren stark aufgrund des unterschiedlichen Druckniveaus. Diese Daten bilden die Grundlage für die zukünftige Entwicklung robuster Algorithmen zur Schadensdetektion für Drucktanks. Erst bei Erreichen von 253 bar Innendruck birst der Tank. Er verifiziert damit die neue Auslegungsmethodik.



# Schadenstoleranz verbessern: Neue Methoden für ein optimiertes Flugzeugdesign

Improving damage tolerance: New methods for optimized aircraft design

Autor:

Dr.-Ing. Raffael Bogenfeld



## Summary

A novel method for assessing the damage tolerance of composite aircraft structures during the early design phase has been developed. This approach comprehensively predicts design-relevant laminate damage, its impact on the structural integrity of the composite, and the resulting design allowable. The method's capability to evaluate arbitrary laminate configurations early in the design phase offers the Potenzial to build lightweight structures, reduce aircraft weight and fuel consumption, and enhance safety against structural failure.

**Die Sicherheit und die Effizienz von Flugzeugen hängen maßgeblich von der Widerstandsfähigkeit ihrer Strukturen ab. Schädigung lässt sich während des Betriebslebens nicht verhindern. Daher sind bestmögliche Methoden zur Schadensbewertung essentiell. Um sowohl das Leichtbaupotenzial von CFK auszunutzen als auch die Betriebssicherheit zu gewährleisten bedarf es neuer Methoden zur Schadensbewertung im Rahmen der Strukturauslegung**

Eine umfassende Berechnungsmethode ermöglicht uns, die Schadenstoleranz (Damage Tolerance) bereits in der frühen Entwurfsphase zu bewerten und in den Entwurfsprozess, wie er am Institut für Systemleichtbau entwickelt wurde, miteinfließen zu lassen. Im Gegensatz zu konventionellen Auslegungsmethoden, die den Entwurfsraum auf vorab im Versuch getestete Laminat beschränken, verspricht diese Methode eine individuelle Berechnung der Schadenstoleranz für beliebige Laminatkonfigurationen. Daher arbeiten wir nicht nur an einer Verbesserung der Sicherheit, sondern auch an einer Reduzierung der Strukturmasse und des resultierenden Treibstoffverbrauchs.

## Von der laminatspezifischen Restfestigkeit zum Grenzwert für die Strukturoptimierung

Die Grundlage dieser Methode bildet eine detaillierte Schädigungsanalyse, welche der laminatspezifischen Ermittlung der maßgeblichen Schadensgröße an CFK-Laminaten dient. Von Laminat zu Laminat unterscheidet sich neben den Schäden selbst auch der damit einhergehende Einfluss auf die strukturellen Eigenschaften des Laminates – vor allem die Bewertung der Sichtbarkeit und der Resttragfähigkeit sind hierbei erforderlich.

Eine besondere Herausforderung stellt die Ableitung von allgemeinen Auslegungsgrenzwerten dar, nachdem die laminatspezifischen Resttragfähigkeiten bekannt. Wir untersuchen hierzu die Schadensszenarien verschiedenartiger Laminat in einem mehrstufigen Prozess. Das Ziel des Prozesses ist die Minimierung der Auswirkungen des Schadens bei gleichzeitiger Ermittlung des kritischsten möglichen Falles in der Gesamtheit der Laminat des Entwurfsraumes. Die genaue Vorhersage der Schadensgröße hängt dabei wesentlich vom Risswiderstand des Matrix-Materials und von der Schichtung des multidirektionalen Lagenaufbaus ab.

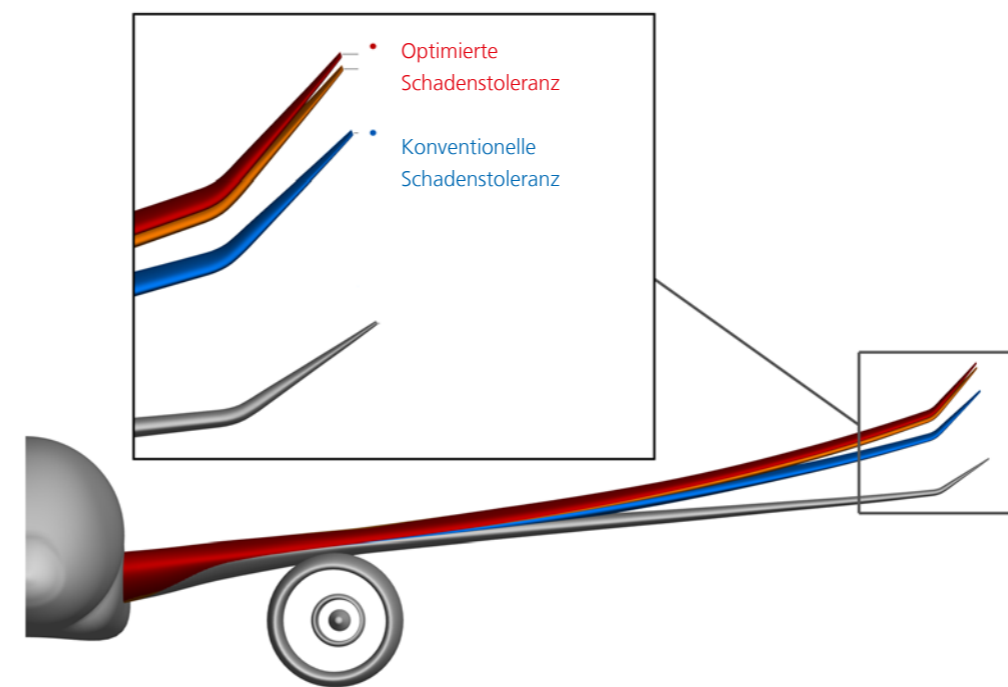
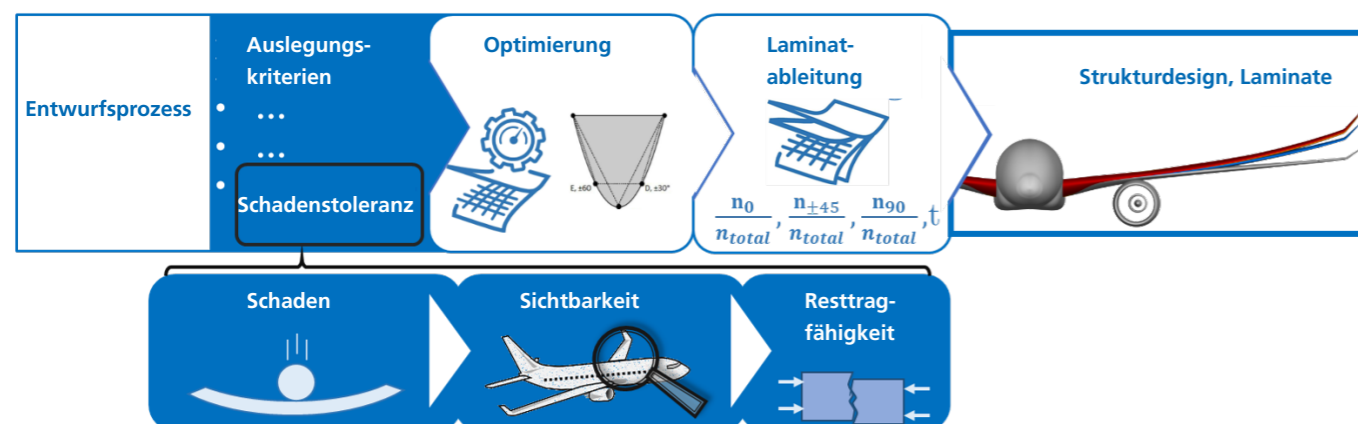
Die Gültigkeit der Methode ist dennoch für jede Konfiguration dieser Parameter sichergestellt. Durch den Vergleich mit bestehenden experimentellen Daten konnte die Vorhersagegenauigkeit der Methode verifiziert werden.

## Direkter Einfluss des Grenzwertes auf die Strukturmasse

Diese Entwicklung hat weitreichende Auswirkungen auf die frühe Phase des Flugzeugentwurfs. Eine präzisere Bestimmung der Schadenstoleranz ermöglicht es Ingenieuren, leichtere und dennoch sicherere Flugzeuge zu entwerfen. Durch Optimierung einer Flügelstruktur konnte unter Einbezug der individuellen Schadenstoleranzermittlung eine Massenreduktion von 5 % und eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs um etwa 1,4 % erreicht werden. Die Forschung wurde in enger Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Disziplinen des Flugzeugentwurfes durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Methode den praktischen Anforderungen gerecht wird.

Einordnung der Schadenstoleranzbewertung im Entwurfsprozess einer Faserverbund- Luftfahrtstruktur

Positioning of the damage tolerance assessment in the design process of a composite aerospace structure



Einfluss verbesserter Schadenstoleranz auf die Elastizität einer Flügelstruktur

Impact of improved damage tolerance on the Elasticity of a wing structure

Der nächste Schritt in der Weiterentwicklung dieser Methode besteht darin, sie auf eine breitere Palette von Anwendungsfällen auszuweiten, damit das vorhandene Leichtbaupotenzial in allen Strukturregionen genutzt werden kann.

# Eiskalt durchschaut – KI-basierte Risserkennung in der Kryomikroskopie

Ice cold vision - AI-based crack detection in cryomicroscopy

Autoren:

Dr. rer. nat. Christoph Brauer  
Jonas Naumann, M.Sc.



## Summary

While the manual examination of microscope images of samples made of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) is very time-consuming, the use of a suitable AI model represents a much more efficient alternative for analysing these images. This not only enables a larger number of different samples to be analysed, but also the derivation of quantitative, local sample features based on the resulting image segmentation. One relevant application is the manufacture of hydrogen tanks from CFRP. Due to changing filling levels with liquid hydrogen at a temperature of around  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the material is exposed to thermal cycles that can lead to microcracks in the epoxy resin. Of particular interest here is the determination of correlations between local sample properties, such as the estimated local fibre volume content, and the probability of crack formation. Ideally, the results can be used to derive recommended adjustments to the production process that will reduce the susceptibility to cracking in the future

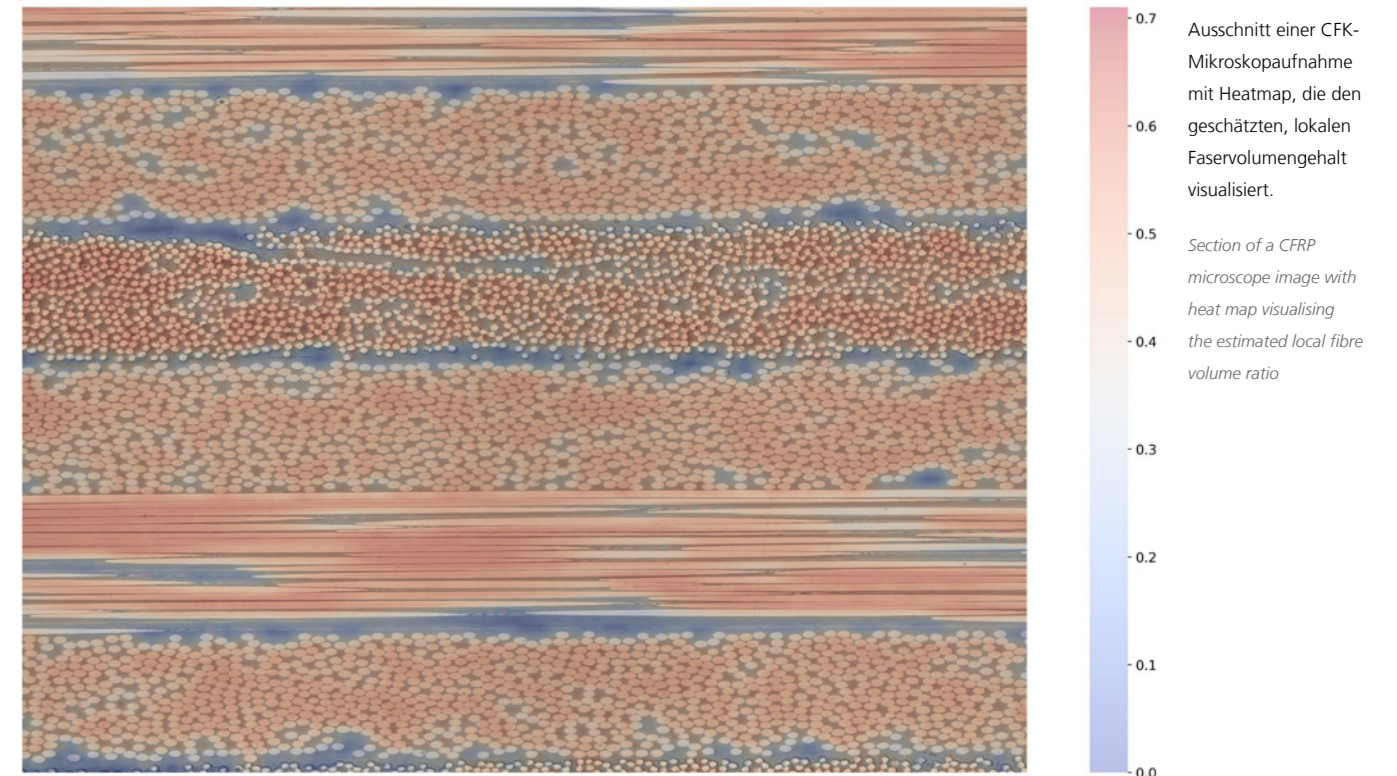
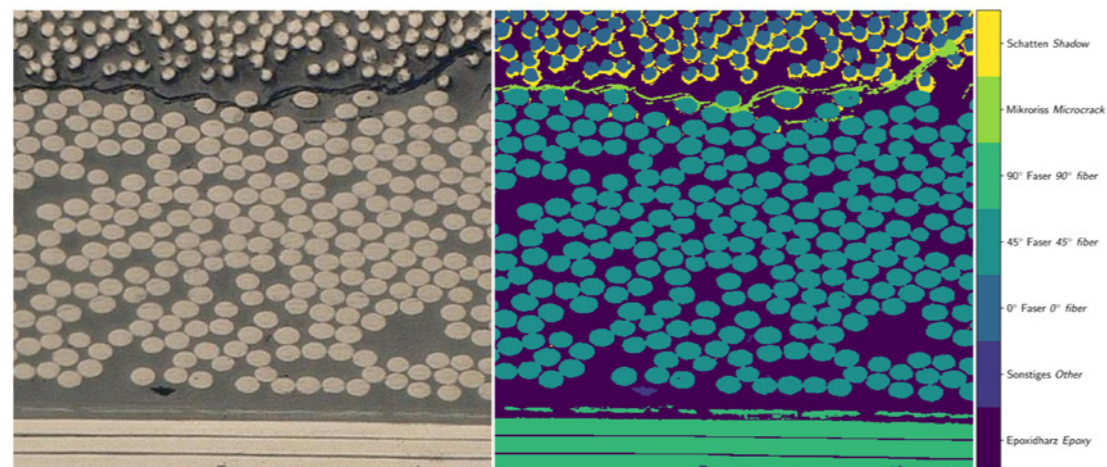
Während die manuelle Untersuchung von Mikroskopaufnahmen von Proben aus CFK sehr zeitaufwändig ist, stellt die Anwendung eines geeigneten KI-Modells eine deutlich effizientere Alternative zur Analyse dieser Bilder dar. Dies ermöglicht nicht nur die Untersuchung einer größeren Anzahl unterschiedlicher Proben, sondern auch die Ableitung quantitativer, lokaler Probenmerkmale auf Basis der resultierenden Bildsegmentierung. Ein relevanter Anwendungsfall ist die Herstellung von Wasserstofftanks aus CFK. Durch wechselnde Füllstände mit flüssigem Wasserstoff mit einer Temperatur von etwa  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist das Material hier thermischen Zyklen ausgesetzt, die zu Mikrorissen im Epoxidharz führen können. Von besonderem Interesse ist dabei die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen lokalen Probeneigenschaften, wie zum Beispiel dem geschätzten lokalen Faservolumengehalt, und der Wahrscheinlichkeit der Rissentstehung. Im Idealfall können aus den Ergebnissen empfohlene Anpassungen des Produktionsprozesses abgeleitet werden, die die Rissanfälligkeit in Zukunft reduzieren.

## Semantische Segmentierung von Mikroskopaufnahmen

Die Grundidee besteht darin, ein KI-Modell zur semantischen Segmentierung auf den Mikroskopaufnahmen zu trainieren, sodass zukünftige Proben automatisch segmentiert werden können. Unter semantischer Segmentierung versteht man die Zuordnung jedes Pixels zu einer von mehreren vordefinierten Klassen, in diesem Fall zum Beispiel Faser, Epoxidharz oder Mikroriss. Um ein Modell aus dem Bereich des überwachten maschinellen Lernens zu trainieren, werden sowohl die Eingabedaten, hier die Bilder, als auch die zugehörigen Ausgabedaten, hier die Segmentierungsmasken, benötigt. Der erste Schritt bestand daher darin, die Bilder pixelweise zu labeln.

Links: Ausschnitt einer CFK-Mikroskopaufnahme. Rechts: Zugehörige Segmentierung.

Left: Section of a CFRP microscope image. Right: Corresponding segmentation.



Basierend auf 18 Mikroskopaufnahmen von drei CFK-Proben und jeweils sechs Phasen von Temperaturzyklen entstand ein Datensatz von über 6.000 Bildern der Größe  $512 \times 512$  Pixel. Das fertige, trainierte Modell klassifiziert auf einem Testdatensatz über 95 % der Pixel korrekt. Aufgrund der geringen Anzahl von Rissen in den vorliegenden Proben und der generellen Schwierigkeit, diese von visuell ähnlichen Klassen wie Verunreinigungen auf der Probenoberfläche zu unterscheiden, ist die Genauigkeit des Modells in Bezug auf die Rissklasse jedoch noch verbesserungswürdig, zum Beispiel durch Hinzunahme weiterer Trainingsdaten.

Die Erstellung des gelabelten Datensatzes ist aufwändig, kann aber in Zukunft als sehr hilfreiche Grundlage für weitere Forschungsarbeiten dienen. Eine Erweiterung des Datensatzes mit neuen Bildern sowie Anpassungen der definierten Klassen sind nun mit Hilfe des Datensatzes und des trainierten Segmentierungsmodells mit deutlich reduziertem Aufwand möglich. Auf Basis eines Datensatzes mit deutlich mehr Rissen kann in Zukunft auch ein Modell trainiert werden, das die Entstehung neuer und die Entwicklung bestehender Risse nach einer bestimmten Anzahl von Temperaturzyklen vorhersagt. Darauf aufbauend planen wir mit Methoden der Explainable Artificial Intelligence (XAI) lokale Probeneigenschaften zu ermitteln, die die Rissentstehung beeinflussen.

# Ich sehe was, was Du nicht siehst - Vorhersage von Brandprüfungsergebnissen mittels KI

*I spy with my little eye - Predicting fire test results with AI*

Autoren:

Dr.-Ing. Alexandra Kühn  
Dr. rer. nat. Christoph Brauer  
Dipl.-Ing. Monika Monkiewitsch



## Summary

Machine learning methods offer the Potenzial to predict the results of qualifying fire tests using quick and simple screening tests. This enables the product designer to use new sustainable materials already in the design phase, even though no empirical values on fire behaviour of these materials are available yet. Based on the screening tests, the forecast narrows down the choice of materials to such an extent that expensive and time-consuming verification and qualification tests are limited to the most promising material candidates. Material developers also benefit from such forecasts, as the trained models identify and quantify the main influencing factors for certain fire characteristics. This enables targeted material design for fireprone structures.

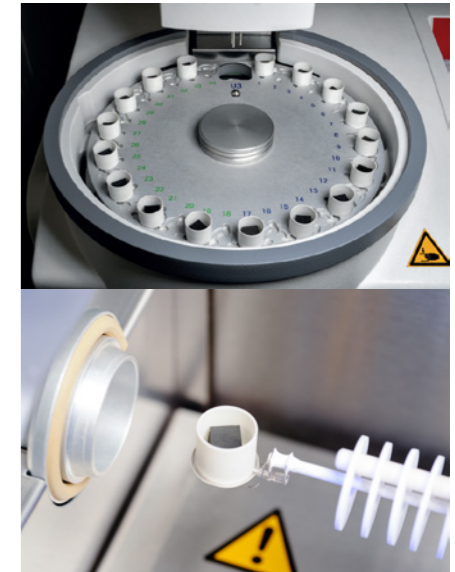
**Methoden des maschinellen Lernens bieten das Potenzial, die Ergebnisse von qualifizierenden Brandprüfungen anhand schneller und einfacher Screening-Tests vorherzusagen. Insbesondere ermöglicht das dem Produktdesigner bereits in der Auslegungphase neue nachhaltige Materialien zu verwenden, für die bislang noch keine Erfahrungswerte zum Brandverhalten vorliegen. Die Prognose grenzt anhand der Screening-Tests die Materialauswahl so weit ein, dass sich teure und aufwendige Nachweis- und Qualifikationsprüfungen auf den aussichtsreichsten Materialkandidaten beschränken. Auch Materialentwickler profitieren von solchen Prognosen, da die trainierten Modelle die Haupteinflussfaktoren für bestimmte Brandkennwerte identifizieren und quantifizieren. Dies ermöglicht ein gezieltes Materialdesign für brandgefährdete Strukturen.**

## Das Modell geht zur Schule

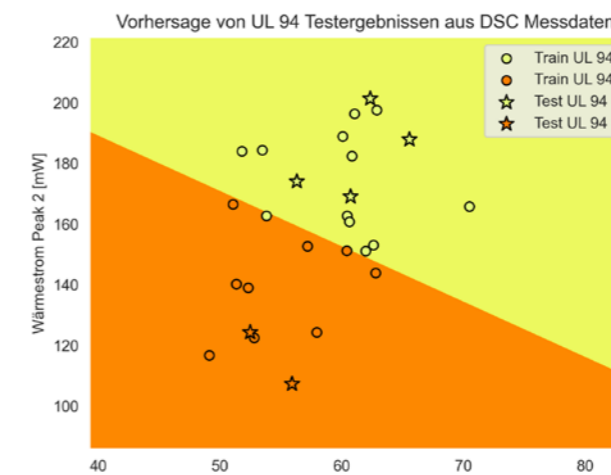
Als einfaches Brand-Screening-Verfahren dient die kombinierte thermogravimetrische Analyse (TGA) und Differenzkalorimetrie (DSC). Der Einsatz eines Probenwechslers ermöglicht die kontinuierliche Prüfung einer hohen Stückzahl an Proben, die nur geringe Abmessungen aufweisen. Als qualifizierende Brandprüfverfahren in dieser Machbarkeitsstudie kommen der UL94-Test und das Cone-Kalorimeter zum Einsatz. Ausgewählte Kennwerte, die mit diesen Messverfahren erzeugt wurden, gehen bis auf einen kleinen Teil, der zur Validierung des Modells zurückbehalten wird, als Inputdaten (TGA/DSC) und Outputdaten (UL94 und Cone) in das Modell ein. Das Modell lernt somit den Zusammenhang zwischen Input- und Outputdaten durch Anpassung der Parameter an die Trainingsdaten. Die Auswahl eines geeigneten Modells für die jeweilige Fragestellung hängt insbesondere vom Umfang der verfügbaren Daten und der Komplexität des gesuchten Zusammenhangs ab. In dieser Studie ist ein One-vs.-Rest-Klassifikationsmodell gut geeignet, um die Ergebnisse des UL94-Tests abzubilden, während ein LASSO-Modell gut geeignet ist, um die Ergebnisse des Cone-Kalorimeter-Tests vorherzusagen. In beiden Fällen handelt es sich um lineare Modelle, eines zur Klassifikation und eines für die Regression. Beide Modelle können auch bei kleineren Trainingsdatensätzen sinnvoll eingesetzt werden.

## Mit viel Erfahrung bis zum Brandschutzexperten

Zur Auswertung aller Daten verarbeiten die trainierten Modelle sowohl die zurückbehaltenen als auch die zum Training verwendeten Inputdaten. Alle so prognostizierten Daten stehen zum Vergleich den real gemessenen Daten aus den UL94- und Cone-Kalorimeter-Tests gegenüber. Sogar das in dieser Studie über Brandschutzmittelkonzentrationen nur geringfügig modifizierte Verhalten der verschiedenen Probensätze ist durch das trainierte Modell gut abgebildet. Die LASSO-Koeffizienten des Modells für den jeweiligen Output-Kennwert haben für diejenigen Input-Parameter hohe positive oder negative Kennwerte, deren Variation den größten Einfluss auf das prognostizierte Ergebnis haben. Wird zum Beispiel ein geringer MARHE-Wert angestrebt, der ein Indiz für die Brennbarkeit eines Materials ist, muss erwartungsgemäß ein größerer Anteil an Flammenschutzmitteln eingesetzt werden. Es ist aber auch erkennbar, dass sich ein erhöhter gewichteter Heizwert und eine reduzierte Wärmestromspitze in der ersten Verbrennungsstufe positiv auswirken. Als Maßnahme sind somit Zusätze förderlich, welche die Verkohlung der Probe begünstigen. Diese Wirkzusammenhänge bleiben ohne die Auswertung der LASSO-Koeffizienten zunächst einmal unerkannt.



Mit dem Probenwechsler der TGA/DSC kann eine große Anzahl an Proben automatisch untersucht werden.  
*With the TGA/DSC sample changer, a large number of samples can be analyzed automatically.*



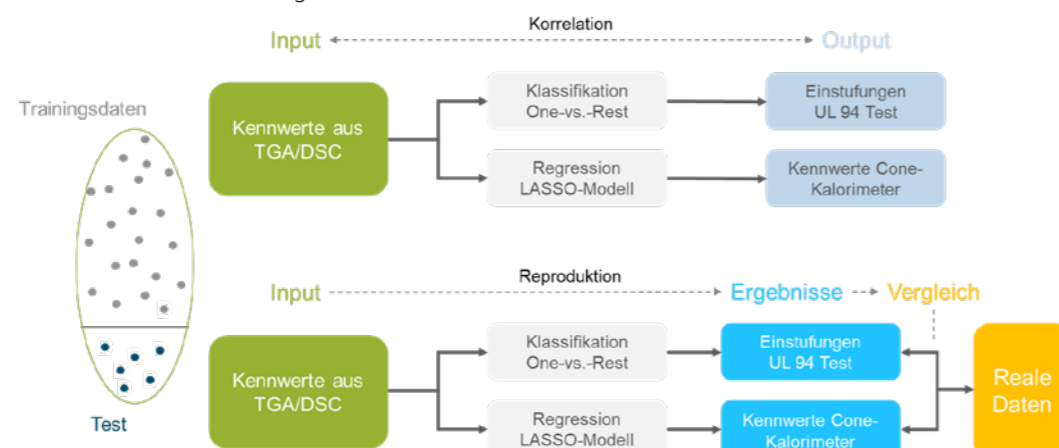
UL94-Testergebnisse lassen sich durch die Position von DSC-Messdaten oberhalb (gelb) oder unterhalb (orange) einer Geraden vorhersagen.

*UL94-Test results can be predicted by the position of DSC measurement data above (yellow) or below (orange) a straight line.*

Bis zur Technologiereife des Modells bedarf es allerdings einer weiteren Investition. Bis dahin gilt es, weitere Variationen der Parameter, wie Brandschutzmittel mit verschiedenen Wirkmechanismen und Synergisten sowie verschiedene Materialkombinationen, einzubinden und eine insgesamt größere Datenbasis zu untersuchen. Ein wichtiger Meilenstein ist die aktuell angestrebte Normierung der Brandscreening-Methode, durch die potenziell eine Vergrößerung der zur Verfügung stehenden Datenbasis resultiert.

Eine weitere aussichtsreiche Anwendung der Methode ergibt sich aus der Übertragung auf die Vorhersage von Pyrolyseprozessen beim Recycling von Faserverbundwerkstoffen.

Methodischer Ansatz für die Erstellung eines Machine-Learning-Modells zur Korrelation von Brandscreeningtests und Standardbrandprüfungen  
*Methodological approach for the creation of a machine learning model for the correlation of fire screening tests and standard fire tests*



## KONSTRUKTION

Construction

32

Funktionsintegrierte und hybride Bauweisen für zukünftige Rumpfsegmente  
*Functionally integrated and hybrid designs for future fuselage segments*

34

Leichte Strukturen, starke Verbindungen: Das Elektrische-System-Netzwerk in multifunktionaler Bauweisen  
*Lightweight structures, strong connections: The electrical system network in a multifunctional design*

36

Windkraftanlagen > Wolkenkratzer? Design für Rotorblätter > 150 m  
*Wind turbines > skyscrapers? Design of rotor blades > 150 m*

38

Diese Hinterkantenklappe für ein Winglet ist FAMoUS –  
Druckaktuierte Steuerflächen für bessere Effizienz  
*This winglet tab is FAMoUS - Pressure actuated control surfaces for higher efficiency*



# Funktionsintegrierte und hybride Bauweisen für zukünftige Rumpfsegmente

Functionally integrated and hybrid designs for future fuselage segments

Autoren:

Dipl.-Ing. Hakan Ucan  
Dr.-Ing. Alexander Pototzky  
Constantin Bäns  
Dr.-Ing. Arne Hindersmann



## Summary

With the increased use of CFRP in aviation, new requirements for electrical conductivity arise. The DLR project FraME (2021–2023) explores methods for integrating circuitry into aircraft structures to reduce weight and assembly effort. The focus is on selecting suitable manufacturing technologies and advancing infusion technology for lighter, more efficient laminates.

