



# Innovationsbericht 2017

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

*Innovation Report 2017*

*Institute of Composite Structures and Adaptive Systems*



## Preface

*What are the contributions that composite structures and adaptive systems can make to a technology in transition, and to a society undergoing digital change? Is lightweight construction more than a remnant from the good old analogue times, and might adaptive structures possibly be the answer? Can lightweight structures still be economically produced in Germany instead of importing them from other countries at low cost? Is there a potential in 3D printing for lightweight construction? In an era of virtual worlds – is it still appropriate that scientists deal, amongst others, with questions of methodology development for better thermal management of satellite structures, technology developments for segmented rotor blades, controlled infusion of dry fibre layups, or new methods for ice detection at rotors and wings? Are these questions and the answers still important?*

*We are looking for safe, energy-saving, and sustainable mobility. Everyone has gained their personal experience of how energy, acceleration, and mass are interrelated when we ride a bike, and a clear conception of the consequences of mechanical structural failure when we watch a car accident. We are aware of the fact that structures undergo an ageing process when we are stuck in a traffic jam in front of a bridge under reconstruction, and we feel safe in an airplane since we trust in the stringent test specifications of this business sector.*

*The following applies likewise to our bone structure, which is also an outstanding lightweight construction: structures are meant to serve our needs: only if they fail, we are aware of their existence. With our scientific approach of adaptive lightweight construction, we enable economical manufacturing of lightweight structures that fulfil their intended functions under any condition and with permanent quality assurance.*

*Hence, the answer to the questions raised above is a clear, unequivocal „yes!“. Germany has a powerful lightweight construction industry and many highly qualified people manufacturing outstanding products, lightweight and durable, economical in operation, and increasingly equipped with diagnostic systems ensuring performance and operational reliability under all conceivable conditions – products, which are in strong demand all over the world.*

*With this innovation report, we want to give you once again an insight into the world of lightweight construction in the digital age. It goes without saying that composite structures and adaptive systems also benefit from new opportunities in the field of sensor technology, data transmission, and 3D printing. Lightweight construction will gain robustness and economic efficiency through digitalisation; adaptive systems will become an integral constituent of adaptable structures. In this report, we want to inform you about this topic and many more, and we are looking forward to your feedback and queries.*

## Vorwort

Welche Beiträge können der Faserverbundleichtbau und die Adaptronik leisten für eine Technik im Umbruch, für eine Gesellschaft im digitalen Wandel? Ist Leichtbau mehr als ein Relikt aus der guten alten analogen Zeit und sind adaptive Strukturen möglicherweise eine Antwort darauf? Können leichte Strukturen noch wirtschaftlich in Deutschland produziert werden, anstatt sie billig aus anderen Ländern zuzukaufen? Bietet der 3D-Druck Potenzial für den Leichtbau? Ist es noch zeitgemäß, wenn sich im Zeitalter virtueller Welten Wissenschaftler zum Beispiel mit Fragen der Methodenentwicklung für ein besseres Thermalmanagement von Satellitenstrukturen, Technologieentwicklungen für segmentierte Rotorblätter, der kontrollierten Infusion von Trockenfasergelegen oder neuen Verfahren zur Eiserkennung an Rotoren und Flügeln befassen? Sind diese Fragen und ist ihre Beantwortung noch wichtig?

Wir wünschen uns Mobilität, die sicher, energiesparend und nachhaltig ist. Jeder von uns hat Erfahrungen, wie Energie, Beschleunigung und Masse zusammenhängen, wenn wir auf ein Fahrrad steigen, und eine klare Vorstellung von den Folgen mechanischen Strukturversagens, wenn wir einem Fahrzeugunfall begegnen. Wir erleben, dass Strukturen altern können, wenn wir im Stau vor der in Sanierung befindlichen Brücke stehen und fühlen uns in einem Flugzeug sicher, weil wir auf die strengen Prüfvorschriften der Zulassung vertrauen.

Wie für unseren Knochenbau – auch der ist hervorragender Leichtbau – gilt: Strukturen haben dienenden Charakter - erst wenn sie nicht mehr funktionieren, bemerkt man, dass sie da sind. Wir sorgen mit unserer Wissenschaft vom anpassungsfähigen Leichtbau dafür, dass Leichtbaustrukturen wirtschaftlich herstellbar sind und dauerhaft qualitätsgesichert ihre Funktionen in jeder Situation erfüllen.

Die Antwort auf die oben gestellten Fragen ist daher ein eindeutiges „Ja!“. Wir haben in Deutschland eine starke Leichtbauindustrie und eine Vielzahl von hochqualifizierten Menschen, die hervorragende Produkte herstellen, leicht und haltbar, wirtschaftlich im Betrieb und zunehmend ausgestattet mit Diagnosesystemen, die die Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit unter allen denkbaren Bedingungen sicherstellen – Produkte, die überall auf der Welt gefragt sind und ganz neue Betriebsmodelle ermöglichen.

Mit diesem Innovationsbericht möchten wir Ihnen wieder einen Einblick in die Welt des Leichtbaus im Zeitalter der Digitalisierung geben. Denn natürlich profitieren Faserverbundleichtbau und Adaptronik auch von den neuen Möglichkeiten der Sensorik, der Datenübertragung und des 3D-Drucks. Leichtbau wird durch Digitalisierung an Robustheit und Wirtschaftlichkeit gewinnen, Adaptronik wird zum integralen Bestandteil anpassungsfähiger Strukturen. Darüber und über andere Themen wollen wir Ihnen hier berichten und freuen uns auf Ihre Rückmeldungen und Nachfragen.



Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
Institutsdirektor



Dr.-Ing. Peter Wierach  
Stellvertretender Institutsdirektor

# Inhaltsverzeichnis

## Contents

<b>Das Institut im Überblick</b>	<b>06</b>
<i>The institute in a nutshell</i>	
<b>Die Forschungsthemen von morgen</b>	<b>09</b>
<i>The research topics of tomorrow</i>	
Bewertungsfähigkeit für den Multimaterialeichtbau	10
<i>Competence in the assessment of multi-material lightweight structures</i>	
AddCompSTM – Additive Composite Structures	12
<i>The merging of composite production and 3D printing</i>	
Ganzheitliche Strukturbewertung beim Flugzeuggesamtentwurf	14
<i>Holistic structural assessment with in multi-disciplinary aircraft design</i>	
Zukunftsfabrik 2030 für den Multimaterialeichtbau	16
<i>Future Factory 2030 for multi-material lightweight structures</i>	
<b>Von Nano über Mikro zu Makro</b>	<b>19</b>
<i>Nano – micro – macro</i>	
Wärmeleitfähigkeit schnell, einfach und effizient bestimmt	20
<i>New method for the determination of thermal conductivity</i>	
Partikelverstärkt ins All – Thermalmanagement von Satelliten	22
<i>Particle-reinforced fibre composites for satellites</i>	
Schädigung verstehen – peridynamische Modellierung von Rissen	24
<i>Comprehension of damages – peridynamic modelling of cracks</i>	
Thin Ply – Forschung an ultra-dünnem Carbon-Prepreg	26
<i>Thin ply – research on ultra-thin carbon prepreg</i>	
Blitzschutz mit multifunktionalen CFK-Werkstoffen	28
<i>Lightning strike protection with multifunctional CFRP materials</i>	
<b>Robuster Gesamtentwurf</b>	<b>31</b>
<i>Robust primary structures</i>	
Hält's noch, wenn's brennt? Brandversuche unter mechanischer Last	32
<i>Well sealed – fire test under mechanical load</i>	
Faserverbundstrukturen für Hochtemperaturanwendungen	34
<i>Fibre composite structures for high-temperature applications</i>	
Individuelle Schadensbewertung – neuer Ansatz zur Reparatur	36
<i>Individual damage assessment – demonstration of a new approach to demand-oriented repair of composite structures</i>	
Lebensdaueranalyse von Kompositstrukturen bei verschiedenen Temperaturen	38
<i>Fatigue life analysis of composite structures at varying ambient temperatures</i>	
Kann die Wandstärke von Raketen noch dünner werden?	40
<i>New design methods for primary structures of launch-vehicles</i>	
<b>Strukturkonforme Funktionsverdichtung</b>	<b>43</b>
<i>Compliant aggregation of functionalities</i>	
Warum löchern wir lasttragende Faserverbundstrukturen?	44
<i>Integration of air ducts into a HTP leading edge</i>	
Fügen von hybriden Strukturen mit Filmklebstoffen	46
<i>Joining of hybrid structures with film adhesives – the delta-alpha issue and its possible solution</i>	
Segmentierte Windturbinen-Rotorblätter – auf die Verbindung kommt es an!	48
<i>Segmented rotor blades of wind turbines – it comes down to the joining technology!</i>	
Wenn Satelliten schwitzen – kombinierter Struktur- und Thermalentwurf	50
<i>When satellites are sweating – a semi-analytical design method for a coupled structural-thermal analysis</i>	
Den Gordischen Knoten lösen – crashsichere Faserverbundstrukturen	52
<i>Initial design of crashworthy composite structures by simultaneous consideration of static loads and crash loads</i>	

<b>Lernende CFK-Prozessierung</b>	<b>55</b>
<i>Self-controlled CFRP processing</i>	
Volles Spektrum – Fertigungsüberwachung von Rotorblättern	56
<i>Full spectrum – optical monitoring of wind turbine rotor blade manufacturing</i>	
Qualitätsgesicherte Liquid Composite Moulding (LCM)-Prozesse	58
<i>In-situ monitoring and adjustment of LCM processes</i>	
CoRe HeaT – brandheiße Faserlegetechnologie	60
<i>CoRe HeaT – a new heating method for fast fibre placement</i>	
Smart-Work-Station (SWS) – Kostenbewertung in Echtzeit	62
<i>Smart Work Station (SWS) – concept of real-time eco-efficiency assessment in composite manufacturing</i>	
Mit Schall die Pultrusion verbessern	64
<i>With sound to a better pultrusion</i>	
<b>Autark agierende Faserverbundsysteme</b>	<b>67</b>
<i>Autonomous composite structures</i>	
Runter kommen sie (n)immer! Solarbetriebene Stratosphärenplattformen	68
<i>Long-endurance stratosphere vehicle – solar-powered HALE-Platform (High Altitude Long Endurance)</i>	
Adaptives Helikopter-Rotorblatt im Windkanal	70
<i>Conception, design, construction, and qualification of an adaptive helicopter rotor blade for wind tunnel tests</i>	
Leicht und leise – weniger Lärm in der Flugzeugkabine	72
<i>Active-passive-hybrid noise reduction methods for novel fuselage structures</i>	
Pneumatische Skelette – morphende Strukturen aus dem 3D-Drucker	74
<i>New pressure-actuated morphing structures produced through 3D printing</i>	
Aus der Tiefkühltruhe in den Windkanal	76
<i>New methods for local ice detection</i>	
<b>Nachhaltige Produktionsprozesse</b>	<b>79</b>
<i>Sustainable composite processes</i>	
Wir brauchen eine neue Haut! Flugzeugrumpf aus Faser-Metall-Laminat	80
<i>Automated production of fuselage structures made of fibre-metal laminates for the new short range</i>	
Schneller geht's im Team! Effiziente Fertigung von Flügelschalen	82
<i>Team strength and focused heat for large structures – efficient wing cover manufacturing</i>	
Kleine Serien ganz groß: vollautomatisiert und wirtschaftlich	84
<i>High-rate production of low-rate products – how automation can become economical even for low production rates</i>	
Die COPRO®-Technologie – Profilpreforming voll automatisiert	86
<i>The COPRO® technology – preforming of profiles fully automated</i>	
<b>Das Institut im Detail</b>	<b>89</b>
<i>The institute in detail</i>	
Abteilungsprofile	90
<i>Departments</i>	
Schwerpunkte der Anwendungsforschung	96
<i>Key areas of applied research</i>	
Selbstorganisierte multifunktionale Strukturen für den adaptiven Leichtbau	102
<i>Self-organising multifunctional structures for adaptive lightweight constructions</i>	
Veröffentlichungen 2016–2017	104
<i>Publications 2016–2017</i>	
Patente 2016–2017	106
<i>Patents 2016–2017</i>	

## Das Institut im Überblick

Das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat die Expertise für den Entwurf und die Realisierung anpassungsfähiger, effizienter Faserverbundstrukturen und Leichtbausysteme. Die Forschung dient der Gewichtsminimierung tragender Strukturen, der Verbesserung der Kosteneffizienz in Herstellung und Betrieb, der Maximierung der in die Struktur integrierten Funktionalität, der Komfortsteigerung und der Erhöhung der Umweltverträglichkeit.

Das Institut bildet die Brücke zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung. Mit seinen Fachkompetenzen in Multifunktionswerkstoffen, Strukturmechanik, Funktionsleichtbau, Faserverbundtechnologie, Adaptronik und Verbundprozesstechnologie orientiert sich das Institut entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung anpassungsfähiger, effizient gefertigter, toleranter Leichtbaustrukturen.

### Hochleistungsleichtbau: anpassungsfähig – effizient – tolerant

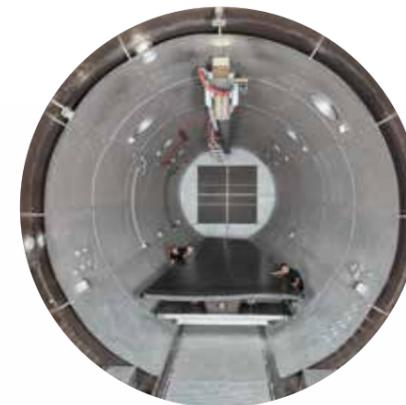
Mit seinen kreativen Wissenschaftlern an den Standorten Braunschweig und Stade ist das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Partner für Industrie, Hochschulen, DFG, Forschungseinrichtungen, Ministerien und Zulassungsbehörden. Zur Klärung von Fragen der Stabilität, Festigkeit und Thermalanalyse betreiben wir einzigartige Versuchs- und Fertigungseinrichtungen wie thermomechanische Prüfstände, eine Beulanlage für dynamische Bauteilbelastungen sowie einen Mikrowellenautoklaven. Neben grundlegenden Arbeiten in der Zukunftsforschung fokussiert sich das Institut auf sechs Schwerpunkte in der Anwendungsforschung. Sie dienen der Durchführung von großen praxisorientierten Projekten mit abteilungsübergreifendem und interdisziplinärem Charakter.

Aufseiten der universitären Grundlagenforschung ist das Institut durch strategische Partnerschaften und Kooperationen mit der Technischen Universität Braunschweig, der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und weiteren Universitäten verbunden. Aufseiten der anwendungsorientierten Forschung ist durch die Schaffung des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) und durch die Technologie-transferzentren in Hamburg und Bremen auch die Nähe zum industriellen Kunden gewährleistet.



Die Forschung am ZLP-Standort Stade konzentriert sich auf die Herstellung von komplexen Bauteilen in hochproduktiven Faserablage-Verfahren, die Steuerung von thermischen Aushärteprozessen und die voll automatisierte Fertigung von Großserienbauteilen im RTM-Prozess

*The research carried out at the ZLP site at Stade focuses on the manufacture of complex components in high-production fibre placement processes, of thermally inert curing processes in autoclaves and fully automated manufacturing of high-volume components in the resin transfer moulding (RTM) process*



Forschungsautoklav BALU (420 °C, Länge: 20 m, Durchmesser: 5,8 m) im ZLP Stade

Research autoclave BALU (420 °C, length: 20 m, diameter: 5,8 m) at ZLP Stade

## The institute in a nutshell

*The DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems is an expert in the design and development of innovative lightweight systems. The research serves the improvement of safety, cost-efficiency, functionality, comfort, and environment protection.*

*The institute bridges the gap between fundamental research and industrial application. The expertise of the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems in multifunctional materials, structural mechanics, composite design, composite technology, adaptronics, and composite process technology is orientated along the entire process chain of making adaptable, tolerant, efficiently manufactured lightweight structures.*

### High-performance structures adaptable – efficient – tolerant

*Creative scientists working at the sites in Braunschweig and Stade make the institute the ideal partner for the industry, the DFG (German Research Foundation), research establishments, ministries, and civil aviation authorities. In order to deal with strength, stability, and thermo-mechanical problems we operate unique experimental facilities like thermomechanical test facilities, buckling facilities with the special feature of dynamic loading, and a new microwave autoclave. Besides basic research for the future, the institute focuses on six application areas. They serve for the realisation of large practice-oriented projects of a cross-departmental and cross-disciplinary nature.*

*Seeking to promote fundamental research within higher education, the institute maintains a strategic partnership and cooperation with TU Braunschweig, Otto von Guericke University Magdeburg and other academic institutions. Moreover, the institute has created the Center for Lightweight Production Technology (ZLP) and the Technology Transfer Centers in Hamburg and Bremen to maintain close ties with clients from industry within its application-based research.*



3D-gedruckte, funktionsintegrierte Verbundbauteile: eine Flügelvorderkante aus carbonfaserverstärktem Kunststoff, montiert an einer morphenden, druck-aktuierten Elastomer-Flügelhinterkante.

*3D-printed composite material parts with integrated function: a wing with a stiff lightweight carbon fibre-thermoplastic leading edge connected to a pressurised plastic-rubber morphing trailing edge.*

## Die Forschungsthemen von morgen

Welchen Herausforderungen steht der Leichtbau in Zukunft gegenüber? Welches Potenzial bietet die Digitalisierung? Um diese und weitere Fragen zu beantworten, haben wir im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik vier strategische Forschungsfelder identifiziert. Im Folgenden möchten wir Ihnen erläutern, welche Erwartungen und Ziele wir mit diesen Forschungsfeldern verknüpfen.

### **The research topics of tomorrow**

*What are the challenges lightweight construction will have to face in the future? What is the potential of digitalisation? To answer these and many more questions, the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems has identified four strategic fields of research. In the following, we would like to explain which expectations and objectives we pursue with regard to these fields of research.*

Bewertungsfähigkeit für den Multimaterialeichtbau <i>Competence in the assessment of multi-material lightweight structures</i>	10
AddCompS™ – Additive Composite Structures <i>The merging of composite production and 3D printing</i>	12
Ganzheitliche Strukturbewertung beim Flugzeugesamtentwurf <i>Holistic structural assessment within multi-disciplinary aircraft design</i>	14
Zukunftsfabrik 2030 für den Multimaterialeichtbau <i>Future Factory 2030 for multi-material lightweight structures</i>	16

# Bewertungsfähigkeit für den Multimaterialeichtbau

*Competence in the assessment of multi-material lightweight structures*

**Die Bewertung von Forschungsergebnissen und neuen Technologien ist eine Kernkompetenz des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik. Der Fokus liegt dabei traditionell auf der strukturmechanischen Analyse von neuen Werkstoffen, Fertigungsverfahren und Bauweisen. Für die experimentelle Charakterisierung steht dem Institut eine umfangreiche Laborinfrastruktur zur Verfügung, die kontinuierlich modernisiert und ausgebaut wird, um für neue technologische Anforderungen, die sich beispielsweise im Zusammenhang mit hybriden Materialsystemen oder generativen Fertigungsverfahren ergeben, gerüstet zu sein. Ergänzt werden die Analysemöglichkeiten durch die Einbettung des Instituts in ein partnerschaftliches Umfeld aus Universitäten und weiteren Forschungseinrichtungen. Mit Hilfe dieser experimentellen Basis werden neue Berechnungs- und Fertigungsmethoden entwickelt und validiert. Dadurch ist das Institut optimal aufgestellt, um den Herausforderungen einer virtuellen Bewertungsfähigkeit, an deren Ende eine virtuelle Zertifizierungsfähigkeit stehen kann, zu begegnen.**

## Summary

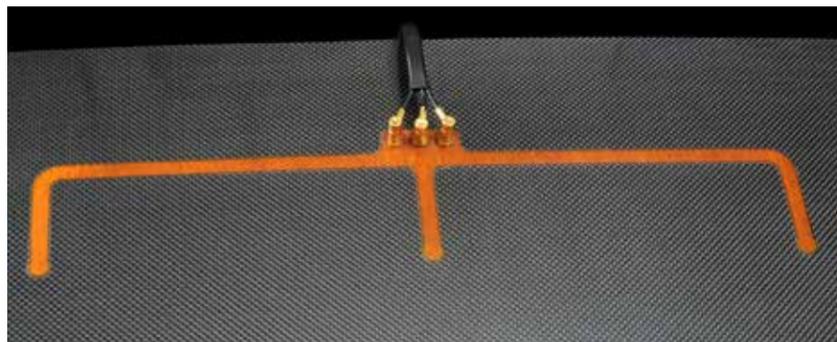
The assessment of research results and new technologies is a core competence of the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems. Traditionally, the focus is on the evaluation of the structural performance of new materials, processes, and designs. For this purpose, the institute is equipped with a large and up-to-date lab infrastructure. The quality and efficiency of the test lab is underlined by its DIN EN ISO 17025 accreditation. New methods and tools are developed to allow for a more comprehensive assessment of our research over the whole life cycle. This includes ecological, economic, and user-friendly aspects. In this context, the identification and collection of relevant data is most important and will play an even more important role with the increasing digitisation in all production areas. How can we benefit from the large amount of data gathered by numerous sensors during production, quality assurance, and operation? A new field for the assessment of multi-material lightweight structures has opened up.