Mit der verstärkten Nutzung von CFK in der Luftfahrt entstehen neue Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit. Im DLR-Projekt FraME (2021–2023) werden Methoden zur Integration von Leiterbahnen in Flugzeugstrukturen erforscht, um Gewicht und Montageaufwand zu reduzieren. Der Fokus liegt auf der Auswahl geeigneter Fertigungstechnologien und der Weiterentwicklung der Infusionstechnologie für leichtere, effizientere Laminare.

Die richtige Leiterbahn für jede Aufgabe

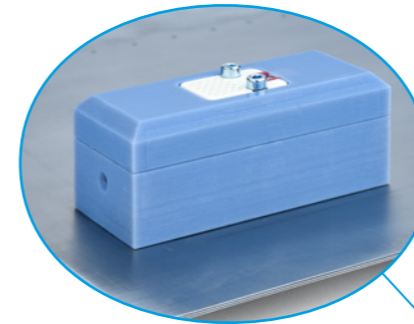
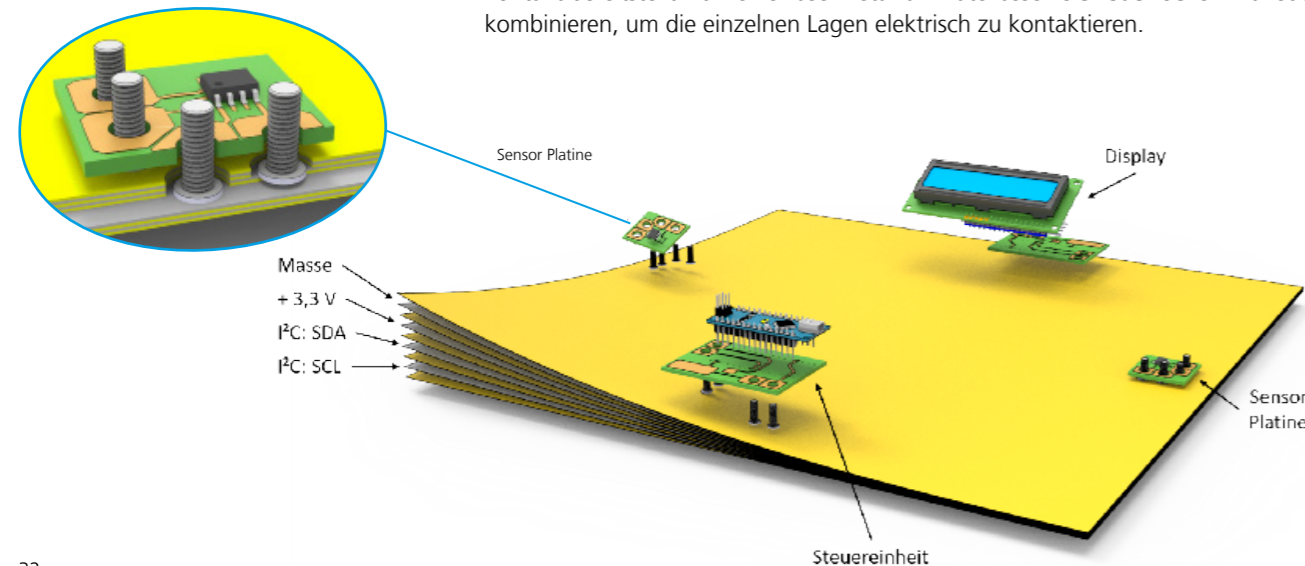
Das Hauptziel liegt darin, die Integration von Leiterbahnen direkt in die Lasttragende Struktur zu realisieren und die Entwicklung einer robusten Kontaktierungsmethode für diese Leiterbahnen durchzuführen, welche den strengen Luftfahrtstandards entspricht. Diese Strukturintegration steigert die Effizienz, reduziert das Gewicht und verringert den Montageaufwand in der Final Assembly Line erheblich.

Zunächst wird die geeignete Fertigungstechnologie zur Integration der Leiterbahnen identifiziert. Dabei liegt der Fokus auf dem Vergleich zwischen nachträglich applizierten und integral gefertigten Leiterbahnen. Je nach Konzept wird hierbei der Aufwand in der Fertigung oder in der Montage erhöht. Die entwickelten Konzepte zur Integration der Leiterbahnen berücksichtigen auch die automatisierte Ablage, um den Anforderungen der Luftfahrtindustrie gerecht zu werden. Unter Einbeziehung der Spezifikationen, der benötigten Anzahl an Leiterbahnen, der erforderlichen Querschnitte sowie der Isolationsfähigkeit der Leiterbahnen können geeignete Leiterbahnmaterialien identifiziert und festgelegt werden. Abhängig von der bevorzugten Bauweise des Flugzeugrumpfs und der definierten elektrischen Versorgungsaufgabe wird abschließend eine geeignete Integrationsmethode festgelegt.

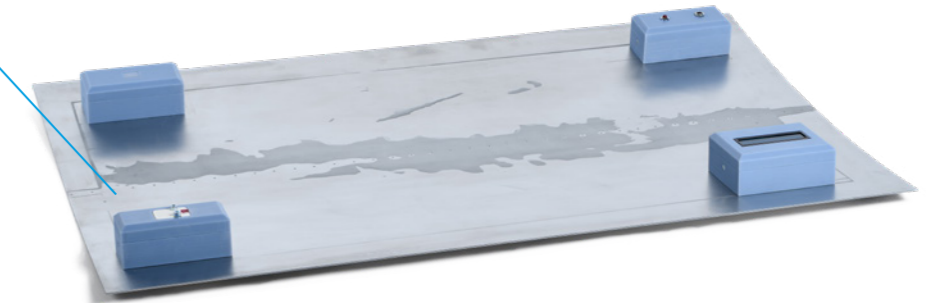
Für jeden Leiterbahntyp lässt sich auch individuell ein passendes Interface entwickeln. Leiterbahnen aus CFK lassen sich sehr gut mithilfe von Nieten kontaktieren. Für die in CFK eingebetteten Metallfolien existiert eine Niet-Löt-Lösung, welche einen Steckkontakt bereitstellt. Für reine Fasermetalllaminare lassen sich Sacklöcher mit Federpins kombinieren, um die einzelnen Lagen elektrisch zu kontaktieren.

Explosionsdarstellung des Leiterbahndemonstrators sowie der Elektrokomponenten und Detail-Darstellung des Kontaktierkonzepts mithilfe von Gewindebolzen

Exploded view of the circuit board demonstrator and the electrical components, along with a detailed representation of the contact concept using threaded bolts



Technologiedemonstrator im Projekt FraME zur funktionsintegrierten Leiterbahnen mit Steckermodul in einem FML-Bauteil  
Technology demonstrator in the FraME project for function-integrated circuit boards with plug-in module in an FML component



## Vakuuminfusion für Faser-Metall-Laminare (FML)

Die wirtschaftliche Infiltration eines Flüssigharzsystems in ungesättigtes Fasermaterial erfordert technisches Know-how und strategische Planung. Die Vakuuminfusion ist eine weitverbreitete Methode im Liquid Composite Moulding (LCM) zur Herstellung hochwertiger Laminatstrukturen. Um die Qualität zu optimieren und den Verbrauch von Harz und Hilfsstoffen zu minimieren, werden Infusionsverfahren kontinuierlich weiterentwickelt.

Neben der theoretischen Analyse wurden [Faser-Metall-Laminat](#) Technologiedemonstrator im Vacuum Assisted Differential Pressure Infusion (VADPI) Verfahren realisiert, das eine gleichmäßige Harzverteilung sicherstellt, sowie weniger Hilfsstoffe benötigt. Um das Harz in Dickenrichtung zwischen die Metallfolien zu führen, sind Löcher mit 2 mm Durchmesser und 30 mm Abstand, deckungsgleich in die Metallfolien bis zur letzten Faserlage eingebracht worden. Der Kanal aus dem [VADPI](#) Verfahren verteilt das Harz über die Löcher in das Bauteil. Nach der Infiltration kann der Kanal rückstandsfrei entfernt werden und das Harzvolumen des Kanals wird vor Beenden der Infiltration durch Bedrucken wieder entfernt.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Vakuuminfusion für die Herstellung komplexer Laminare und Verbundwerkstoffe vielversprechend ist. Während die Prepregtechnologie derzeit Standard für FML ist, könnte Infusionstechnologie durch niedrigere Materialkosten und verbesserte Prozesse wirtschaftlicher und nachhaltiger sein.

## Schlussfolgerungen und Perspektiven

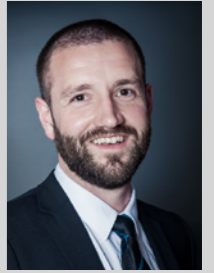
Die Integration von Leiterbahnen in Flugzeugstrukturen kann die Effizienz und Leistung der Luftfahrt erheblich steigern, indem Gewicht reduziert, die elektrische Leitfähigkeit verbessert und die Robustheit erhöht wird. Die Konzepte müssen weiter verfeinert und optimiert werden. Besonders vielversprechend ist die Nutzung strukturintegrierter Leiterbahnen für das [Elektrische-System-Netzwerk \(ESN\)](#) der nächsten Flugzeuggeneration. Zudem bietet die Infusionstechnologie von FML Potenzial für verbesserte und kosteneffizientere Fertigungsprozesse.

# Leichte Strukturen, starke Verbindungen: Das Elektrische-System-Netzwerk in multifunktionaler Bauweise

Lightweight structures, strong connections: The electrical system network in a multifunctional design

Autoren:

Dr.-Ing. Alexander Pototzky  
Dr.-Ing. David Zerst  
Dr.-Ing. Daniel Schmidt



## Summary

Modern aircraft use numerous electrical systems that require efficient power distribution, traditionally relying on metallic skins for grounding. The integration of carbon fibre reinforced polymers (CFRP) presents challenges for electrical conductivity, particularly in modern airplanes, where the complex Electrical-System-Network (ESN) involves over 6,000 parts. A new concept integrates metal foils into stiffening elements like stringers and frames, enhancing electrical paths while reducing weight and assembly time. Demonstrator tests show that stainless steel foils can be integrated without compromising structural integrity, facilitating quicker ESN setup in final assembly. This approach leverages advanced materials and manufacturing techniques to optimize performance and cost-effectiveness.

Die zunehmende Verwendung von CFK in der modernen Luftfahrt hat neue Herausforderungen hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit aufgeworfen. Insbesondere im Airbus A350 erfordert das komplexe Elektrische-System-Netzwerk (ESN) eine aufwendige Verkabelung mit metallischen Elementen, um die elektrische Kontinuität zu gewährleisten. Dies führt zu zusätzlichem Gewicht und Montageaufwand. Der diesjährige Artikel zu dem [Projekt FRAME](#) beschreibt die daraus entstehenden Nachteile sehr ausführlich. Es wird ein innovatives Konzept vorgestellt, bei dem die Leiterbahnen integral in die Versteifungsstrukturen integriert werden, um eine Gewichtseinsparungen zu erzielen und den Montageaufwand zu reduzieren.

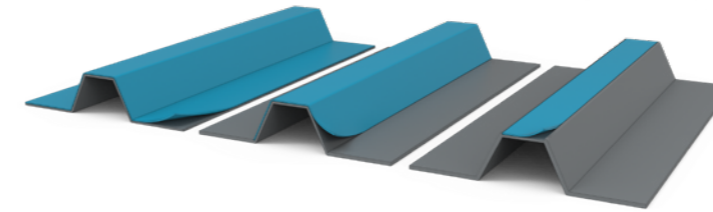
## Ein multifunktionaler Stringer mit mehreren Aufgaben

Versteifungselemente wie Stringer und Spanten durchziehen die gesamte Flugzeugstruktur in Längs- und Umfangsrichtung. Entgegen dem üblichen Vorgehen, die elektrisch leitfähigen Elemente an dieser Struktur zu befestigen, funktionalisiert man die Versteifungselemente mit Hilfe einer Metallfolie und verlegt den elektrischen Pfad direkt in die Versteifungselemente der Flugzeugstruktur. Dabei ersetzen metallische Schichten einzelne Faserverbundlagen, um am Lastabtrag des Stringers mitzuwirken. Die verwendeten Metallfolien sind so dimensioniert, dass sie einen Beitrag am Lastabtrag des Stringers beisteuern, die elektrischen Aufgaben des ESN bestmöglichst übernehmen und sich integral im Fertigungsprozess der Profile integrieren lassen. Die elektrische Verbindung aller Profile untereinander schafft ein elektrisches Netzwerk im Flugzeug, das mit dem klassischen ESN vergleichbar ist.

## Auf der Suche nach dem optimalen ESN - Stringer

Wo wird die Metallfolie am sinnvollsten integriert, um maximal am Lastabtrag beteiligt zu sein? Wie groß ist sie um kein unnötiges Mehrgewicht in die Flugzeugstruktur einzubringen? Welches Metall und welcher Querschnitt erfüllen die elektrische Aufgabe maximal?

Diese Fragen beantwortet ein Optimierungsprozess mithilfe des [Lightworks-Frameworks](#). Die Eigenschaften definieren dabei Materialauswahl, Lagenaufbau und Stringer-Geometrie. Als Grundlage für die Strukturauslegung dient ein repräsentatives Rumpf-Paneel. Dazu wird ein analytisches Modell dieses Paneels formuliert, das die Versteifungswirkung des Omega-Stringers auf die Rumpfhaut abbildet. Anhand von Referenzlastfällen und unter Berücksichtigung von Design-Kriterien wie Beul-Stabilität und Festigkeit werden optimale Materialkombination und Lagenaufbauten für eine minimale Masse identifiziert. Zusätzlich zu der Variation des Lagenaufbaus lassen sich auch einzelnen Regionen des Stringers mit einem Faser-Metall-Mix definieren. So beeinflusst die Lage der Metallfolie im Stringerfuß, Stringerkopf und Steg die Gesamtperformance des Stringers. Neben der Bewertung von Steifigkeit und Masse wird auch die Fertigbarkeit bei der Integration der Metallfolie berücksichtigt.



Unterschiedliche Regionen des Stringers lassen sich mit einem Faser-Metall-Mix ausrüsten  
Different regions of the stringer can be equipped with a fibre-metal mix

## Auf der Suche nach dem optimalen ESN - Stringer

Um das Konzept zu validieren, fertigte das Projektteam einen Demonstrator, bei dem eine 0,4 mm dicke Edelstahlfolie gewichtsneutral in die Stringerstruktur integriert wurde, ohne die Steifigkeit des Stringers zu beeinträchtigen. Die lasttragende Metallfolie ersetzt insgesamt eine CFK-Lage auf der vollen Breite und zwei kleine CFK-Lagen im Stringerkopf des Demonstrators. Zusätzlich erfüllt der Stringer einen Teil der elektrischen Aufgaben des ESN.

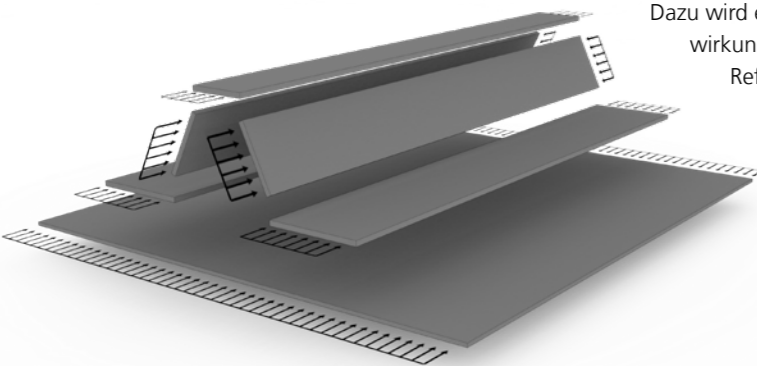
Um den multifunktionalen Stringer an das ESN anschließen zu können, werden Gewindebolzen als elektrische Anschlüsselemente auf die Metallfolie aufgeschweißt. In der Materialkombination des Demonstrators ist ein Wärmeeintrag in die CFK-Struktur nicht nachweisbar. Mithilfe eines solch gefertigten und ausgerüsteten Stringers lässt sich das ESN in der FAL deutlich schneller aufbauen, da lediglich die elektrische Verbindung zwischen den Komponenten hergestellt werden muss. Diese Zeitersparnis lässt sich direkt in eingesparte Kosten überführen.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass mit einer breiteren Metallfolie zwar das Gewicht des Stringers um einige Gramm ansteigt, die elektrische Aufgabe aber vollumfänglich erfüllt wird. Hier muss eine Gewichtsabschätzung des kompletten ESN Systems inkl. der Stringer durchgeführt werden, um die Gewichtseinsparung auf Flugzeugebene bewerten zu können.

Multifunktionaler ESN-Stringer in CFK-Stahlbauweise  
Multifunctional ESN stringer in CFRP steel construction



Lastaufteilung auf Basis der Elementsteifigkeiten am analytischen Stringer-versteiften Paneel  
Load distribution based on the element stiffnesses on the analytical stringer-stiffened panel

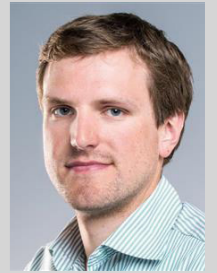


# Windkraftanlagen > Wolkenkratzer? Design für Rotorblätter > 150 m

Wind turbines > skyscrapers? Design of rotor blades > 150 m

Autor:

Edgar Werthen, M. Eng.



## Summary

By 2030, the installed capacity of German offshore wind turbines is set to increase from currently 8 to at least 30 GW. As suitable locations are rare, future offshore wind turbines will have to be significantly larger than today's resulting in total heights of over 300 m and rotor diameters of more than 280 m. Which technologies can be used for development and how can they be integrated into the rotor blade design? These questions are being addressed by the Special Research Area SFB 1463. A two-stage design process taking load-structure coupling into account is used. It was developed by our Institute together with the Centre for Wind Energy Research ForWind at the University of Oldenburg.

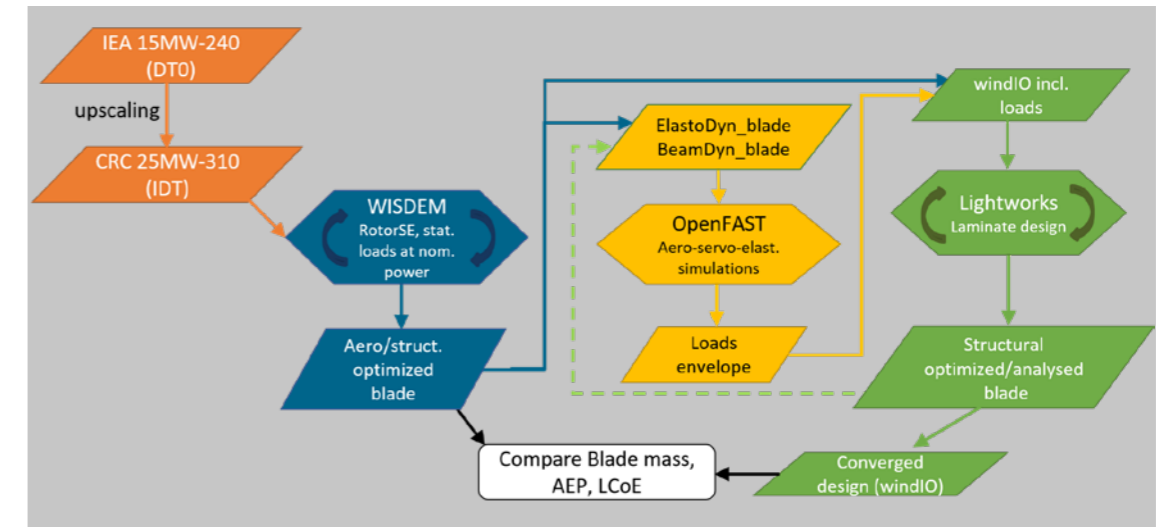
Bis 2030 soll die installierte Leistung von Offshore-Windkraftanlagen in Deutschland von aktuell 8 auf mindestens 30 GW steigen. Die Anzahl geeigneter Standorte ist begrenzt. So müssen die neuen Offshore-Windenergieanlagen deutlich größer werden als heutige Anlagen. Gesamthöhen von über 300 m und Rotoren von mehr als 280 m Durchmesser sind notwendig. Welches sind die Technologien für die Anlagenentwicklung und wie lassen sie sich in den Rotorblattentwurf integrieren? Diesen Fragen widmet sich der Sonderforschungsbereich [SFB 1463](#). Zur Auslegung und Bewertung derartiger Rotorblattkonzepte dient ein zweistufiger Entwurfsprozess, der die Last-Struktur-Kopplung berücksichtigt. Entwickelt hat ihn unser Institut zusammen mit dem Zentrum für Windenergieforschung [ForWind Universität Oldenburg](#).

Von 8 auf 30 GW installierte Leistung bis 2030 mit Offshore-Me-gastrukturen

Verringerte Stromgestehungskosten bei massiv gesteigertem jährlichen Energieertrag – so lauten die Hauptanforderungen an Offshore-Windkraftanlagen. Bis 2030 soll die installierte Leistung in Deutschland von aktuell 8 auf mindestens 30 GW und bis 2045 auf mindestens 70 GW steigen. Dazu müssen Offshore-Windkraftanlagen immer leistungsfähiger werden; das heißt immer größere Anlagen mit längeren Rotorblättern. Beim geometrischen Hochskalieren bestehender Anlagendesigns steigen Rotorblattmasse und Kosten mit zunehmender Rotorblattlänge mit der dritten Potenz, der Energieertrag jedoch nur mit der zweiten Potenz.

## Last-Struktur-Kopplung für große Anlagen

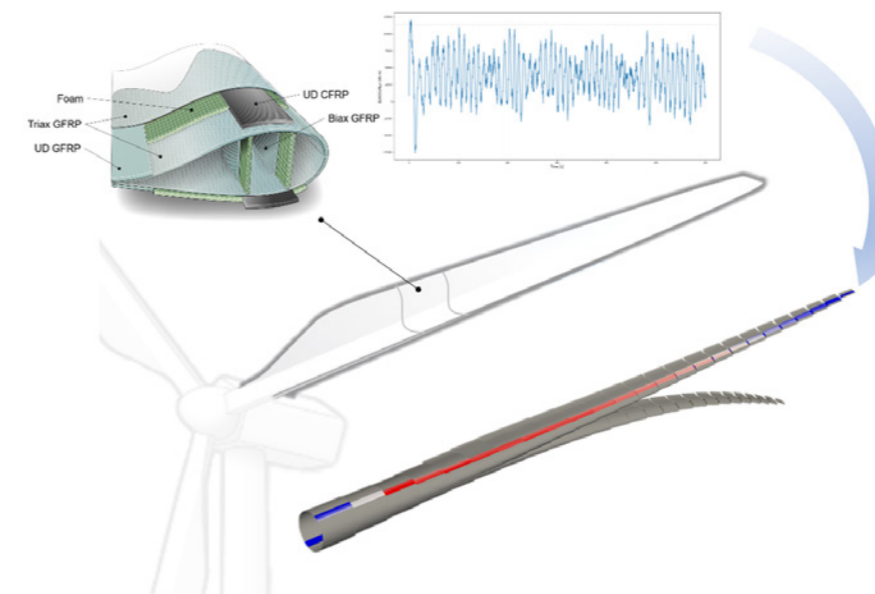
Im [SFB1463](#) der DFG hat unser Institut zusammen mit dem Zentrum für Windenergieforschung [ForWind Universität Oldenburg](#) einen zweistufigen Designprozess entwickelt, der Rotorblätter mittels Last-Struktur-Kopplung optimiert. Der erste Schritt findet mit schnellen Rechenverfahren und vereinfachten Annahmen für die Lasten und Auslegungskriterien einen Kompromiss zwischen aerodynamischer Effizienz und struktureller Integrität als Startlösung für die erweiterte Optimierung. Ein statischer Lastfall dient dabei als Input für die vereinfachte Strukturanalyse und Optimierung mit Hilfe eines Festigkeitsnachweises auf Basis der Spannungen in den Gurten. Die zweite Stufe besteht aus einer aero-servo-elastisch gekoppelten Lastsimulation und einer Strukturoptimierung mit dem an unserem Institut entwickelten [Framework Lightworks](#). Aus den Lastzeitreihen lassen sich statische Ersatzlasten für die gradientenbasierte Optimierung des Rotorblattentwurfs der ersten Designstufe in Lightworks generieren. Das Framework stellt verschiedene Faserverbundparametrisierungen als Designvariablen zur Verfügung. Hier kommen alle Einzellagendicken zur Verwendung. Der Solver PreDoCS ermittelt aus den äußeren statischen Ersatzlasten die Spannungen und Verformungen des Rotorblattes mit Hilfe von Balkenmodellen und stellt diese für die Optimierung bereit. Die Versagensgrenzen für Festigkeit und Stabilität in allen Bereichen des Blattes bilden die Randbedingungen.



Zweistufiger, aero-strukturgekoppelter Designprozess  
Two-stage aero-structural coupled design process

## Das Rotorblattdesign für eine 25 MW Windkraftanlage

Grundlage für die Untersuchung von zwei Designvarianten ist eine geometrisch hochskalierte 25 MW Version der [IEA 15MW-240 Referenzturbinen](#). In Variante 1 optimiert der erweiterte Designprozess den bestehenden Lagenaufbau und seine Einzellagendicken. Bei Variante 2 sind zusätzlich die Profilpositionen als Design-Parameter freigeschaltet. Die veränderte Rotorblattgeometrie beeinflusst nicht nur die Struktureigenschaften, sondern auch die Aerodynamik und den Energieertrag. In die Bewertung der Rotorblattdesigns fließen Energieertrag und Stromgestehungskosten der Gesamtanlage ein.



Materialverteilung und Lasten als Input für das Rotorblattdesign  
Material distribution and loads as input for the structural design of the rotor blade

## Ergebnisse

Mit den verwendeten Methoden und der aero-strukturellen Optimierung ließ sich die Masse um 35 % reduzieren. Die Stromgestehungskosten verringerten sich um 1,7 % bei konstant gehaltenem Energieertrag im Vergleich zur geometrisch hochskalierten Version und der IEA 15 MW Referenzanlage. Das „kubisch-quadratische Gesetz“ ist hier außer Kraft gesetzt.

# Diese Hinterkantenklappe für ein Winglet ist FAMoUS – Druckaktuierte Steuerflächen für bessere Effizienz

*This winglet tab is FAMoUS - Pressure actuated control surfaces for higher efficiency*

Autor:

Dipl.-Ing. Ralf Keimer



## Summary

*In the frame of the EU Project MANTA (MovAbles for Next generaTion Aircraft) we designed a winglet tab based on fluid actuated morphing unit structures (FAMoUS) for load alleviation. These unit structures are pressurized cells build of an elastomeric structure combined with stiffening elements, which under inner pressure from a fluid elongate in one direction. Two groups of these cells stacked on one another with different pressures exhibit a bending motion of the structure enabling a deflection of the control surface of the winglet-tab. The FAMoUS cells combined with a decentralized hydraulic actuation can be installed locally without increased drag due to the clean surfaces. The research shows that such systems are able to be used for load alleviation, leading to reduced weight and thus increased efficiency.*

**Steigerung der Effizienz ist ein Ziel in der Entwicklung von modernen Flugzeugen. Elastisch verformende (morphende) Strukturen bieten die Möglichkeit einer Effizienzsteigerung durch Gewichtsreduktion. Minimierung der Anzahl bewegter Bauteile oder die Möglichkeit aktiver Lastkontrolle sind Optionen einer Gewichtsreduktion.**

Das EU Projekt MANTA (MovAbles for Next generaTion Aircraft) adressiert morphende Strukturen unter diesem Aspekt. Wir haben ein Labormuster einer Hinterkantenklappe für ein Winglet entworfen und gebaut. Diese Klappe ermöglicht Lastbeeinflussung an der Flügelspitze durch das FAMoUS Prinzip, wobei FAMoUS für Fluid-Actuated Morphing Unit Structure (Fluid betriebene, morphende Einheitszellen) steht.

Diese Zellen sind Druckzellen, die aus einer Kombination von versteifenden Ringen und einem Elastomer aufgebaut sind. Durch die Beaufschlagung dieser Zellen mit Druck durch ein Fluid ändern sie ihre Länge und können dabei Arbeit verrichten. Kombiniert man zwei solche Zellen übereinander und beaufschlagt sie mit unterschiedlichem Druck, so ergibt sich daraus eine Biegung der Struktur, die die gewünschte Kontrollflächenbewegung realisiert.

Die Vorteile des FAMoUS Prinzips liegen darin, dass:

- Struktur und Aktuator ein Bauteil sind und dadurch eine glatte Oberfläche entsteht, die entgegen herkömmlichen Klappen mit Gelenken und Hydraulikzylindern keinen zusätzlichen Widerstand generieren
- es auch in sehr beengten Bauräumen realisiert werden kann.

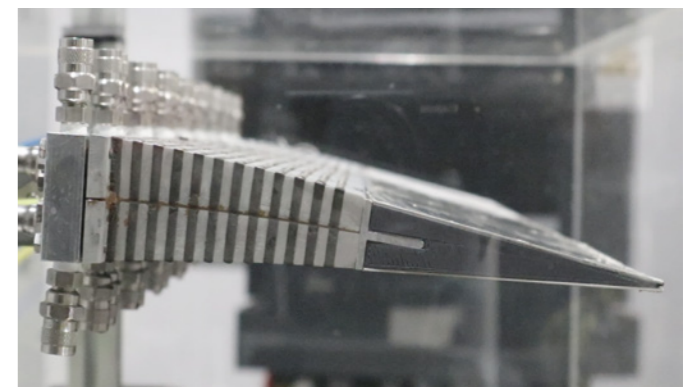
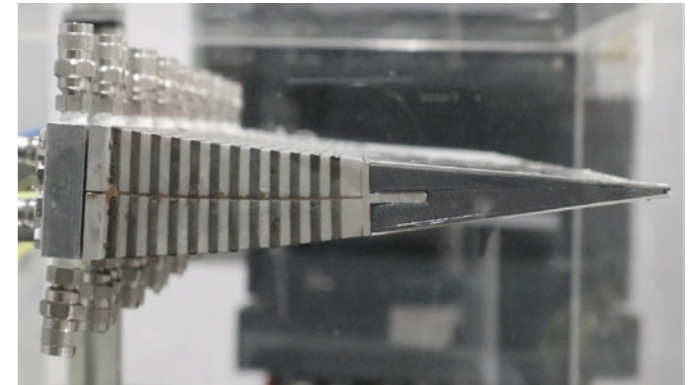
Das gebaute Labormuster hat eine Spannweite von circa 1 m und ermöglicht die Untersuchung von Materialauswahl, Auslegung und Fertigung einer solchen Struktur. Ein Hydrauliksystem ergänzt die Klappenstruktur, das die Auslenkung der Klappe auf vorgegebene Ausschlagwinkel regeln kann und somit die Klappe tatsächlich als Steuerfläche einsetzbar macht. Das Hydrauliksystem ist als elektrisch betriebenes System konzipiert, das dezentral z.B. auch im Flügel platziert werden kann. Die Untersuchungen des Antriebssystems schließen luftfahrtüblich Redundanzen der Antriebe zur Sicherheit ein.

Die durchgeführten Versuche haben erfolgreich nachgewiesen, dass die Designparameter einer solchen Klappe verstanden sind, der Bau mit luftfahrtgeeigneten Materialien möglich ist und die erforderlichen Auslenkungen erreicht werden können.

Die nächsten Schritte zur Erhöhung des technischen Reifegrades sind:

- Eine Umsetzung in voller Größe
- Experimentelle Untersuchungen des Verhaltens bei von der Raumtemperatur abweichenden Bedingungen
- Experimentelle Simulation von Luftlasten
- Lebensdaueruntersuchungen

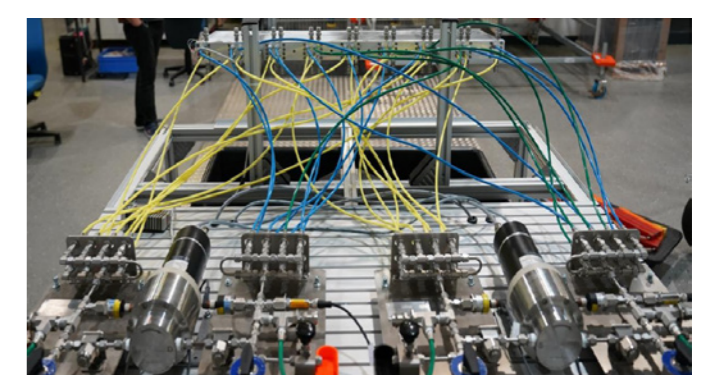
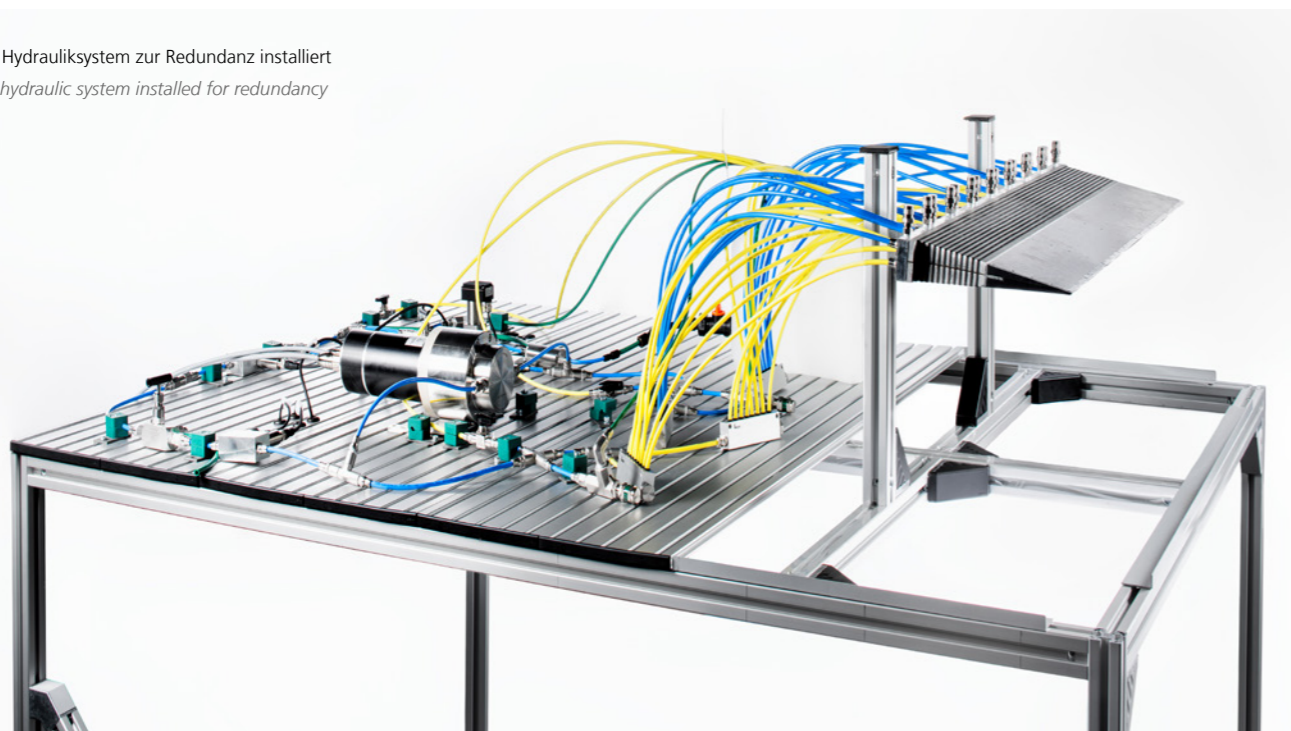
Die hier vorgestellten Arbeiten wurden durch das Clean Sky 2 Joint Undertaking (JU) mit dem Förderkennzeichen 724558 (MANTA – „Movables for Next Generation Aircraft“) gefördert. Das JU wird durch das Horizon 2020 Forschungsprogramm der Europäischen Union getragen.



Auslenkung der Hinterkantenklappe durch verschiedene Drücke in den oberen und unteren Druckzellen.

*Movement of the winglet-tab due to different pressures in upper and lower pressure cells.*

Zweites Hydrauliksystem zur Redundanz installiert  
*Second hydraulic system installed for redundancy*



Labormuster mit morphender Struktur und Hydrauliksystem  
*Test-specimen with morphing structure and hydraulic actuation system completed*



## PRODUKTION

*Production*

42

*Großes fängt oft klein an: Systemleichtbau als Kleinflugzeugtechnologie  
Big things often start small: lightweight systems as small aircraft technology*

44

*Die AFP-Welt rotiert – LH2-Tankstrukturen aus CFK  
The AFP world rotates - LH2 tank structures made of CFRP*

46

*Plug & Play – Mühelos zur digitalisierten Fertigung mit DigiDAQ  
Plug & Play - Digitalized production simplified with DigiDAQ*

48

*Komplexe, hochintegrierte Leichtbausysteme –  
Additive Funktionalisierung macht's möglich  
Complex, highly integrated lightweight construction systems -  
Additive functionalisation makes it possible*

# Großes fängt oft klein an: Systemleichtbau als Kleinflugzeugtechnologie

*Big things often start small: Lightweight systems as small aircraft technology*

Autoren:

Fabian Neumann, M.Sc.  
Linus Jacobsen, M.Sc.  
Dominic Bertling, M.Eng.  
Dr.-Ing. Martin Radestock



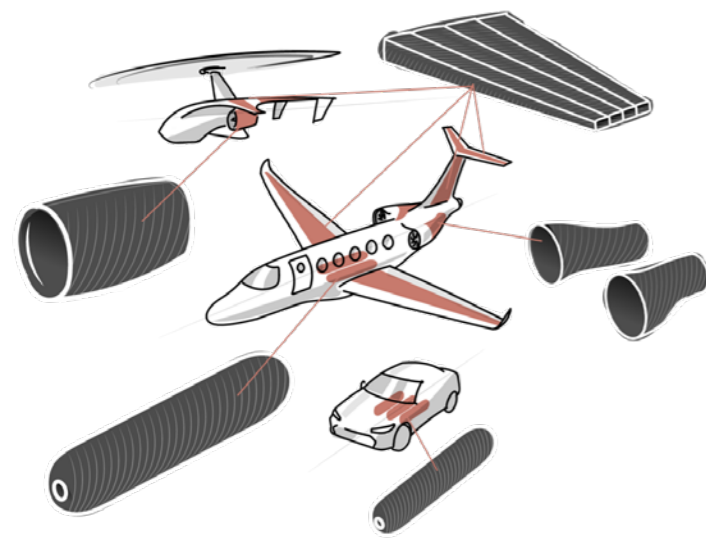
## Summary

At DLR's Innovation Center for Small Aircraft Technologies (INK) in Aachen, the Institute of Lightweight Systems engages in research on technological modules aimed at advancing electrified and climate-neutral aviation for the future. Emphasizing small aircraft allows for the swift translation of research findings into practical implementation within the air transport system. This article offers a concise overview of the four primary research areas at INK.

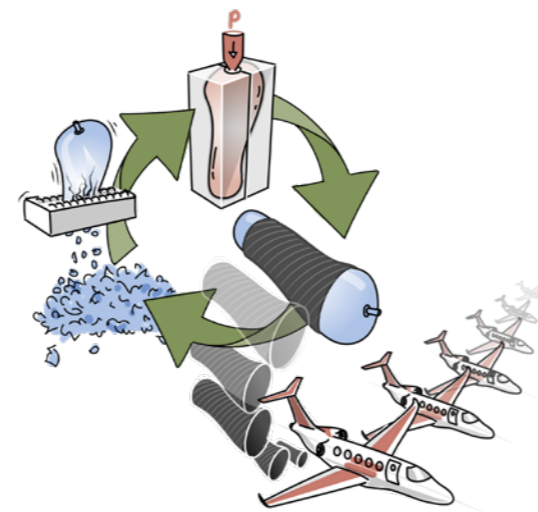
Das Institut für Systemleichtbau forscht am [Innovationszentrum für Kleinflugzeugtechnologien \(INK\)](#) des DLR in Aachen an Technologiebausteinen für eine elektrifizierte und klimaneutrale Luftfahrt von morgen. Der Fokus auf Kleinflugzeuge ermöglicht den beschleunigten Transfer der Forschungsergebnisse in die Umsetzung im Luftverkehrssystem. In diesem Artikel wird ein knapper Überblick über die vier grundfinanzierten Forschungsschwerpunkte des Instituts am INK präsentiert.

### Projekt S<sup>2</sup>TOL: Fertigung komplexer FVK-Hohlkörper mit digitaler Prozesskette

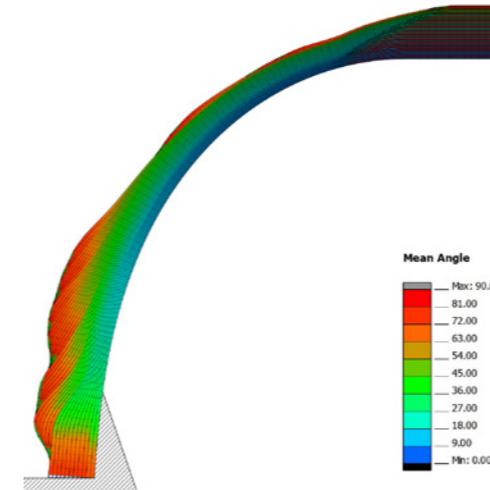
Mit dem Projekt S<sup>2</sup>TOL (engl. Silent Short Takeoff and Landing) wird ein neues Konzept für ein extrem leises und kurzstartfähiges Luftfahrzeug untersucht und im Flugexperiment demonstriert. Die Verwendung eines ummantelten elektrischen Propellertriebwerks erlaubt die Minimierung der Schallemissionen im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben. Am Beispiel der Nacelle (der Triebwerksummantelung) untersucht das Institut für Systemleichtbau zwei Hauptforschungspunkte: Zum einen ein hochratenfähiges Fertigungskonzept für FVK-Hohlkörper, bei dem zur Entformung schrumpfbare blasgeformte Kunststoffkerne zum Einsatz kommen, zum anderen die sensorische Begleitung dieses Fertigungsprozesses. Auf Basis einer systematischen Literaturrecherche wurden Ultraschall-, Lamb-Wave- und dielektrische Sensoren ausgewählt und in Fertigungsversuchen deren Einsatzfähigkeit auf Kunststoffwerkzeugen im Vergleich zu herkömmlichen metallischen Werkzeugen untersucht. Aufgrund der geringen Impedanzunterschiede zwischen Werkzeug und Matrix können hier deutlich kleinere Amplitudenschwankungen aufgelöst werden, was eine genauere Analyse des Fertigungsprozesses ermöglicht. Des Weiteren wird in enger Zusammenarbeit mit dem IKV der RWTH Aachen an der Prozessoptimierung für die blasgeformten Werkzeuge gearbeitet.



Beispiele von Faserverbund-Hohlkörpern für die Hochratenfertigung  
Examples of fibre composite hollow bodies for high-rate production



Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses auf blasgeformten Kernen  
Schematic illustration of the manufacturing process on blow-moulded core



Lagenaufbau eines von [Tankoh2](#) optimierten Drucktanks  
Layer setup of a pressure tank optimized by [Tankoh2](#)

### Projekt KoPf: Der Übergang zum dynamischen Produktionsumfeld

Im [Projekt KoPf \(Kennwertdatenbank und optimierte Produktionstechnik für Kleinflugzeuge\)](#) wird der Übergang von der nachgeschalteten Qualitätssicherung einer statischen Produktionsumgebung zu einer Ist-Daten-basierten Qualitätsoptimierung im dynamischen Produktionsumfeld eingeleitet. Hierzu wird eine Infrastruktur der nächsten Generation mit automatischen Qualitätssicherungsmethoden und Möglichkeiten der adaptiven Prozessanpassung benötigt. In einem ersten Schritt wurden bestehende Prozessketten hinsichtlich der lückenlosen Überwachung sowie Dokumentation analysiert, optimiert und digitalisiert. Des Weiteren wurde eine webbasierte Anwendung entwickelt, die aus einem Front- und Backend besteht und dazu dient, alle relevanten Daten einzugeben und zu verarbeiten. Die Webanwendung und die verbundene digitalisierte Produktionsumgebung bieten die Grundlage dafür, real erreichte Bauteilkennwerte mit gemessenen Fertigungsparametern in Korrelation zu bringen. Sind diese Zusammenhänge nachgewiesen und quantifiziert, können prozessabhängige Kennwerte für die Bewertung sowie Zulassung genutzt werden.

### Projekt D-Light: Optimierte Hochdrucktanks trotz Fertigungsunsicherheiten

Für das Projekt D-Light (engl. Digital climate neutral light aircraft) werden CFK-Hochdrucktanks zur Wasserstoffspeicherung in einem Brennstoffzellen-betriebenen Kleinflugzeug entwickelt. Für den Entwurf der gewickelten Tanks innerhalb des Designworkflows wurde dafür das Tankoptimierungstool [Tankoh2](#) weiterentwickelt. Mit Tankoh2 ist es möglich, unter Berücksichtigung ausgewählter Randbedingungen und Fertigungsparameter durch iterative Optimierung einen optimalen Lagenaufbau zu erstellen. Das DLR stellt die entwickelte Anwendung als Open-Source-Software bereit. Eine Besonderheit bei D-Light ist, dass Unsicherheiten aus der Tankfertigung in den Entwurfsprozess integriert werden. Die klassische Auslegung basiert auf idealisierten Rechenmodellen, die Fertigungseigenheiten durch hohe Sicherheitsfaktoren kompensieren. Um den Einfluss dieser Parameter zu quantifizieren, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die zu erwartenden Variationen im Faservolumengehalt oder des Faserablagewinkels einen signifikanten Einfluss auf den Berstdruck der Tanks haben. Aus der Kombination von Optimierung und stochastischen Methoden wird in D-Light eine Auslegungsmethodik entwickelt, die bekannte Fertigungsunsicherheiten einbeziehen kann, um robuste Tanks zu entwerfen.

### Projekt SMART-MET: Flight Safety of Small Aircraft under Adverse Meteorological Condition

Eissensoren und Eisschutzsysteme bei Kleinflugzeugen sind heutzutage keine Standardsysteme, obwohl diese einen signifikanten Sicherheitsgewinn bedeuten. Selbst leichte Vereisungen am Flügel, die nicht erkannt werden, können zu fatalen Flugunfällen führen. Jedoch bei einer rechtzeitigen Warnung könnte ein Pilot ein Vereisungsgebiet schnellstmöglich verlassen oder ein Eisschutzsystem aktivieren. Das Projekt SMART-MET beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung anwendungsnaher Forschungskonzepte für die Eissensorik und die Enteisungssysteme. Kleinflugzeughersteller können neuartige Konzepte aufgrund hoher Risiken nicht entwickeln. Das Projekt SMART-MET schließt diese Entwicklungslücke, damit energieeffiziente Eisschutz- und Eiserkennungssysteme zukünftig in Kleinflugzeugen standardmäßig verfügbar sind. Hersteller aus dem rheinischen Revier partizipieren in dem Projekt, um die Systeme anwendungsnah zu integrieren und um einen neuen Standard in Bezug auf die Flugsicherheit bei Kleinflugzeugen zu setzen.



Eisansammlung an einer Vorderkante während des Flugs  
Ice accumulation on a leading edge during flight

# Die AFP-Welt rotiert – LH2-Tankstrukturen aus CFK

The AFP world rotates - LH2 tank structures made of CFRP

Autoren:

Dipl.-Ing. Christian Krombholz  
Dipl.-Ing. Dominik Delisle



## Summary

Hydrogen has a great Potenzial for the future of CO<sub>2</sub>-free drives. Stored in liquid form, comparatively low operating pressures are required compared to gaseous storage, which means that the gravimetric index of the overall system can be increased. This makes the use of liquid hydrogen an attractive alternative to paraffin or SAF, and two different manufacturing processes are being considered for the production of LH<sub>2</sub> tank structures. One is the winding process and the other is automated fibre placement (AFP). Compared to the winding process, AFP offers the Potenzial of greater flexibility in terms of laminate design and mass savings by avoiding crossing points of the material paths in the dome area. This also reduces the risk of excessive tension and the associated formation of micro-cracks. The suitability of the AFP process for the production of LH<sub>2</sub> tank structures was first demonstrated within the DLR as part of the HyStor project. Further research was required, particularly in the description of the material-side limits and the adaptation of lay-up strategies.

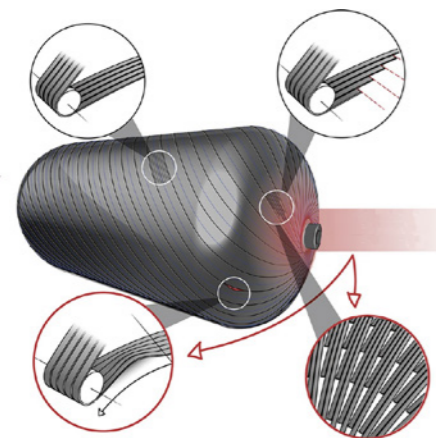
**Der Einsatz von Wasserstoff als nachhaltiger Energieträger für zukünftige CO<sub>2</sub>-freie Antriebe bietet großes Potenzial zur Dekarbonisierung. Neben bodengebundenen Anwendungen wie schweren Nutzfahrzeugen und Schifffahrt kann Wasserstoff auch in der Luftfahrt als alternativer Energieträger zu Kerosin und Sustainable Aviation Fuels (SAF) beitragen.**

## Wasserstofftanks für die Luftfahrt

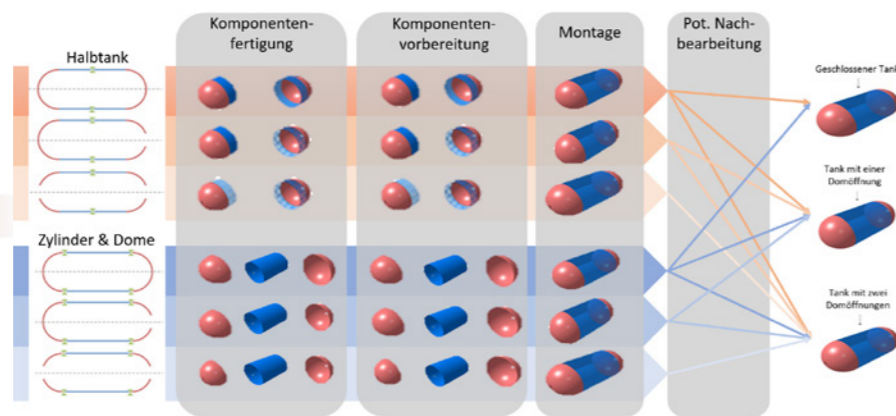
Im Vergleich zu Schweröl oder Kerosin hat Wasserstoff eine höhere massenbezogene, aber geringere volumenbezogene Energiedichte. Daher benötigt ein wasserstoffbetriebenes Fahrzeug ein größeres Speichervolumen. Drucktanks mit Betriebsdrücken bis zu 700 bar sind in bodengebundenen Anwendungen üblich, bieten jedoch aufgrund des geringen gravimetrischen Indexes weniger Potenzial für die Luftfahrt. Die Speicherung von Wasserstoff in flüssiger Form (LH<sub>2</sub>) ist eine Alternative. Sie ermöglicht durch geringere Betriebsdrücke und reduziertes Tankstrukturgewicht einen höheren gravimetrischen Index, was die Wirtschaftlichkeit des Flugzeugs steigert.

## Design- und Bauweisenkonzepte für Composite-Wasserstofftanks

Für LH<sub>2</sub>-Wasserstofftanks aus Faserverbundmaterialien lassen sich zwei Hauptdesigns unterscheiden: das Kinderei-Konzept und die differentielle Fertigung von Dom- und Zylinderkomponenten. Das Kinderei-Konzept teilt den Tank in zylindrischen oder konischen Bereich in zwei Teile, die anschließend gefügt werden. Die differentielle Fertigung sieht die separate Herstellung von zwei Dom- und einer Zylinderkomponente vor, die später zusammengefügt werden. Die Komponenten können in 2,5D- und 3D-Strukturkomponenten unterteilt werden. Besonders die 3D-Dombereiche erfordern umfangreiche Analysen und Bewertungen der Fertigungstechnologien und deren Auswirkungen auf das Bauteildesign.



Belegungsplan einer LH<sub>2</sub>-Tankstruktur im AFP-Verfahren  
Coverage of an LH<sub>2</sub> tank structure in the AFP process



Design- und Teilungskonzepte für LH<sub>2</sub>-Composite Tanks (Typ IV/V)  
Design and partitioning concepts for LH<sub>2</sub> composite tanks (type IV/V) [HyStor]

## Fertigungstechnologien zur Herstellung von Wasserstofftanks

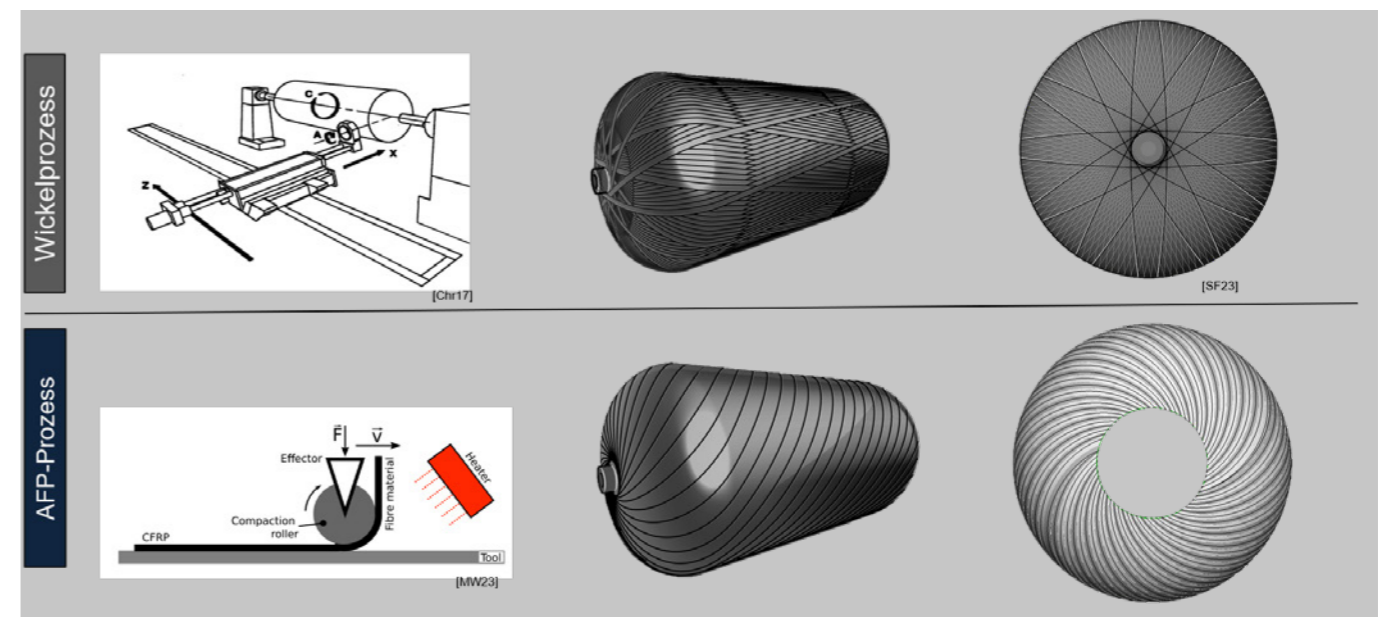
Zwei Hauptfertigungsverfahren für LH<sub>2</sub>-Tanks aus faserverstärkten Materialien (Typ 4 und Typ 5) sind das Wickelverfahren (Filament Winding) und das Automated Fibre Placement (AFP). Das Wickelverfahren, oft in der Produktion von leichten und robusten Strukturen wie Druckbehältern eingesetzt, kann im Dombereich zu Materialanhäufungen und Spannungsüberhöhungen führen, was Mikrorissbildungen begünstigt. Der AFP-Prozess vermeidet diese Effekte, indem Einzelbahnen aus mehreren schmalen Materialbändern parallel abgelegt werden. Dies minimiert Spannungskonzentrationen und erhöht die Kompaktierung des Preforms durch kontrollierte Anpresskraft. Die Methode bietet mehr Gestaltungsspielraum im Laminatdesign und das Potenzial zur Gewichtsreduktion des Tanks sowie zur Steigerung des gravimetrischen Index.

## Herausforderungen des AFP-Prozesses

Das AFP-Verfahren ermöglicht zwar zusätzliche Freiheitsgrade im Laminatdesign, birgt aber auch Herausforderungen in der Fertigung. Besonders im Dombereich sind spezifische Legestrategien erforderlich, um Fertigungsfehler zu vermeiden und die Struktur vollständig und unter Berücksichtigung insbesondere der Materialrestriktionen zu belegen. Weiterentwicklungen dieser Strategien sind notwendig, um den Anforderungen an LH<sub>2</sub>-Tankstrukturen gerecht zu werden. Ebenso müssen exakte Werkzeugpositionen erfasst und Restungenauigkeiten ausgeglichen werden. Im Rahmen des [Projektes HyStor](#) (Hydrogen Storage, Förderung N-Bank, Laufzeit 2021 – 2023) wurde eine initiale Nachweisführung der Anwendbarkeit des AFP-Verfahrens zur Herstellung eines LH<sub>2</sub>-Tanksegments erfolgreich erbracht.