## Qualität als Basis für Bewertungsfähigkeit

Eine wesentliche Voraussetzung für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist die Qualität der Datenbasis, die der Bewertung zugrunde liegt. Bereits 2013 wurde das statische Prüflabor des Instituts von Airbus zertifiziert. Durch die in diesem Jahr erfolgreich durchgeführte Akkreditierung nach DIN EN ISO 17025 unterstreicht das Institut seinen Anspruch, Materialien auf höchstem Qualitätsniveau zu charakterisieren. Unseren Kunden und Forschungspartnern demonstrieren wir damit die Datenqualität und die Effektivität unserer Prüflabore.

Kostengünstige Ultraschallsensoren zur Fließfronterkennung, Aushärte- und Strukturüberwachung messen über den gesamten Lebenszyklus Daten

*Cost efficient ultrasonic sensors for flow front detection, cure -, and structural health monitoring measure data over the whole life cycle*



## Ganzheitlicher Ansatz

In Politik, Wirtschaft und Gesellschaft entsteht immer mehr der Wunsch nach einer frühzeitigen und umfassenden Bewertung von Forschungsergebnissen. Die Industrie möchte den Mehrwert für ihre Produkte identifizieren, während Politik und Gesellschaft den Nutzen für Wirtschaft, Bevölkerung und Umwelt nachgewiesen haben möchten. Neben der klassischen strukturmechanischen Bewertung treten nun auch Fragen nach Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und der Wirkung neuer Technologien auf den Menschen in den Vordergrund. Seit einigen Jahren beschäftigt sich das Institut daher mit der Kostenbewertung und der ökologischen Bewertung über den gesamten Lebenszyklus eines Bauteils. In großen EU-Projekten wurde z. B. der wirtschaftliche Nutzen moderner Fertigungsverfahren, wie dem Single-Line-Injection Moulding, in Verbindung mit einem spring-in-kompensierten Formwerkzeug über die gesamte Prozesskette von der Komponentenfertigung bis zur Montage am Beispiel einer Wingbox demonstriert. Zum Einsatz kommen dabei am Institut erarbeitete Methoden, die fortwährend weiterentwickelt werden, als auch kommerzielle Software (z. B. Umberto®). Ein entscheidender Faktor und eine wesentliche Kompetenz des Instituts ist dabei die genaue Kenntnis, welche Daten relevant sind und wie diese Daten erhoben werden können.

Vorbereitung eines Prüfkörpers im statischen Prüflabor des Instituts  
*Preparation of a test specimen in the static test lab of the institute*



## Bewertungsfähigkeit im Zeitalter der Digitalisierung

Speziell die Datenerhebung wird in Zukunft eine besondere Rolle spielen. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette statten wir Produkte, Prüf- und Produktionsanlagen mit neuen Sensoren aus, die eine Vielzahl von Informationen erfassen. Der Umfang und die Geschwindigkeit, mit der neue Daten entstehen, steigen damit drastisch an. Wie können diese Datenmengen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauteils automatisiert erfasst, zusammengeführt und ausgewertet werden? Das Potenzial, das sich aus diesen Daten ergibt, ist enorm: Werden bestimmte Charakteristika eines Halbzeugs beispielsweise mit Verarbeitungseigenschaften in Verbindung gebracht, können Zusammenhänge erkannt werden, die sonst verborgen geblieben wären. Diese Kenntnis kann direkt zu Produktverbesserungen führen, sie kann helfen, den Produktionsprozess zu optimieren oder sogar dafür sorgen, neue Technologien schneller zu zertifizieren. Für die Bewertungsfähigkeit auf dem Gebiet des Multimaterialeichtbaus ergibt sich ein völlig neues Tätigkeitsfeld.

Koordinator:  
Dr.-Ing. Peter Wierach



# AddCompS™ – Additive Composite Structures

*The merging of composite production and 3D printing*

**Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen, die neben der Luft- und Raumfahrt auch im Automobilbau und der Windenergiebranche sehr gefragt sind, werden immer komplexer und individueller. Die rasante Entwicklung des 3D-Drucks ermöglicht gerade in Kombination mit Faserverbunden immer anspruchsvollere Leichtbauteile mit problemangepassten Eigenschaften. Unter dem Begriff AddCompS™ (Additive Composite Structures) erforscht das Institut, wie sich 3D-Druckverfahren in bereits bestehende Produktionstechnologien integrieren lassen. Bisher nicht effizient herstellbare multimaterielle und mehrskalige Werkstoffe sowie Strukturen und Systeme mit integrierten Funktionen sollen somit in naher Zukunft leichter und kostengünstiger realisierbar sein.**

## Summary

*3D printing capabilities have been improving significantly over the last decade. There is great potential for achieving lightweight structures, in particular due to the possibility to print complex geometries. By focusing its research strategically on AddCompS™ (Additive Composite Structures), the institute addresses the combination of composite production and 3D printing. This requires a new integral approach involving material characteristics, design, optimisation, manufacturing, production, and certification – utilising the best of both techniques. This will create new opportunities for material combinations as well as functional integration, which may open up new design spaces for complex applications such as structural health monitoring (SHM) systems, acoustically optimised structures, light-weight compatible crash absorbers, integrated antennas, stealth structures, and morphing structures.*

*Opened in 2017, the 3D-printing lab has already created new structures such as carbon fibre reinforced ribs and a new generation of pressurised morphing structures.*

## 3D-Druck in der Produktionstechnik

Die Produktionstechnik heutiger Faserverbundbauteile mittels Faserablegeköpfen verschmilzt zukünftig mit den neuen Möglichkeiten des 3D-Drucks. Dadurch wird die zeit- und kosteneffiziente Herstellung multimaterieller und mehrskaliger funktionsintegrierter Leichtbaukomponenten inhärenter Bestandteil des Produktionsprozesses. Dies erfordert eine neue, ganzheitliche Methodik mit innovativen Ansätzen für Material, Entwurf, Auslegung, Optimierung, Fertigung, Produktion bis hin zur Zertifizierung, welche die beste Kombination aus verschiedenen Fertigungsverfahren in jeder Phase berücksichtigt. Dadurch können Werkstoffe, Strukturen und Systeme wie integrierte SHM-Systeme, leichte und akustisch optimierte Strukturen, leichtbaugerechte Crash-Systeme, integrierte Antennen, integrierte Beleuchtung, Stealthstrukturen, formvariable Strukturen (Morphing) oder Gradientenwerkstoffe realisiert werden, die bisher im Hinblick auf Kosten, Gewicht und Komplexität nicht umsetzbar sind.

Gedruckte luftdruckaktivierte formvariable Flügelhinterkante

*Printed morphing trailing edge driven by pressurised cells*



## Neues 3D-Druck-Labor

Im 2017 eigens eingerichteten 3D-Druck-Labor wurden bereits erste Bauteile entworfen und produziert. Darunter sind u. a. Flügelrippen für ein Solar-Hale-Flugzeug, eine fliegende Plattform, die aufgrund ihres geringen Gewichts allein durch Sonnenenergie aus Solarzellen in der Luft gehalten werden kann. Die Rippen werden direkt durch eine Kombination von Kohlenstofffasern und einem thermoplastischen Kunststoff gedruckt. Nach konventioneller Bauart würden die Rippen ausgefräst. Der 3D-Druck ermöglicht hingegen eine kraftflussgerechte Verwendung der Fasern, wodurch stabile Strukturen mit weniger Fasern und Kunststoff realisiert werden.

Ein weiterer Anwendungsfall sind formveränderliche Strukturen, die zukünftig im Bereich der Steuer- und Landeklappen von Flugzeugtragflächen eingesetzt werden können, um Kraftstoffeinsparungen zu erzielen. Mit der Kombination von festen und flexiblen Materialien ist mittlerweile der 3D-Druck formvariabler Flügelkanten möglich, die über elastische, luftdruckgesteuerte Zellen verfügen. Diese Technologie eröffnet ganz neue Möglichkeiten, um Strukturen effizient herzustellen, die ihre Gestalt an variable Anforderungen anpassen können.

CFK-verstärkte Rippen aus dem 3D-Drucker

*CFRP ribs made by 3D printing*



Koordinatoren:

Prof. Dr.-Ing. Hans Peter Monner  
Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider



# Ganzheitliche Strukturbewertung beim Flugzeuggesamtentwurf

*Holistic structural assessment in multi-disciplinary aircraft design*

**Der Aufbau aller Fähigkeiten zur ganzheitlichen Entwicklung und Bewertung des Gesamtflugzeugs anhand des virtuellen Produkts ist ein strategisches Ziel des DLR. Dies bedarf der vertikalen Integration der verschiedenen Disziplinen wie Flugphysik, Struktur, Antriebe oder Systeme sowie der horizontalen Integration verschiedener Themenfelder zur Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus einschließlich Produktion, Wartung, Reparatur und Betrieb. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik stellt daher seine Kernkompetenzen in Form von Methoden und Werkzeugen zur Strukturentwicklung und -bewertung im Rahmen der multidisziplinären Optimierung des Gesamtflugzeugs bereit. Damit wird eine frühzeitige und effiziente strukturelle Bewertung und Optimierung auch unter Berücksichtigung entscheidender Kriterien der Statik, Schadenstoleranz, Fertigkeit, Formtoleranz, System- und Funktionsintegration sowie Wartbarkeit ermöglicht.**

## Summary

*The ability to develop and evaluate the entire aircraft on the basis of the virtual product is a strategic goal of DLR. This requires the vertical integration of the different disciplines, such as flight physics, structure, propulsion or systems, as well as the horizontal integration of different aspects of the entire life cycle, including production, maintenance, repair and operation. The Institute of Composite Structures and Adaptive Systems therefore provides its expertise in the form of methods and tools for the structural development and evaluation within multidisciplinary optimisation of the entire aircraft. This enables an early and efficient structural analysis and optimisation, also taking into account decisive criteria of statics, damage tolerance, manufacturability, shape tolerance, system and function integration as well as maintainability.*

## Effiziente Methoden und Werkzeuge

Die zuverlässige Bewertung von Flugzeugstrukturen hinsichtlich Masse, Treibstoffbedarf oder Kosten bedarf validierter Prozesse und Methoden in allen Phasen des Entwurfs. Für die Bewertung konventioneller Flugzeugkonzepte existieren bereits robuste, effiziente Methoden mit einem hohen Reifegrad. Für die Entwicklung unkonventioneller Konzepte und Bauweisen außerhalb des bekannten Entwurfsraums ist die Gültigkeit dieser Methoden jedoch nicht abgesichert. Zudem werden in aktuellen Prozessen Randbedingungen der Produktion und Kosten nicht explizit berücksichtigt.

Für die ganzheitliche Strukturbewertung werden daher neue Kriterien, Methoden und Werkzeuge entwickelt und in den multidisziplinären Flugzeugentwurf integriert. Die besonderen Herausforderungen liegen dabei in den hohen Effizienz- und Genauigkeitsanforderungen bei gleichzeitiger Allgemeingültigkeit der Methoden für die Bewertung im erweiterten Entwurfsraum.

Zur genauen phänomenologischen Beschreibung des Strukturverhaltens werden höherwertigere Modelle, Verfahren, Methoden und Versagenskriterien entwickelt und angewendet. Diese ermöglichen die Identifikation von Strukturreserven und sichern die Bewertung neuer Bauweisen oder Materialien ab. Zur Erhöhung der Recheneffizienz werden Technologien zur Kopplung der genaueren numerischen mit schnellen semi-analytischen Verfahren sowie Ersatzmodellen weiterentwickelt. Insbesondere der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen stellt aufgrund der hohen Anzahl von freien Parametern sowie der hohen Sensitivitäten in Abhängigkeit von den gewählten Fertigungsverfahren eine weitere Herausforderung für die zuverlässige und weniger konservative Strukturbewertung dar. Hierfür wird ein effizienter Multi-Level-Optimierungsprozess von der Gesamtflugzeugebene bis hin zu lokalen Strukturdetails entwickelt und neue, effiziente Dimensionierungs- und Optimierungskriterien sowie neue Verfahren zur Berücksichtigung von Fertigungsrandbedingungen integriert.

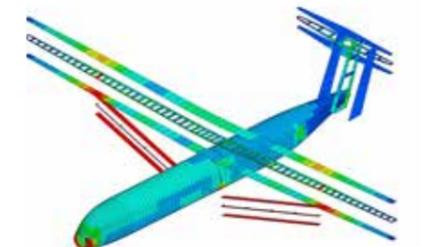
## Auslegung und Strukturbewertung mittels neuer Methoden

Zur Quantifizierung von Unsicherheiten bei der Analyse unkonventioneller Konzepte wurden z. B. im DLR-Projekt FrEACs spezifische Erweiterungen zur Modellbildung und Analyse einer Strut-Braced-Wing-Konfiguration für den parametrischen Flugzeugentwurf implementiert. Daraufhin konnten Sensitivitäten der Analysemethoden und Auslegungskriterien sowie Unsicherheiten der Materialkennwerte und Lasten quantifiziert werden. Dies ermöglicht die robuste, vergleichende Bewertung unterschiedlicher Flugzeugkonfigurationen hinsichtlich Masse und Treibstoff auch für neuartige Konfigurationen.

Im LuFo-Projekt ATLAS2Hybrid wird beispielsweise die Bauweise eines Tragflügels optimiert. Hierbei werden detaillierte FE-Modelle in die Optimierung eingebunden, um Sensitivitäten lokaler Strukturdetails, z. B. variabler Stringer-Geometrie oder Verbindungen, zu ermitteln und zu berücksichtigen. Auf lokaler Ebene erfolgt ebenfalls die Berücksichtigung von Produktionsrandbedingungen, welche im DLR-Projekt ATLAS auf Gesamtflugzeugebene angewendet wird.

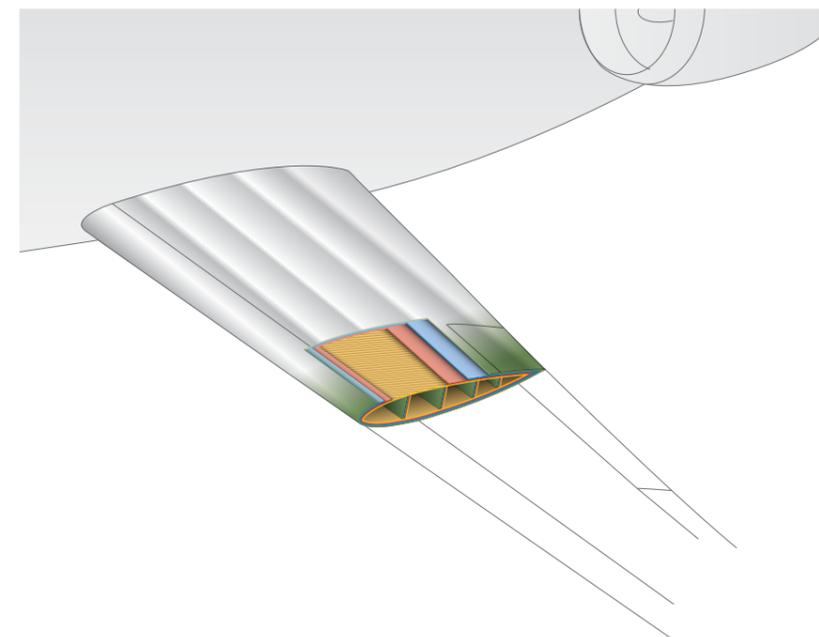
Ergebnis einer Strukturdimensionierung für eine Strut-Braced-Wing-Konfiguration

*Result of structural sizing for Strut-Braced-Wing configuration*



Struktur- und Laminatoptimierung am Tragflügel

*Structural- and laminate optimization of aircraft wings*



Koordinator:  
Dr.-Ing. Tobias Wille



# Zukunftsfabrik 2030 für den Multimaterialeichtbau

*Future Factory 2030 for multi-material lightweight structures*

**Die Entwicklung neuartiger Fertigungstechnologien und Anlagenkonzepte für die Produktion von morgen für Multimaterial-Leichtbauanwendungen gehört zu den Kernarbeitsgebieten des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik. Mit dem Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie in Stade wurde 2010 der Grundstein für eine Forschungsplattform der Zukunftsfabrik 2030 für den Multimaterial-Leichtbau gelegt. In der Zukunftsfabrik 2030 sind Maschinen und Anlagenkomponenten miteinander vernetzt, arbeiten autark agierende mobile Robotereinheiten, entscheidet künstliche Intelligenz über Fertigungsabfolgen und werden Bauteilfehler im Fertigungsprozess bewertet und erforderlichenfalls automatisch behoben. Das Forschungsfeld „Zukunftsfabrik 2030“ ist eine konsequente Umsetzung der DLR-Strategie 2030 und unterstützt das DLR-Querschnittsprojekt „Factory of the Future“.**

## Summary

The development of manufacturing technologies and facility concepts for the production of the tomorrow of multi-material lightweight structures is one of the core fields of research of Institute of Composite Structures and Adaptive Systems. With its Center for Lightweight Production Technology, a cornerstone has been set in 2010 for a research platform of the Future Factory 2030 for multi-material lightweight structures. In the Future Factory 2030, machines and facility components linked to each other, autarkic mobile robot units are operating, artificial intelligence is deciding on production sequences, and product faults are assessed within the production process and will be repaired automatically, if necessary. The research field "Future Factory 2030" represents a consequent conversion of the DLR strategy 2030 and supports the cross-linked DLR project "Factory of the Future".

## Digitalisierung als erster Schritt

Einen ersten Schritt in Richtung einer vom Industrie-4.0-Gedanken geprägten Fertigung stellt die Entwicklung von Methoden und Lösungen zur automatisierten, digitalen Erfassung, Speicherung und Auswertung von bisher überwiegend manuell verarbeiteten Mess- und Prozessdaten vor. Zusammen mit Industriepartnern werden Lösungen zum Umgang mit großen Datenmengen und zu deren gezielter Auswertung entwickelt. Zukünftige Forschungsziele umfassen selbstlernende Software-Werkzeuge (u. a. „Deep Learning“), automatisch generierte Life-Data-Sheets -sozusagen der Standpunkt jedes digitalen

Automatisierte Bahnplanung mit Hilfe intelligenter Software-Algorithmen zur Koordinierung des Bewegungsablaufs mehrerer mobiler Robotereinheiten

*Automated path planning using intelligent software-algorithms for the coordinated operation of several mobile robot units*



Zwillings- für den Bereich Produktion sowie die Prozesssteuerung unter Verwendung von live ermittelten und ausgewerteten Messdaten. Eine erste erfolgreiche Umsetzung stellt der virtuelle Autoklav dar, mit dessen Hilfe Erkenntnisse aus einer zukunftsgerichteten Simulation unter Verwendung von Echtzeitdaten aus dem Prozess generiert werden können. Diese werden zur Steuerung des realen Autoklavprozesses herangezogen.