## Zusammenfassung und Ausblick

Wasserstoff hat großes Potenzial für CO<sub>2</sub>-freie Antriebe. Flüssiger Wasserstoff bietet durch geringere Betriebsdrücke und höheren gravimetrischen Index Vorteile gegenüber Kerosin oder SAF. Das AFP-Verfahren zeigt gegenüber dem Wickelverfahren Vorteile in Flexibilität und Masseneinsparung und wurde im Projekt HyStor erfolgreich angewendet. Weitere Forschung ist erforderlich, um materialseitige Grenzen und Legestrategien zu optimieren.



Gegenüberstellung des AFP- und des Wickelprozesses

Comparison of the AFP and the winding process

# Plug & Play – Mühelos zur digitalisierten Fertigung mit DigiDAQ

Plug & Play - Digitalized production simplified with DigiDAQ

Autor:

Dr.-Ing. Nico Liebers



## Summary

DigiDAQ speeds up manufacturing process design by providing an intuitive framework for capturing and storing crucial data, minimizing the time and effort required for development. Through its modularity, DigiDAQ offers adaptability to diverse manufacturing environments, accommodating different measurement tasks seamlessly. Leveraging components from the Internet of Things (IoT) and open-source software ensures transparency, simplicity, and cost effectiveness. Its ability to automatically store data in a central database with timestamps enhances efficiency and facilitates real-time monitoring and analysis. Overall, DigiDAQ presents a comprehensive solution for digitized manufacturing, empowering developers to optimize processes swiftly and effectively. The DigiDAQ framework is currently prepared to be published as open hard- and software.

Die Herstellung von Faserverbunden ist komplex, wodurch die Entwicklung eines Prozesses für ein neues Bauteil oder neue Materialien aufwendig ist und viele Versuche erfordert. Die Erfassung von Daten von Fertigungsparametern oder den Bauteileigenschaften während der Herstellung ist dabei besonders wertvoll und kann die Entwicklung beschleunigen. Auch in einem eingefahrenen Serienprozess können Daten aus der Fertigung wichtige Einsichten und Erkenntnisse erbringen. Mit „DigiDAQ“ wurde ein Werkzeug entwickelt, das die Erfassung, die drahtlose Übertragung und die Speicherung der Fertigungsdaten in eine zentrale Datenbank mit Zeitstempel möglichst einfach bereitstellt. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf Modularität, Nutzerfreundlichkeit und Open Source gelegt.

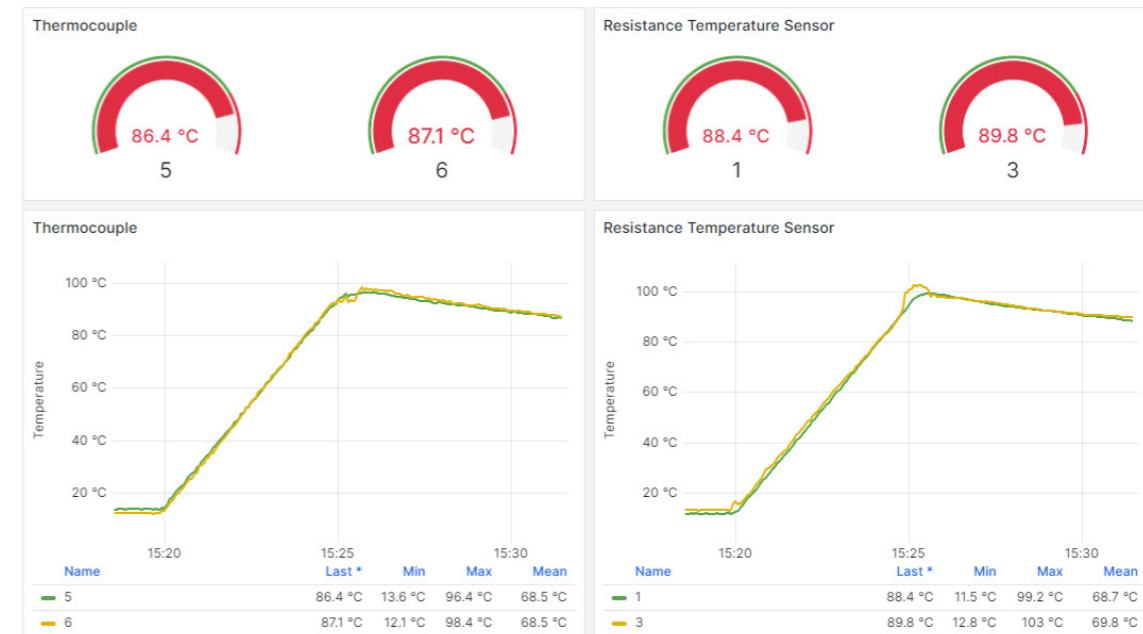
Schnittstelle zwischen physischer und digitaler Welt

DigiDAQ ist ein Framework bestehend aus Hardware und Software, die entwickelt wurde, um relevante Daten während des Fertigungsprozesses automatisiert zu erfassen. Dabei fungiert DigiDAQ als Schnittstelle sowohl für gängige Sensoren, wie Thermoelemente, als auch für Sensoren mit analogen elektrischen Ausgängen, die noch digitalisiert werden müssen. Des Weiteren werden auch die Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur und -feuchte aufgezeichnet. In der Praxis sind hierfür meist mehrere Mess-Laptops notwendig, wodurch die Daten in unterschiedlichen Formaten und Zeitstempeln aufgezeichnet und im Anschluss mühsam zusammengeführt werden.



DigiDAQ mit Messmodulen für Umgebungsbedingungen, Thermoelemente, Widerstandsthermometern, analoger elektrischer Spannung und Stromstärke

DigiDAQ with measurement modules for ambient conditions, thermocouples, resistance temperature sensors, analogue electrical voltage and current



Das DigiDAQ-System besteht aus verschiedenen Modulen, die je nach Bedarf miteinander verbunden werden können. Diese Modularität erlaubt eine flexible Anpassung an die spezifischen Anforderungen verschiedener Fertigungsumgebungen und Messaufgaben. Der modulare Aufbau gewährleistet es auch, weitere Module zu entwickeln und zu integrieren. Darüber hinaus ist auch eine batteriebetriebene Nutzung möglich, was zusätzliche Flexibilität bietet.

## Bewährtes aus dem Internet of Things nutzen

Die Grundidee hinter DigiDAQ ist es, Bausteine aus dem Bereich des Internet of Things (IoT) und Open-Source-Software zu nutzen. Dies ermöglicht nicht nur eine hohe Transparenz, sondern auch eine einfache Architektur, die wiederum dem Anwender die Möglichkeit gibt, das System schnell zu verstehen und bei Bedarf weiterzuentwickeln und zu erweitern. Dabei ist ein zentraler Fokus, dass das System leicht anwendbar ist und dem Prinzip des „Plug-and-Play“ folgt, gleichzeitig jedoch robust genug ist, um den Anforderungen der industriellen Umgebung gerecht zu werden.

Ein zentraler Aspekt von DigiDAQ ist die Speicherung der erfassten Daten in einer zentralen Datenbank (z.B. [Shepard](#)), welche direkt nach dem Einschalten automatisch und kontinuierlich erfolgt. Die Datenübertragung und Steuerung erfolgen über WLAN unter Verwendung des MQTT-Protokolls, wodurch eine effiziente und robuste Kommunikation gewährleistet wird. Diese Daten sind über Dashboards als Diagramme einsehbar und können auch über die Datenbank abgerufen werden, was eine umfassende Überwachung und Analyse des Fertigungsprozesses ermöglicht.

Insgesamt bietet DigiDAQ eine flexibel anpassbare Lösung zur Erfassung, Speicherung und Analyse von Fertigungsdaten. Durch die Kombination von IoT-Technologie und Open-Source-Software wird eine kosteneffiziente und skalierbare Lösung geschaffen, die es Entwicklern von Fertigungsprozessen ermöglicht, schnell komplexe Prozesse zu analysieren und die optimalen Parameter zu finden. Das DigiDAQ-Framework wird derzeit zur Veröffentlichung als Open Hard- und Software vorbereitet.



# Komplexe, hochintegrierter Leichtbausysteme – Additive Funktionalisierung macht's möglich

Complex, highly integrated lightweight construction systems - Additive Functionalisation makes it possible

Autorin:

Xenia Köneke, M. Sc.



## Summary

The EmpowerAX demo part team has received two awards in the past twelve months for its concept of Additive Functionalisation. The EmpowerAX Demo Part is a multi-curved carbon fibre-reinforced thermoset shell that was additively stiffened by DLR Institute of Lightweight Systems and twelve international EmpowerAX members from industry using short and continuous fibre-reinforced 3D printing, thus demonstrating the industrially available process chain of additive functionalisation. However, Additive Functionalisation enables much more than just the stiffening of composite structures. The new EmpowerAX demonstrator shows how the economical production of complex, highly integrated lightweight systems can be realised even with small quantities and a large number of variants.

Das Team rund um den EmpowerAX-Demonstrator durfte in den vergangenen zwölf Monaten für sein Konzept der Additiven Funktionalisierung gleich zwei Mal die Siegerephäre mit nach Hause nehmen. Der preisgekrönte EmpowerAX-Demonstrator ist eine doppelt gekrümmte kohlenstofffaserverstärkte Duromerschale, die vom DLR-Institut für Systemleichtbau und zwölf internationalen Mitgliedern des DLR Innovation Lab EmpowerAX (Empower Additive Extrusion) durch kurz- und endlosfaserverstärkten 3D-Druck additiv versteift wurde. Sie demonstriert die industriell verfügbare Prozesskette der sogenannten Additiven Funktionalisierung. Letztere ermöglicht viel mehr als nur die Versteifung von Verbundstrukturen. Wie die wirtschaftliche Produktion von komplexen, hochintegrierten Leichtbausystemen auch bei kleinen Stückzahlen und einer großen Variantenvielfalt realisiert werden kann, zeigt der neue EmpowerAX-Demonstrator.

EmpowerAX-Demonstrator zur Additiven Funktionalisierung - Ein Konzept mit Auszeichnung

“And the winner is... EmpowerAX!” Diese Verkündung hat das Team des DLR-Innovation Lab EmpowerAX in der Vergangenheit gleich zweimal hören dürfen. Denn zwei verschiedene Jurys zeichneten den EmpowerAX-Demonstrator zum Konzept der Additiven Funktionalisierung sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene mit renommierten Preisen aus. Im September 2023 gewann EmpowerAX den Niedersachsen Innovationspreis in der Kategorie Kooperation. Nur 5 Monate später freut sich das Team über den internationalen JEC Innovation Award in der Kategorie Aerospace Process – auch bekannt als „the oscar of composites“- in Paris.



Die Teams vom DLR und von SWMS beim Innovationspreis Niedersachsen 2023 mit dem niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kultur Falko Mohrs und dem niedersächsischen Minister für Wirtschaft, Verkehr, Bauen und Digitalisierung Olaf Lies

The teams from DLR and SWMS at the Lower Saxony Innovation Award 2023 with Lower Saxony's Minister for Science and Culture Falko Mohrs and Lower Saxony's Minister for Economic Affairs, Transport, Building and Digitalisation Olaf Lies

EmpowerAX- Team und Partner beim Sieg des JEC Innovations Award 2024

EmpowerAX team and partners win the JEC Innovation Award 2024



EmpowerAX-Handdemonstrator zur additiven Funktionalisierung  
EmpowerAX hand demonstrator for Additive Functionalisation

Möglich gemacht hat dies das großartige Konsortium aus zwölf internationalen Industriepartnern und dem DLR-Institut für Systemleichtbau, dessen Team neben der Konsortialführung auch einen entscheidenden Anteil der technischen Umsetzung des EmpowerAX-Demonstrators verantwortet hat. Seit der Vorstellung des Demonstrators zum EmpowerAX-Konzept der Additiven Funktionalisierung auf der JEC im April 2023, ist der Demonstrator gut 10.000 km durch Europa gereist. Aus der Welt des faserverstärkten 3D-Drucks ist er damit nicht mehr wegzudenken. Doch was hat es mit dem Konzept der Additiven Funktionalisierung auf sich, das der EmpowerAX-Demonstrator eindrucksvoll darstellt, und wie geht es zukünftig weiter?

## Das EmpowerAX- Konzept der Additiven Funktionalisierung

Das Konzept der Additiven Funktionalisierung beschreibt die Kombination von konventionellen Verbundwerkstoff-Fertigungsverfahren mit dem 3D-Druck. Hierbei ist insbesondere auch die Verbindung von Thermoplasten und Duromeren möglich. Die duroplastische Grundstruktur kann vergleichsweise schnell und kostengünstig mit einem etablierten Fertigungsverfahren hergestellt werden. Mit Hilfe des faserverstärkten 3D-Drucks ist die anschließende Funktionalisierung des Bauteils entsprechend seiner individuellen Anforderungen möglich. Die Optionen zum Einsatz der Additiven Funktionalisierung sind vielfältig und reichen vom Aufdrucken lokaler Versteifungsrippen über die Integration von Montage- und Klebehilfen bis zum Einbringen elektrischer Leiterbahnen in das Bauteil. Das EmpowerAX-Konzept kombiniert Materialien und Fertigungsprozesse genau so, dass diese einen möglichst großen Mehrwert bezüglich Kosteneffizienz und Ressourcenschonung bieten.

## Komplexe, hochintegrierte Leichtbausysteme auch bei kleinen Stückzahlen

Neben dem EmpowerAX-Demonstrator, verfügt das DLR-Innovation Lab auch über einen entsprechenden Handdemonstrator. Dieser zeigt verschiedene Funktionselemente, wie ein Gehäuse mit Befestigungselementen und einer Dichtungsnut, eine Wabenkernstruktur, eine Kabelführung sowie Klebe- und Ausrichthilfen. Das schnelle Aufbringen aller Funktionselemente auf die planare duroplastische Verbundwerkstoffplatte erfolgte durch 3D-Druck mit kurzfaserverstärktem Thermoplast mittels eines konventionellen 3-achsigen Desktop-3D-Druckers. Der EmpowerAX-Handdemonstrator zielt darauf ab, die besonderen Vorteile der additiven Fertigung in Kombination mit konventionellen Verbundwerkstoff-Fertigungsverfahren zu nutzen, um die wirtschaftliche Produktion komplexer, hochintegrierter Leichtbausysteme auch bei kleinen Stückzahlen und einer großen Variantenvielfalt zu realisieren.



## SYSTEM

System

52

*Überwachung von hochbelasteten Bolzenverbindungen*  
*Monitoring of highly stressed bolt connections*

54

*Adaptive Rotorblätter mit STAR-Qualitäten gegen Lärm und Vibrationen*  
*Adaptive rotor blades with STAR qualities against noise and vibrations*

56

*Smarte Verkleidungsteile für die Flugzeugkabine der Zukunft*  
*Smart linings for the aircraft cabin of the future*

58

*Innovative Schallschutzlösungen mit akustischen Metamaterialien*  
*Innovative soundproofing solutions with acoustic metamaterials*

# Überwachung hochbelasteter Bolzenverbindungen

Monitoring of highly stressed bolt connections

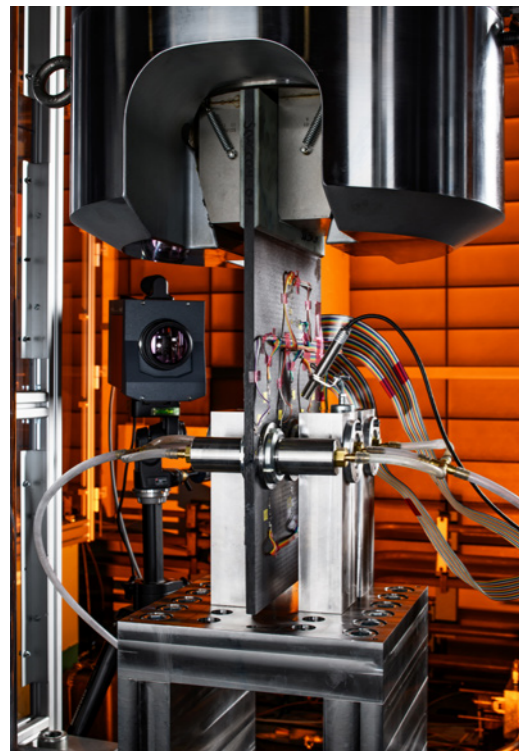
Autor:

Dr.-Ing. Till Julian Adam



## Summary

Funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, the SONYA project aims to enhance wind turbine reliability with advanced monitoring of bolt connections. This is especially relevant for risk minimization for large segmented rotor blades. The project uses a hybrid sensor system combining strain gauges and fibre-optic sensors with ultrasonic waves, analyzed through machine learning methods and data fusion. This approach aims to provide accurate structural health monitoring (SHM) with fewer false positives, enabling reliable early damage detection and minimizing downtime.



Eine instrumentierte Lochleibungsprobe mit drei Bolzenverbindungen im dynamischen Belastungsversuch  
A bearing specimen with three bolt connections and hybrid sensor setup in a dynamic load test

**Der Ausbau der Windenergie und die Senkung der Energieerzeugungskosten durch Einsatz immer größerer Windkraftanlagen ist ein entscheidender Baustein der Energiewende. Die mit der Rotorblattlänge zunehmenden statischen und dynamischen Belastungen der Strukturkomponenten erfordern den Einsatz neuer Struktur- und Überwachungstechnologien. In dem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Verbundprojekt SONYA erforscht das Institut gemeinsam mit Projektpartnern aus Forschung und Industrie die Anwendung eines hybriden Strukturüberwachungssystems für hochbelastete Bolzenverbindungen mit dem Ziel, die Gesamtverfügbarkeit von Windkraftanlagen zu steigern.**

## Fortschritt durch Structural Health Monitoring

Die bisher im Rotorblattbau für Windenergieanlagen etablierten GFK-Werkstoffe stoßen mit Zunahme der Blattgrößen an ihre Leistungsgrenzen, so dass der Bedarf für neue Werkstoffsysteme, Fertigungskonzepte und Anpassungen im Blattdesign groß ist. Bei derzeitigen Blattlängen von über 75 Metern bei Onshore-Windkraftanlagen stellt die Entwicklung segmentierter Rotorblätter, die erst am Aufstellungsort mittels Bolzenverbindungen zusammengefügt werden, einen vielversprechenden Ansatz zur Reduktion der Transportkosten und der Erschließung neuer Standorte dar. Der Einsatz neuer Technologien geht jedoch mit erhöhtem Risiko durch Ausfälle und Stillstand einher. Eine gezielte Zustandsüberwachung dieser hochbelasteten Verbindungen durch Structural Health Monitoring ermöglicht eine frühzeitige Schadenserkenkung und leistet einen Beitrag zur Reduktion der Inspektionskosten und dem wirtschaftlichen Betrieb segmentierter Rotorblätter.

## Zuverlässigkeit durch Hybridsensorik und Datenfusion

Mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Schadensdetektion zu erhöhen, werden zwei unabhängige Überwachungssysteme kombiniert. Ein passives System auf Basis klassischer Dehnungsmessstreifen sowie faseroptischer Sensoren dient der Messung lokaler Dehnungen und deren Änderungen im Schadensfall. Darüber hinaus wird ein aktives auf geführten Ultraschallwellen basierendes System eingesetzt. Während die Detektion und Analyse von Welle-Schaden-Interaktionen und die Bestimmung von Schadensort, -art und -größe in dünnwandigen Laminaten gut verstanden sind, ist die Überwachung mehrschnittiger Bolzenverbindung aufgrund der Laminatdicke und der Komplexität des Schadensverhaltens herausfordernd. Der im Projekt gewonnene experimentelle Datensatz ermöglicht die Analyse der Interaktionsmechanismen an verbindungsspezifischen Schadensmechanismen und die Weiterentwicklung der Auswertalgorithmen.

Zur Quantifizierung und Verfolgung der Strukturschädigung werden aus den Messdaten der einzelnen Systeme mittels Anomalieerkennungsmethoden Kennzahlen (sog. Schadenindizes) abgeleitet. Anschließend erfolgt unter Einsatz von Machine-Learning Methoden und Datenfusion die Ableitung eines gemeinsamen Merkmals mit dem Ziel, die Schadensdetektion zu verbessern und falsch-positive Schadenserkennungen der Einzelsysteme zu vermeiden.

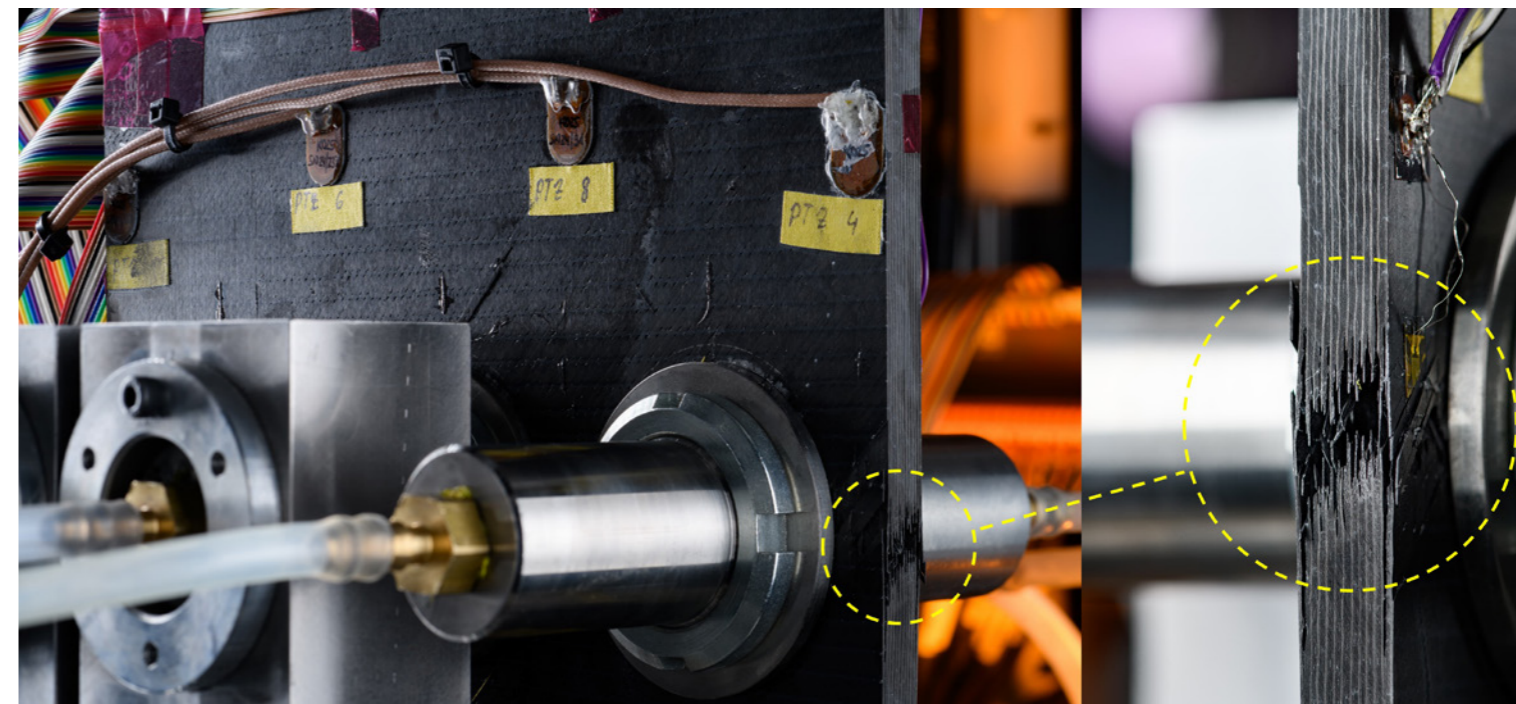
## Bolzenverbindung unter Last

Die Erprobung der Hybridsensorik und die Gewinnung experimenteller Daten erfolgte in statischen und dynamischen Lochleibungsversuchen. Zur Abbildung verschiedener Komplexitäten und Belastungssituationen wurden Versuche mit ein- und mehrschnittigen Bolzenverbindungen und unterschiedlichen Lasthöhen durchgeführt. Hierbei dienten insbesondere die Ermüdungsversuche der Erzeugung einer sukzessiv zunehmenden Schädigung. Neben der systematischen Erfassung der mechanischen Lastgrößen und der Strukturzustandsdaten wurden punktuelle pyrometrische und flächige thermografische Messungen zur Überwachung der Probekörpertemperaturen im zyklischen Versuch eingesetzt. Bei sehr hohen Lastniveaus konnte mit einer Wasserkühlung der Bolzen die entstehende Reibungswärme effizient abgeführt werden. Durch Überwachung und Begrenzung der Probekörpertemperaturen werden temperaturinduzierte Schäden und Beeinträchtigungen der Sensorsysteme verhindert.

## Erste Erfolge und weitere Schritte

Mit dem Aufbau und Einsatz der spezialisierten Prüfumgebung wurde eine experimentelle Basis entwickelt, die es ermöglicht, die Schadensphänomene in komplexen Verbindungselementen zu untersuchen und umfangreiche komplementäre Messdaten zu gewinnen. Erste am Institut für Statik und Dynamik der Universität Hannover durchgeführte Analysen zeigen, dass durch die Fusion der verschiedenen Messdaten Schäden erfolgreich erkannt werden und eine Vorhersage der Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts möglich ist, selbst wenn ein einzelnes Sensorsystem für sich genommen unzuverlässige Vorhersagen liefert. Neben der Optimierung der Auswertalgorithmen gehört die Entwicklung fortschrittlicher SHM-Sensor- und Netzwerklösungen, z.B. durch Integration verschiedener Sensortechnologien, wie piezokeramischen Ultraschallwandler auf Basis der am Institut entwickelten DuraAct-Technologie und faseroptischer Sensoren in einem Sensormodul, zu den weiteren technischen Ergebnissen.

Teil des DuraAct-Ultraschall-Sensornetzwerks (links) mit gegenüberliegendem DMS-Messfeld am Beispiel eines versagten Probekörpers.  
Part of the DuraAct sensor network (left) with opposite strain gauge pattern using the example of a failed specimen.



# Adaptive Rotorblätter mit STAR-Qualitäten gegen Lärm und Vibrationen

Adaptive rotor blades with STAR qualities against noise and vibrations

Autoren:

Dipl.-Ing. Steffen Kalow  
Dipl.-Ing. Oliver Schneider  
Dr.-Ing. Gunther Wilke



## Summary

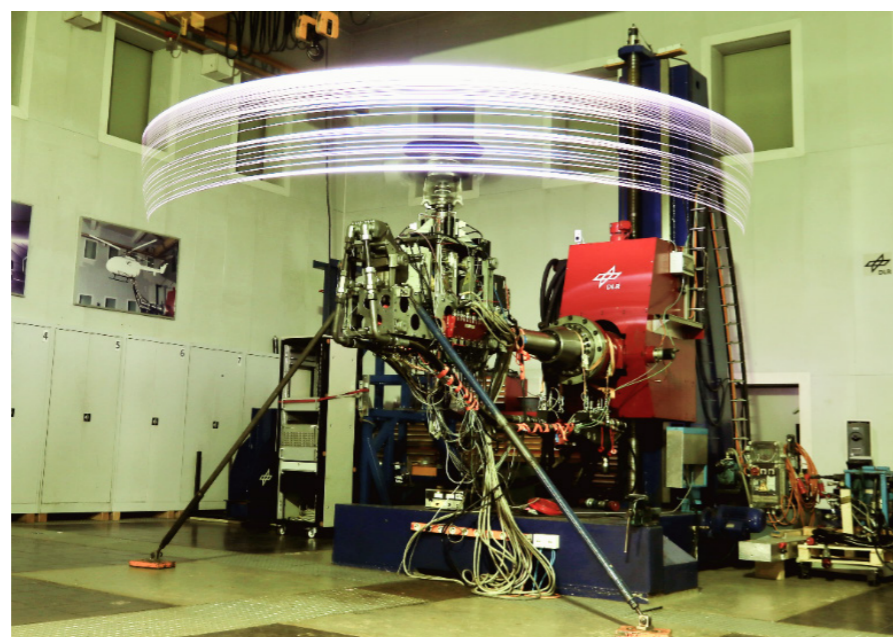
In the project STAR (Smart Twisting Active Rotor) the DLR develops a 4-bladed rotor for wind tunnel test. This rotor uses the technology of active twist for the reduction of noise, vibration and power. The active twist blades have 30 piezoceramic actuators embedded in the rotor surface that operate like a kind of artificial muscle by applying an electrical voltage. This allows the entire rotor blade to twist. This influences the propagation and interaction of blade-tip vortices. Successfully completed preliminary tests have already proven the functionality of the rotor. It is therefore sufficiently qualified for a wind tunnel test campaign in 2025 at the DNW's LLF with numerous international partners.