## Kommunizierende Maschinen

Ein weiteres Forschungsfeld stellt die Entwicklung von Anlagenintelligenz dar. Diese setzt die Möglichkeit der Kommunikation zwischen Anlagenteilen und Maschinenkomponenten voraus. Ein Umsetzungsbeispiel ist der Austausch relevanter Daten zur Taktung der Prozessschritte in der automatisierten Preformproduktion. Ebenso werden Ansätze verfolgt, die ein effizientes und kollisionsfreies Arbeiten mehrerer mobiler Robotereinheiten durch Einsatz einer intelligenten Ablaufplanung ermöglichen. Darüber hinaus wird an der Entwicklung neuartiger Designmethoden und -tools gearbeitet, bei denen Fertigungsrandbedingungen im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Bauteilperformance bereits im Designprozess Berücksichtigung finden (Design for Production).

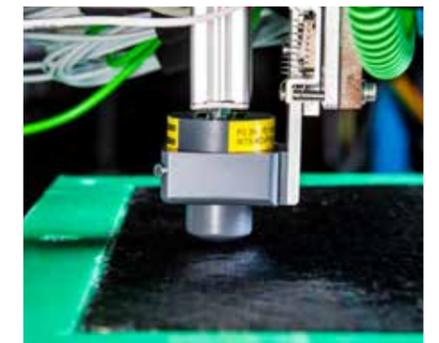
Forschungsplattform für die automatisierte Mehrkopf-Faserablage mit koordiniert arbeitenden mobilen Robotereinheiten

*Research platform for the automated multi-head fibre layup using coordinated mobile robot units*



Online-Messung der Faserorientierung in mehrlagigen textilen Preforms mittels Wirbelstromsensoren

*Online measurement of the fibre orientation in multiply textile preforms using eddy-current sensor technology*



Koordinator:  
Dr.-Ing. Jan Stüve



Additiv gefertigtes diamantisches Gitter

*Additively manufactured diamond lattice*

## Von Nano über Mikro zu Makro

Mehrphasenwerkstoffe erfordern das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Werkstoffphasen. Das schließt die Wirkung nanoskaliger Additive in Harzen ebenso ein wie die Wirkung von Fertigungsdefekten wie z. B. Poren auf das Tragverhalten.

### **Nano – micro – macro**

*Multi-phase materials like composites require the comprehensive understanding of the components' interaction on a nano, micro, and macro scale. This includes the effect of nano-scaled additives on the resin as well as the effect of manufacturing defects like pores on the mechanical properties of the structure. Moreover, carbon nanotubes exhibit a significant actuation effect in an electrolytic environment. Understanding the path from nano to macro means thorough research by our scientists looking for new technical applications.*

Wärmeleitfähigkeit schnell, einfach und effizient bestimmt <i>New method for the determination of thermal conductivity</i>	20
Partikelverstärkt ins All – Thermalmanagement von Satelliten <i>Particle-reinforced fibre composites for satellites</i>	22
Schädigung verstehen – peridynamische Modellierung von Rissen <i>Comprehension of damages – peridynamic modelling of cracks</i>	24
Thin Ply – Forschung an ultra-dünnem Carbon-Prepreg <i>Thin ply – research on ultra-thin carbon prepreg</i>	26
Blitzschutz mit multifunktionalen CFK-Werkstoffen <i>Lightning strike protection with multifunctional CFRP materials</i>	28

# Wärmeleitfähigkeit schnell, einfach und effizient bestimmt

*New method for the determination of thermal conductivity*

**Das DLR entwickelt ein neues, einfaches, günstiges und genaues Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für die Kunststoffindustrie. Der große Vorteil des Verfahrens liegt bei kleineren Probengrößen, wodurch es sich von herkömmlich eingesetzten Verfahren abhebt. Nutznießer des neuen Verfahrens ist der Forschungsbereich, bei dem sehr teure Werkstoffe und deren Modifikationen zur Anwendung kommen. Die Wärmeleitfähigkeit dient als wichtige Materialkenngröße bei der Konstruktion und Auslegung von Strukturen zur Vorhersage des Thermalverhaltens. Der Kennwert beschreibt die Fähigkeit eines Materials, thermische Energie in Form von Wärme zu leiten und kann daher bei korrekter Auslegung dazu beitragen, auftretende Wärmespitzen abzuleiten und somit elektronische oder mechanische Komponenten vor Überhitzung zu schützen.**

## Summary

*The DLR develops a new process to determine thermal conductivity that provides exact material characteristics for the plastics industry without further investigation. Compared to conventional methods, the main advantage is the smaller sample size. The new method is a benefit to the research field that uses mostly expensive materials and their modifications.*

*The material parameter of thermal conductivity is required for the construction and design of structures to predict the thermal behaviour. It describes the ability of a material to conduct thermal energy. This material information enables detecting heat peaks and thus to protect electronical or mechanical components against overheating.*

Ein Blick in die Messzelle zeigt die geänderte Probenanordnung. Unter dem Aluminiumtiegel mit der Schmelzsubstanz liegt die Wärmeleitfähigkeitsprobe direkt auf dem Sensor

*A view into the measuring cell shows the modified sample arrangement. Under the aluminium crucible with the smelting substance lies the thermal conductivity probe directly on the sensor*

## Wärmeleitfähigkeitsmessung für Faserverbunde

Der Markt bietet eine Reihe verschiedener Gerätetypen zur Messung der Wärmeleitfähigkeit. Allen gemein ist das Anlegen eines Temperaturgefälles an die Probe. Je nach verwendetem System generieren elektrische Energie, beheizte Metalplatten oder Laserimpulse die Wärme. Leider ist die Anschaffung der Geräte für diese Standardverfahren für die ausschließliche Ermittlung nur eines Kennwerts verhältnismäßig teuer und die Kennwertermittlung setzt große Probengrößen voraus. Manche Verfahren erlauben lediglich die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit. Weitere Analysegeräte sind dann für die Bestimmung der Werkstoffdichte und der spezifischen Wärmekapazität notwendig. Allein die hohen Kosten machen die Kennwertermittlung mit Standardverfahren unrentabel.



Hochentwickelte Sensortechnik ermöglicht die Messung kleiner Proben mit hoher Genauigkeit

*Highly developed sensor technology enables measurement of small samples with high accuracy*

## Das neue Verfahren im Detail

Das allgemeine Messprinzip einer dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) beruht auf der Messung sich verändernder Wärmeströme, die bei gleichem Temperaturprogramm zwischen einem leeren Referenztiegel und einem Tiegel mit Probenmaterial auftreten. Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird die zylindrische Probe per Hand direkt auf den Sensor gelegt und darauf der Tiegel mit einer schmelzenden Substanz. Der Schmelzpunkt dieser Substanz bestimmt die Temperatur, bei der die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit der Probe mit diesem Verfahren möglich ist.

Im Vergleich mit etablierten Messverfahren zur Wärmeleitfähigkeitsbestimmung ergeben sich für die neue Messmethode gute Korrelationen. Die Methode ist bislang für verschiedene Thermoplaste und duroplastische Systeme geeignet, die auch unterschiedliche Füllstoffgehalte von Nanopartikelmodifikationen enthalten. In einem DIN-Ausschuss stößt das Verfahren auf großes Interesse und ein Rundversuch soll die Eignung verschiedener DSC-Typen darstellen. Das Ziel ist eine Normung mit festen Standards, welche die Methode einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung stellen.

Autorin:

Dipl.-Ing. Monika von Monkiewitsch



# Partikelverstärkt ins All – Thermalmanagement von Satelliten

Particle-reinforced fibre composites for satellites

Satellitenstrukturen sind im Weltraum extremen thermischen Bedingungen ausgesetzt. Einseitige Sonnenbestrahlung und fehlende Konvektion erfordern ein komplexes Thermalmanagement, welches das Gewicht des Satelliten durch zusätzliche Bauteile erhöht. Um diese Lasten zu reduzieren, ist es erstrebenswert, Wärmeströme über die tragende Faserverbundstruktur zu leiten. Für eine effektive Auslegung ist es jedoch notwendig, die Wärmeleitfähigkeit des Verbundes gezielt zu erhöhen. Eine Möglichkeit hierzu bietet die Einbringung von Partikeln in die Faserverbundmaterialien. In Abhängigkeit von den eingebrachten Partikelgrößen, Gehalten und Materialien lässt sich so die Wärmeleitfähigkeit des Verbundes signifikant steigern.

## Summary

Satellites are exposed to extreme thermal conditions in space. This makes an extensive thermal management necessary, which leads to a higher weight. Therefore, using the fibre composite structure for heat flow is desirable in the construction of satellites. Nevertheless, for effective thermal management the thermal conductivity of carbon fibre reinforced plastics must still be improved, especially as the thermal conductivity of carbon fibre is much higher than that of plastics, which leads to an anisotropic conductivity in and out-of plane. In this context, fibre composites can be reinforced with particles. Results conducted with a guarded heat flow meter, clearly show the ability to adjust the heat flow in plastics by additives. Thereby, the thermal conductivity of the composites can be tailored dependent on particle size, content, and material.

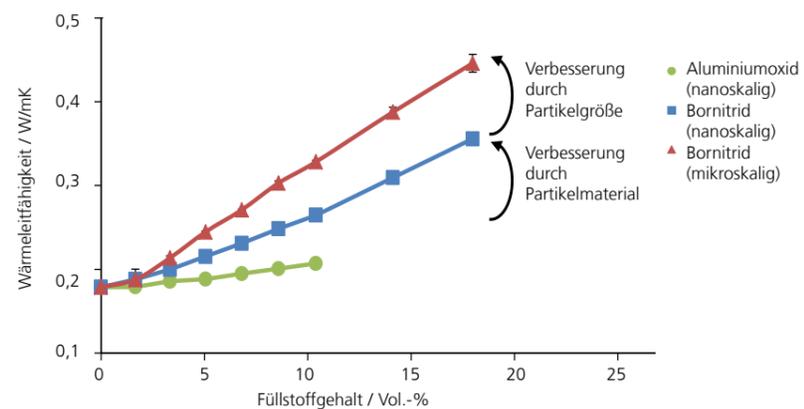
Wärmeleitfähigkeit eines Epoxidharzes in Abhängigkeit vom Partikelgehalt von nanoskaligem Aluminiumoxid, nanoskaligem Bornitrid und mikroskaligem Bornitrid

Thermal conductivity of an epoxy resin filled with different particle contents of nanoscaled aluminium oxide, nanoscaled boron nitride, and microscaled boron nitride

## Wärmeleitfähigkeit von Faserverbunden

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) weisen stark anisotrope Wärmeleitfähigkeiten auf. Dabei besitzen die Fasern eine gute Leitfähigkeit, während diese für den Kunststoff um drei Dekaden kleiner ausfällt. Somit ist auch im Faserverbund die Wärmeleitfähigkeit in Faserichtung deutlich größer als quer dazu. Für ein effektives Thermalmanagement von Satelliten und Landern (vgl. Lange, *Wenn Satelliten schwitzen – Kombiniertes Struktur- und Thermalentwurf*, Innovationsbericht 2017, S. 50) ist jedoch ein guter Wärmestrom in alle Raumrichtungen vonnöten.

Um unterschiedliche Materialmodifikationen für diesen Anwendungszweck zu erforschen, stehen im DLR, neben der neu entwickelten Methode im Differenzkalorimeter (vgl. Monkiewitsch, *Wärmeleitfähigkeit schnell, einfach und effizient bestimmt*, Innovationsbericht 2017, S. 20), auch ein kommerzielles Gerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit zur Verfügung. Dieses arbeitet nach dem Prinzip des geschützten Wärmestroms. Diese beiden Messtechniken können genutzt werden, um die Einflüsse von Materialmodifikationen zu analysieren.



## Partikelverstärkte Komposite

Ein besonderer Forschungsschwerpunkt liegt dabei auf partikelverstärkten Kunststoffen. Diese dienen als Matrix für die Faserverbunde und weisen unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit vom Partikelgehalt und der Leitfähigkeit des Partikelmaterials auf. Dabei gilt, dass die Wärmeleitfähigkeit mit dem Gehalt und in Abhängigkeit vom verwendeten Material steigt. In der Abbildung ist dieser Zusammenhang exemplarisch an Aluminiumoxid und Bornitrid aufgezeigt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen dabei die größeren Steigerungen der Wärmeleitfähigkeit durch die Einbringung von Bornitrid im Vergleich zu den Aluminiumoxidpartikeln, was den Eigenschaften der Partikelmaterialien entspricht. Darüber hinaus spielt jedoch auch die Partikelgröße eine entscheidende Rolle. Hierbei wirken sich Grenzflächen negativ aus, da in Kunststoffen die Wärmeleitung über Phononenschwingung erfolgt. Aus diesem Grund steigern mikroskalige Partikel die Wärmeleitfähigkeit des Komposites effektiver als nanoskalige Partikel. Insgesamt zeigen die Ergebnisse also nicht nur das Potenzial von partikelverstärkten Kompositen, die Wärmeleitfähigkeit von Faserverbunden zu verbessern, sondern auch eine Möglichkeit für das gezielte Thermalmanagement von Satellitenstrukturen.

Analysegerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Materialien nach dem Messprinzip des geschützten Wärmestroms

Guarded heat flow meter to analyse the thermal conductivity of materials



Autorin:  
Wibke Exner, M.Sc.



# Schädigung verstehen – peridynamische Modellierung von Rissen

Comprehension of damages – peridynamic modelling of cracks

**Am DLR ist eine genaue Vorhersage des Schädigungsverhaltens in Mikrostrukturen von Faserverbunden möglich. Hierzu haben wir eine peridynamische Simulationsumgebung entwickelt, um komplexe Schädigungsmuster zu analysieren und zu validieren. Gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern forschen wir an der Erweiterung der Methoden und ebnen so den Weg für ein tieferes Verständnis von Phänomenen beim Materialversagen und deren modellhafter Beschreibung. Erst dieses Verständnis erlaubt uns die Entwicklung verbesserter Versagenskriterien. So können wir genauere Vorhersagen im Gesamtentwurf von Leichtbaustrukturen treffen.**

## Summary

At DLR, accurate prediction of the damage behaviour in microstructures of fibre composites is possible. Material damage is a key aspect during the design and sizing of lightweight structures. For us, a profound understanding of the damage phenomena and mechanisms is required to develop improved failure criteria and finally create lighter and more robust fibre composite designs. For this purpose, we have developed a peridynamic simulation environment to analyse and validate complex damage patterns.

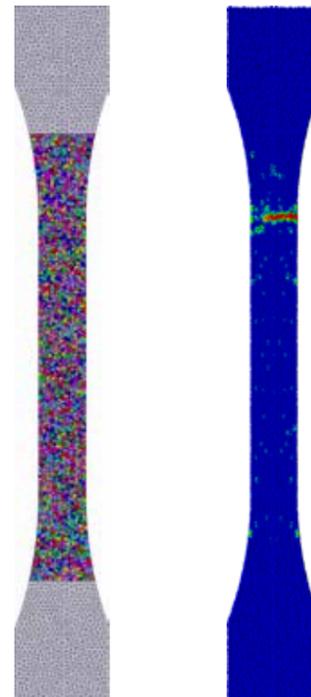
Our framework for peridynamic simulations includes a preprocessor utilising commercial finite element programmes. It allows us to use finite element models in arbitrary formats and analyse them using the peridynamic method. Together with partners from the Otto von Guericke University Magdeburg and the University of Washington, we work on further enhancements of the method.

Strukturtest an Reinharzproben und Abbildung in der peridynamischen Simulationsumgebung

Tests on bulk resin and simulation using the peridynamic framework

## Phänomene verstehen

Wir wollen Schädigungsmechanismen in Faserverbunden und Fügeverbindungen deutlich besser und effizienter als mit heutigen Methoden beschreiben und abbilden (vgl. Krause, *Mikromechanik des Ermüdungsverhaltens polymerer Verbundwerkstoffe*, Innovationsbericht 2015, S. 21). Dabei nutzen wir die Methode der Peridynamik. Die Peridynamik ist ein neuartiger Ansatz der Material- und Schadensmodellierung. Die Theorie ist eine nicht-lokale, integralbasierte Beschreibung des Materialverhaltens und kann direkt Schädigungen im Materialmodell berücksichtigen. Mit dieser Theorie ist es möglich, das Versagensverhalten von Leichtbaustrukturen hochgenau zu modellieren. Dieser Ansatz erlaubt es uns, genauer in das Innere von Faserverbunden zu blicken und die wirkenden Mechanismen bei deren Versagen zu verstehen.



## Potenziale offenbaren

Die am DLR entwickelte peridynamische Simulationsumgebung ermöglicht uns die gezielte Erweiterung der Methode. Zur Modellerstellung nutzen wir weit verbreitete kommerzielle Finite-Elemente-Programme. Wir sind in der Lage, deren Modelle automatisiert in eine peridynamische Beschreibung zu übersetzen. Die Einstiegshürde zur Nutzung der Umgebung ist daher gering.

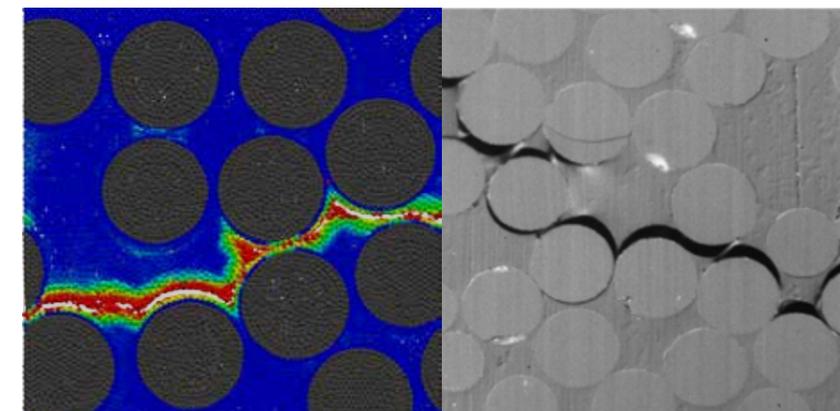
Aufgrund dieser Flexibilität können wir Strukturen von der Faser bis zur komplexen Leichtbaustruktur abbilden und unser Verständnis für Schädigungsphänomene erhöhen. Diese Erkenntnisse nutzen wir zur Entwicklung genauerer Versagenskriterien für den Gesamtentwurf von Leichtbaustrukturen (vgl. Wille, *Strukturmechanik*, Innovationsbericht 2017, S. 91). Exaktere Versagenskriterien versetzen uns zukünftig in die Lage, leichtere und robustere Faserverbundstrukturen zu entwickeln.

## Synergien nutzen

Mit Partnern von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der University of Washington in Seattle forschen wir gemeinsam an der Erweiterung der Methode. Aktueller Schwerpunkt ist die Entwicklung von neuen Material- und Schädigungsmodellen für faserverstärkte Kunststoffe. Wir wollen diese Technologie für die industrielle Anwendung ertüchtigen, um Unternehmen zukünftig eine genauere Bewertung ihrer Strukturen zu ermöglichen.