**Hubschrauber kommen heute in vielen kommerziellen, zivilen und militärischen Anwendungen zum Einsatz, denn der Rotor verleiht dem Hubschrauber einzigartige Flugeigenschaften. Jedoch ist der Rotor auch die Hauptquelle für den entstehenden Lärm. Weiterhin sind Vibrationen bei Hubschraubern im Vergleich zu Flugzeugen viel höher und wirken sich negativ auf die Besatzung und die Passagiere aus. Die Vibrationen verkürzen unter anderem die Lebensdauer mechanischer und elektrischer Komponenten. Neue, aktiv verwindbare Rotoren reduzieren den Lärm, die Vibrationen und den benötigten Leistungsbedarf des Hubschraubers.**

Ein großer Teil des Lärms entsteht am Hubschrauber durch die Wechselwirkung der Rotorblätter mit den sogenannten Blattspitzenwirbeln, indem der Wirbel eines Rotorblatts mit dem nachfolgenden Rotorblatt kollidiert. Die dabei auftretenden Wechselwirkungen am Rotorblatt verursachen nicht nur das typische "Teppichklopper-Geräusch", sondern führen auch zu Vibrationen im Hubschrauber. Hochgenaue Änderungen des Anstellwinkels jedes einzelnen Rotorblattes, die mehrfach pro Umdrehung stattfinden, verringern die Blattwirbelinteraktion deutlich.

## Aktive Verwindung gegen Lärm

Das DLR-Projekt STAR (Smart Twisting Active Rotor) adressiert genau eine solche Technologie unter dem Aspekt der Reduktion von Lärm, Vibration und benötigter Leistung. Die aktiv verwindbaren Rotorblätter besitzen in die Oberfläche eingebettete piezokeramische Aktuatoren, die durch Anlegen einer elektrischen Spannung in der Lage sind, wie eine Art künstlicher Muskel zu fungieren. Das so verwundene Rotorblatt kann dadurch Einfluss auf die Ausbreitung, Lage und Intensität von Luftwirbeln nehmen.



Erprobung der STAR-Rotorblätter in der DLR Rotorhalle  
Testing the STAR rotor blades in DLR rotor hall

## Vorteile aktiv verwindbarer Rotorblätter:

- direkt in die Haut integrierte Aktuatoren (es sind keine mechanischen Teile vorhanden, die wiederum Lärm und Luftwiderstand erzeugen und wartungsanfällig sind),
- hohe aerodynamische Wirksamkeit
- geringer Einfluss auf die Blattfestigkeit
- 



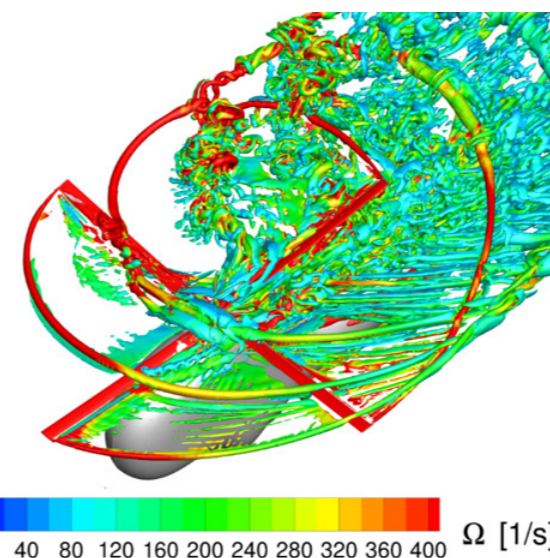
Piezokeramiken und Drucksensoren integriert in die Rotorblattoberfläche  
Piezo ceramics and pressure sensors integrated into the blade surface

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein auf die Machzahl skaliertes 4-Blattrotor mit einem Durchmesser von vier Metern gefertigt und aufgebaut. Jedes Blatt verfügt über 30 Aktuatoren und einer Reihe von unterschiedlichen Sensoren zur Verformungsmessung. Weiterhin kann die Druckverteilung an der Außenhaut jedes Rotorblattes mit bis zu 100 integrierten Drucksensoren an verschiedenen Radiuspositionen bestimmt werden.

## Vorversuche beweisen die Funktionalität

Nach Einzelblattversuchen haben Vorversuche mit dem 4-Blatt-Rotor bereits die Funktionalität der Rotorblätter mit verschiedenen statischen und dynamischen Ansteuerungen der Aktuatoren nachgewiesen. Für Drehzahlen bis zu 1041 rpm und bei unterschiedlichen Schubeinstellungen lassen sich mit Hilfe von Frequenz-Sweeps bis 250 Hz die sich über der Drehzahl ändernden Blatteigenfrequenzen messen. Mit Abschluss dieser Vorversuche ist das gesamte Rotorsystem erfolgreich qualifiziert. Der Rotor wird voraussichtlich in 2025 im Nieder-

geschwindigkeitswindkanal DNW-LLF in den Niederlanden erprobt. Während dieser Tests wird sich zeigen, welches Potenzial Blätter mit aktiver Verwindung bezüglich der Verringerung von Lärm, Vibrationen und benötigter Antriebsleistung unter Lasten im Flugzustand haben. Weiterhin dienen die gemessenen Daten zur Validierung der Simulationsprogramme der internationalen Partner (US Army, NASA, ONERA, KARI, JAXA, Konkuk Universität, Universität Glasgow, DNW).



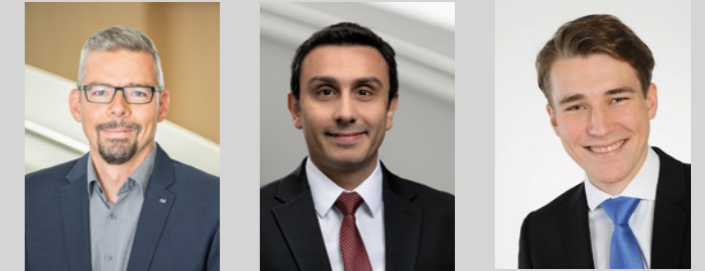
Simulierte Blattwirbel-Interaktionen des STAR II-Rotors  
Simulated blade vortex interactions of the STAR II rotor

# Smarte Verkleidungsteile für die Flugzeugkabine der Zukunft

Smart linings for the aircraft cabin of the future

Autoren:

Dr.-Ing. Malte Misol  
Ugur Dincer, M.Sc.  
Moritz Prade; M.Sc.



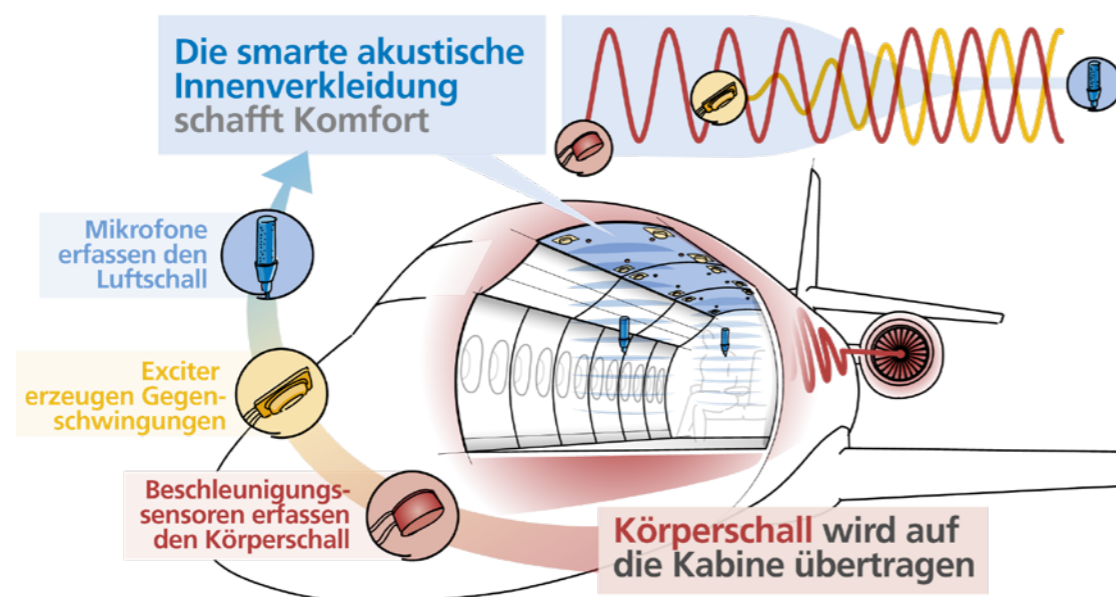
## Summary

Engine noise in the aircraft cabin is perceived as particularly disturbing when tones or tonal beats occur. Tonal noise is caused on the one hand by the rotor blades and on the other by the vibrations of the engines, which can spread through the aircraft structure into the cabin. Low-pitched sounds are particularly difficult to control because their propagation can traditionally only be prevented by the undesirable use of additional masses and insulating materials. For this reason, our institute has developed a new type of interior trim panel to reduce the level of disturbing sounds with as little additional mass as possible. The smart component can help to reduce the noise in the cabin caused by propeller or fuel-saving engines with open rotors. The developed system can even reduce low-frequency sounds in the cabin with turbofan engines. Furthermore, the additional functions of a smart interior trim panel allow, for example, passenger announcements to be played, masking noises to be generated or sensor data to be made available for analysis purposes.

Triebwerkslärm in der Flugzeugkabine wird als besonders störend empfunden, wenn Töne oder tonale Schwebungen auftreten. Ursächlich für den tonalen Lärm sind zum einen die Rotorblätter und zum anderen die Schwingungen der Triebwerke, die sich über die Flugzeugstruktur bis in die Kabine ausbreiten können. Dabei sind tiefe Töne besonders schwer in den Griff zu bekommen, weil deren Ausbreitung klassischerweise nur durch den unerwünschten Einsatz von Zusatzmassen und Dämmstoffen unterbunden werden kann. Aus diesem Grund hat unser Institut eine neuartige Innenverkleidung entwickelt, um die Pegel der störenden Töne mit möglichst wenig Zusatzmasse zu reduzieren. Das smarte Bauteil kann dazu beitragen, den Lärm in der Kabine zu reduzieren, der durch Propeller- oder treibstoffsparende Triebwerke mit offenen Rotoren entsteht. Selbst bei Turbo-Fan-Triebwerken kann das entwickelte System tieffrequente Töne in der Kabine reduzieren. Darüber hinaus ermöglichen die Zusatzfunktionen einer smarten Innenverkleidung, z. B. Passagierdurchsagen abzuspielen, Maskierungsgeräusche zu erzeugen oder Sensordaten für Analysezwecke bereitzustellen.

## Mit smarten Bauteilen effizient Lärm reduzieren

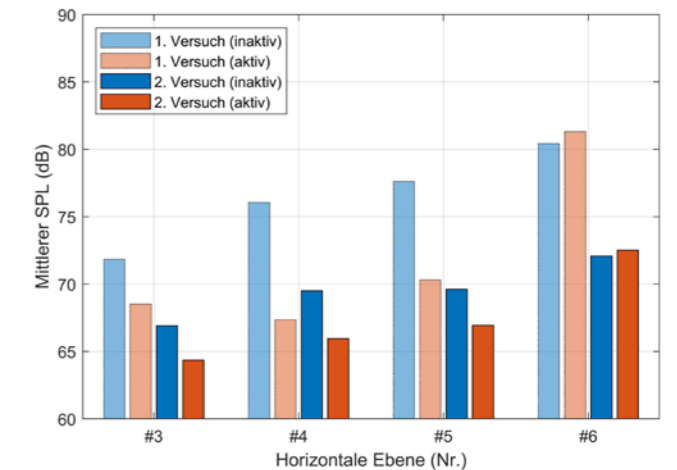
Das Funktionsprinzip der neuartigen Innenverkleidung – hier ein Deckenpaneel – ist in der unteren Abbildung dargestellt. Triebwerksvibrationen breiten sich über die Pylone in die Rumpfstruktur aus und versetzen Verkleidungsteile, wie das Deckenpaneel, in Schwingung. Diese Schwingungen wiederum führen zu einer Schallabstrahlung in die Kabine. Das smarte Deckenpaneel kann seine eigenen Schwingungen anhand der Signale von Beschleunigungssensoren erfassen. Ferner verarbeitet es Schalldruckdaten von Mikrofonen in der Kabine. Ein Controller berechnet aus den Sensordaten Ansteuersignale für die Inertialerreger, welche gezielte Schwingungen in das Bauteil einleiten, um den Schalldruck in der Kabine zu reduzieren. Das Prinzip ähnelt der bei Kopfhörern etablierten „Active Noise Cancellation (ANC)“-Methode. Im Unterschied zu lautsprecherbasierten Systemen ist das smarte Deckenpaneel dank seiner großen Oberfläche besonders gut geeignet, um hohe Schalldrücke bei tiefen Frequenzen zu erzeugen. Außerdem benötigt das System nur wenig Bauraum und kann nahezu unsichtbar in die Kabine integriert werden.



Prinzip der aktiven Lärmreduktion im Flugzeug mit einem smarten Deckenpaneel  
Principle of active noise reduction in aircraft with a smart ceiling panel

## Systemauslegung mit Messdaten des iSTAR

Messdaten aus einem früheren Bodenversuch mit dem iSTAR halfen dabei, das smarte Deckenpaneel auszulegen. Ergebnis dieses Auslegungsprozesses sind eine Aktuator- und Sensorverteilung sowie eine Abschätzung der Lärmreduktion für ein optimiertes System. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Verteilung des Schalldruckpegels (SPL) in Kopfhöhe bei 137,5 Hz und bei 404 Hz. Diese Frequenzen entsprechen den Wellendrehzahlen der Nieder- und Hochdruckverdichter bei circa 80 % Schub. Der Einfluss des aktivierten smarten Deckenpaneels auf die SPL-Verteilung in der Kopfebene ist im rechten Teil der Abbildung zu sehen. Es wird deutlich, dass das System vor allem den tieferen Ton beeinflussen kann. Dieser wird im Mittel um 6,9 dB reduziert. Dafür werden nur vier jeweils 60 Gramm schwere Aktuatoren benötigt.



## Systemtest bei Triebwerksanregung im Bodenversuch

Um das smarte Deckenpaneel unter Realbedingungen zu testen, wurde ein zweiter Bodenversuch mit Triebwerksanregung durchgeführt. Das DLR-Institut für Aeroelastik, die DLR-Einrichtung Flugexperimente, der DLR-Entwicklungsbetrieb und der Hersteller Dassault Aviation unterstützten die Versuche.

Die in der oberen Abbildung dargestellten Ergebnisse aus dem Bodenversuch belegen die Wirksamkeit des smarten Deckenpaneels. Die mittlere Reduktion des SPL auf Kopfhöhe (#4) sowie in der oben (#5) und unten (#6) angrenzenden horizontalen Ebene beträgt 3 dB. Die SPL-Reduktion fiel somit geringer aus als erwartet. Ursächlich dafür ist das veränderte Schwingungsverhalten der Triebwerke. Wie in der Abbildung erkennbar, war der SPL bei inaktivem Deckenpaneel beim zweiten Bodenversuch deutlich geringer als beim ersten. Ferner traten im zweiten Bodenversuch stärkere tonale Schwebungen in der Kabine auf, welche bei der Systemauslegung nicht berücksichtigt wurden. Daher sind deshalb weitere Tests nötig, um die Lärmreduktion des smarten Deckenpaneels auf den vorhergesagten Wert zu erhöhen.

Mittlere SPL in den horizontalen Ebenen bei inaktivem und aktivem Deckenpaneel  
Average SPL in the horizontal planes with inactive and active ceiling panel



Bodenversuch mit dem iSTAR auf dem Vorfeld des DLR  
Ground test with the iSTAR on the DLR apron

Dieses Projekt wurde im Rahmen des „Clean Sky 2 Joint Undertaking“-Forschungsprogramms der Europäischen Union „Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union“ unter der Fördervereinbarung Nr. CS2-LPA-GAM-2020-2023-01 gefördert.

This project has received funding from the Clean Sky 2 Joint Undertaking under the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No CS2-LPA-GAM-2020-2023-01.



# Innovative Schallschutzlösungen mit akustischen Metamaterialien

Innovative soundproofing solutions with acoustic metamaterials

Autor:

Ugur Dincer, M.Sc.



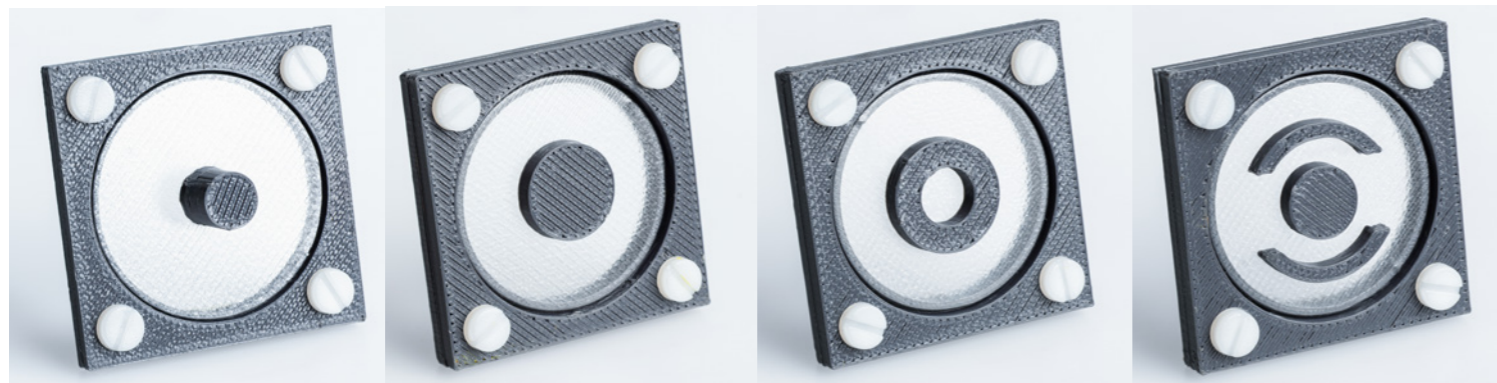
## Summary

Attenuation of low- and mid-frequency noise from various sources is challenging with conventional acoustic materials. Acoustic metamaterials (AMMs), particularly membrane-type AMMs (M-AMMs), offer an innovative solution. These materials, engineered with unit cells comprising a rigid frame, an elastic membrane, and a fixed mass, can be precisely tailored for desired vibro-acoustic responses. Additive manufacturing techniques, such as 3D printing, facilitate the accurate and repeatable production of these structures. By utilizing compatible elastic and rigid materials, membrane-type acoustic metamaterials have achieved significant sound attenuation at targeted frequencies. This advancement holds substantial promise for industrial noise reduction applications.

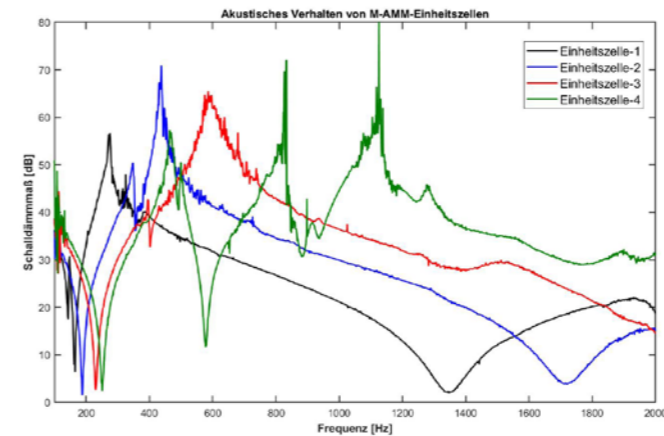
**Die Minderung von Geräuschen im niedrigen bis mittleren Frequenzbereich, die von Quellen wie Propellern, Ventilatoren und gegenläufigen Rotoren ausgehen, ist mit leichten und passiven Maßnahmen allein kaum zu erreichen. Jüngste Studien haben gezeigt, dass die Schalldämpfungseigenschaften durch Manipulation des natürlichen Verhaltens von Materialien verändert werden können. Beispielsweise kann eine Einheitszellen aus einer neuartigen Materialkombination mit bestimmten Dämpfungseigenschaften aufgebaut werden, so dass sie sich in der Gesamtheit vorteilhafter verhält als ein homogenes Material. So entstand das Konzept der akustischen Metamaterialien (AMMs).**

## Membranartige akustische Metamaterialien (M-AMMs)

M-AMMs sind für die Lärmreduktion konzipiert und zeichnen sich durch ihre Einfachheit aus. Die Einheitszellen von M-AMMs bestehen aus einem starren Rahmen, einer elastischen Membran und einer daran befestigten Masse. Das vibroakustische Verhalten von M-AMMs kann untersucht werden, indem man eine Einheitszelle mit einer kreisförmigen Membran und einer konzentrischen Scheibenmasse betrachtet, die durch eine akustische ebene Welle angeregt wird. Die Frequenz der ersten Schwingungsmoden hängt von der Größe der Masse ab, während die Frequenz der zweiten Schwingungsmoden von der Membranspannung und der Form und Verteilung der Masse abhängt. Zwischen diesen beiden Moden gibt es eine Antiresonanzmode, bei der sich die Masse und die Membran gegenphasig bewegen. Bei dieser Frequenz ist die Gesamtamplitude der Oberfläche nahezu Null. Dadurch strahlt die Struktur kaum bis keinen Schall mehr ab. Das Schwingungsverhalten der Struktur kann durch die Anpassung ihrer Parameter gesteuert werden. Die bisherige Herstellung von M-AMMs umfasst manuelle Techniken für Positionierung und Verklebung der Komponenten sowie das Aufbringen der Vorspannung. Die Reproduzierbarkeit ist daher gering und führt zu Abweichungen zwischen numerischen Simulationen und Experimenten. Da die Masse und ihre Positionierung auf der Membran aber genau kontrolliert werden müssen, erfordert der Aufbau eine flexible Herstellung und zuverlässige Reproduktion.



Additiv gefertigte Einheitszellen  
Additively manufactured unit cells



Schalldämmmaß gemessen mit dem Impedanzmessrohr

Sound transmission loss measured with the impedance measuring tube

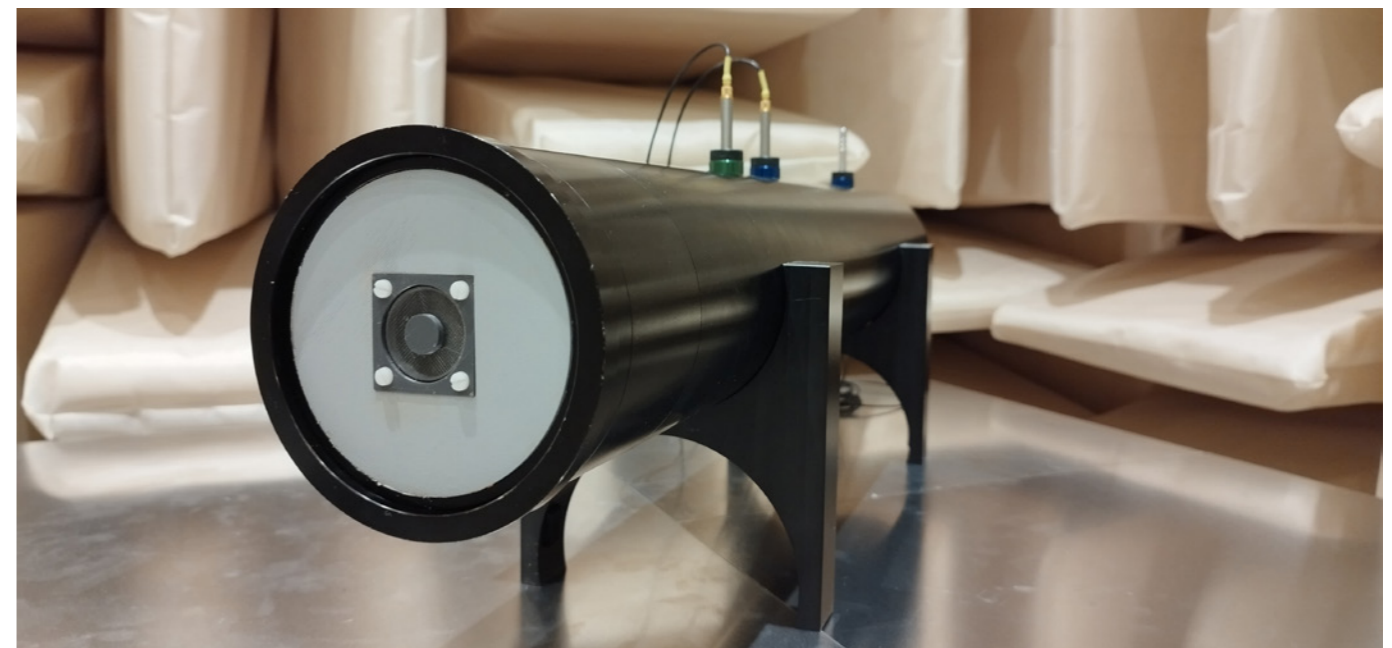
## Ein praktisches Beispiel

Um Einheitszellen (UC) zu erhalten, werden Membranen mit thermoplastischem Polyurethan-Filament gedruckt. Im gleichen Prozess wird relativ steifes Polyethylenterephthalat-Glykol-Filament für den Rahmen und die Massen ausgewählt. Um eine gleichmäßige Spannungsverteilung auf der Membran zu gewährleisten, wird eine Sekundärstruktur gedruckt, die dann mit Polyamidschrauben und -muttern befestigt wird. Die Verteilung und die Form der Massen wirken sich direkt auf die vibro-akustischen Eigenschaften der Einheitszelle aus und verändern so die Antiresonanzfrequenz, d.h. die Frequenz, bei der das Schalldämmmaß am größten ist. UC\_4 zeigt insbesondere, dass mit drei Massen auf der Membran eine multitonale Geräuschdämpfung erzielt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen das Potenzial von additiv gefertigten M-AMMs für industrielle Anwendungen, insbesondere für die Minderung von tonalen oder breitbandigen Geräuschen. Die Technologie bietet eine exakte Abstimmbarkeit und eine hohe Genauigkeit, was sie für verschiedene Branchen vielversprechend macht.

Impedanzmessrohr mit Probe

Impedance measuring tube with sample





## NACHHALTIGKEIT

*Sustainability*

Detail aus dem Projekt BioForm  
*Detail from the BioForm project*

62

Kreislaufwirtschaft und Leichtbau im Bausektor: Viel Potenzial für rezyklierte Kohlenstofffaser  
*Circular economy and lightweight design in the building sector:  
A multitude of Potenzial applications for recycled carbon fibres*

64

Luftfahrt im Wandel: Green Deal-Meilenstein für nachhaltige Bauteil-Wiederverwendung  
*Aviation in transition: Green Deal milestone for sustainable component reuse*

# Kreislaufwirtschaft und Leichtbau im Bausektor: Viel Potenzial für rezyklierte Kohlenstofffasern

Circular economy and lightweight design in the building sector: A multitude of potential applications for recycled carbon fibres

Autor:

Dipl.-Ing. Jens Bachmann



## Summary

A solvolysis based recycling process and application of recycled carbon fibres in carbon concrete offer a high potential to reduce environmental impacts caused by energy consumption and depletion of fossil resources for the production of virgin carbon fibres. The project EDISON-rCF demonstrates a complete process chain including diminution, shredding, solvolysis and production of semi-finished products. Preliminary Life Cycle Assessment results for the substitution of virgin carbon fibres by recycled ones in a rebar for carbon concrete show a significant reduction of global warming Potenzial.

**Der Energieaufwand und der Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen sind bei der Herstellung neuer Kohlenstofffasern (virgin carbon fibre, vCF) auf Basis von Polyacrylnitril (PAN) sehr hoch. Daher ist die Wiederverwendung der Kohlenstofffasern in geschlossenen Stoffkreisläufen aus ökonomischer und ökologischer Sicht erstrebenswert. Dabei bestehen trotz etablierter Recyclingverfahren, wie der Pyrolyse weitere Potenziale bei den CFK. Das Projekt EDISON-rCF\* demonstriert die Möglichkeiten einer Recycling-Prozesskette zur Gewinnung hochwertiger rezyklierter Kohlenstofffasern (rCF) aus einem Solvolyseprozess und deren Anwendung in klassischen Faserverbundwerkstoffen sowie einer innovativen Anwendung in Bewehrungsstäben für Carbonbeton.**

## Effiziente Recyclingverfahren für CFK

Ein wichtiger Faktor für die Einrichtung von Recyclingrouten ist die Schaffung von Anreizen für das Recycling mit geringen Einbußen der Materialeigenschaften (Downcycling), der effizienten Weiterverarbeitung zu neuen Halbzeugen und deren Nutzung in geeigneten Anwendungen. Diese Anreize können über einen attraktiven Preis sowie gute mechanische Eigenschaften geschaffen werden. Dafür wurden im Projekt EDISON-rCF alle notwendigen Schritte von der Zerkleinerung und Sortierung bis hin zur Herstellung neuer Faserhalbzeuge behandelt. Anstatt des etablierten Pyrolyseprozess wurde eine Solvolyse für das Recycling des CFK verwendet. Beim Solvolyseprozess wird zusätzlich zur Wiedergewinnung der Kohlenstofffasern die Polymermatrix des CFK in einem Druckreaktor mit einem Lösungsmittel in erneut nutzbare Oligomere zerlegt.



Zeisberg Carbon rCF-Rebar®, der weltweit erste Bewehrungsstab aus rezyklierten Kohlenstofffasern (Foto: Stefan Gröschel, TU Dresden)

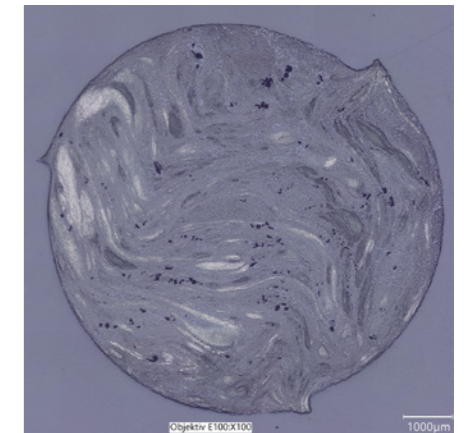
rCF-Rebar®, the world's first concrete rebar from recycled carbon fibres from Zeisberg Carbon (photo: Stefan Gröschel, TU Dresden)

## Potenzielle Nutzungswege im Bausektor

Während die rCF schadungsfrei aus der Solvolyse gewonnen werden, liegen sie durch die für die Prozessierung notwendige Zerkleinerung in gekürzter Länge vor. Deshalb ist die Herstellung angepasster Halbzeuge ein wichtiger Schritt. Neben Vliesstoffen für klassische Faserverbundanwendungen wurde auch ein innovativer Ansatz zur Verwendung von rCF in Carbonbeton verfolgt. Carbonbeton benötigt aufgrund der besseren Korrosionseigenschaften weniger Material im Vergleich mit einer Bewehrung aus Stahl. Zusammen mit den hervorragenden mechanischen Eigenschaften von CFK ergeben sich damit völlig neue Gestaltungsspielräume. Dafür wurden im Projekt EDISON-rCF erste Bewehrungsstäbe (rCF-Rebar) hergestellt und charakterisiert. Mikroskopaufnahmen ermöglichen wertvolle Rückschlüsse auf die Faserdistribution und deren Ausrichtung sowie Harznester und Luft einschüsse.

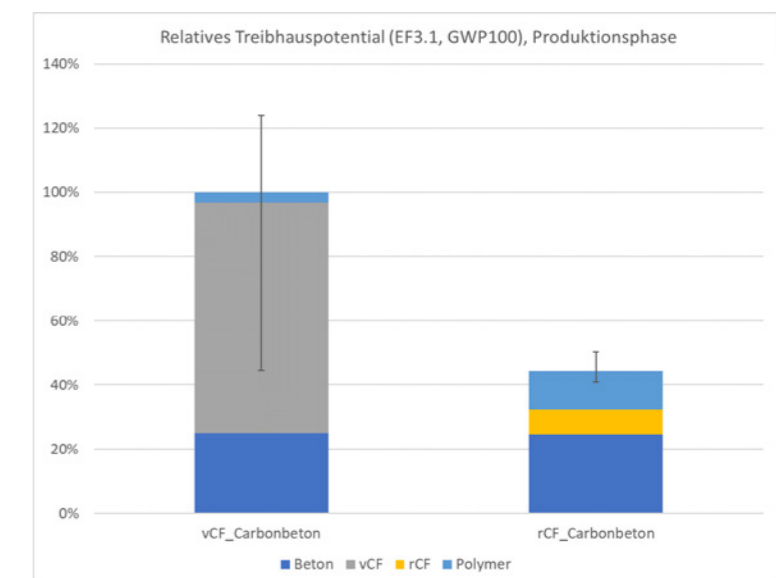
## Ist es auch ökologisch sinnvoll?

Mit der Nutzung von rCF bietet sich das Potenzial die notwendige Energie und damit verbundene Umweltauswirkungen in der Herstellungsphase gegenüber energieintensiven vCF zu verringern. Mit Hilfe einer Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) wurden dafür alle Prozessschritte im Hinblick auf eine Vielzahl von Wirkungskategorien bewertet. Unter Berücksichtigung der Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) wurden generische Bauteile aus Carbonbeton im Hinblick auf vergleichbare mechanische Eigenschaften ausgelegt. In der unteren Abbildung ist ein vorläufiger Vergleich in der Kategorie Treibhauspotenzial (Global Warming Potenzial, GWP) dargestellt. Der geringere Energieverbrauch bei der Solvolyse zur Gewinnung der rCF ist hier entscheidend für die in Summe geringeren Treibhausgasemissionen. Deutlich wird allerdings auch die nicht zu vernachlässigende Unsicherheit der Ergebnisse. Diese ist in der großen Bandbreite verfügbarer Daten für die vCF-Herstellung sowie dem Forschungsstadium für Solvolyse und rCF-Verarbeitung begründet. Eine Steigerung der Effizienz der Prozesskette in einer Serienfertigung ist wahrscheinlich. Daraus lässt sich ein großes Potenzial zur Nutzung von rCF in Carbonbeton ableiten.



Mikroskopaufnahme vom Querschnitt der ersten Generation des Zeisberg rCF-Rebar®. Zu sehen ist die Verteilung von Fasern, Matrix und Poren.

Microscopic photo of the cross section of the first generation Zeisberg rCF-Rebar®. Visible are the distribution of fibres, matrix and pores.



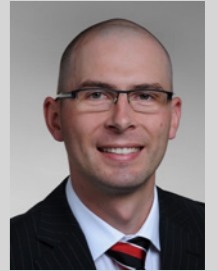
Vorläufige Ergebnisse für das TreibhausPotenzial (GWP100) in der Produktionsphase eines generischen Carbonbeton Bauteils mit vergleichbaren mechanischen Eigenschaften aus vCF und rCF.

Preliminary results for the Global Warming Potenzial (GWP100) in production phase for a carbon concrete part with similar mechanical properties reinforced with vCF and rCF.



# Luftfahrt im Wandel: Green Deal-Meilenstein für nachhaltige Bauteil-Wiederverwendung

Aviation in transition: Green Deal milestone for sustainable component reuse



Autor:  
Dr.-Ing. Janko Kreikemeier

## Summary

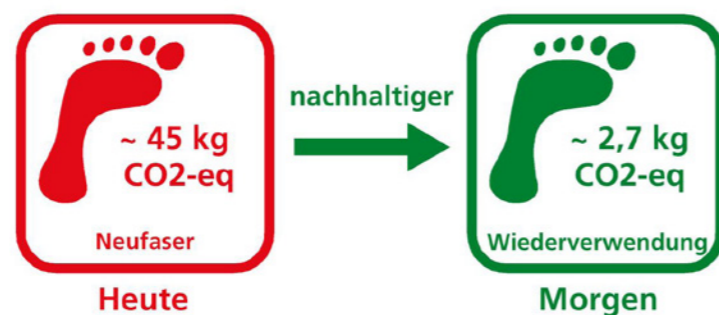
Lightweight high-performance materials like carbon fibre-reinforced plastics are key to aircraft sustainability, often lasting up to 30 years. Despite their energy-intensive production, they hold Potenzial for even longer use, enhancing their sustainability. Current recycling methods, which shorten fibres and reduce material quality, are seen as "downcycling." Non-destructive disassembly offers a solution by cleanly separating components without fibre damage, allowing direct reuse and extending Structural Life to a "Version 2.0."

**In der heutigen Zeit gewinnt nachhaltiges Wirtschaften zunehmend an Bedeutung. Auch die Luftfahrtbranche birgt Potenzial zur Reduktion von CO2-Emissionen. Wenn strukturell sehr hochwertige und extrem leichte aber in der Herstellung kosten- und energieintensive CFK-Bauteile nach einer Nutzungsdauer von bis zu 30 Jahren eine neue Verwendung finden, wird ergänzend zur Reduktion der Klimawirkung in der Luft auch am Boden ein wertvoller Beitrag geleistet.**

Aktuell eingesetzte Recyclingverfahren müssten genau genommen als „Downcycling“ bezeichnet werden. Denn durch das Durchtrennen der tragenden Fasern während des Recyclings sind die dann kürzeren Fasern auch mit neuer Polymereinbettung nur noch für weniger anspruchsvolle Anwendungen nutzbar. In traditionellen Recyclingrouten werden die ursprünglichen Bauteile in kleine Stücke zerbrochen. Die potentiell erreichbaren strukturellen Eigenschaften der aus den Rezyklaten hergestellten Bauteile werden dadurch herabgesetzt. Dieser Herausforderung nimmt sich das innovative Prinzip der zerstörungsfreien Demontage an. Hierbei erfolgt eine präzise und schonende Trennung der Bauteile voneinander, ohne die Fasern zu beschädigen, wodurch ihre strukturelle Integrität erhalten bleibt. Anders als bei traditionellen Verfahren wird die gezielte Separation an potentiell trennbaren Verbindungsstellen zwischen den Komponenten vorgenommen. Dies erlaubt nicht nur eine Wiederverwendung der Teile gemäß des „Second-Life-Prinzips“, sondern birgt auch signifikante Vorteile für nachfolgende Recyclingprozesse. Durch die gezielte Trennung von Komponenten und Materialien bleibt die Qualität und damit auch der Wert des Ausgangsmaterials im Rezyklat weitestgehend erhalten. Heute entstehende und kaum zu verwertende Materialgemische werden vermieden. Somit wird die Effizienz des Recyclings gesteigert und Abfall reduziert.

Diese bahnbrechende Methode markiert einen Paradigmenwechsel in der CFK-Recyclingtechnologie. Durch den Erhalt der Faserintegrität können wir eine werterhaltende Kreislaufführung ermöglichen, Kosten senken und Ressourcen effizienter nutzen. Das Ziel ist es eine nachhaltigere Zukunft schaffen, in der CFK-Bauteile eine entscheidende Rolle spielen.

Reduzierung des CO2-Fußabdruckes eines Produktes durch konsequente Wiederverwendung struktureller Bauteile  
Reducing a product's carbon footprint through consistent reuse of structural components

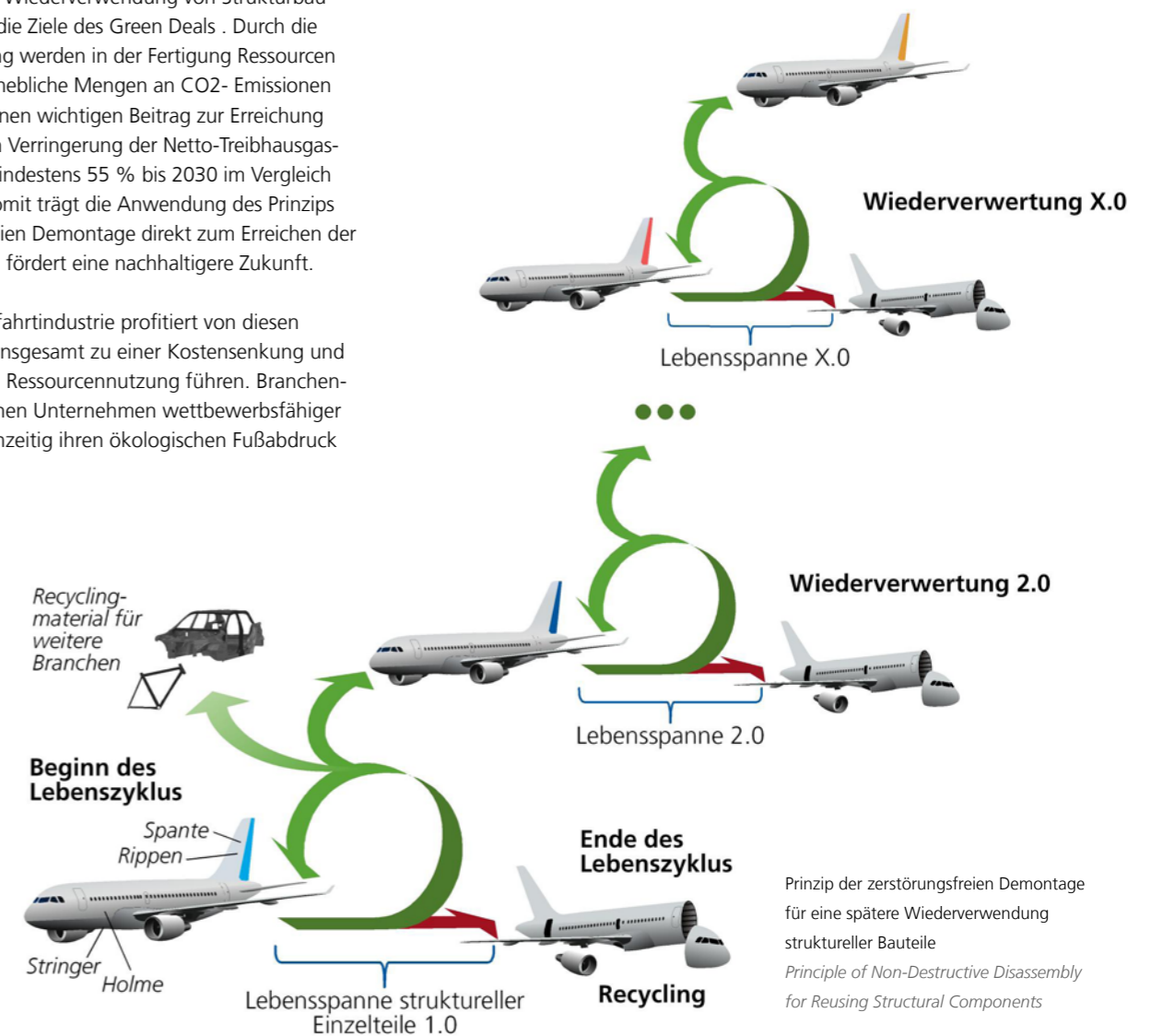


## Ein Meilenstein des Green Deals: Nachhaltige Demontage in der Luftfahrt

Ein Beitrag zur nachhaltigen Luftfahrt liegt in der effizienten Wiederverwendung von Primärbauteilen nach dem Dienst eines Flugzeugs. Das Rückgrat - die Struktur - des Flugzeugs besteht aus Stringern, Spanten und Haut. Diese Komponenten sind von besonderem Interesse, da sie trotz ihres sehr geringen Gewichts die strukturelle Stabilität sicherstellen, ihre Herstellung aber gleichzeitig kosten- und ressourcenintensiv ist. Doch hier liegt auch eine Chance: Da diese Bauteile in vielen Flugzeugmodellen ähnlich konstruiert und verbaut sind, eröffnet sich die Möglichkeit ihrer Wiederverwendung - mit ökonomischen und ökologischen Vorteilen. Die Integration neuartiger Designansätze bereits im Vorentwurf eines Flugzeugs, die das Prinzip der zerstörungsfreien Demontage berücksichtigen, zusammen mit innovativen Materialkombinationen und der Option einer späteren Anpassung, können den Weg für zukünftige, nachhaltigere Anwendungen ebnen.

Die Forschung zur Wiederverwendung von Strukturbauteilen unterstützt die Ziele des Green Deals. Durch die Wiederverwendung werden in der Fertigung Ressourcen eingespart und erhebliche Mengen an CO2-Emissionen vermieden, was einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der versprochenen Verringerung der Netto-Treibhausgasemissionen von mindestens 55 % bis 2030 im Vergleich zu 1990 leistet. Somit trägt die Anwendung des Prinzips der zerstörungsfreien Demontage direkt zum Erreichen der Klimaziele bei und fördert eine nachhaltigere Zukunft.


Nicht nur die Luftfahrtindustrie profitiert von diesen Fortschritten, die insgesamt zu einer Kostensenkung und einer effizienteren Ressourcennutzung führen. Branchenübergreifend können Unternehmen wettbewerbsfähiger werden und gleichzeitig ihren ökologischen Fußabdruck reduzieren.





# TRANSFER

*Transfer*



Überprüfen des HYSor-Prototypen  
*Checking the HYSor prototype*

68

Transfer im Systemleichtbau –

Neue Produkte durch Anwendungsforschung

*Transfer in lightweight system construction - new products through application research*

70

Systemleichtbau international – Das DLR auf der JEC World 2024

*International lightweight systems - DLR at the JEC World 2024*

# Transfer im Systemleichtbau – Neue Produkte durch Anwendungsforschung

Transfer of lightweight system constructions - new products through application research

Autoren:

Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider



## Summary

*DLR aims to transfer research to industry. The Department of Innovation facilitates this for the Institute of Lightweight Systems. Its interdisciplinary team identifies promising research and supports technology transfer. The service desk serves as the initial contact point. Transfer to specific industries can occur in various ways.*

Die Überführung von Forschungsergebnissen in eine industrielle Verwertung ist ein wesentliches Ziel des DLR. Die Abteilung Leichtbauinnovation begleitet diesen Transferprozess für die Themen des Instituts für Systemleichtbau. Als Bindeglied zur Industrie identifiziert das interdisziplinäre Team der Abteilung potenzialträchtige Forschungsergebnisse und unterstützt beim Transfer der Technologien in die Anwendung. Zentrale Anlaufstelle ist dabei das Service Desk des Instituts, über das ein Erstkontakt zu jeder Art von Transfer hergestellt werden kann. Die Überführung der Forschungsergebnisse in die spezifischen, industriellen Anwendungsfelder kann dabei auf vielfältige Weisen geschehen.

## Veröffentlichungen

Die klassische Methode, um neues Wissen weiterzugeben, besteht in der Veröffentlichung von Forschungsergebnissen. Insbesondere die Darstellung auf Konferenzen und in fachspezifischen Journals erlaubt es industriellen Partnern, neues Wissen zur Beantwortung bestehender Herausforderungen zu identifizieren. Darüber hinaus ermöglicht die Veröffentlichung eine direkte Kontaktaufnahme den Autoren was zu neuen Partnerschaften führen kann. Eine Übersicht aller Veröffentlichungen bietet die [Online-Bibliothek des DLR elib](#).

## Patente & Lizenzen

Das DLR stellt die Forschungsergebnisse über veröffentlichte Patente in einen konkreten Anwendungsbezug. Auf diese Weise sind ihre Nutzungsperspektiven für industrielle Partner auffindbar und eine direkte Verwertung durch Lizenzen wird möglich. Beispielsweise gehören die DuraAct und DuraAct Power Flächenwandler zu den Entwicklungen des Instituts, die über Jahre mit einer Lizenz auf unserem Patent gefertigt und vermarktet werden. Für den Transfer durch Lizenzierung steht eine Reihe von Patenten aus unserem [Hause zur Verfügung](#).

## Forschungsprojekte

Der nächste Schritt, um mit unseren Forschungsergebnissen einen industriellen Mehrwert zu schaffen, ist die Durchführung von gemeinsamen Forschungsprojekten mit Firmen. Diese Projekte sind in der Regel mit dem Ziel verknüpft, mit dem Industriepartner Forschungs- und Technologiefragen kooperativ zu beantworten. Projektinhalte können zum Beispiel die technische Bewertung von unterschiedlichen Lösungen oder die Erforschung neuer Lösungen sein. So wird in jedem Fall die Wettbewerbsfähigkeit des Partners gestärkt. Diese Variante ist im Rahmen von unterschiedlichen Förderprojekten üblich und in unserem Institut eine gut etablierte und gängige Variante zum Wissenstransfer.

## Interessensgemeinschaft & Netzwerkbildung

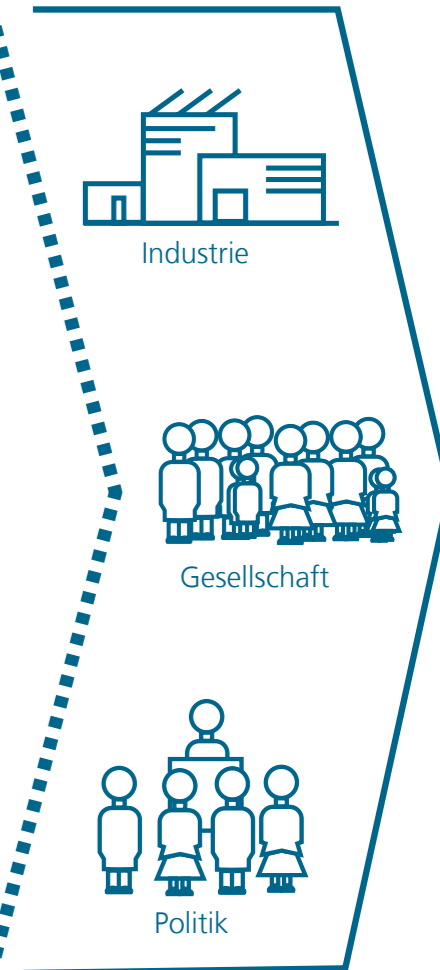
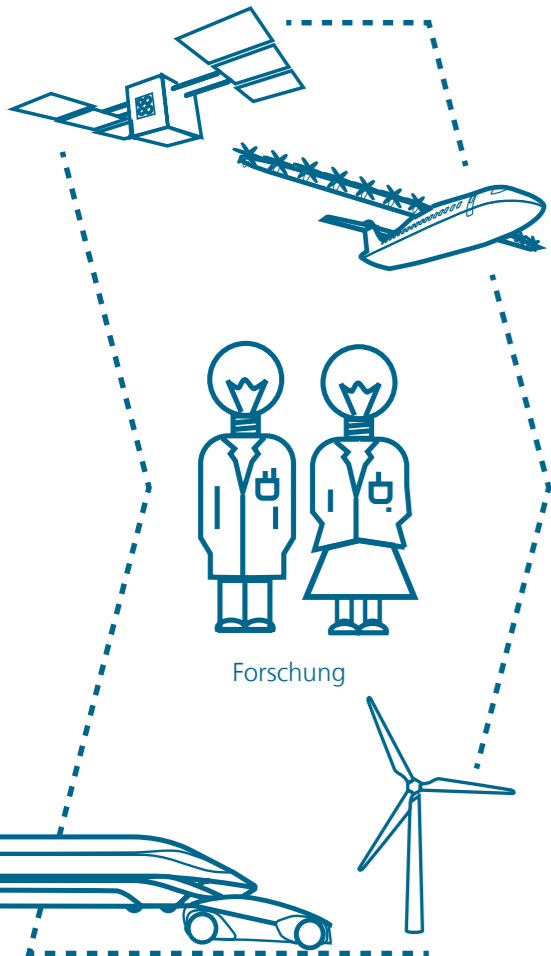
Um dieses hohe Niveau der Zusammenarbeit zu halten und auszubauen, vertreten wir die Forschungsleistungen des Instituts kontinuierlich auf Messen und in Netzwerken und laden zu gemeinsamen Projekten ein. So entstand das Forum für Rumpftechnologie speziell für diese Netzwerkarbeit aus dem Institut heraus. Das [Innovation Lab zur Additiven Extrusion \(EmpowerAX\)](#) fokussiert ebenfalls einen Teil seiner Arbeit auf die Pflege und die Koordinierung der Zusammenarbeit aller Forschungs- und Projektpartner im Bereich der additiven Extrusion.

## Forschungskooperation

Als ein sehr effektiver Weg des Transfers haben sich auch Patenschaften erwiesen. Dieses Modell wurde in der Vergangenheit sowohl mit Airbus als auch mit Unternehmen der Energie und Verkehrsbranche umgesetzt. Die enge Verzahnung durch das Patenkind ist ein sehr guter Start für den Transfer und gleichzeitig hilfreich für gemeinsame Forschungsprojekte.

## Ausgründungen

Nicht zuletzt unterstützt das DLR Ausgründungen der eigenen Mitarbeitenden und schafft somit eine weitere Plattform für den Wissenstransfer. Erkenntnisse aus Forschungsarbeiten des DLR bilden die Basis dieser Ausgründungen. Ausgründungen haben in unserem Institut eine lange Tradition. Als kommerzieller Hersteller von hochwertigen Faserverbundbauteilen ist die INVENT GmbH eine solche Ausgründung, die sich 1996 gegründet und zu einem führenden Mittelständler im Bereich der Faserverbundfertigung gewachsen ist. Aber auch in den letzten Jahren gab es immer wieder Ausgründungen, in denen Verfahren oder Produkte kommerziell angeboten werden. Das DLR stellt für diese Transition aus dem DLR in neu gegründete Firmen eine Reihe von Unterstützungsleistungen zur Verfügung. So verfügen die Gründer über einen möglichst fokussierten Start als solide Grundlage zur Firmengründung.



Bedarfe & Praxisdaten

# Systemleichtbau international – Das DLR auf der JEC World 2024

International lightweight systems - DLR at the JEC World 2024



Autorin:

Jessica Treptow; M.A.

## Summary

In March 2024, the DLR institutes in Braunschweig and Stuttgart presented their expertise in lightweight construction at JEC World in Paris. With a focus on knowledge transfer to the lightweight construction industry, the institutes presented selected topics. The trade fair offered the ideal opportunity to make new contacts and exchange ideas with partners.

**Im März 2024 vertraten das Braunschweiger DLR-Institut für Systemleichtbau und das Stuttgarter DLR-Institut für Bauweisen und Strukturtechnologien die Leichtbau-Expertise des DLR auf der europäischen Leitmesse für Faserverbunde, der JEC World in Paris. Mit dem Fokus, das Wissen der Forschung in die Leichtbau-Industrie zu transferieren, zeigten die Leichtbau-Institute einen repräsentativen Messeauftritt und bereiteten ausgewählte Themen für das Fachpublikum auf. Als einen Ort, bei dem man direkt mit dem Fachpublikum in Kontakt tritt, bietet eine Messe die ideale Gelegenheit, neue Kontakte zu knüpfen oder sich mit schon bestehenden Partnern auszutauschen.**

Das Standkonzept sorgte für viel Aufmerksamkeit und schaffte einen adäquaten Rahmen für die Ausstellung unserer Exponate mit besonderem Innovationspotenzial:

Als Erstes fällt das Exponat des [JEC Award-Gewinners Empower AX](#) ins Auge. Auch wenn der eigentliche Demonstrator beim Kooperationspartner [Weber additive](#) ausgestellt wurde, findet sich hier das neueste Werk des DLR-Innovation Labs EmpowerAX. Mit dem handlichen Demonstrator zeigte das Team, was mit der additiven Funktionalisierung in jedem Maßstab möglich ist. Gleich daneben präsentierte das strategische Arbeitsteam [Add-CompSTM](#) sich mit dem neuen Projekt „Schall FTP“. Durch Co-Extrusion entwickelt das Team hochleistungsfähige, verstärkte Halbzeuge mithilfe von hochmodernen Verarbeitungsanlagen in unseren Laboren.

Nur einen Schritt weiter findet sich die im Rahmen des „SuCoHS“-Projekts untersuchte Hochleistungsverbundstruktur. Das „SuCoHS“-Panel beweist eine hohe thermomechanische Beständigkeit und gilt daher als repräsentativ für eine Flugzeugheckkomponente. Das Projektteam erhöhte die thermomechanische Beständigkeit auf über 200 °C, was den Weg für die weitere Nutzung des Potenzials von Verbundwerkstoffen ebnet.

Ein geborstener Tank für den „[Next Generation Train](#)“ aus dem gleichnamigen Projekt im Zentrum des Stands fungiert als Sinnbild für viele Projekte zum Thema Wasserstoff-Tanks. Schließlich werden derzeit schrittweise Tankkonzepte für Durchmesser von 400, 1.700 und 3.000 mm unter Herstellungs- und Testgesichtspunkten untersucht. Der ausgestellte Tank ist mit Sensoren ausgestattet, die zunächst den Herstellungsprozess und dann den Zustand des Tanks während seines gesamten Lebenszyklus überwachen.

Im Rahmen des [Clean Aviation](#) „UpWing“-Projekts erforscht das Institut [Double-Double – Laminate \(DD\)](#) in großem Maßstab. Die Verjüngung der Dicke ermöglicht die präzise Gestaltung der Oberflächenformen von Platten unter Biegebelastung, was besonders wertvoll ist, wenn enge aerodynamische Toleranzen eingehalten werden müssen. In „UpWing“ wurde ein „DD-Flex-Panel“ entwickelt und die vorhergesagten Oberflächenformen experimentell verifiziert. Auf der JEC World 2024 konnten die Besucher Handanlegen und die Biegebelastung selbst herbeiführen.