Schädigung in einem Faser-Matrix-Verbund unter Zugbelastung in vertikaler Richtung, modelliert mit der Peridynamik (links) und dargestellt im Schliiffbild (rechts)

Damage in a fibre-matrix composite under transverse tensile load modelled with peridynamics (left) and measured in experiments (right)



Autoren:  
Dr.-Ing. Christian Willberg  
Dipl.-Ing. Martin Rädels



# Thin Ply – Forschung an ultradünnem Carbon-Prepreg

*Thin ply – research on ultra-thin carbon prepreg*

**Thin Ply Prepreg bezeichnet eine neuartige Klasse von mit Harz vorimprägnierten Carbonfasern (Prepreg). Mit einer Dicke von nur 40 Mikrometern sind sie dreimal dünner als das bisher dünnste in der Luftfahrt eingesetzte Prepregsystem. In Materialtests auf Coupon-Level hat Thin Ply bereits vielfach bewiesen, dass es verbesserte Impact-Eigenschaften besitzt und das Wachstum von Rissen effektiv unterdrückt. Diese Eigenschaften machen das Materialsystem für Anwendungen im Flugzeug oder in der Raumfahrt höchst interessant. Derzeit läuft hierzu ein Kooperationsprojekt mit der japanischen Raumfahrtagentur JAXA und dem japanischen Forschungsinstitut ITCF.**

## Summary

*Thin ply prepregs are a new class of resin pre-impregnated carbon fibres (prepreg). They are much thinner than the thinnest material used in aerospace up to now. The currently used material has a thickness of 40 micrometres. This is just one third of the thinnest material in use, so called low grade with a thickness of 125 micrometres. In material tests on a coupon level, thin ply has often proven its improved impact properties and effective suppression of crack propagation. Because of these properties, the material gets interesting for applications in aerospace. At the moment a project for the research of the material is ongoing in cooperation with the Japan Aerospace Exploration Agency JAXA and the Japanese research institute ITCF.*

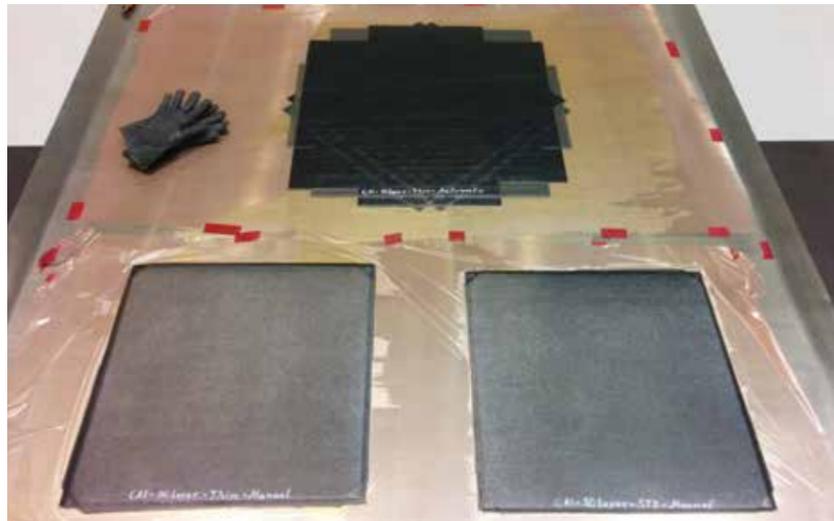
*One of the key enablers for processing thin ply prepreg is automation. Because of its thickness, triple the amount of layers is needed. Without using automated tape laying and automated fibre placement technologies, the effort would be too high. Therefore, the possibility to process thin ply with automated layup technologies is being examined.*

## Kooperative Forschung mit Japan

Im Rahmen der Kooperation mit den japanischen Partnern hat das DLR in Stade drei Platten mit je 450 x 450 Millimetern gefertigt. Dafür kommen zwei verschiedene Materialien zum Einsatz: Thin Ply mit einer Dicke von 40 Mikrometer und sogenanntes Standard Ply, „normal dünnes“ Prepreg-Material mit einer Dicke von 135 Mikrometern. Nachdem die manuelle Ablage der ersten zwei Platten erfolgt ist, stellt ein Roboter die dritte Platte mit einem Tapelege-Kopf auf der GroFi-Anlage her. Das DLR in Stade härtet die Platten nach der Ablage im Autoklaven aus und schickt sie für die weiteren Untersuchungen nach Japan. Dortige Ultraschalluntersuchungen zeigen für die manuell abgelegten Platten eine gute Qualität. Allerdings gibt es eine erhebliche Anzahl an Luftpneinschlüssen bei der automatisiert abgelegten Platte. Um diesem Problem zu begegnen, arbeiten die Mitarbeiter in Stade aktuell an einer neuen Ablagestrategie, die in Kürze neue, automatisierte Prepreg-Ablagen produziert.

Die Platten nach der Aushärtung

*The laminates after curing*

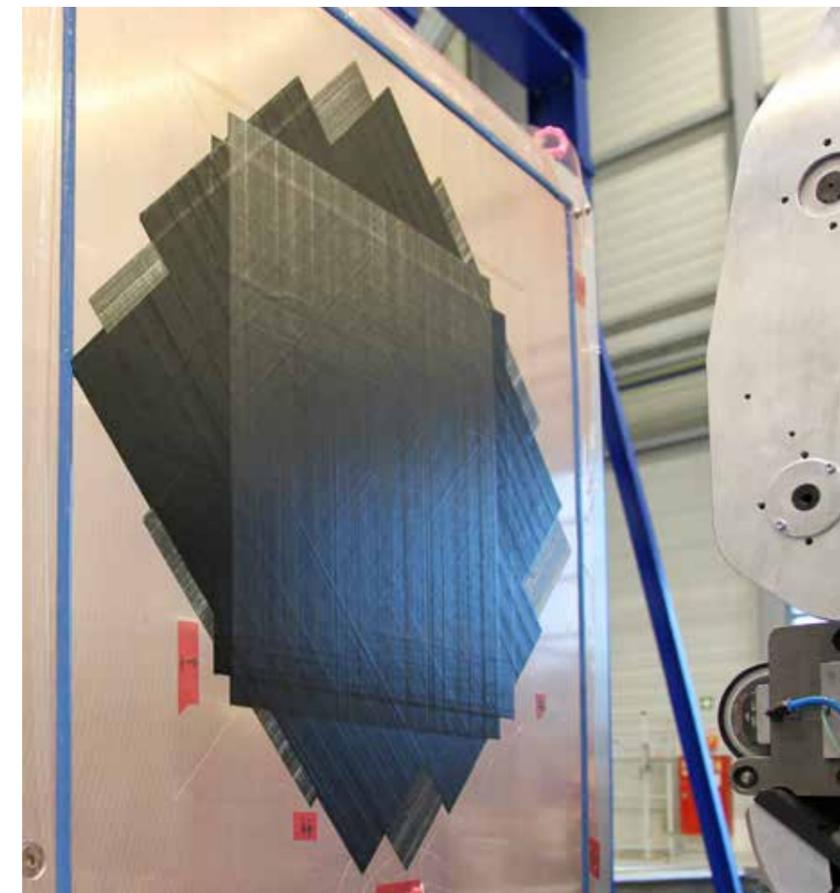


## Automatisierte Ablage

Für die effiziente Verarbeitung von Thin Ply Prepreg ist die Automation unerlässlich. Aufgrund der Dicke von nur einem Drittel der Dicke von Standard-Prepreg ist die dreifache Anzahl an Lagen erforderlich und der Legeaufwand bzw. die erforderliche Zeit steigen enorm an. Das DLR in Stade löst dies mit der roboterbasierten Ablage in der GroFi-Anlage. Dort stehen zwei Ablagetechnologien zur Auswahl: zum einen die Ablage von 6,35 Millimeter schmalen Tapes mittels Automated Fibre Placement (AFP)-Technologie und zum anderen die Ablage von 150 mm breiten Tapes mittels Automated Tape Placement (ATP)-Technologie. Das DLR hat alle bisherigen Platten mit den breiteren Tapes gefertigt. Doch einer der nächsten Schritte ist die Untersuchung der AFP-Technologie für die Thin-Ply-Ablage.

Automatisierte Faserablage

*Automated layup*



Autor:  
Dipl.-Ing. Christian Bülow



# Blitzschutz mit multifunktionalen CFK-Werkstoffen

*Lightning strike protection through multifunctional CFRP materials*

**Jedes Verkehrsflugzeug wird im Durchschnitt jährlich von ein bis zwei Blitzen getroffen. Flugzeugstrukturen aus Aluminium können die dabei auftretenden hohen Ströme ohne größere Beschädigungen ableiten. An ungeschützten CFK-Bauteilen können dagegen schwere Schäden entstehen. Daher wird in der Regel auf der Außenseite Metall als Blitzschutz aufgebracht. Durch silberbeschichtete Wirkfäden wird die Schadensresistenz von CFK gegenüber Blitzschlägen gesteigert, sodass ein leichter Blitzschutz ausreicht.**

## Summary

Silver-coated knitting yarns are used to improve the electrical conductivity of NCF-reinforced CFRP. The laminate's electrical conductivity in thickness direction increases by maximally two orders of magnitude up to 600 siemens per metre. The in-plane conductivity rises as well.

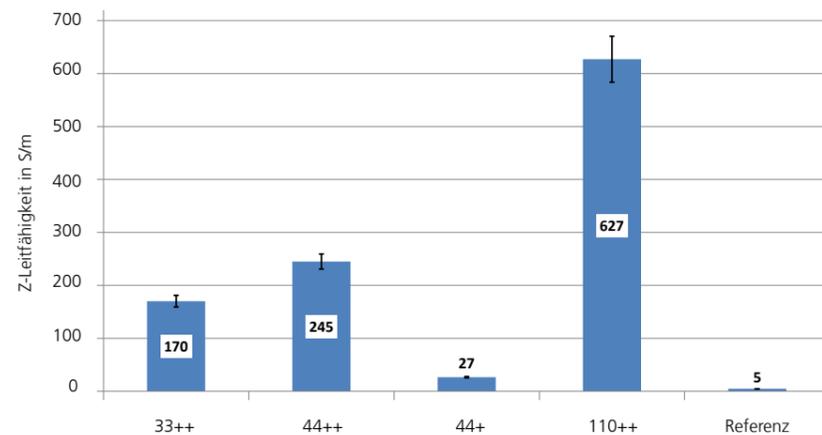
Lightning strike tests on unprotected laminates show a significantly improved lightning strike resistance. The damage at a depth of 1 millimetre is reduced by 90 per cent.

## NCF mit leitfähigen Wirkfäden

Der Grund für die höhere Anfälligkeit von CFK gegenüber Schäden durch Blitzschlag ist die im Vergleich mit Metall deutlich niedrigere elektrische Leitfähigkeit. Insbesondere in Dickenrichtung ist CFK nur schlecht leitfähig. Um die Leitfähigkeit von Faserverbundwerkstoffen zu erhöhen, wurden elektrisch leitfähige Wirkfäden in NCFs verwendet. NCFs (Non-Crimp-Fabrics, deutsch: Multiaxialgelege) sind Verstärkungstextilien, die aus übereinander abgelegten unidirektionalen Faserlagen bestehen. Diese werden durch einen Wirkfaden zusammengehalten. Für die Wirkfäden werden typischerweise thermoplastische Kunststoffe verwendet. Werden diese Fäden mit Silber beschichtet, steigt die Leitfähigkeit des Verbundwerkstoffs deutlich an, insbesondere in Dickenrichtung.

## Steigerung der Laminatleitfähigkeit

Nach vielversprechenden Vorversuchen an kleineren, vernähten Textilien wurde ein Versuchstextil mit verschiedenen silberbeschichteten Wirkfäden hergestellt. Die Leitfähigkeit der daraus hergestellten Laminats in Dickenrichtung steigt gegenüber dem Referenzmaterial je nach Dicke des Garns und aufgetragener Menge Silber um bis zu zwei Größenordnungen auf über 600 Siemens pro Meter. Auch die Leitfähigkeit in der Laminatenebene nimmt deutlich zu.



Laminatleitfähigkeit in Dickenrichtung von Laminaten mit silberbeschichteten Wirkfäden (Zahl: Titer in g/10000 m; +/++ Beschichtungsgrad)

Z-conductivity of laminates with silver-coated knitting yarns (number: yarn count in g/10000 m; +/++ degree of coating)

## Geringere Schäden bei Blitzschlag

Um CFK-Bauteile vor Blitzen zu schützen, wird heute meist Kupfer als sogenanntes ECF (Expanded Copper Foil) außen auf das Bauteil laminiert. Für ein Flugzeug, das wie der A350 zu wesentlichen Teilen aus CFK besteht, wiegt dieser Blitzschutz mehrere Hundert Kilogramm.

Eine im Labor durchgeführte Reihe von Blitzschlagversuchen zeigt, dass die Größe der Schäden durch die leitfähigen Wirkfäden reduziert wird. Dies betrifft insbesondere die tieferen Schichten des Laminats. Die zerstörte Fläche wurde anhand von Ultraschallbildern in verschiedenen Tiefen gemessen. Die Größe des Schadens in einer Tiefe von einem Millimeter sinkt beispielsweise um 90 Prozent. Die Versuche wurden an ungeschützten, relativ dünnen Laminaten durchgeführt. Daher sind auch die Schäden an den hoch leitfähigen Laminaten noch zu groß. Es ist allerdings denkbar, auf diesen hoch leitfähigen Laminaten einen leichteren Blitzschutz zu verwenden. Bei dickeren Laminaten ist die höhere Schadensresistenz eventuell bereits ausreichend, sodass auf zusätzlichen Blitzschutz verzichtet werden kann.

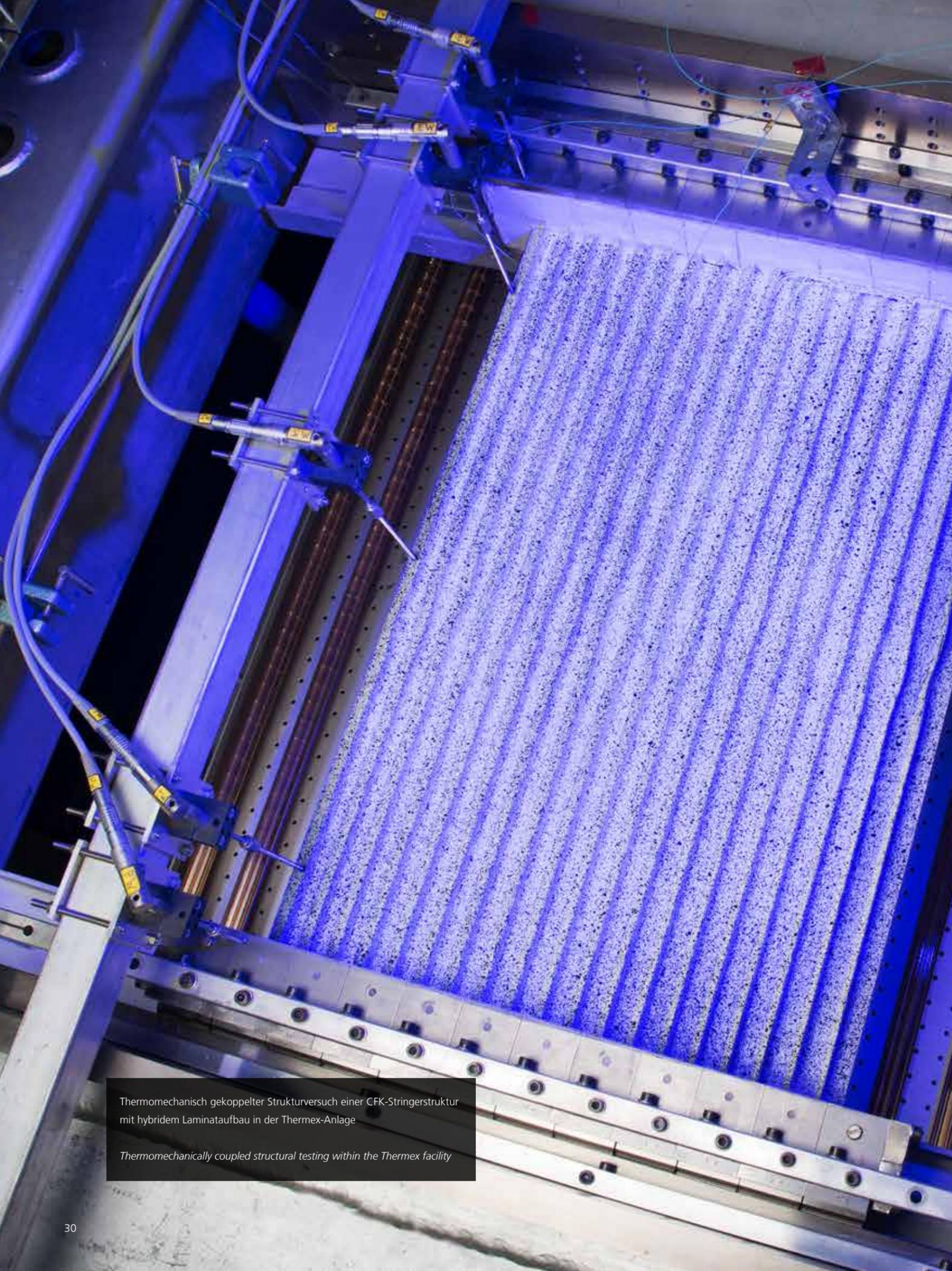


Lackierte Versuchsplatte nach Blitzschlagversuch

*Painted specimen after lightning strike test*

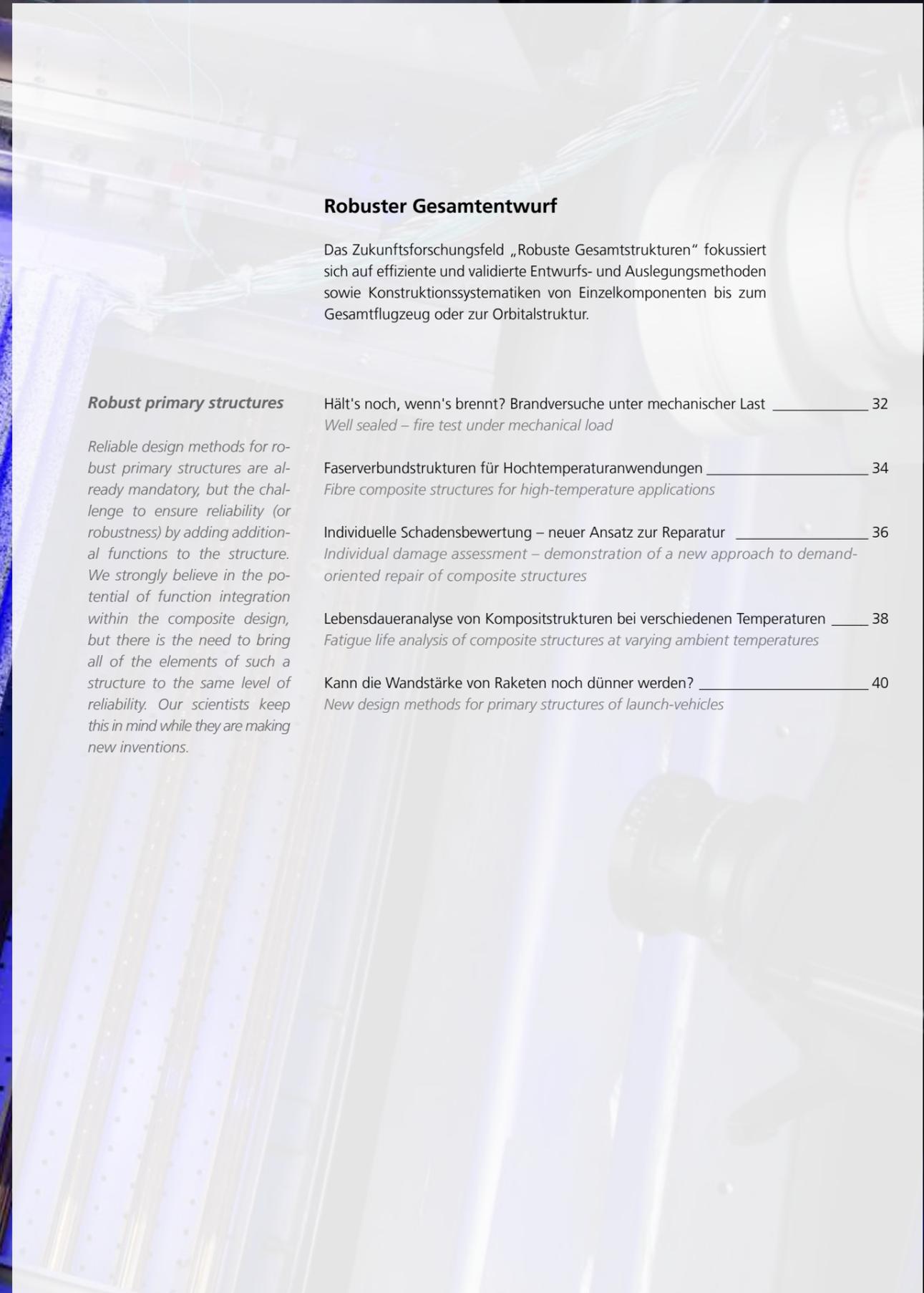
Autor:  
Dr.-Ing. Johannes Rehbein





Thermomechanisch gekoppelter Strukturversuch einer CFK-Stringerstruktur mit hybridem Laminataufbau in der Thermex-Anlage

*Thermomechanically coupled structural testing within the Thermex facility*



## Robuster Gesamtentwurf

Das Zukunftsforschungsfeld „Robuste Gesamtstrukturen“ fokussiert sich auf effiziente und validierte Entwurfs- und Auslegungsmethoden sowie Konstruktionssystematiken von Einzelkomponenten bis zum Gesamtflugzeug oder zur Orbitalstruktur.

### **Robust primary structures**

*Reliable design methods for robust primary structures are already mandatory, but the challenge to ensure reliability (or robustness) by adding additional functions to the structure. We strongly believe in the potential of function integration within the composite design, but there is the need to bring all of the elements of such a structure to the same level of reliability. Our scientists keep this in mind while they are making new inventions.*

Hält's noch, wenn's brennt? Brandversuche unter mechanischer Last \_\_\_\_\_ 32  
*Well sealed – fire test under mechanical load*

Faserverbundstrukturen für Hochtemperaturanwendungen \_\_\_\_\_ 34  
*Fibre composite structures for high-temperature applications*

Individuelle Schadensbewertung – neuer Ansatz zur Reparatur \_\_\_\_\_ 36  
*Individual damage assessment – demonstration of a new approach to demand-oriented repair of composite structures*

Lebensdaueranalyse von Kompositstrukturen bei verschiedenen Temperaturen \_\_\_\_\_ 38  
*Fatigue life analysis of composite structures at varying ambient temperatures*

Kann die Wandstärke von Raketen noch dünner werden? \_\_\_\_\_ 40  
*New design methods for primary structures of launch-vehicles*

# Hält's noch, wenn's brennt?

## Brandversuche unter mechanischer Last

*Well sealed – fire test under mechanical load*

**Sind Leichtbauwerkstoffe besser, wenn schwere Stahlbleche in den sonst so leichten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) liegen? Kommt auf die Anwendung an! Durch eine höhere Sicherheit und bessere mechanische Eigenschaften im Brandfall könnten sie Flugzeuge noch sicherer machen. Bereits ohne Stahllagen zeigen Ergebnisse aus dem Projekt CORINNA, dass Schutzschichten im Faserverbundwerkstoff die Brandresistenz erheblich steigern. Das Projekt Future Sky Safety will jetzt demonstrieren, wie Stahllagen die Mechanik und die Brandresistenz auf ein höheres Niveau heben.**

### Summary

*Will it surrender or will it withstand? This might be one of the most important questions when it comes to fire safety of structural components in aircraft. The good news: carbon fibre reinforced plastics (CFRP) can bear high temperatures as the fibres withstand temperatures of over 2000 degrees Celsius. However, the matrix decomposes around 300 degrees Celsius, which leads to toxic fumes and a possible kinking of the fibres. Fibre-metal laminates (FML) circumvent these downsides. The steel layers bear the loads up to their melting point of approx. 1400 degrees Celsius. They also form a barrier for the toxic gases that result from the decomposing matrix. These gases simultaneously form an insulating gas layer between the steel layers and protect the subjacent layers of the laminate. A new testing method was developed to compare the FML to its predecessors. The testing method simultaneously applies a mechanical load and a gas flame with a temperature of 1200 degrees Celsius. This results in realistic design values for the safe aircraft of the future.*

### CFK während eines Brandes

Das Beste vorweg: Stahl und Faserverbundwerkstoffe ergeben ein sicheres und leichtes Materialsystem, das spielend mit klassischen Werkstoffen wie Aluminium mithält. CFK hat viele Vorteile gegenüber klassischen Konstruktionswerkstoffen. Bei einem deutlich geringeren Gewicht zeigt es bessere mechanische Eigenschaften. Selbst im Extremfall eines Brandes überstehen die Kohlenstofffasern 2000 °C. Zum Vergleich: Aluminium schmilzt bei gut 600 °C, Edelstahl erst bei 1400 °C. Leider zersetzt sich die Matrix des CFK bereits unterhalb von 300 °C und gibt dabei giftige Gase ab. Somit bleiben vom ansonsten hervorragenden CFK im Brandfall nur eine Rauchgaswolke und lose Fasern, die unter Druckbeanspruchung sofort ausknicken.

Probe während des Versuchs: Der Gasbrenner beflammt die Probe mit 1200 °C, gleichzeitig wird die Probe in vertikaler Richtung durch die Hydraulikpresse zusammengedrückt. Im unteren Bild sind bereits die Kohlenstofffasern aufgrund der Zersetzung der Matrix zu erkennen.

*Specimen while testing: Gas burner heats the specimen up to 1200 °C. Simultaneously vertical compression is applied through the hydraulic press. The lower picture shows the decomposition of the matrix.*



### CFK mit integrierten Stahllagen

Genau diese Nachteile können Stahllagen im CFK beheben. Einerseits tragen die Stahllagen immer noch, wenn die Matrix bereits zersetzt ist und andererseits schützen die Stahllagen die tiefer liegenden Schichten im CFK. Dabei entstehen zwischen den Stahllagen wärmedämmende Gasblasen. Die Natur macht es vor, denn in einem wärmenden Federkleid befinden sich viele kleine Luftpolster zur Isolation. Zusätzlich verhindern die Stahllagen, dass giftige Gase in das Flugzeug gelangen. Es entsteht also ein multifunktionales Faser-Metall-Laminat (FML), das zeitgleich brandgassperrend und während des Brandes mechanisch stabiler ist als klassisches CFK oder Aluminium.

Faser-Metall-Laminare (FML) mit unterschiedlicher Anzahl, Dicke und Verteilung der Stahllagen

*Fibre-metal-laminate (FML) with varying number, thickness and distribution of steel layers*



### Test unter Brand und mechanischer Last

Neue Materialsysteme erfordern zugleich neue Testverfahren. Bisher erfolgt die experimentelle Bestimmung der mechanischen Eigenschaften, der Giftigkeit der austretenden Gase und der Brandresistenz von FML separat. Doch was sagt das aus? Im Realfall soll der Flugzeugrumpf auch bei sehr hohen Temperaturen stabil bleiben, nur schlecht brennen und die Passagiere vor giftigen Gasen schützen. Ein zuverlässiges Testverfahren bildet daher beides ab: Brand und mechanische Belastung zugleich. Dabei übernimmt eine spezielle Presse die Mechanik. Für den Brand sorgt ein Gasbrenner mit einer 1200 °C heißen Flamme. Der Versuch beantwortet die Frage, wie lange das FML der Flamme standhält, bevor es unter der Last nachgibt.

Brandprobe nach dem Versuch: Mechanisches Versagen der Probe nach der Zersetzung der Matrix.

*Specimen after testing: Mechanical collapse of specimen after progressed matrix decomposition*



Diese Messungen zeigen den Ingenieuren, wo und wie mit schwerem Stahl in leichtem CFK aus dem Flugzeug von heute ein noch sichereres Flugzeug von morgen wird.



Autoren:  
Dr.-Ing. Paul Lorsch  
Imke Roese-Koerner, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Martin Liebisch



# Faserverbundstrukturen für Hochtemperaturanwendungen

*Fibre composite structures for high-temperature applications*

Die geschickte Kombination von Hochtemperaturharzen, hoch wärmeleitfähigen Fasern und innovativen Strukturkonzepten ermöglicht den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen bei bis zu 200 °C. Dies führt zu Gewichtsreduktionen im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen und erschließt neue Anwendungen. Das Institut hat diese Werkstoffklasse im Rahmen des LuFo-geförderten Projekts THERMOSTRUKT untersucht und für den potenziellen Einsatz in einem Hubschrauberheckausleger im Einflussbereich des Abgasstrahls analysiert. Dies beinhaltet Lösungen für zugehörige Fertigungsprozesse, Materialtests anhand von Couponproben und experimentell validierte Strukturkonzepte.

## Summary

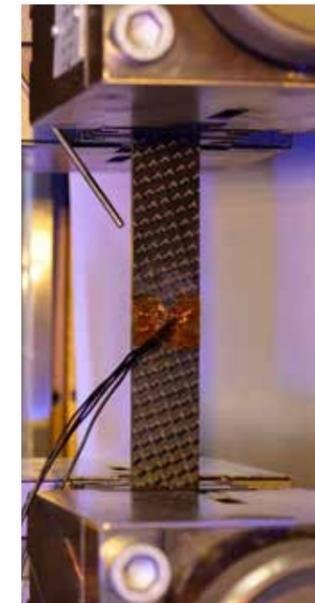
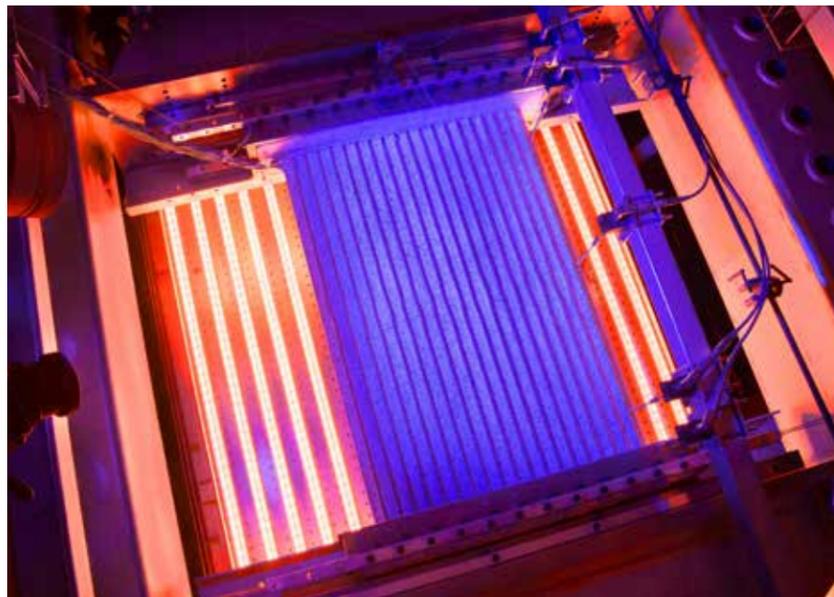
*The clever combination of high-temperature resins, highly heat-conducting fibres and innovative construction concepts allows fibre composite materials to withstand operating temperatures of up to 200 degrees Celsius. This is a decisive factor in the application range of light-weight structures. The institute has successfully tested this material class within the scope of the LuFo-funded project THERMOSTRUKT. The object of investigation was the helicopter tail boom in the area of influence of the exhaust gas stream. In tailor-made production processes, coupon samples as well as complex structural components can be created for the high-temperature application range.*

## Heiße CFK-Verbundwerkstoffe

Die Fertigung hochtemperaturbeständiger Faserverbundbauteile erfordert eine sorgfältige Abstimmung von Faserhalbzeug, Schlichte und duromerer Harzmatrix. Systematische Reihenuntersuchungen geben Aufschluss über die optimale Materialpaarung in Bezug auf die Werkstoffkennwerte und Verfahrensparameter. Die Auswahl basiert auf der thermischen, rheologischen und mechanischen Charakterisierung verschiedener Harzklassen (Epoxidharze, Cyanatester, Benzoxazine und Turane) mittels DSC, Rheologie und DMTA. Bei Anwendungstemperaturen von 200 °C eignen sich Harze auf Basis von Benzoxazin und Cyanatester besonders gut, da deren Verarbeitung im verfahrenstechnisch einfachen zweistufigen Herstellungsprozess möglich ist. Die Vorvernetzung der Faserverbunde mittels RTM-Technologie findet

Strukturversuch unter axialer Druckbelastung bei simultaner Thermallast durch Infrarotstrahlung

*Structural compression test with simultaneous heat loading through infrared radiation*



Materialcharakterisierung bei hohen Temperaturen: Zugversuch in der Temperierkammer

*Material characterisation at high temperatures: Tension test within temperature chamber*

im Werkzeug und die Nachvernetzung anschließend außerhalb des Werkzeugs statt. Anhand von Faserverbund-Couponproben erfolgt die Bewertung der Komponentenkompatibilität und der thermomechanischen Werkstoffcharakteristik. Dafür hat das Institut auslegungsrelevante Zug-, Druck- und Schubkennwerte im Klimaschrank von RT bis 250 °C ermittelt. Diese Kennwerte bilden die Basis für Simulationsberechnungen, die für die Auslegung und die Fertigung von Teststrukturen mit unterschiedlichen Bauweisen erforderlich sind.

## Erhöhte Einsatztemperatur durch innovative Leichtbaukonzepte

Verschiedene Leichtbaukonzepte ermöglichen ein verbessertes mechanisches Strukturverhalten bei höheren Einsatztemperaturen. Neue Strukturkonzepte und die Verwendung eines hybriden Materialaufbaus reduzieren die thermische Belastung des Werkstoffs bereits stark. Ergänzend kann der Einsatz von Hochtemperaturwerkstoffen weitere Gewichtspotenziale bei höheren Thermallasten ausschöpfen. Zum Vergleich der entwickelten Strukturkonzepte mit Referenzstrukturen dienen experimentelle thermomechanische Analysen in der THERMEX-Anlage. Diese bilden die Validierungsbasis für die Vorhersage des komplexen thermomechanischen Verhaltens von Luft- und Raumfahrtstrukturen unter realen Einsatzbedingungen.

Die Kombination aus werkstofflicher Untersuchung, Simulation und daraus abgeleiteten Konzepten schafft die Voraussetzung für die Umsetzung zukunftssträchtiger Bauweisen für thermisch hoch belastete Bereiche bei gleicher bzw. reduzierter Strukturmasse.



Autoren:  
Dr. rer. nat. Thorsten Mahrholz  
Dr.-Ing. Alexandra Kühn  
Dipl.-Ing. Martin Liebisch



# Individuelle Schadensbewertung – neuer Ansatz zur Reparatur

*Individual damage assessment – demonstration of a new approach to demand-oriented repair of composite structures*

**Ein neuer Ansatz zur Schadensbewertung und Reparaturnachweisführung an Faser-verbundstrukturen trägt zur Umsetzung bedarfsorientierter Reparaturen bei. Individuelle Restfestigkeitsberechnungen der beschädigten wie auch der reparierten Struktur weisen auf erforderliche Folgemaßnahmen zum angemessenen Umgang mit der schadhaften Struktur hin. Der vorgestellte Ansatz ermöglicht eine bessere Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials von Faserverbundstrukturen, im Gegensatz zu den herkömmlichen konservativen Auslegungsmethoden und Richtlinien zur Bewertung und Reparatur von Schäden an Luftfahrtstrukturen. Die Durchführung repräsentativer Strukturversuche dient der Demonstration dieser neuen Herangehensweise.**

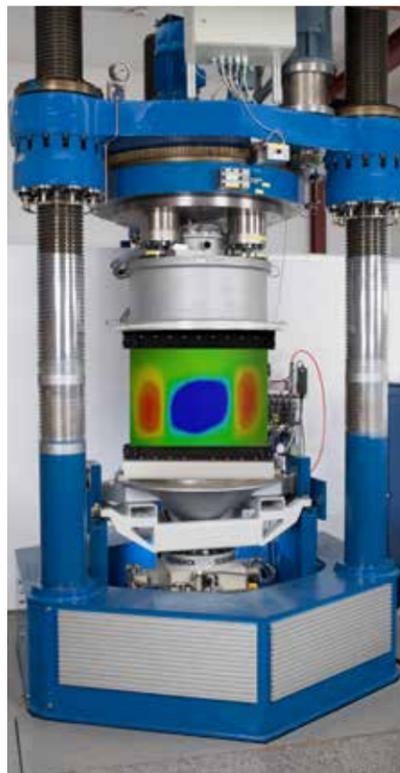
## Summary

*A new approach for individual damage assessment of composite structures supports the reduction of conservatism associated to current damage assessment methods. As opposed to the current empirical methods, the proposed approach bases decision-making regarding further maintenance measures on the predicted residual strength of the impacted and repaired structure. This is obtained through numerical analysis, in which realistic boundary conditions and the relevant features of the true structural condition, i.e. damage distribution and repair-specific parameters, are considered.*

*The method is demonstrated on panel level by simulation of the different stages (virgin, impacted, and repaired) according to the condition of the experimental test panel.*

## Schadensbewertung und Reparatur

Die aktuell zur Strukturauslegung und zur Bewertung von Schäden angewendeten deterministischen Ansätze sind vorwiegend empirischer Natur. Sie erfordern die Annahme des kritischsten Szenarios sowie diverser Reduktionsfaktoren, um die statistische Streuung abzudecken, was unweigerlich zu sehr konservativen Belastungsgrenzen führt.



Versuchsanlage zur Demonstration der Methode  
*Testing facility for the method's demonstration*

Vor diesem Hintergrund entwickelten wir am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptivtechnik im Rahmen des zweiten Hamburger Luftfahrtforschungsprogramms eine neue deterministische Methode (vgl. Diene, *Strukturmechanisch begründete Schadensbewertung und Reparatur*, Innovationsbericht 2014, S. 26). Unter Berücksichtigung der realistischen Randbedingungen und des tatsächlich vorliegenden Schadens berechnet die Methode die residuale Tragfähigkeit der beschädigten Struktur. Ein weiteres Modul der Methode ermittelt die Tragfähigkeit einer für den Schaden adäquaten Reparatur. Zusammen bilden die Ergebnisse dieser individuellen Analysen die Entscheidungsgrundlage zur Auswahl geeigneter Folgemaßnahmen. Frühere Studien haben gezeigt, dass diese neue Methode das Strukturverhalten kleiner beschädigter bzw. reparierter Proben (sog. Coupons) in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen vorhersagt. Diese liegt nun in einer erweiterten Version vor, welche die Wechselwirkung zwischen den lokalen Phänomenen in der unmittelbaren Schadens- bzw. Reparaturumgebung mit den globalen Mechanismen der umliegenden Struktur erfasst.

## Demonstration am Panel

Repräsentative Versuche an typischen T-Stringerversteiften Paneelen unter Axialdruckbelastung demonstrieren die Anwendbarkeit der Methode für verschiedene Strukturstadien (ungeschädigt, geschädigt und repariert). Dazu bilden virtuelle Modelle zur Analyse und Bewertung die unterschiedlichen Strukturzustände ab, entsprechend der im Versuch real durchlaufenen Stadien. Der Einsatz optischer Messtechnik und eines mobilen Ultraschall-Scanners ermöglicht die exakte Erfassung und Identifikation geometrischer Paneelparameter und relevanter Schadensmerkmale wie Delaminationen oder Faserbrüche. Automatisierte Kopplungsmethoden übertragen die Schadensmerkmale direkt in die Berechnungsmodelle zur individuellen Schadensbewertung.