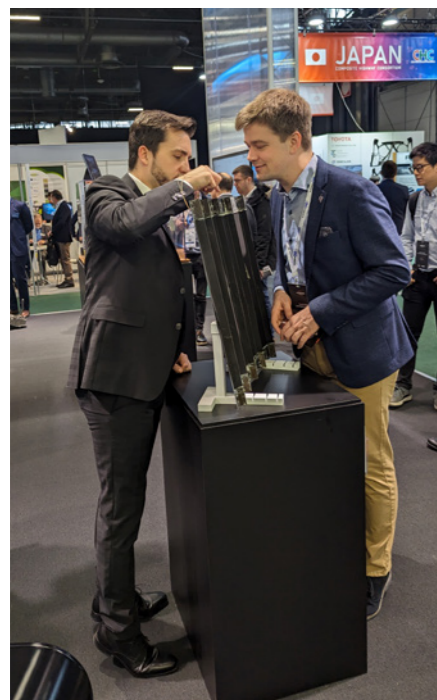
Über allem schwebte der Flügel aus dem Projekt „[EnerWing](#)“. Die in diesem Projekt genutzte Airborne-Struktur soll in Zukunft für mobile Windenergieanlagen genutzt werden und speziell für die Windkraft leicht zu fertigen sein.

Die bei der JEC World 2024 vorgestellten Ausstellungsstücke dienen als Türöffner zu neuen Wegen, die die zukünftigen Forschungsprojekte in Richtung Anwendung begehen wollen. Mit ihrer Vielfältigkeit und ihren Anwendungsmöglichkeiten zeigt sich der Systemleichtbau als eine Schlüsseltechnologie von Morgen.



DLR-Stand zu Beginn der JEC 2024  
DLR stand at the start of the JEC 2024

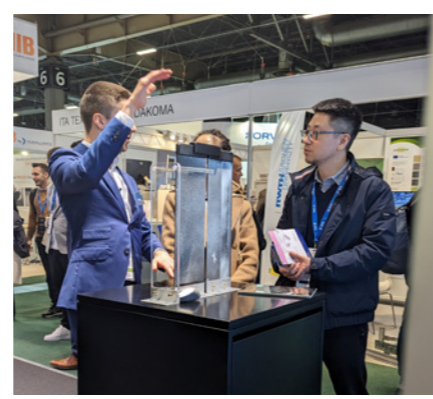
Eindrücke aus dem Messebetrieb  
Impressions from the fair



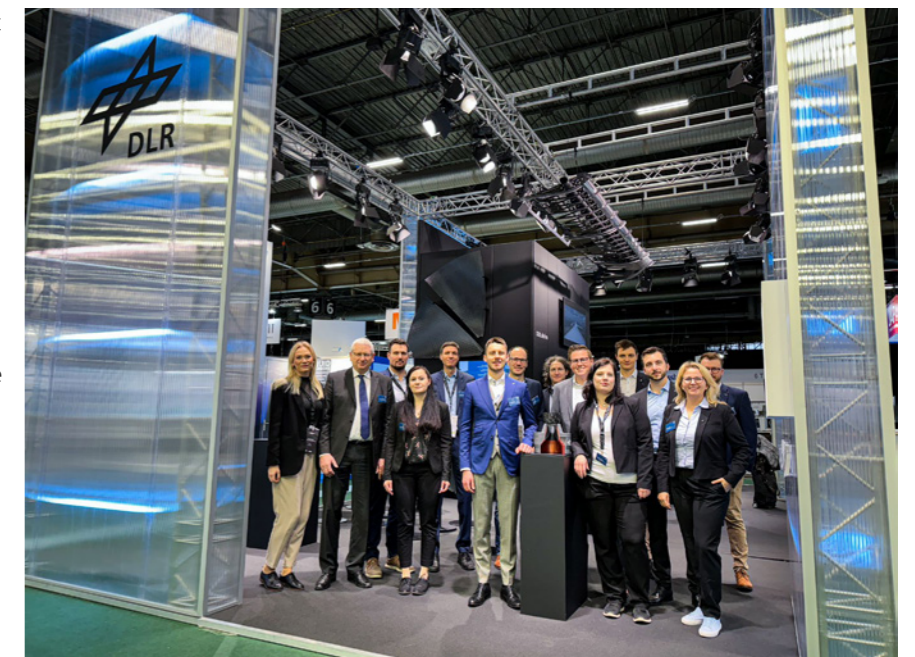
SuCoHS-Panel  
SuCoHS-panel



Next Generation Train - Tank  
Next Generation Train - Tank



Double-Double – Laminate (DD)  
Next Generation Train - Tank



DLR-Team auf der JEC 2024  
DLR team at the JEC 2024

Detailaufnahme aus dem 3D-Druck-Labor  
Close-up from the 3D printing lab

## DAS INSTITUT IM DETAIL

The institute in detail

74

[Abteilungen](#)

Departments

81

[Geschäftsfelder](#)

Business areas

88

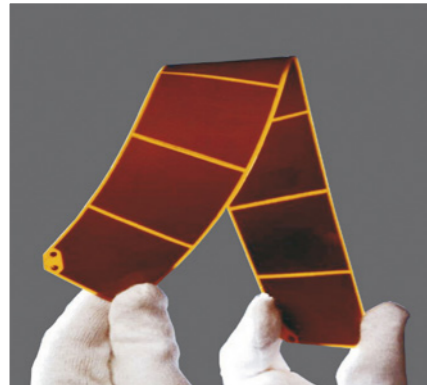
[Veröffentlichungen 2023/2024](#)

Publications 2023/2024

90

[Patente 2023/2024](#)

Patents 2023/2024



## Summary

New materials with superior properties are the basis for innovative technologies. The department's research focuses on the integration of additional functionalities in order to increase the competitiveness and fields of application of fibre composite materials. By developing high-performance lightweight materials, we make a significant contribution to sustainable mobility in the future. With our extensive laboratory infrastructure, new material systems, from semi-finished products to coupons and beyond, can be evaluated. Through the accreditation according to DIN EN ISO 17025 and Nadcap, we underline our claim to characterise materials of the highest quality.



Abteilungsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach

Neue Werkstoffe mit überlegenen Eigenschaften sind die Grundlage für innovative Technologien. Im Fokus der Forschungsarbeiten der Abteilung steht dabei die Integration zusätzlicher Funktionalitäten in den Werkstoff, um die Wettbewerbsfähigkeit und das Anwendungsfeld von Faserverbundwerkstoffen zu vergrößern. Durch die Entwicklung leistungsfähiger Leichtbauwerkstoffe leisten wir einen wesentlichen Beitrag für eine nachhaltige Mobilität von morgen.

## Kompetenzen

Zukünftige Arbeiten steuern darauf hin, die Eigenschaften und Funktionalitäten von Multimaterialsystemen skalienübergreifend (Nano – Mikro – Makro) gezielt zu gestalten und in den Herstellungsprozess einzustellen. Für die Verbesserung matrixdominierter Eigenschaften nutzen wir verschiedene Dispergierungsverfahren zur Herstellung von Nanokompositen und beschäftigen uns mit der Compoundierung und Extrusion von thermoplastischen Materialien für generative Fertigungsverfahren. Neben klassischen Verbundwerkstoffen untersuchen wir u. a. das Potenzial von Naturfasern, recycelten Fasern und der Integration von Smart Materials mit sensorischen und aktorischen Funktionen.

Für die experimentelle Charakterisierung steht uns eine umfangreiche Laborinfrastruktur zur Verfügung, die kontinuierlich ausgebaut wird. Durch die Akkreditierung nach DIN EN ISO 17025 und Nadcap unterstreichen wir unseren Anspruch, Materialien auf höchstem Qualitätsniveau zu charakterisieren. Die Prüftechniken werden in Richtung Prozessüberwachung und Structural Health Monitoring (SHM) von Faserverbundstrukturen weiterentwickelt.

## Leistungsprofil

- Verbesserung und Entwicklung neuer Injektionsharze
- Nanotechnologie in Faserverbundwerkstoffen
- Untersuchung textiler Halbzeuge
- Verbundwerkstoffe aus Natur- und recycelten Fasern
- Smart Materials
- Piezokomposite
- Structural Health Monitoring (SHM)
- Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (NDT)
- Statische und dynamische Prüfung von Werkstoffen und Strukturen
- Thermoanalyse und Mikroskopie
- Life Cycle Assessment (LCA)
- Compoundierung und Extrusion von thermoplastischen Materialien für generative Fertigungsverfahren



## Vom Phänomen über die Modellbildung zur Simulation

Die Entwicklung neuer Methoden für eine effiziente Analyse und Bewertung von Leichtbaustrukturen der Luft- und Raumfahrt, der Verkehrstechnik und der Windenergie liegt im Fokus der Abteilung. Sehr wesentlich ist hierbei die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von der Bauteilfertigung bis zur Wiederverwendbarkeit oder Entsorgung. Dies wird daher in neuen Simulationsmethoden und deren Software-Implementierung abgebildet. Innovative Versuchsmethoden komplettieren das Vorgehen. Sie erlauben die phänomenologische Analyse und die Validierung der neuen Simulationsmethoden auf unterschiedlichen Ebenen der Testpyramide. Gemeinsam mit internationalen Partnern und in interdisziplinären WissenschaftlerInnen-Teams fokussiert sich die Forschung auf folgende Bereiche:

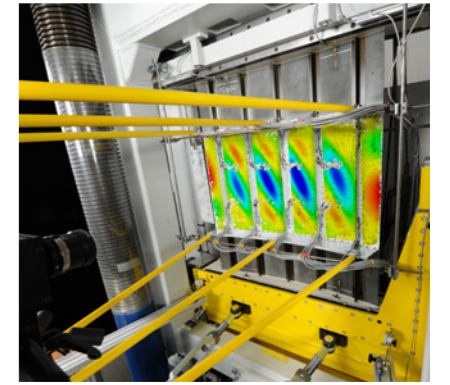
- Effiziente Entwurfsmethoden
- Innovative Prüf- und Messverfahren auf Bauteilebene
- Virtuelle Strukturen und digitaler Zwilling für den ganzen Lebenszyklus

## Kompetenzen

Die Abteilung führt phänomenologische Untersuchungen des komplexen Strukturverhaltens unter multiphysikalischen Belastungen durch. Hierfür dienen experimentelle, analytische und numerische Verfahren. Neue Berechnungsmethoden erlauben eine genauere und effizientere Vorhersage des Material- und Strukturverhaltens sowie deren Robustheitsbewertung unter Berücksichtigung von inhärenten Unsicherheiten. Dies ist die Grundlage für eine zukünftige simulationsbasierte Zertifizierung. Die Validierung der Berechnungsmethoden erfolgt mittels kontinuierlich weiterentwickelter Prüfverfahren und neuer innovativer Prüfstände.

## Leistungsprofil

- Methoden für den Gesamtentwurf
- Strukturelle Stabilität
- Analyse der Schädigung und Schadenstoleranz von Material- bis Strukturebene
- Thermalanalyse und thermo-mechanisch gekoppelte Analyse
- As-built-Analyse mittels Prozesssimulation und Effects-of-Defects-Bewertung
- Toleranz- und Uncertainty-Analyse auf multiplen Skalen
- Mess- und Versuchstechnik für phänomenologische, validierende und qualifizierende Versuche (z. B. Beulanlage, modularer Komponentenprüfstand, dynamischer Fallprüfstand, thermo-mechanische Prüfanlage THERMEX)



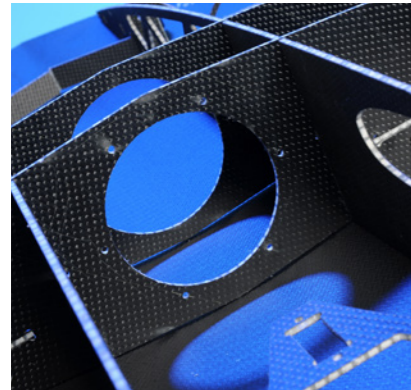
## Summary

Within the department of Structural Mechanics, the main focus is placed on research and development of reliable and efficient methods as well as software tools for analysing composite structures, which can be integrated into the overall CAE process. Therefore, fast numerical tools are available at an early development stage within a concurrent/integrated engineering concept. Special methods for simulation-based design, life cycle modelling and assessment are developed for primary composite structures for the aerospace, automotive, and wind energy industry. In this context, the experimental validation of new methods is of special interest as the department is developing and providing unique test facilities.



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Tobias Wille





## Summary

The department of Composite Design offers a closed development chain from the first sketch of composite structures, their sizing-up to a design allowing for efficient production. Hereby, adequate material selection including hybridisation and the consideration of fibre-composite specific aspects are addressed. Design concepts are optimised and assessed by using low- and high-fidelity simulation tools, which also take into account probabilistically distributed material and manufacturing parameters. In the end, the detailed design is realised under consideration of tolerance management, quality assurance, and appropriate tool concepts. Particular emphasis in research is placed on the design of multifunctional structures, which, besides their required structural-mechanical properties, contain additional features like electric conductivity, acoustic noise absorption, information transmission, etc.



Abteilungsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

## Von Anforderungen über Konzepte zu multifunktionalen Strukturen

In der Abteilung Funktionsleichtbau wird die geschlossene Konstruktionsprozesskette vom ersten Entwurf einer Struktur über die Auslegung bis hin zur werkstoff- und fertigungsgerechten Konstruktion von Prototypen realisiert. Im Entwurf werden faserverbundgerechte Bauweisen unter Einbeziehung einer geeigneten Werkstoffauswahl entwickelt, die auch Hybridwerkstoffe einschließt. Mittels numerischer Methoden werden in der Auslegung unterschiedliche Bauweisen optimiert und unter Einbeziehung der Probabilistik der Kennwerte des Materials und des Herstellungsprozesses bewertet. Unsere Forschung ist fokussiert auf:

- Faserverbundgerechtes Design von Bauteilen und Gesamtstrukturen
- Strukturkompetenz im Bereich Luft- und Raumfahrt sowie Verkehr und Windenergie
- Bauteil-, Werkzeug- und Anlagendesign für eine effiziente und kostengünstige CFK-Produktion
- Multifunktionale Strukturen in Faserverbundbauweise

## Kompetenzen

Im Zentrum der Prozesskette steht die Konstruktion, zu der die Realisierung eines montagegerechten Toleranzmanagements und eines geeigneten Werkzeugkonzepts zählt. Eine besondere wissenschaftliche Vertiefung erfolgt zu den Fragen der konstruktiven Realisierung von Multifunktionsstrukturen, die zusätzliche, für das Endprodukt geforderte Funktionen wie Informationsübertragung, Leitfähigkeit, Schallabsorption etc. integrieren.

## Leistungsprofil

- Funktionsbauweisen, Konstruktion und Berechnung
- Design mit Funktionswerkstoffen
- Kinematische Mechanismen
- Probabilistik
- Formvariable Strukturen
- Entfaltbare Strukturen
- Bionik
- Hybride Konzepte



## Seite an Seite mit der Industrie – Forschung mit Großanlagen im Full Scale-Maßstab

Der Sprung von der Idee zur bewertbaren Anwendung erfordert insbesondere bei der fertigungstechnischen Umsetzung ein professionell ausgestattetes Großanlagen-Umfeld im Full-Scale-Maßstab. Dies gilt vor allem für luftfahrttechnische Anwendungen mit einem TRL von 4-6, aber auch für andere Anwendungen, z.B. aus dem Bereich von Windkraftrotorblättern. Die simulative Abbildung der Prozesse ist für eine effiziente Umsetzung der Forschungsaufgaben unerlässlich und bietet zudem die Möglichkeit, die gewonnenen Erkenntnisse auf abweichende Prozess- und Taktraten zu übertragen.

## Kompetenzen

Anlagenseitig deckt das Angebot der Abteilung Produktionstechnologie Fertigungsvarianten von der Pressen-, RTM und Autoklaventechnologie bis zur Faserablage- und Faserwickeltechnik ab. Alle Anlagen sind digital vernetzt und verfügen über modernste Steuerungs- und Qualitätssicherungstechnik. Bewertet werden sowohl Produktionskosten als auch Ressourcen- und Energieeffizienz.

## Überblick über die eingesetzten Großanlagen:

- GroFi@: szenario-flexible Forschungsplattform für multi-robotische Fibre-Placement- / Tapelege und Wickelprozesse, Bauteilgrößen bis zu 18 m x 5,5 m
- Evo: Forschungsplattform für voll automatisierte textile Preforming- und RTM-Prozesse zur Realisierung hoher Stückzahlen in der FVK-Bauteilfertigung.
- BALU@: Forschungsautoklav für effektive Erwärmungsmethoden sowie für simulationsunterstützte und ressourceneffiziente Aushärte- und Konsolidierungsprozesse
- MACS@: Forschungsautoklav mit optionaler Mikrowellenheizung und Videoüberwachung.

## Leistungsprofil

### Anwendungsgerechte Fertigungsverfahren und effiziente Erwärmungsmethoden

- Prozessverständnis in der automatisierten FVK-Fertigung
- Prozess- und Technologie-Know-how für Faserlegeprozesse, Aushärtungs-/Konsolidierungsprozesse sowie textile Preforming- und RTM-Prozesse
- Technologieentwicklung und -demonstration im Großmaßstab
- Realisierung innovativer Leichtbaustrukturen
- Sensorgeführte Prozessierung und Qualitätssicherung für energieeffiziente Erwärmungsmethoden
- Energiemanagement und CO2-Footprint im Lebenszyklus / Bilanzierung der Ressourceneffizien

### Digitalisierung/Industrie 4.0, Virtuelle Fertigung und Bewertungsmodelle

- Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze
- Prozesssimulation, digitale Anlagen- und Bauteilzwillinge
- Nachhaltige Fertigung und Montage durch Digitalisierung
- Methoden und Technologien zur Inline-Qualitätssicherung
- Machine-Learning-Ansätze (KI) in Produktionstechnologien
- Digitales Prozessdaten-Management



## Summary

The leap from the idea to the evaluable application requires a professionally equipped large-scale plant environment on a full-scale, especially for the manufacturing implementation. This applies above all to aeronautical applications with a TRL of 4-6, but also to other applications, e.g. from the field of wind power rotor blades. The simulative mapping of the processes is essential for efficient implementation of the research tasks and also offers the possibility of transferring the knowledge gained to deviating process and cycle rates.



Abteilungsleitung



Braunschweig:

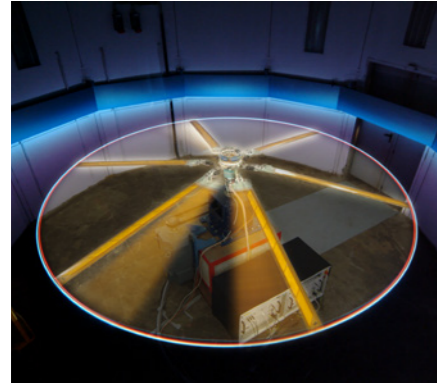
Dr.-Ing.

Markus Kleineberg

Stade:

Dr.-Ing.

Daniel Stefaniak



## Summary

Smart structures have the ability to adapt to changing environmental and operational conditions such as vibrations and shape changes. Microprocessors analyse the signals of the sensors and use integrated control algorithms to command the actuators to apply localised strains/displacements/damping to alter the elasto-mechanical system response. Since 1989, the department has been working as one of the first European research groups on solutions in the field of smart structures technology. With its experience in adaptive systems comprising structural material, distributed actuators and sensors as well as control strategies, solutions for all lines of business can be realised. Applications range from space systems to fixed-wing and rotary-wing aircraft, automotive, optical systems, machine tools, wind turbines, and medical systems. Additive manufacturing opens up new opportunities to build smart structures and is being developed within the department accordingly.



Abteilungsleiter:  
Prof. Dr.-Ing.  
Hans Peter Monner



## Von der Struktur zum adaptiven System

Ein adaptronisches System hat die Fähigkeit, auf veränderliche operationelle Bedingungen (wie z. B. Schwingungen oder aerodynamische Anforderungen an die Gestalt eines Tragflügels oder auch Vereisung) zu reagieren. Mikroprozessoren analysieren die Signale der Sensoren und verwenden integrierte Regelalgorithmen zur Ansteuerung der Aktuatoren, um so lokal Kräfte/Verformungen/Dämpfung zur Anpassung des elasto-mechanischen Strukturverhaltens einbringen zu können.

Seit 1989 arbeitet die Abteilung Adaptronik als eine der ersten europäischen Forschungsgruppen an technologischen Lösungen auf dem Gebiet der Adaptronik. Dank jahrelanger Erfahrung können adaptronische Systeme, welche konventionelle Strukturwerkstoffe, verteilte Sensorik und Aktuatorik sowie optimierte Regelungs- und Leistungselektronik in sich vereinen, quer durch alle Branchen realisiert werden. Die Anwendungen reichen von Raumfahrtssystemen bis zu Starr- und Drehflüglern, vom Automobil bis zu Windenergieanlagen und von Werkzeugmaschinen bis zu Robotern. Der 3D-Druck bietet beim Aufbau solch spezialisierter anpassbarer Strukturen ganz neue Möglichkeiten und wird für diese Anwendungen genutzt und weiterentwickelt.

## Kompetenzen

Die Abteilung bietet Kunden und Projektpartnern ihre Kompetenzen an, beginnend mit Beratung und Systemanalyse bis hin zur kompletten Auslegung adaptronischer Systeme:

- Modellierung und Simulation komplexer adaptronischer Systeme
- Reglerentwicklung und -implementierung
- Systemintegration und Validierung
- Demonstration von adaptronischen Systemen und deren Komponenten
- Experimentelle Methoden für strukturdynamische und vibroakustische Systemanalyse sowie Deformationsanalyse für formvariable Strukturen

## Leistungsprofil

- Aktive Vibrationsunterdrückung
- Aktive Lärmreduktion
- Aktive Gestaltkontrolle
- 3D-Druck adaptiver Strukturen (z. B. endlosfaserverstärkter 3D-Thermoplast-Druck)
- Enteisung/Eiserkennung



## Nachhaltigkeit greifbar machen – von der Linear- zur Kreislaufwirtschaft

Die Abteilung hat zum Ziel, das volle Nachhaltigkeitspotenzial des Systemleichtbaus zu erschließen. Dazu werden in den Forschungsfeldern Nachhaltigkeitsbewertung und Kreislaufführungstechnologien in Industrie und Forschung vorhandene Wissens-, Fähigkeits- und Technologielücken geschlossen.

## Kompetenzen

Mit dem Forschungsfeld Nachhaltigkeitsbewertung schafft die Abteilung die notwendigen Voraussetzungen zur gezielten Entwicklung und Verbesserung nachhaltiger Lösungen. Denn die Technologien des Systemleichtbaus sind zwar ein wichtiger Baustein für eine emissionsminimale Zukunft, aber die quantifizierbare Bewertung ihres Potenzials stellt aufgrund der komplexen Interaktion verschiedener Disziplinen eine große Herausforderung dar. Durch die sorgfältige und standardisierte Modellierung, die gewissenhafte Nutzung interner und externer Datenquellen, sowie den Einsatz geeigneter und angepasster Metriken erfolgt eine transparent nachvollziehbare, quantitative Bewertung der Nachhaltigkeit. Nur auf dieser Grundlage können der ökologische Fußabdruck und die Ökoeffizienz im Systemleichtbau zielgerichtet verbessert werden.

Im Forschungsfeld Kreislaufführungstechnologien entwickelt die Abteilung Trenn- und Demontagetechnologien sowie Verfahren zum Recycling und zur Aufbereitung von Faserverbunden. Durch die Forschung auf diesen Gebieten werden verschiedene Optionen für die Transition von der Linear- zur werterhaltenden Kreislaufwirtschaft geboten. So wird deren Nachhaltigkeit bewert- und damit greifbar gemacht.

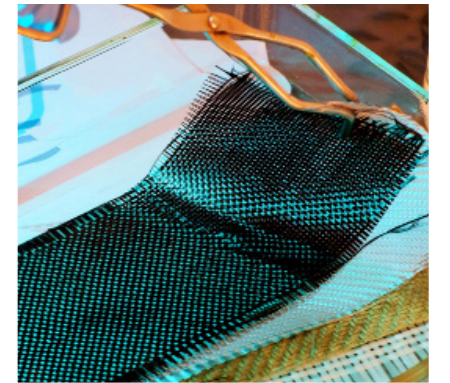
## Leistungsprofil

### Nachhaltigkeitsbewertung im Systemleichtbau

- Generierung und Bereitstellung von universell nutzbaren Daten und Modellen für die Ökobilanzierung und Kostenbewertung
- Entwicklung und Bereitstellung von bedarfsgerecht anpassbaren Tools zur ökologischen und ökonomischen Bewertung
- Transparente Bewertung der Umweltauswirkungen und Kosten von Technologien und Prozessen in einer Kreislaufwirtschaft
- Identifikation von Handlungsfeldern zur Steigerung der Nachhaltigkeit

### Technologieentwicklung für die werterhaltende Kreislaufführung

- Demontagetechnologien zur Wiederverwendung von Komponenten
- Trennprozesse für sortenreine Stoffströme
- Angepasste Recyclingverfahren
- Aufbereitung von Rezyklaten



## Summary

Department of Sustainability Technologies to develop the full sustainability Potenzial of lightweight system construction. In its efforts to do this, it seeks to close gaps in expertise, capabilities and technologies for sustainability assessment and circular technologies in industry and research.

With its research in the field of sustainability assessment, the department creates the necessary conditions for the targeted development and improvement of sustainable solutions. Lightweight systems technologies are an important building block for achieving minimal emissions in future, but quantifiable evaluation of their Potenzial represents a major challenge due to the complex interaction between different disciplines. Transparent, comprehensible and quantitative assessment of sustainability is carried out through careful and standardised modelling, the conscientious use of internal and external data sources and the application of appropriate and adapted metrics. This provides the basis for improving the environmental footprint and eco-efficiency of lightweight system construction in a targeted manner.



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Steffen Opitz







### Summary

Our institute maintains close contact with industry to facilitate successful innovation through research results. The closest possible interaction is necessary to determine the need for research and the commercial utilisation of the research results. The Innovations Department focuses on reinforcing this interface in order to enhance knowledge and technology transfer. As the first point of contact for companies, our service desk responds to any queries on lightweight system construction and solutions to specific technical issues relating to fibre composites

**Stärkung von Wissens- und Technologietransfer**

Basis für erfolgreiche Innovation durch Forschungsergebnisse unseres Instituts ist ein enger Kontakt zur Wirtschaft. Für die Ermittlung des notwendigen Forschungsbedarfs ist ein möglichst enger Austausch ebenso notwendig wie für die wirtschaftliche Verwertung der Forschungsergebnisse. Die Stärkung dieser Schnittstelle stellt die Kernaufgabe der Abteilung Leichtbauinnovation dar, um Wissens- und Technologietransfer zu stärken.

Als erster Ansprechpartner für Unternehmen steht unser [Servicedesk](#) für alle Fragen rund um den Systemleichtbau ebenso zur Verfügung, wie für Lösungen zu spezifischen technischen Fragestellungen rund um den Faserverbund.

Um den engen Außenkontakt zu pflegen, koordinieren unsere Geschäftsfeldleiter die Aufgaben den Geschäftsfeldern [Rumpf](#), [Flügel](#), [Raumfahrt](#), [Wind](#) und [Verkehr](#). Sie stehen als Bindeglied des Instituts mit den DLR-internen Partnern und insbesondere externen Partnern in Wirtschaft, Forschung und Politik. So werden auch Lenkungs-kreise und Forschungsnetzwerke von Mitgliedern der Abteilung bedient. Im Fall des Innovationsnetzwerks EmpowerAX zur Additiven Extrusion mit Endlosfasern wird dies auch geleitet. Um die Zusammenarbeit zu realisieren, koordinieren die Geschäftsfeldleiter auch die Akquise in ihrem Bereich.

Als richtiges Umfeld für den Dialog zwischen Wirtschaft und DLR betreiben wir die Inventionsumgebung DLR Wissenswelt Leichtbau. Hier finden die verschiedensten Akteure den Raum um den Transfer von Forschung in die Anwendung weiter zu stärken und zur Innovationsgenerierung beizutragen. Darüber hinaus bietet der institutseigene Wissenschaftsblog, Messeauftritte, sowie Veranstaltungen wie der jährliche Wissenschaftstag allen Interessierten die Möglichkeit unsere Forschungsthemen zu entdecken, nachzuverfolgen und mit dem Institut in Kontakt zu treten.

Als weiteren Schwerpunkt der Leichtbauinnovation gliedert sich die Digitalisierung in die Abteilung ein. Institutsübergreifende, systematische Erhebungen und Aufbereitung von Prozess- und Prüfdaten bilden hier den Fokus der Arbeiten. Auch die Infrastruktur zur Bereitstellung von Services und Anwendung sowie die hohe Qualität der im Haus entwickelten Software wird hier für das Institut sichergestellt. Zudem bietet die Abteilung die zentrale Anlaufstelle für Patente, Erfindungsmeldungen und Patentstrategie.