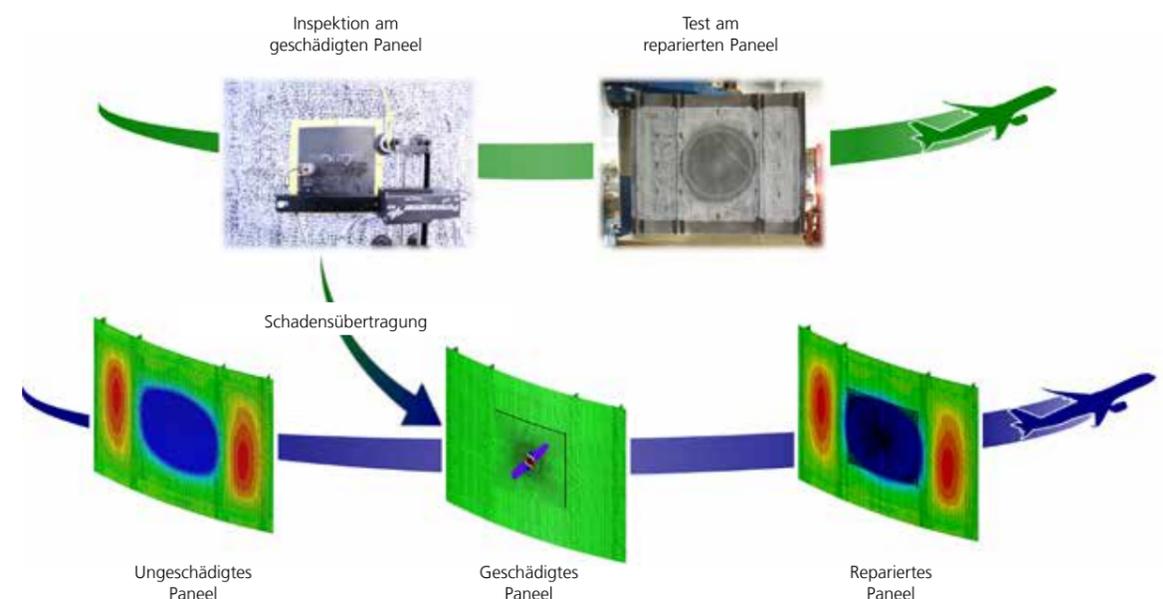
Autor:  
Dipl.-Ing. Christoph Paul Diene



Im Rahmen der Demonstration sind die Last-Stauchungs-Kurven, die punktuellen Dehnungen auf der Schaleninnen- und außenseite sowie die beidseitigen Verschiebungsfelder die betrachteten Merkmale zur Beschreibung des Strukturverhaltens. Diese dienen dem Vergleich zwischen den numerischen und den experimentellen Ergebnissen.

Demonstration am Panel: experimenteller Versuchsablauf (grün) und entsprechende numerische Analyse (blau)

*Demonstration on panel level: experimental test procedure (green) and corresponding numerical analysis (blue)*



# Lebensdaueranalyse von Kompositstrukturen bei verschiedenen Temperaturen

*Fatigue life analysis of composite structures at varying ambient temperatures*

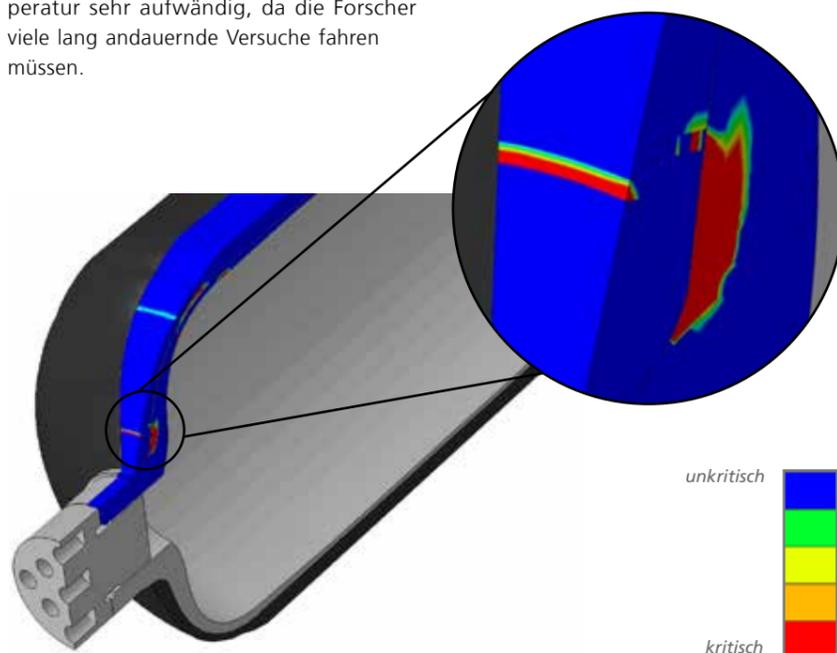
**Die Forscher des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickelten ein effizientes Modell zur Lebensdauerberechnung von Faserverbundkunststoffen (FVK) für verschiedene Temperaturen. Es kommt ohne kostenintensive temperaturabhängige Lebensdauerversuche aus. Die Modellkalibrierung erfordert lediglich die Messung temperaturabhängiger Festigkeiten sowie Lebensdauerversuche bei Raumtemperatur. Dies bietet ein enormes Zeit- und Kosteneinsparpotenzial in der Materialcharakterisierung. Damit ermöglicht die Methode eine robuste und effiziente Auslegung von FVK-Strukturen, die variierenden Betriebstemperaturen ausgesetzt sind.**

## Summary

*The scientists at the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems developed a model for fibre reinforced plastics (FRP), which predicts the fatigue life at different temperatures. Thereby, the model needs no expensive fatigue tests at different temperatures. This offers tremendous time and cost saving potential in the material characterisation procedure. The model calibration only requires temperature-depending strengths and fatigue tests at room temperatures. Thus, a robust and efficient design of FRP structures exposed to various ambient temperatures is achievable. Together with the tool chain presented in the innovation report 2016, the model leads to a reliable fatigue life assessment of cryogenic hydrogen storage tanks. The comparison with experimental data proves the model to be suitable for a robust and efficient dimensioning of thermally and mechanically loaded components.*

## Eine für alle

Das auf den Veröffentlichungen von Shokrieh und Lessard basierende und am Institut weiterentwickelte Lebensdauermodell fasst die klassischen Wöhlerlinien für verschiedene Lastbedingungen bei Raumtemperatur in einer Masterkurve zusammen. Durch die Modellerweiterungen fallen auch die Wöhlerlinien bei anderen Umgebungstemperaturen in diese Masterkurve. Diese eine Masterkurve kann somit die Lebensdauer des Materials bei beliebiger Temperatur vorhersagen. Eine Bedingung dafür ist ein qualitativ vergleichbares Ermüdungsverhalten bei verschiedenen Temperaturen. Diese Fähigkeit des Modells reduziert den Kosten- und Zeitaufwand in der Materialcharakterisierung enorm. Gerade bei Lebensdauermodellen ist die Kennwertbestimmung allein bei Raumtemperatur sehr aufwändig, da die Forscher viele lang andauernde Versuche fahren müssen.



Ermüdungskritische Bereiche in Liner und Wicklung des Kryo-Druckbehälters

Fatigue-critical areas in liner and winding of a cryogenic hydrogen storage tank

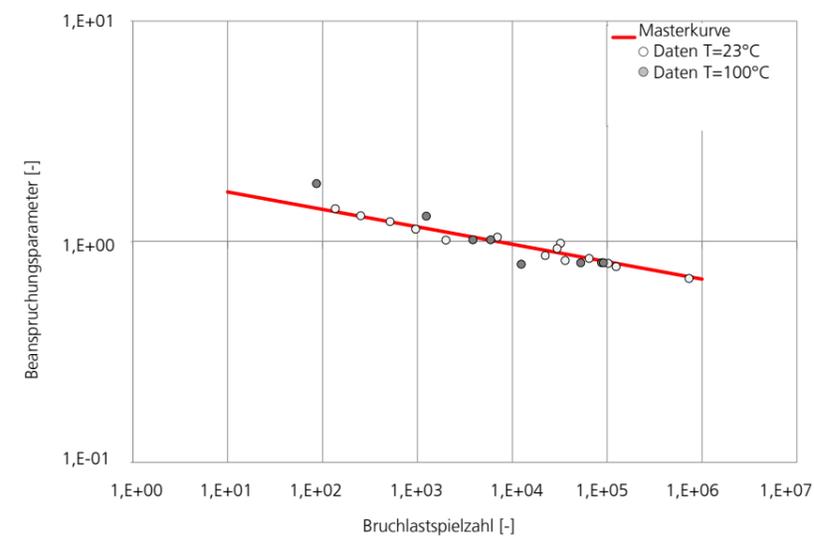
Zusätzliche Tests bei tiefen oder hohen Temperaturen stellen hohe Anforderungen an die technische Infrastruktur und vervielfachen den experimentellen Gesamtaufwand. Durch den neuen Ansatz können aber zusätzliche Lebensdauerversuche bei anderen Temperaturen entfallen. Hier genügt die verhältnismäßig einfache Bestimmung der temperaturabhängigen Festigkeiten. Das reduziert den Aufwand für die Modellkalibrierung merklich.

## Effiziente Strukturberechnung

Die entwickelte Methode erlaubt eine robuste Strukturauslegung unter effizienter Berücksichtigung von Temperatureinflüssen. Insbesondere für Druckbehälter, die im Automobilbau als Speicher für den alternativen Kraftstoff „Wasserstoff“ eingesetzt werden, ist dies von großer Bedeutung. In solchen Behältern liegt der Wasserstoff unter hohem Druck und als tiefkaltes Gas vor. Die wiederholte Betankung und Entnahme während des Betriebs setzt die Behälter zyklischen Belastungen bei sehr tiefen Temperaturen aus. Zusammen mit der im Innovationsbericht 2016 vorgestellten Simulationskette kann die neue Methode die Lebensdauer dieser Behälter zuverlässig abschätzen. Dies belegt der Vergleich mit experimentellen Daten. Das am Institut entwickelte Modell ermöglicht somit die robuste und effiziente Auslegung thermisch und mechanisch belasteter Komponenten.

Masterkurve für Lebensdauerdaten bei verschiedenen Lasten und Temperaturen

Master curve for life time data at different loads and temperatures



Autoren:  
Dipl.-Ing. Caroline Lüders  
Dr.-Ing. Daniel Krause



# Kann die Wandstärke von Raketen noch dünner werden?

*New design methods for primary structures of launch vehicles*

**Zylindrische und konische Schalen sind Primärstrukturelemente von Trägerraketen. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat neue Entwurfs- und Auslegungsmethoden für diese dünnwandigen Strukturen entwickelt. Das neue Vorgehen führt zu einer signifikanten Verringerung des Strukturgewichts.**

**Um das Vorgehen zu demonstrieren, wurden konische Schalen aus Faserverbund ausgelegt, gefertigt und getestet. Die Schalen repräsentieren eine skalierte Version des ECA-Adapters 3936 der europäischen Trägerrakete Ariane 5. Die Ergebnisse zeigen über 100 Prozent größere ertragbare Lasten und ein Gewichtspotenzial von ca. 40 Prozent. Wird das Vorgehen in der Industrie angewandt, ist eine signifikante Kostenreduktion der Nutzlast (von 15.000 – 30.000 Euro pro Kilogramm) möglich.**

## Summary

*A new design and manufacturing procedure for cylindrical and conical composite shells was developed at the German Aerospace Center (DLR). A first estimation shows that the structural weight of a launch vehicle can be reduced by at least 5–10 per cent. Hence, the cost for kilogramme per payload can be significantly reduced. The newly developed design methods allow a better prediction of the maximum load-carrying capability of axially loaded shells. Hence, the structural design can be pushed to the limits. In the preliminary design, the influence of the manufacturing effects on the stability behaviour are considered and compensated. The imperfection sensitivity of the structure can be assessed by means of new numerical methods. The whole procedure was demonstrated by means of a conical composite shell (scaled-down adapter of the European launch vehicle Ariane 5). The results of high-fidelity buckling experiments show more than 100 per cent higher loads in comparison with conventional methods used which results in a weight-saving potential of about 40 per cent.*

## Ein simples Konzept mit Potenzial

Der derzeitige Industriestandard für die Auslegung von stabilitätsgefährdeten axial belasteten zylindrischen und konischen Schalen beruht auf empirischen Methoden und Messdaten. Der zugehörige Prozess ist deswegen sehr zeit- und kostenintensiv. Das neu entwickelte Konzept ist völlig unabhängig von Messdaten und besteht aus analytischen und numerischen Methoden, die einfach und schnell zu implementieren sind.

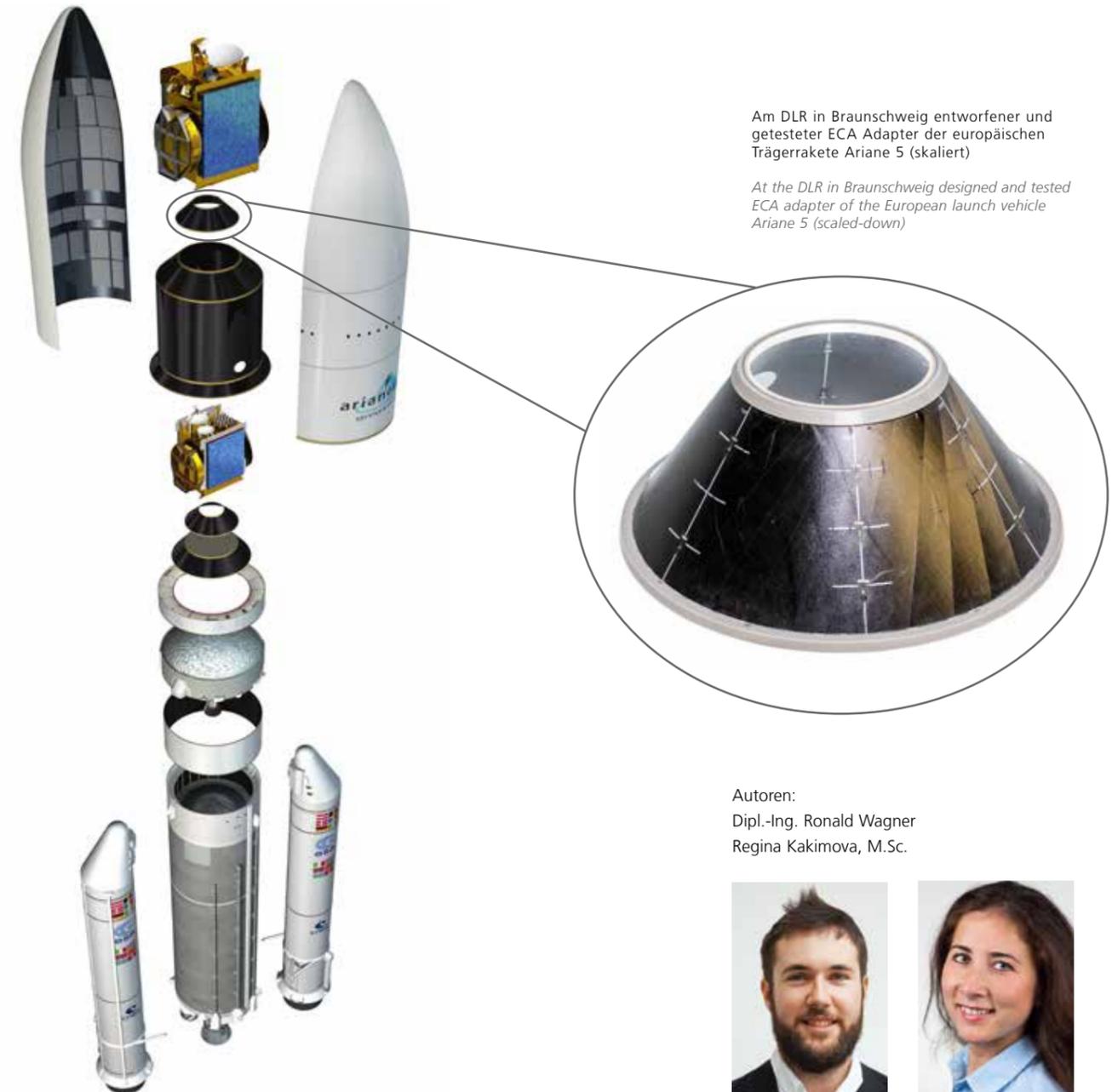
Speziell für die Vorauslegung entwickelte analytische Formeln zeigen bereits in frühen Auslegestadien ein deutliches Gewichtspotenzial. Erste Ergebnisse zeigen für zylindrische Strukturen 5–10 Prozent Gewichtsersparnis. Bei konischen Schalen ist sogar eine stärkere Reduzierung des Strukturgewichts zu erwarten.

Innerhalb der numerischen Methoden für fortgeschrittene und finale Auslegestadien wird gezielt das Stabilitätsversagen von axial belasteten zylindrischen und konischen Schalen aufgelöst. So lassen sich exakte Aussagen über die maximal ertragbaren Lasten und das besondere Strukturverhalten ableiten.

## Gewicht erfolgreich reduziert

Die Forscherinnen und Forscher am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik haben das Potenzial der neuen Auslege- und Entwurfsmethoden mit einer konischen Schale aus Faserverbund demonstriert. Ein eigens entwickeltes Fertigungskonzept ermöglicht dabei eine genaue Definition von verschiedenen Faserwinkeln der Schale, welche bei Konen wegen der komplexen Geometrie nicht trivial ist. Sorgfältig durchgeführte optische und akustische Messungen zeigen, dass fertigungsbedingte Fehler minimal sind.

Das Resultat der anschließend durchgeführten Beultests sind über 100 Prozent größere maximal ertragbare Lasten der Faserverbundschalen (im Vergleich zum derzeitigen Industriestandard). Das zugehörige Gewichtspotenzial beträgt etwa 40 Prozent.