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider



Große Teile der anwendungsspezifischen Forschungsaktivitäten unseres Institutes sind den Geschäftsfeldern Flügel, Rumpf, Raumfahrt, Verkehr und Wind zuzuordnen. Je ein Geschäftsfeldleiter bildet das Bindeglied zwischen den Forschenden und den externen Partnern in Wirtschaft, Wissenschaft, Normung und Politik. Der enge Austausch mit der Industrie unterstützt die Schwerpunktsetzung in den Forschungsaktivitäten, sichert die wirtschaftliche Verwertung der Forschungsergebnisse und bildet die Basis für erfolgreiche Innovationen. Die Pflege dieser Schnittstelle stellt für die Abteilung Leichtbauinnovation eine Kernaufgabe dar, um den Wissens- und Technologietransfer zu fördern. Dies zeichnet sich auch durch die Verantwortung von themengebundenen Lenkungs-kreisen sowie Innovationsnetzwerken, wie beispielsweise dem DLR Innovation Lab EmpowerAX, aus.

Als erster Ansprechpartner für Unternehmen steht außerdem unser [Servicedesk](#) für alle Fragen rund um den Systemleichtbau zur Verfügung. Sowohl für allgemeine Anfragen als auch für die Identifizierung von Lösungen zu spezifischen technischen Fragestellungen stehen wir Ihnen zur Seite. Hier bekommen sie kurzfristige Antworten und werden an Experten weitervermittelt.

Large parts of the application-specific research activities of our institute can be assigned to the business fields of wings, fuselage, space, transport and wind. A business unit manager forms the link between the researchers and the external partners in industry, science, standardisation and politics. The close exchange with industry supports the setting of priorities in research activities, ensures the economic utilisation of research results and forms the basis for successful innovations. Maintaining this interface is a core task for the Innovation department in order to promote knowledge and technology transfer. This is also characterised by the responsibility of topic-related steering groups as well as innovation networks, such as the DLR Innovation Lab EmpowerAX.

Our [service desk](#) is also available as the first point of contact for companies for all questions relating to lightweight system construction. Both for general enquiries and for identifying solutions to specific technical issues, we are at your side. Here you will receive answers at short notice and be referred to experts.

Kontakt/Contact :

[servicedesk-systemleichtbau@dlr.de](mailto:servicedesk-systemleichtbau@dlr.de)





## Geschäftsfeld Rumpf

Business area Fuselage

### Summary

The business area „Fuselage“ is dedicated to future fuselage concepts. Lightweight materials, e. g. CFRP and multi-material combinations are used and investigated to cover the main objectives: weight and cost reduction. At the same time, more robust stability, residual strength and impact tolerance requirements are met to cover the functionalities of cabin and systems. Improved design and analysis methods in conjunction with respective validation tests as well as commercially efficient production and assembly processes will directly be integrated into innovative and future-oriented fuselage architectures. For that, full-scale demonstration is a key enabler to cover large structural cutouts, e.g. passenger and cargo doors, load-carrying cabin elements as well as bonded and/or welded joining technologies. From an industrial point of view, the focus of research activities lies on large structural components, stiffening elements and secondary structural components of the cabin to finally achieve a safer and lightweight aircraft with integrated functions.

Im Geschäftsfeld Rumpf werden Konzepte für den Flugzeugrumpf der Zukunft entwickelt, unter Verwendung von Leichtbauwerkstoffen wie CFK oder geeigneten Multimaterialkombinationen.

Ziel ist eine Gewichts- und Kostenreduktion bei erhöhter Robustheit hinsichtlich Stabilität, Festigkeit, Restfestigkeit und Impacttoleranz sowie eine maximale Funktionsintegration unter Berücksichtigung der Anforderungen und Funktionen von Kabine und Systemen.

Neue Werkstoffe und Werkstoffkombinationen, moderne Entwurfs- und Nachweisverfahren unter Verwendung geeigneter Validierungstests sowie wirtschaftliche Herstellungs- und Montageprozesse werden in innovativen funktionsintegrierten Bauweisen bis zu Demonstratoren im 1:1-Maßstab entwickelt, die auch große Ausschnitte für Passagier- und Frachtraumtüren, mitttragende Kabinenelemente sowie geklebte oder geschweißte Verbindungen beinhalten. Als industrielle Anwendungsfälle stehen hierbei Großbauteile (z. B. Rumpfschalen), komplexe Versteifungselemente (z. B. Spante) und Sekundärstrukturen der Kabine im Fokus.

Geschäftsfeldleiter:  
Dr.-Ing. Daniel Schmidt



## Geschäftsfeld Flügel

Business area Wing



Auf dem Weg in die emissionsarme Luftfahrt der Zukunft kommt dem Flügel eine Schlüsselrolle zu. Die aerodynamischen Effekte, die hier genutzt werden sollen, werden nicht nur durch Gewichtsreduktion im Leichtbau unterstützt, sondern sind im Sinne des Systemleichtbaus teilweise erst möglich. Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen ermöglicht den Entwurf schlanker, hochgestreckter Tragflügel, öffnet Optionen für neue, formvariable Vorflügel und effiziente multifunktionale Hochauftriebs- und Steuerflächen. Das gemeinsame Denken von Bauweise und Fertigung ist im Faserverbundleichtbau dabei unerlässlich. Das Geschäftsfeld Flügel leistet in allen diesen Bereichen wertvolle Beiträge, um mit dem Systemgedanken im Leichtbau die Entwicklung moderner Tragflügel voranzutreiben.

In Multi-Disciplinary-Design-Projekten bringen wir unsere umfangreiche Kompetenz im Flügelentwurf und der Strukturoptimierung für Flugzeugkonfigurationen mit hochgestreckten Flügeln ein.

Wir beschäftigen uns zudem damit, Ailerons und multifunktionale Flaperons in innovativer Bauweise industrialisierbar und skalierbar herzustellen. Neue Ansätze im Laminatdesign, wie der Double-Double-Ansatz, werden hier zunehmend aufgegriffen und in realen Bauteilen umgesetzt.

Darüber hinaus haben wir zusätzlich die Integration von Funktionen im Blick, um unsere leichten Strukturen noch effizienter zu machen. Strukturintegrierte Systeme zur Beheizung und zur Eiserkennung ermöglichen eine energieeffiziente Enteisung, die auf das Flugzeugleben gesehen den Treibstoffverbrauch zu reduzieren hilft. Das Geschäftsfeld Flügel bedient die Entwicklung von Bauweisen- und Fertigungskonzepten, über den Vorentwurf bis zum Detailed Design eines fertigen Bauteils. Unsere Fertigungsanlagen ermöglichen die Bauteilherstellung bis hin zur Originalgröße von Flügelschalen moderner Mittelstreckenflugzeuge.

Wir bündeln damit alle Fähigkeiten des modernen Systemleichtbaus für die Entwicklung der emissionsarmen Luftfahrt von morgen.

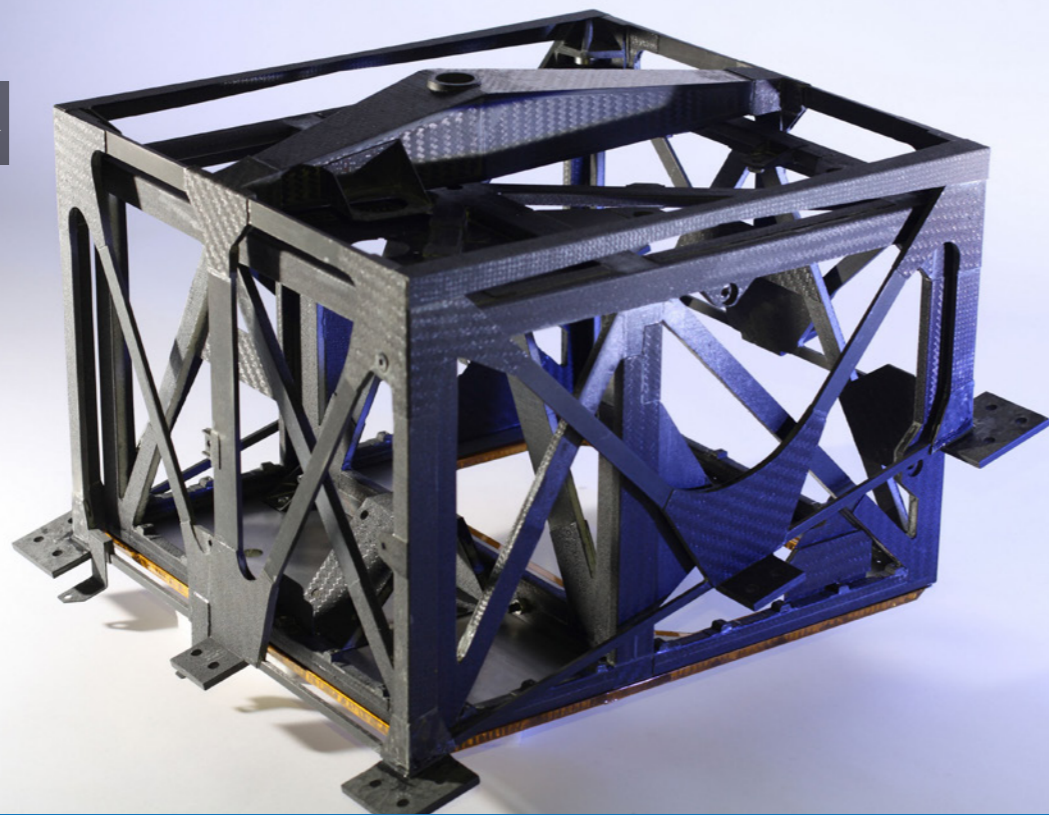
### Summary

The wing will play a key role on the road to the low-emission aviation of the future. The aerodynamic effects that are to be utilised here are not only supported by weight reduction in lightweight construction, but are in part only possible in the sense of lightweight system construction. The use of fibre-reinforced composites enables the design of slender, highly stretched wings, opens up options for new, shape-variable slats and efficient multifunctional high-lift and control surfaces. Thinking about design and production together is essential in fibre composite lightweight construction. The Wing business unit makes valuable contributions in all these areas in order to advance the development of modern aerofoils with the system concept in lightweight construction.

We thus combine all the capabilities of modern lightweight system construction for the development of tomorrow's low-emission aviation.

Geschäftsfeldleiter:  
Olaf Steffen, M.Sc.





## Geschäftsfeld Raumfahrt

Business area Space Technologies

### Summary

The interdisciplinary business area Space Technologies represents a class of its own, which distinguishes itself from aeronautical and ground transport applications. The space research at the institute is strongly shaped by ESA and DLR research missions. Therefore, a large portion of our work focuses on spacecraft and landers for the exploration of the solar system. Notable examples are „Phylae“, which landed on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko and the space probe „MASCOT“ about to land on the asteroid Ryugu. Tailored design concepts and new production processes are routinely developed to yield the structures required for satellites and interplanetary missions. The second major field of work is the development of ultralight deployable structures such as very large solar generators, solar sails, and large deployable antennas. In fact, the institute is a worldwide leader in the design of unique and innovative deployable structures. Thirdly, in the field of space transport, the institute is conducting research on a number of levels from hybrid connections to high-performance load-bearing structures for new vehicles. In the future, the space structures will be intelligent with qualities such as „sensitive“, „reactive“ and „healing“. The ultimate goal is a set of structures that are aware of their state and react autonomously to external influences.

Raumfahrt ist ein herausforderndes interdisziplinäres Forschungsgebiet. Eine starke Orientierung an den Forschungsmissionen von ESA und JAXA, den DLR-eigenen Missionen, den raumfahrtspezifischen Technologien und den ECSS-Standards als übergreifendem Regelwerk sind für das Geschäftsfeld Raumfahrt maßgeblich.

Ein Hauptarbeitsgebiet ist die Entwicklung von Raumsonden und Landern für die Exploration des Sonnensystems, wie beispielsweise dem Kometenlander „Phylae“ der Rosetta-Mission oder der Asteroidenlander MASCOT der Hayabusa2-Mission. Neuartige Designkonzepte und Fertigungstechnologien für die Strukturen von Kompaktsatelliten sowie Instrumentenstrukturen für Satelliten und interplanetare Missionen gehören ebenso zum Portfolio.

Ein weiteres Hauptarbeitsgebiet stellen die ultraleichten entfaltbaren Strukturen dar. Ihre möglichen Einsatzgebiete sind zukünftige sehr große Solargeneratoren, Sonnensegel (solar sails) oder große, im Raum entfaltbare Antennen. Hierfür entwickelt das Institut weltweit einzigartige und äußerst innovative Entfaltungskonzepte.

Im Bereich des Raumtransports erforscht das Institut hybride Verbindungselemente sowie hochbelastbare Strukturen für neuartige Startsysteme. Zukünftig sollen die Raumfahrtstrukturen des Instituts zudem smarter werden: „Sensieren“, „Reagieren“ und „Heilen“ sind Schlagworte zu diesem Ansatz. Das Ziel sind Strukturen, die sich selbst überwachen und weitgehend autonom auf äußere Einflüsse reagieren.

Geschäftsfeldleiter:  
Dipl.-Ing. Olaf Mierheim



## Geschäftsfeld Wind

Business area Wind



Das Geschäftsfeld Wind bündelt die Expertise des Instituts für die gezielte Anwendung im gleichnamigen Bereich der erneuerbaren Energien. Die Kompetenz beruht auf einer ausgewogenen Mischung aus Projekten im Bereich der Windenergie und anderen Industriebereichen wie der Luft- oder der Raumfahrt. Gerade die branchenübergreifende Forschung auf dem Gebiet effizient gefertigter, anpassungsfähiger und toleranter Faserverbunde führt zu maßgeschneiderten Innovationen und Lösungen für die Windenergie.

Die Forschungsthemen dieses Geschäftsfeldes reichen von lebensdaueroptimierten oder funktionalen Werkstoffen über Bauweisen, Auslegung und qualitätsgeregelte Produktion bis hin zu Systemen zur Lastminderung oder Strukturüberwachung. Abgerundet durch die Aspekte Recycling und Lebenszyklusanalyse finden die Forschungsergebnisse Einzug in alle Lebensphasen der im Bereich der Windenergie eingesetzten Faserverbundstrukturen und ermöglichen sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Bewertungen.

Eingebettet in das DLR steht dem Geschäftsfeld eine einzigartige Infrastruktur zur Verfügung. Sowohl der Betrieb von institutseigenen Großanlagen, z. B. im Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade als auch der Zugang zur Forschungsplattform Windenergie für die Erprobung von Strukturen, Systemen oder Technologien an realen Windenergieanlagen ermöglichen eine besonders industrie- und anwendungsnahe Forschung für die emissionsfreie Energieerzeugung von morgen.

Geschäftsfeldleiter:  
Dr.-Ing. Lutz Beyland



### Summary

The business area „Wind Energy“ concentrates the expertise of the institute in this field of renewable energies. The competence is based on a well-balanced mixture of projects in different sectors including wind energy but also aerospace and space. This research activity that covers a variety of industries leads to tailored solutions and innovations for the wind energy sector. The project topics of the business area range from the investigation of fatigue-optimised and functional materials via design, sizing and quality-controlled production to research on systems for load alleviation or structure monitoring. Aspects like recycling and life cycle analysis complete the portfolio and enable to integrate the results in all phases of the life cycle of composite structures in the wind energy sector. Furthermore this broad range of research activities allows the economic and ecologic assessment of composites that are used in this field. As a part of DLR, the business area has access to a unique infrastructure. The institute operates the Center for Lightweight Production Technology in Stade and can test structures and systems on the research platform for wind energy on real turbines. This enables industry-oriented research on a high technology readiness level for the zero-emission energy generation of tomorrow.



## Geschäftsfeld Verkehr

Business area Transport

### Summary

*An aerospace institute researches in transport applications? – Yes! Because many questions and technologies can be transferred: Also in transport applications, the interaction between society's mobility demands and the effects of mobility on the environment is very challenging, because mobility has to be ensured, the environmental protection standards have to be maintained and safety has to be further improved. The business area „Transport“ transfers the institute's expertise gained in the aerospace research to the roads and the railways. To this end, it clusters all research activities with a focus on ground transport vehicles operating on land and waterways. These research projects pursue the vision of emission-free mobility. Here, intelligent lightweight construction plays a key role. In the interdisciplinary business area „Transport“, the institute's various research areas, ranging from efficient simulation methods and low-cost production processes to the testing of integrated systems, interact with each other to shape the environmentally friendly and safe mobility of tomorrow.*

Ein Luft- und Raumfahrtinstitut forscht im Bereich des bodengebundenen Verkehrs? – Ja!

Denn viele Fragestellungen und Technologien sind übertragbar: Auch im Verkehr bringt das Spannungsfeld zwischen den Mobilitätsansprüchen der Gesellschaft und den Mobilitätsauswirkungen auf die Umwelt die Herausforderung mit sich, die Sicherung der Mobilität, die Schonung der Umwelt und den Wunsch nach erhöhter Sicherheit in Einklang zu bringen.

Das Geschäftsfeld Verkehr bringt das in der Luft- und Raumfahrt erworbene Expertenwissen des Instituts auf die Straßen und auf die Schiene. Es bündelt dafür alle Forschungsaktivitäten mit Ausrichtung auf den bodengebundenen Verkehr auf Land- und Wasserwegen. Diese Forschungsprojekte verfolgen die Vision einer emissionsfreien Mobilität, wobei der intelligente Systemleichtbau eine Schlüsselrolle spielt. So in dem grundfinanzierten Projekt Next Generation Car. Dieses Projekt hat die Entwicklung nachhaltiger Fahrzeugstrukturen zum Ziel. Dazu tragen u. a. leichte, strukturintegrierte, lasttragende Leiterbahnen sowie deren ressourcenschonende automatisierte Fertigung bei.

Das ebenfalls DLR-interne Projekt Next Generation Train – Backbone of Intermodal Transport greift die Forderung nach alternativen Treibstoffen und Antriebskonzepten für den Schienenverkehr auf. Ziel ist die Entwicklung langlebiger und kosteneffizienter Wasserstoffspeicher für einen hybriden Triebzug. Hier ermöglicht die Kopplung strukturintegrierter Monitoring-Systeme mit effizienten Berechnungsmethoden eine bessere Materialausnutzung und eine bedarfsgerechte Wartung.

Die Strukturüberwachung als Enabler zur Masseeinsparung ist auch ein Fokus im BMWi-geförderten Projekt *Signifikante Masseeinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem*. Dass eine integrierte Zustandsüberwachung im Realbetrieb möglich ist, zeigt das Projekt am Frontend eines Regionalzugs.

In dem interdisziplinär agierenden Geschäftsfeld Verkehr greifen die unterschiedlichen Forschungsbereiche des Instituts von effizienten Berechnungsmethoden über kostengünstige Fertigungsverfahren bis hin zur Erprobung integrierter Systeme ineinander, um die umweltschonende und sichere Mobilität von morgen zu gestalten.



Geschäftsfeldleiter:  
Marcel Andres, M.Sc.





# PATENTE 2023/2024

Patents 2023/2024

**Peinke, Joachim; Riemenschneider, Johannes:**  
Rotorblatt mit adaptivem Vorflügel für eine Windenergieanlage,  
[DE 102012102746](#), 22.06.2020

**Sinapius, Michael; van der Wall, Berend Gerdes; Riemenschneider, Johannes; Keßler, Christoph; Radespiel, Rolf; Scholz, Peter:**  
Aerodynamischer Profilkörper,  
[DE 102013104695](#), 27.02.2020

**Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:**  
Faserhalbzeug-Ablegekopf,  
[EP 2821198](#), 13.05.2020,  
[FR], [GB], [DE]

**Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:**  
Faserhalbzeug-Temperiervorrichtung,  
[DE 102013107105](#), 02.07.2020

**Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:**  
Faserhalbzeug-Fördervorrichtung,  
[DE 102013107106](#), 24.12.2019,  
[US 10632695](#), 28.04.2020

**Unruh, Oliver; Haase, Thomas; Monner, Hans Peter; Pohl, Martin:**  
Aktives akustisches Schwarzes Loch zur Schwingungs- und Lärmreduktion,  
[DE 102015100442](#), 14.08.2020

**Ückert, Christian; Steffen, Olaf:**  
Procédé et agencement d'assemblage pour relier un constituant de corps d'écoulement avec un ou plusieurs composants,  
[FR 3017668](#), 18.10.2019

**Schmidt, Jochen; Kleineberg, Markus:**  
Faserverbundbauteil sowie Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,  
[FR 3025452](#), 27.09.2019

**Knippschild, Lothar; Elsen, Thomas; Van de Kamp, Bram; Zollenkopf, Michael; Danneberg, Kai; Büchler, Dirk; Kintscher, Markus; Opitz, Steffen; Pohl, Martin; Geier, Sebastian; Bubbers, Andreas; Siebrecht, Thomas; Spardel, Holger; Thieme, Christian:**  
Flossenstabilisator und Wasserfahrzeug,  
[EP 2993118](#), 17.06.2020,  
[FR], [GB], [IT], [DE], [NL]

**Bock, Matthias; Kleineberg, Markus; Röstermundt, Dirk:**  
Harzimprägnierung trocken ummantelter Faserverbundkörper mittels hoher Drücke im vakuumunterstützten RTM-Prozess,  
[FR 1557968](#), 27.08.2015

**Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:**  
Dipositif de préhension,  
[FR 3024066](#), 18.10.2019

**Mendig, Christian:**  
Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Vereisung einer von einer Luftströmung angeströmten Oberfläche,  
[FR 3031499](#), 05.06.2020

**Mahrholz, Thorsten; Geier, Sebastian:**  
Superkondensatoren mit ausgerichteten Kohlenstoffnanoröhren und Verfahren zu deren Herstellung,  
[US 10510494](#), 17.12.2019

**Riemenschneider, Johannes; Mendig, Christian; Sinapius, Michael; Schulz, Martin; Endres, Matthias:**  
Vorrichtung zum Enteisen einer Oberfläche eines aerodynamischen Körpers,  
[DE 102015107275](#), 20.02.2020

**Bach, Tobias; Steffen, Olaf; Kaps, Robert; Kleineberg, Markus; Düring, Denise; Hühne, Christian; Ückert, Christian:**  
Flügelstruktur für Flugobjekte,  
[US 10661886](#), 26.05.2020

**Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:**  
Fasertemperiereinrichtung, Faserapplizier-  
vorrichtung, Faserlegeanlage sowie Verfahren zum Temperieren,  
[DE 102016110323](#), 20.02.2020

**Ückert, Christian; Steffen, Olaf:**  
Dispositif de mesure pour déterminer des angles de réglage, dispositif de réglage pour régler des angles de réglage, ainsi que procédé d'assemblage et procédé d'ajustement s'y rapportant,  
[FR 3043770](#), 22.11.2019

**Bertling, Dominic:**  
Verfahren und Anlage zum Herstellen eines Faserverbundbauteils,  
[FR 3045449](#), 08.11.2019,  
[DE 102015122376](#), 21.11.2019

**Krombholz, Christian; Nguyen, Duy Chinh:**  
Faserlegekopf und Faserlegeanlage sowie Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,  
[DE 102015121428](#), 31.10.2019

**Steffen, Olaf; Kolbe, Andreas:**  
Verfahren zur Unterstützung der Montage eines Bauteils und Montageunterstützungssystem hierzu,  
[DE 102016106010](#), 13.08.2020

**Pototzky, Alexander:**  
Kabelbaum für Fahrzeuge sowie Verfahren zu dessen Herstellung,  
[FR 3043832](#), 11.10.2019

**Rudenko, Anton:**  
Fahrzeug mit einer im Bedarfsfall ausbildbaren Strömungsabrisskante,  
[FR 3054195](#), 25.10.2019

**Nguyen, Duy Chinh; Krombholz, Christian:**  
Dispositif de pose de fibres,  
[FR 3044954](#), 25.10.2019

**Forßbohm, Tobias; Kleineberg, Markus; Buggisch, Manuel; Froese, Sarah:**  
Aerodynamischer Profilkörper für Flugobjekte,  
[DE 102016109026](#), 19.03.2020

**Misol, Malte:**  
Wand mit einer durch rückwärtige Stege in Gitterfelder unterteilten Außenhaut und Flugobjekt,  
[DE 102016115994](#), 10.06.2020

**Grohmann, Yannis; Riederer, Pascal:**  
Tête de pose de fibres et procédé pour poser du matériau à base de fibres,  
[FR 3050681](#), 08.11.2019

**Liebers, Nico:**  
Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,  
[DE 102016112263](#), 17.10.2019

**Kintscher, Markus; Monner, Hans Peter:**  
Tragflügel mit Droop Nose und hybrider Laminarisierung der Strömung durch Absaugung sowie Verkehrsflugzeug mit einem Paar solcher Tragflügel,  
[DE 102016121507](#), 02.07.2020,  
[FR 3058387](#), 15.11.2019

**Pohl, Martin:**  
Fertigungsanlage und Verfahren zur Herstellung eines Bauteils,  
[EP 3345745](#), 15.01.2020, [FR], [DE],  
[DE 102016123344](#), 23.07.2020

**Kleineberg, Markus; Schmidt, Jochen; Hühne, Christian:**  
Bauteilstruktur und Verfahren zur Herstellung derselben,  
[DE 102016124966](#), 24.09.2020

**Algermissen, Stephan:**  
Plattenförmige Struktur und Verfahren zur Reduzierung der Schallabstrahlung,  
[DE 102018102141](#), 26.09.2019

**Al-Lami, Ali; Haschenburger, Anja:**  
Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen einer Leckage,  
[DE 102018105889](#), 10.10.2019

**Hillebrandt, Martin; Zander, Martin; Hühne, Christian:**  
Vorrichtung zum Entfalten eines Mastes,  
[US 10717628](#), 21.07.2020

**Mahrholz, Thorsten; Haunerding, Johannes:**  
Faserverbundbauteil mit Zwischenlagen und Verfahren zu seiner Herstellung,  
[EP 3552813](#), 01.07.2020,  
[DK], [DE], [FR], [GB]

**Misol, Malte; Titze, Maik; Lehn, Andreas:**  
Wand mit einer durch rückwärtige Rippen versteiften Außenhaut und Flugobjekt mit einer solchen Wand,  
[DE 102018104542](#), 17.09.2020

**Kolbe, Andreas:**  
Faserlegekopf, Faserlegeanlage sowie Verfahren zum Ablegen von Fasermaterial,  
[DE 202019102097](#), 20.08.2020

**Zapp, Philipp; Ucan, Hakan; Grasse, Fabian; Grimm, Mathias:**  
Vorrichtung zum Überwachen eines Herstellungsprozesses zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,  
[DE 202019101206](#), 16.07.2020

**Völkerink, Oliver; Prussak, Robert; Pototzky, Alexander; Hühne, Christian:**  
Faserverbundbauteil, Adaptereinheit, faseroptische Sensoreinrichtung und Herstellungsverfahren hierzu,  
[DE 102019112876](#), 27.08.2020

**Heilmann, Lennert:**  
Verfahren zur Herstellung eines Bauteils sowie Bauteil hierzu,  
[DE 102019121592](#), 27.08.2020



## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Wir betreiben Forschung und Entwicklung in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie und Verkehr, Sicherheit und Digitalisierung. Die Deutsche Raumfahrtagentur im DLR ist im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zwei DLR Projektträger betreuen Förderprogramme und unterstützen den Wissenstransfer. Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie.

Das DLR nutzt das Know-how seiner 55 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für diese Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 10.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall und entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft. So tragen wir dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

### *DLR at a glance*

DLR is the Federal Republic of Germany's research centre for aeronautics and space. We conduct research and development activities in the fields of aeronautics, space, energy, transport, security and digitalisation. The German Space Agency at DLR plans and implements the national space programme on behalf of the federal government. Two DLR project management agencies oversee funding programmes and support knowledge transfer. Climate, mobility and technology are changing globally. DLR uses the expertise of its 55 research institutes and facilities to develop solutions to these challenges. Our 10,000 employees share a mission – to explore Earth and space and develop technologies for a sustainable future. In doing so, DLR contributes to strengthening Germany's position as a prime location for research and industry.

## Impressum | Imprint

Herausgeber | Publisher:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | German Aerospace Center (DLR)

Redaktion | Editorial staff: Prof. Dr. Martin Wiedemann (Direktor),  
Prof. Dr. Peter Wierach (Stellv. Direktor),  
Prof. Dr. Jörg Melcher (Lektorat), Jessica Treptow,  
Dr. Matthias Lossau, Jörg Nickel, Dr.-Ing. Malte Misol,  
Dr. rer. nat. Thorsten Mahrolz, Dr.-Ing. Christian Bülow,  
Hakan Ucan, Dr.-Ing. Christian Willberg,  
Dr.-Ing. Raffael Bogenfeld, Katrin Stevens

Anschrift | Address: Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

Telefon | Phone: + 49 531 295-2301

**DLR.de/sy | leichtbau.dlr.de**

ISSN (Print) 2567-7705, ISSN (Online) 2567-7713

Bilder | Images: DLR Fotomedien, Felix Opera, Marcel Soppa, Marvin Diegeler,  
David Senkic, Lea Adams

Copyright: DLR (CC-BY 3.0) soweit nicht anders angegeben | unless otherwise stated

Titelbild | Cover image:

Projekt Hystore | *Project Hystore*



**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**  
German Aerospace Center

Supported by:



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Energy

on the basis of a decision  
by the German Bundestag

Projects supported by:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