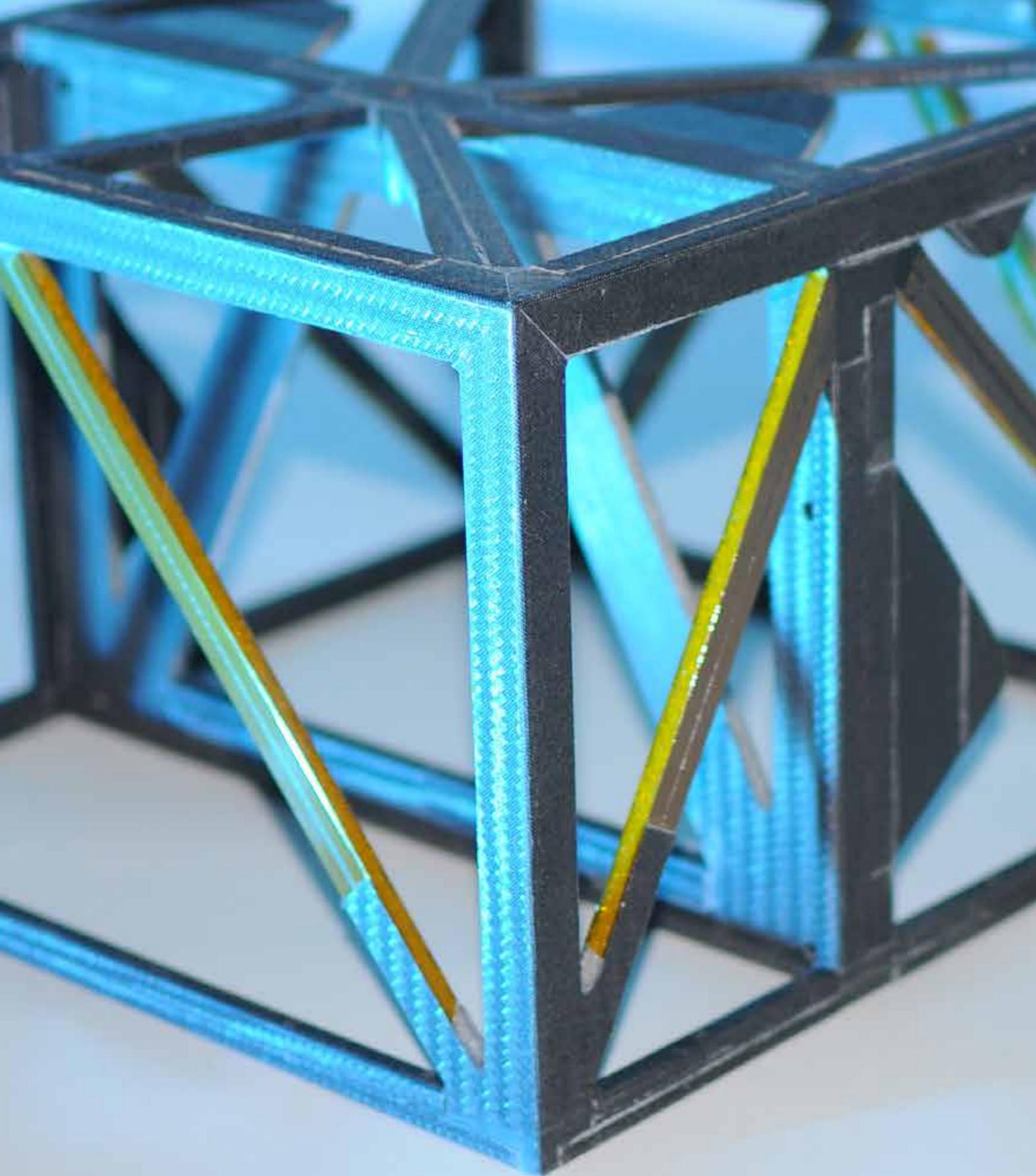


Am DLR in Braunschweig entworfener und getesteter ECA Adapter der europäischen Trägerrakete Ariane 5 (skaliert)

*At the DLR in Braunschweig designed and tested ECA adapter of the European launch vehicle Ariane 5 (scaled-down)*

Autoren:  
Dipl.-Ing. Ronald Wagner  
Regina Kakimova, M.Sc.





Struktur des Asteroidenlanders MASCO, derzeit unterwegs zum Asteroiden Ryugu

Structure of the asteroid lander MASCO, currently headed for the asteroid Ryugu

## Strukturkonforme Funktionsverdichtung

Einen deutlichen Fortschritt bei integralen Bauweisen stellt die Integration weiterer Funktionen wie beispielsweise SHM-Systeme, Leitfähigkeit und Beleuchtungselemente in die tragende Struktur dar.

### **Compliant aggregation of functionalities**

*Compliant aggregation of functionalities aims for solutions, where integration of additional functions does not degrade the original load-carrying function of the structure. To reach this goal, the design principles must be adapted to the additional functions. For example the active shape control of a structure may not lead to additional internal loads. Unconventional ideas from many people are required here to find the right solutions.*

Warum löchern wir lasttragende Faserverbundstrukturen? \_\_\_\_\_ 44  
*Integration of air ducts in a HTP leading edge*

Fügen von hybriden Strukturen mit Filmklebstoffen \_\_\_\_\_ 46  
*Joining of hybrid structures with film adhesives – the delta-alpha issue and its possible solution*

Segmentierte Windturbinen-Rotorblätter – auf die Verbindung kommt es an! \_\_\_\_\_ 48  
*Segmented rotor blades of wind turbines – it comes down to the joining technology!*

Wenn Satelliten schwitzen – kombinierter Struktur- und Thermalentwurf \_\_\_\_\_ 50  
*When satellites are sweating – a semi-analytical design method for a coupled structural-thermal analysis*

Den Gordischen Knoten lösen – craschere Faserverbundstrukturen \_\_\_\_\_ 52  
*Initial design of crashworthy composite structures by simultaneous consideration of static loads and crash loads*

# Warum löchern wir lasttragende Faserverbundstrukturen?

Integration of air ducts in a HTP leading edge

**Eine aktive Strömungskontrolle senkt den Treibstoffverbrauch von Verkehrsflugzeugen um bis zu 400 Kilogramm pro Flug. Voraussetzung für diese widerstandsminimierte Umströmung von Steuer- und Leitwerksflächen ist die strukturelle Integration von Luftführungskanälen in die Höhenleitwerksvorderkante (vgl. Forßbohm, Höhenleitwerksvorderkante mit aktiv kontrollierter Laminarumströmung, Innovationsbericht 2016, S. 47). Diese neuen kohlenstoffaserverstärkten Kunststoff (CFK)-Bauteile senken das Gewicht und steigern die Effizienz des aerodynamischen Profils.**

## Summary

Active flow control reduces the fuel consumption of a commercial aircraft by up to 400 kilograms per flight. A prerequisite for this resistance-minimised flow over the control and tailplane surfaces is the structural integration of air guiding ducts into the leading edge of the horizontal tailplane. These new carbon fibre reinforced plastic (CFRP) components reduce the weight and increase the efficiency of the aerodynamic profile. Thanks to the close cooperation with six other DLR institutes and two European industry partners, the development activities are carried out in a holistic approach.

In addition, aspects of the multifunctional structural concept as well as of the system architecture are directly incorporated in the design of a HLFC-capable wing leading edge.

## Funktionsintegrierte Struktur

Seit 2016 erfolgt am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik die Weiterentwicklung der HLFC\*-Technologie, um zukünftig treibstoff- und damit emissionsärmer fliegen zu können. Die zugrunde liegende Idee ist eine Höhenleitwerksvorderkante, die unter der aerodynamischen Oberfläche angeordnete Absaugkammern nutzt. Diese stehen über exakt hergestellte Drosselbohrungen kommunizierend mit einer Unterdrucksammelkammer im Inneren der Vorderkante in Verbindung. Die direkte Integration der Luftführung in eine Faserverbundstruktur erlaubt es, die aerodynamisch gewünschten Druckverluste darzustellen, ohne auf komplexe Systeme einschließlich separater Leitungen und aufwändiger Ventilsteuerungen zurückzugreifen. Die realisierten Drosselbohrungen halten engste Toleranzen in Position und Durchmesser ein. Sie verursachen weder Faserausrisse noch das Ablösen einzelner Laminatschichten voneinander. Es treten keine unzulässigen Strukturschwächungen auf.

Seinen Charme erhält dieses Konzept dadurch, dass lediglich eine Unterdruckquelle mit festem Betriebsdruck erforderlich ist, um eine optimale Absaugverteilung der turbulenten Strömungsanteile entlang eines Profils zu erreichen.

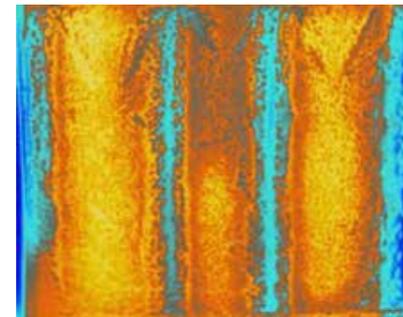


Multifunktionales Strukturkonzept der Vorderkante: erosionsschützende Außenhaut, aerodynamische Luftkanäle mit Drosselöffnungen und lasttragende Struktur mit Rippen

Multifunctional structural leading edge concept: erosion-protecting outer skin, aerodynamic air ducts with throttle orifices and load-bearing structure with ribs

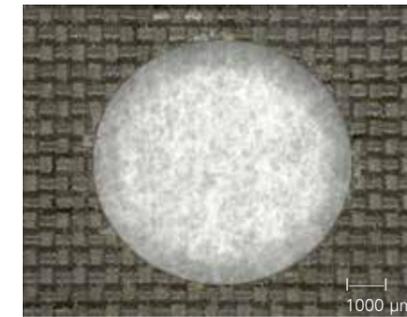
Infrarot-Scan der Absaugverteilung durch eine perforierte und verklebte Titan-Schicht

Infrared scan of the suction distribution through a perforated and bonded titanium layer



Defektfreie Drosselöffnung, wie sie in den Fuß der Luftkanäle gebohrt wird

Defect-free throttle orifice as drilled in the bottom of the air ducts



## Multi-Material-Bauweise

Doch damit nicht genug: Eine perforierte Titan-Erosionsschutzschicht auf der lasttragenden CFK-Struktur erhöht die Widerstandsfähigkeit der Faserverbundstruktur gegenüber erosiv wirkenden Umwelteinflüssen. Dieses strukturelle Verkleben zweier Leichtbauwerkstoffe bedeutet zwar eine weitere strukturkonforme Funktionsintegration, stellt jedoch eine besondere Herausforderung bei der Auslegung dar: Das unterschiedliche Temperaturdehnungsverhalten der Fügepartner induziert infolge wechselnder Umgebungstemperaturen Spannungen in der Verbindungszone, welche sich im Betrieb mit aerodynamischen Lasten überlagern und so die Verklebung zusätzlich belasten (vgl. Schollerer, Fügen von hybriden Strukturen mit Filmklebstoffen, Innovationsbericht 2017, S. 46).

Durch die enge Kooperation mit sechs weiteren DLR-Instituten und zwei europäischen Industriepartnern erfolgen die Entwicklungstätigkeiten in einem ganzheitlichen Ansatz. Im Fokus steht die Herstellung örtlich selektiv zähmodifizierter Klebnähte, um Spannungsüberhöhungen in hoch belasteten Bereichen struktureller Verklebungen abzusenkern und um die Verbindungsfestigkeit zu steigern.

Darüber hinaus fließen Aspekte des multifunktionalen Strukturkonzepts wie auch der Systemarchitektur direkt in den Entwurf einer absaugbaren Flügelvorderkante ein. Sie bilden die Grundlage, die HLFC-Technologie in Verbindung mit einer faserverbundgerechten Leichtbauweise der Strukturkomponenten in zukünftigen Fluggeräten einzusetzen.

\* HLFC steht für Hybrid Laminar Flow Control und beschreibt das Ansaugen turbulenter Strömungsanteile an der Vorderkante umströmter Profile in Verbindung mit einer aerodynamisch glatten Formgebung, um die laminare Lauflänge von Strömungen zu vergrößern.

Autor:  
Dipl.-Ing. Tobias Forßbohm



# Fügen von hybriden Strukturen mit Filmklebstoffen

Joining of hybrid structures with film adhesives – the delta-alpha issue and its possible solution

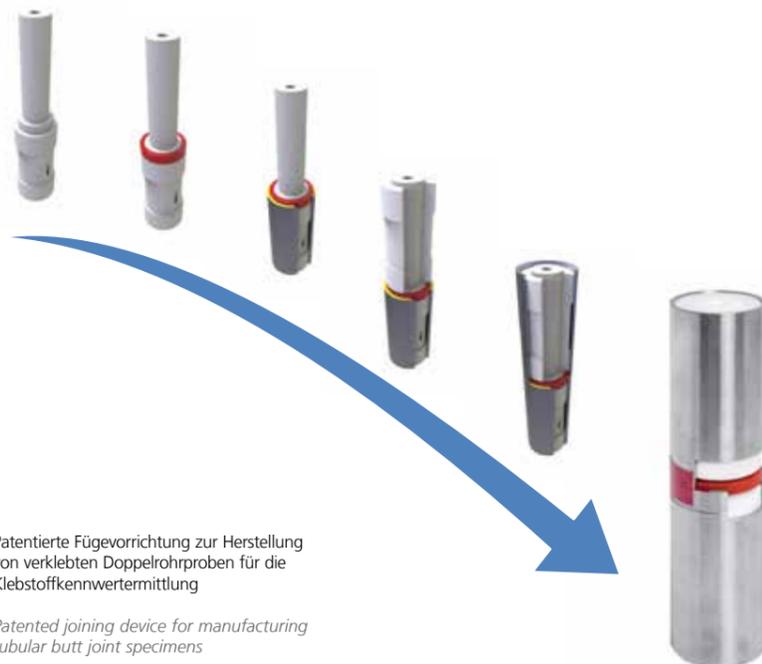
Die Entwicklung einer neuartigen patentierten Fügevorrichtung zur Herstellung von stumpf verklebten Doppelrohrproben ermöglicht die sichere Ermittlung von Kennwerten temperaturoushärtender Filmklebstoffe.\* Durch das Fügekonzept verbessert sich die Ausrichtung der Proben um den Faktor 10. Die Ergebnisse der Versuche erlauben die Auslegung von Klebverbindungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode unter Verwendung von hochwertigen detaillierten Materialmodellen. Die Simulationen zeigen bei verklebten hybriden Strukturen besonders hohe Belastungen auf die Klebschicht (vgl. Forßbohm, *Warum löchern wir lasttragende Faserverbundstrukturen?* Innovationsbericht 2017, S. 44). Der Grund dafür liegt bereits im Herstellungsprozess. Die unterschiedliche Wärmeausdehnung der einzelnen Materialien führt zu unerwünschten Verschiebungen. Diese Thematik ist in der Industrie besser unter dem Namen Delta-Alpha-Problematik bekannt.

## Summary

A new joining device was developed to manufacture tubular butt joint specimens. The invention decreases the geometrical tolerances by factor 10. So it is now possible to precisely generate biaxial material values of hot-curing adhesive films. These values are used to calculate the stresses in bondlines by finite element analysis. Investigations show high loads through thermal deformations of hybrid structures through the curing process of the adhesives. Therefore, a new design of the bondline is the point of investigation to receive a better stress distribution by inserting a surface toughening area in the CFRP adherents.

## Kleben ist die Lösung, oder?

Der Clou an der Fügevorrichtung ist, dass die Problematik der unterschiedlichen Wärmeausdehnungen verschiedener Materialien in dem Fall die Lösung ist. Ein innerer Kern dehnt sich während des Aushärtvorgangs des Klebstoffs und richtet die Rohre aus. Geringste Abweichungen von 0,1 Millimeter in der koaxialen Ausrichtung der Rohre führen zu starken Schwankungen in der Kennwertermittlung. Dies wurde durch Simulationen und Versuche bestätigt.



Patentierte Fügevorrichtung zur Herstellung von verklebten Doppelrohrproben für die Klebstoffkennwertermittlung

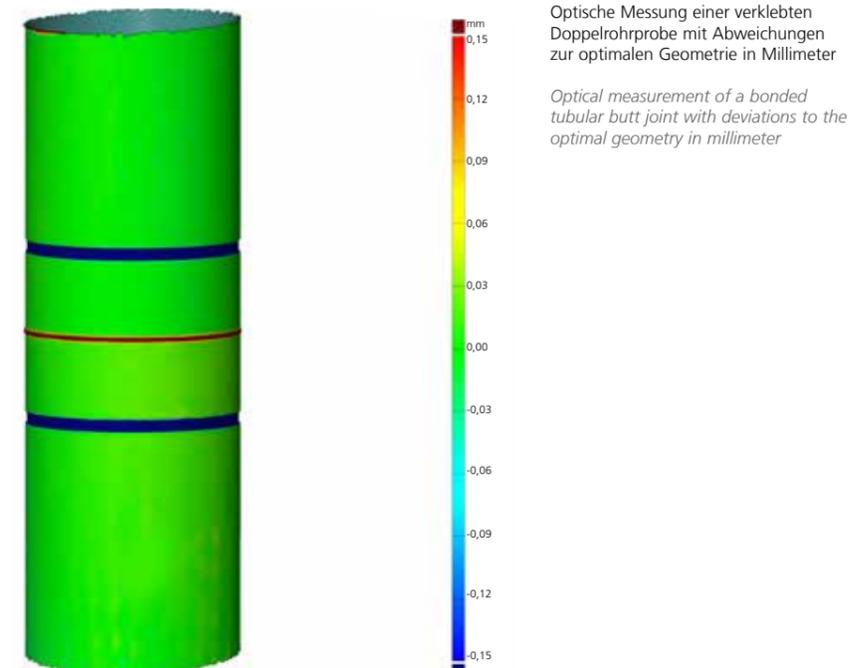
Patented joining device for manufacturing tubular butt joint specimens

## Klebverbindung von morgen

Hybride Strukturen stellen herstellungsbedingt hohe Ansprüche an die Klebverbindung. Hinzu kommen die an Überlappungsrändern von Klebverbindungen zusätzlich entstehenden hohen Spannungskonzentrationen, die die Verbindungsfestigkeit senken und versagensinitierend sind. Der Forschungsschwerpunkt liegt daher auf der Entwicklung einer ganzheitlichen, robusten Klebverbindung. Der Ansatz ist dabei die Weiterentwicklung eines vom DLR patentierten Rissstopkonzepts, bei dem sich durch Oberflächenzähmodifikation ein gleichmäßiger Spannungsverlauf in der Klebschicht einstellt. Die Klebverbindung wird dadurch in ihrer Verbindungsfestigkeit und Ermüdungseigenschaft gesteigert.

Für die Berechnung der Spannungsverläufe finden hochwertige detaillierte elastoplastische Materialmodelle Anwendung. Diese Modelle berücksichtigen sowohl den linear-elastischen Bereich als auch die Abweichung der Fließgrenze je nach Belastungsart aus Zug- und Torsionsbelastung. Die dafür notwendigen biaxialen Materialkennwerte der Klebstoffe lassen sich durch kombinierte Zug-Torsions-Versuche mit stumpf verklebten Doppelrohrproben bestimmen. Die Lösung ist also im Kommen.

\* Filmklebstoffe weisen bei hoher Belastung nahe der Bruchlast ein hochgradiges nicht-lineares Materialverhalten auf. Das „Fließen“ wie bei duktilen Metallen führt zu aufwändigen, nicht-linearen Finite-Elemente-Simulationen. Während lineare Berechnungen für eine schnelle, aber grobe Abschätzung gut zu verwenden sind, wird für die optimale Strukturauslegung die nicht-lineare Finite-Elemente-Methode mit detaillierten Materialmodellen benötigt.



Optische Messung einer verklebten Doppelrohrprobe mit Abweichungen zur optimalen Geometrie in Millimeter

Optical measurement of a bonded tubular butt joint with deviations to the optimal geometry in millimeter

Autor:  
Martin Schollerer, M.Sc.



# Segmentierte Windturbinen-Rotorblätter – auf die Verbindung kommt es an!

*Segmented rotor blades of wind turbines – it comes down to the joining technology!*

**Zwei 40 Meter lange Blattsegmente lassen sich einfacher und günstiger transportieren als ein 80 Meter langes Rotorblatt. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat daher eine neuartige Verbindungstechnik für segmentierte Rotorblätter mittels Stegverschraubung entwickelt. Die Montage der Blattsegmente erfolgt am Errichtungsstandort einfach und schnell mit herkömmlichen Schraubwerkzeugen. Tests mit zunehmender Bauteilkomplexität bestätigen die hohe Belastbarkeit dieser Verbindungstechnik. Die Stegverschraubung benötigt nur etwa 3 Prozent mehr Gewicht bezogen auf die Blattmasse und ist daher besonders wirtschaftlich.**

## Summary

Two 40 metres long blade segments can be transported more easily and more cost-effective than a single 80 metres long rotor blade. The Institute of Composite Structures and Adaptive Systems has developed a new connection technology for segmented rotor blades by bolting the shear webs. Component tests of increasing complexity proved the high load-bearing capacity of this connection technology. The assembly of the blade segments at the erection site is quick and easy with conventional bolting tools. The shear web connection requires only about 3 per cent more weight in relation to the total blade mass and is therefore particularly economical.

In 2017/2018, DLR will manufacture and assemble a 20 metres long, segmented rotor blade with shear web bolting for final validation of the connection technology in a blade test.

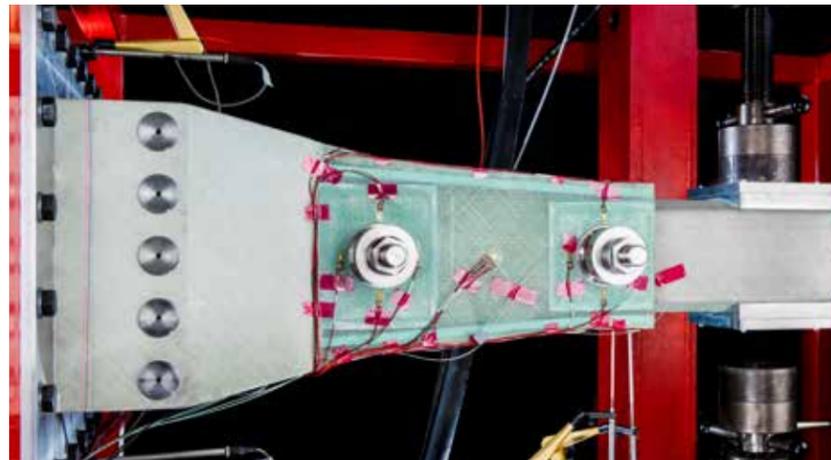
## Ein robustes Leichtgewicht

Insbesondere in Schwachwindgebieten sind immer längere Rotorblätter zur Ertragssteigerung notwendig. Allerdings sind viele Standorte nur durch aufwändige logistische Begleitmaßnahmen zu erreichen. Segmentierte Rotorblätter eignen sich daher bestens für künftige Onshore-Windenergieanlagen an schwer erreichbaren Standorten.

Hier setzt eine neue Technologie zur kostengünstigen Herstellung, zum Transport und zur Montage von segmentierten Rotorblättern an. Die segmentierten Blätter werden erst auf der Errichtungsbaustelle zusammengesetzt. Die Verschraubung erfolgt an den Stegen. So bleiben die empfindlichen Gurte unverletzt und es ergibt sich ein geringes Zusatzgewicht durch wenige lokale Verstärkungen.

Biegetest von 1,5 Meter langen, verschraubten Holmen eines segmentierten Rotorblatts

*Bending test of 1.5 metres long bolted spars of a segmented rotor blade*



Der integrierte Toleranzausgleich kompensiert die oft sehr großen Fertigungsabweichungen von Rotorblättern und sorgt so für eine robuste Verbindung. Zwei große Schrauben verspannen in die Stege eingebettete Buchsen und verbinden so die Blattsegmente. Die Montage ist daher auf der Errichtungsbaustelle schnell und einfach mit Standardwerkzeug durchführbar.

## Mit System zum Ziel

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik erforscht und erprobt seit dem Jahr 2012 segmentierte Rotorblätter. Im ersten Schritt erfolgte eine Untersuchung verschiedener Verbindungskonzepte nach aktuellem Stand der Technik sowie selbst entwickelte Konzepte. Auf Basis einer strukturmechanischen Auslegung wurden mehrere Konzepte miteinander verglichen und bewertet. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Konzept favorisiert. Anschließend lieferten zerstörende Bauteiltests Messdaten über die Belastbarkeit der Stegverschraubung.

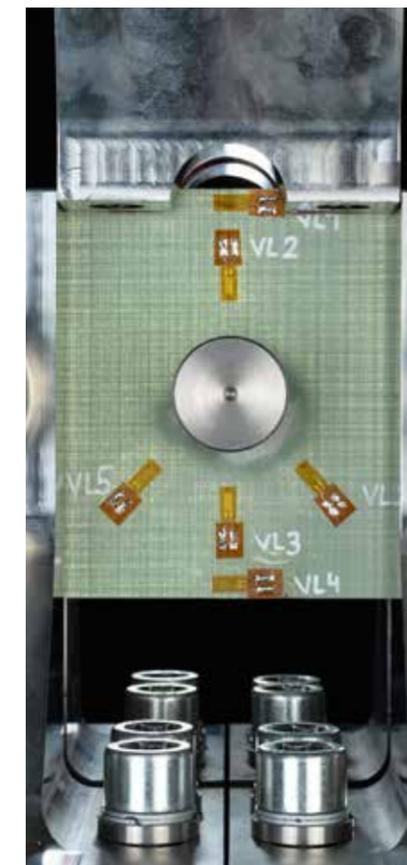
Zunächst überprüften Lochleibungstests die Belastbarkeit der Stege an den Verschraubungspunkten. Außerdem gaben Biegetests von 1,5 Meter langen Holmen Aufschluss über die Belastungsgrenze der hoch beanspruchten Steg-Gurt-Verklebung im Rotorblattholm.

Die Komplexität der Tests steigerte sich weiter mit Biegetests von verschraubten Holmen. Dabei ging es neben einer Überprüfung der Belastbarkeit der Stegbohrungen und Steg-Gurt-Verklebungen auch um die Fertigung und Montage der Verbindungstechnik.

Zur finalen Überprüfung des Konzepts baut das Institut in 2017/18 ein 20 Meter langes, segmentiertes Rotorblatt mit Stegverschraubung für einen Ganzblatttest.

Lochleibungstest zur Überprüfung der Kraftübertragung an den Stegbohrungen

*Bearing test for validation of load transfer at the shear web holes*



3-Punkt-Biegetest eines Rotorblattholms mit eingebettetem Bolzen

*3-point bending test of a rotor blade spar with embedded bolt*



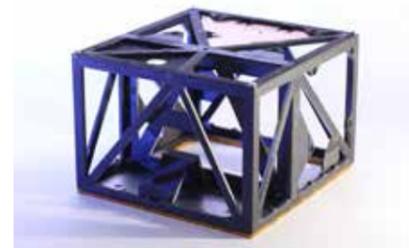
Autor:  
Lutz Beyland, M.Sc.



# Wenn Satelliten schwitzen – kombinierter Struktur- und Thermalentwurf

*When satellites are sweating – a semi-analytical design method for a coupled structural-thermal analysis*

Kompositstruktur des MASCOT Asteroidenlanders  
*Composite structure of the MASCOT asteroid lander*



Die Masse von kleineren Raumfahrzeugen lässt sich zugunsten der wissenschaftlichen Nutzlasten reduzieren, sobald die tragenden Bauteile die Funktionen des Thermalsystems mit übernehmen. Zudem verringert eine kombinierte Betrachtung auch das Risiko von komplizierten Nachbesserungen an der Struktur oder am Thermalsystem. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickelt hierzu eine Entwurfsmethodik für die schnelle und korrekte Simulation von Faserverbundstrukturen. Eine besondere Rolle kommt dabei den Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Bauteilen zu. Hier sind die Fasern, die im Wesentlichen für die Weiterleitung der mechanischen und thermischen Lasten verantwortlich sind, unterbrochen. Für eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung im Raumfahrzeug ist dies kontraproduktiv: Es kommt zu einem Engpass für den Wärmefluss – das Raumfahrzeug kann nicht richtig „schwitzen“ und überhitzt.

## Summary

*It is possible to improve the robustness of small spacecraft's and lander's thermal control system by introducing an amended method for the coupled structural-thermal design analysis. This will allow a priori a (partial) implementation of the thermal control system into the primary structure and reduce the spacecraft's mass in favour of scientific payloads. In addition, the risk of required late changes on the structural or thermal subsystem is reduced. The key elements of the thought-out design method are the structural joints in primary fibre composite structures, transferring structural and thermal loads. Here, especially the out-of-plane heat fluxes play an important role. In a first step these are simulated on coupon level and with 3D-finite element (FE) models. From that, a semi-analytical design method is developed. Amongst other things, it includes the joint's geometry and effective thermal conductivity, main parameters to be considered in a later simplified FE model formulation based on 2D elements.*

## Gekoppelter Struktur- und Thermalentwurf

In Zusammenarbeit mit dem DLR-Institut für Raumfahrtssysteme entwickelt das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik ein Bewertungskonzept für den kombinierten Struktur- und Thermalentwurf von kleinen Satelliten und Landern. Am Beispiel des Asteroidenlanders MASCOT zeigte sich, dass für eine ca. 500 Gramm schwere Hauptstruktur ein ca. 250 Gramm schweres Thermalsystem erforderlich war. Eine Verbesserung dieses Verhältnisses erlaubt z. B. die Mitnahme weiterer Nutzlasten und soll durch die Kombination von Struktur- und Thermalvorentwurf erreicht werden. Eine der Herausforderungen dabei ist, dass die Berechnungsmodelle sowohl eine hohe Flexibilität für den Vergleich verschiedener Entwürfe, gleichzeitig aber auch einen hohen Grad an Genauigkeit aufweisen müssen.

Vorbereitung für einen Thermalvakuumtest zur Ermittlung von Temperaturverteilungen in verschiedenen single-lap joint Proberkörpern

*Thermal-vacuum test preparations for the determination of the temperature distribution in various single-lap joint specimen*

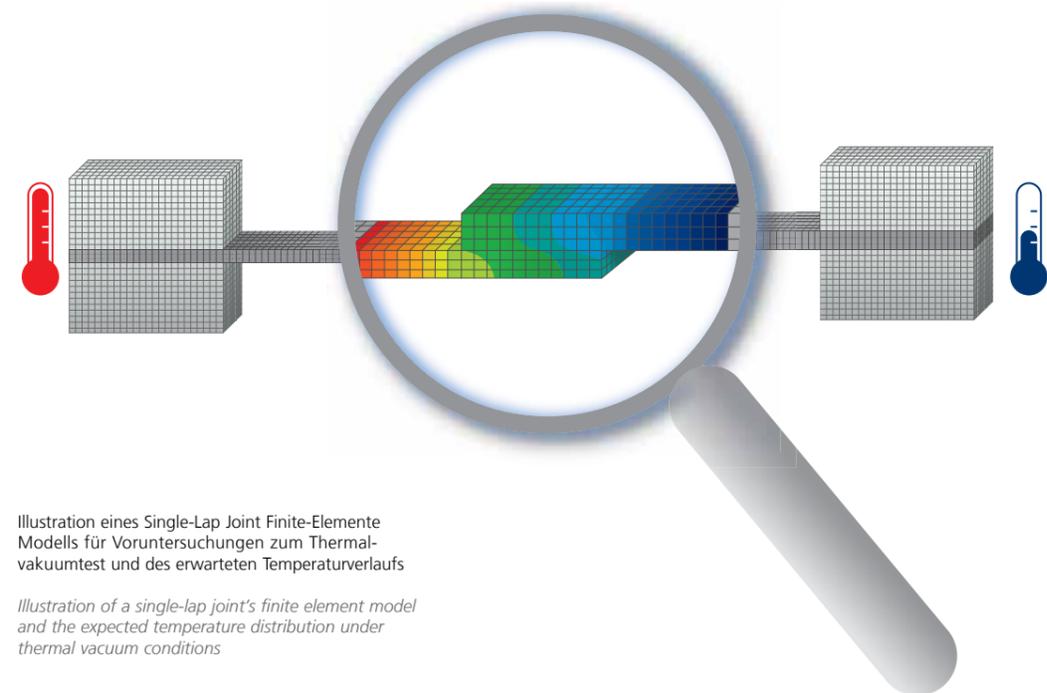


Illustration eines Single-Lap Joint Finite-Elemente Modells für Voruntersuchungen zum Thermalvakuumtest und des erwarteten Temperaturverlaufs

*Illustration of a single-lap joint's finite element model and the expected temperature distribution under thermal vacuum conditions*

## Semianalytisches Bewertungskonzept

Dies ließe sich dann erreichen, wenn einfache, Finite-Elemente (FE)-Modelle, bestehend aus 2D-Elementen, auch eine 3D-Temperaturverteilung verlässlich abbilden könnten. Eine Schlüsselstelle in der Forschung sind die Verbindungsstellen zwischen den einzelnen Bauteilen. Unterschiedliche Geometrien und Ausführungen der Fügstellen wirken sich direkt auf die effektive Wärmeleitfähigkeit der Struktur aus und ermöglichen oder verhindern den Temperaturausgleich. Um die jeweiligen thermischen Effekte im 2D-Modell abzubilden, werden diese Schritt für Schritt experimentell nachgebildet und über eine analytische Formulierung der kombinierten Struktur-Thermalanalyse zugänglich gemacht.

Weitere Experimente beschäftigen sich mit der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit des Laminats senkrecht zur Faserebene, da sich diese nicht aus den in der Regel nicht bekannten Materialparametern ermitteln lässt. Hierzu verfügt das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik über ein breites Spektrum an Verfahren (vgl. von Monkiewitsch, *Wärmeleitfähigkeit schnell, einfach und effizient bestimmt*, Innovationsbericht 2017, S. 20 & Exner, *Partikelverstärkt ins All – Thermalmanagement von Satelliten*, Innovationsbericht 2017, S. 22). So lässt sich neben der Wärmeleitfähigkeit von Faser-Matrix-Verbunden auch die von Strukturklebstoffen und modifizierten Matrices mittels Transient-Hot-Bridge-Verfahren, Heat Flow Meter oder dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) messen.

Autor:  
Dipl.-Ing. Michael Lange



# Den Gordischen Knoten lösen – crashsichere Faserverbundstrukturen

*Initial design of crashworthy composite structures by simultaneous consideration of static loads and crash loads*

**Crashsicherheit ist nicht per se gegeben: Man erreicht sie mit einer spezifischen Auslegungsmethodik, ohne dabei den Blick auf das Strukturgewicht zu verlieren. Produktentwickler und Konstrukteure könnten zukünftig von dieser neuartigen Auslegungsmethodik durch ein hohes Maß an frühzeitigem Erkenntnisgewinn und kürzeren Entwicklungszyklen profitieren. Insbesondere Faserverbundstrukturen versprechen ein hohes Potenzial zur Gewichtseinsparung. Um dieses Potenzial zu heben, erforscht das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, wie sich der Erstentwurf unter gleichzeitiger Betrachtung von statischen Lasten und Crashlasten realisieren lässt. Durch den Einsatz geeigneter Verfahren zur Strukturmodellierung und Strukturoptimierung gelang es in diesem Jahr, die Wirksamkeit der Methodik in virtuellen Experimenten nachzuweisen.**

## Summary

*Crashworthiness is not given per se: it needs to be specifically fostered in the design method without losing sight of structural weight. In the future, product developers and designers could benefit from this novel design methodology through a high degree of early product knowledge and shorter development cycles.*

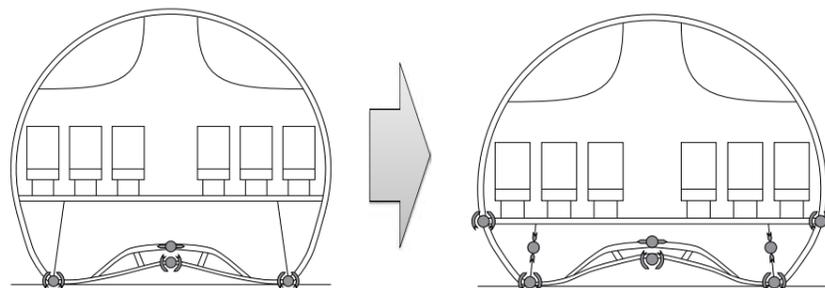
*In particular composite structures promise a high potential for weight saving. In order to utilise this potential, the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems is investigating how the initial design of crashworthy composite structures can be realised with simultaneous consideration of static loads and crash loads. Through the use of suitable methods for structural modelling and structural optimisation, this year the effectiveness of the methodology was demonstrated in virtual experiments.*

## Evolutionäre Mehrzieloptimierung

Der Schlüssel zum Erstentwurf crashsicherer Faserverbundstrukturen liegt im geeigneten Einsatz numerischer Methoden zur Strukturberechnung sowie in deren Kopplung mit effizienten Optimierungsalgorithmen. Die Herausforderung liegt wesentlich in der Beachtung faserverbundspezifischer Material- und Bauteileigenschaften bei der Formulierung der Optimierungsaufgabe. Unter strategischer Ausnutzung evolutionärer Mehrzieloptimierung lassen sich geeignete globale Strukturantworten für das erforderliche statische Tragverhalten und das gewünschte Energie-dissipationsvermögen identifizieren. Die globale Strukturantwort und ihre spezifische Verformungskinematik unter Crashlast resultieren dabei aus den individuellen Charakteristika der konstituierenden Faserverbundbauteile sowie deren Wechselwirkung. Die Auslegungsmethode stellt sowohl diese Charakteristika als auch die Positionierung der zugehörigen Faserverbundbauteile innerhalb eines Bauraums als Konstruktionsinformationen bereit.

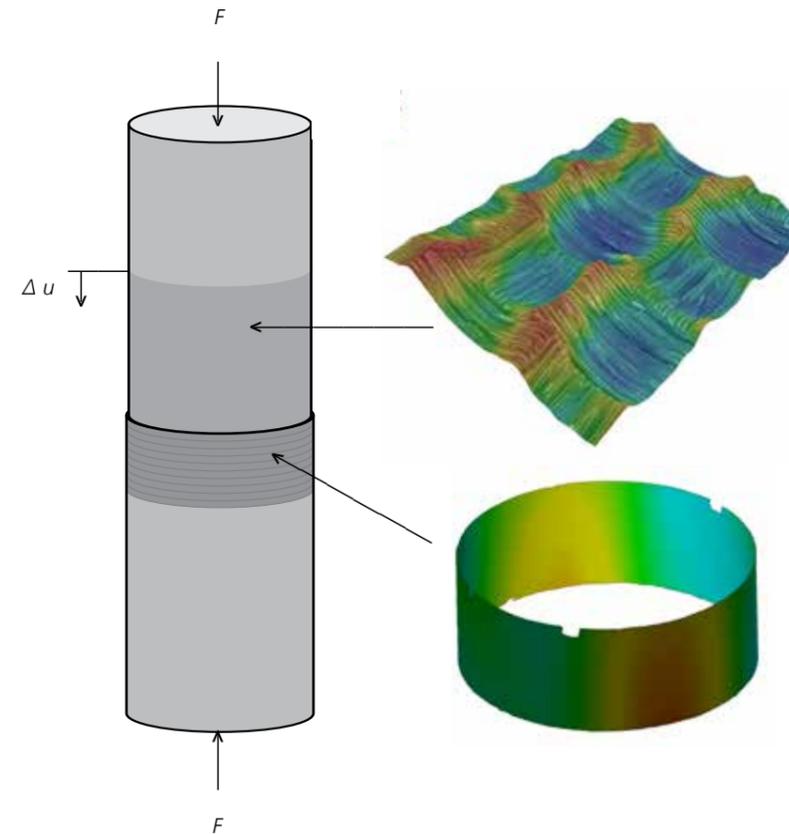
Ausnutzung großer Verformungen für verbesserte Crashsicherheit im Erstentwurf von Flugzeigrümpfen

*Use of large deformations for improved crash safety in the initial design of aircraft fuselages*



## Strukturintegriertes Deformationselement

Das hohe Maß an Erkenntnisgewinn in der Phase des Erstentwurfs ermutigt die Umsetzung der Idee eines strukturintegrierten Deformationselements. Dessen Grundzüge sind bereits im Innovationsbericht 2014 skizziert (vgl. Weiß, *Strukturintegriertes Deformationselement*, Innovationsbericht 2014, S. 38). Die systematische Überführung der Konstruktionsinformationen vom Erstentwurf hin zur Vorentwurfsphase ermöglicht nun die prototypische Umsetzung einer patentierten Teleskopstange zum Zwecke der Verformungssteuerung und Energiedissipation. Die Realisierung des Prototyps sowie dessen experimentelle Untersuchung in Crashversuchen sind die nächsten Schritte der Produktentwicklung. Trotz gegensätzlicher Anforderungen aus Statik und Crash lassen sich nun frühzeitig Strukturlösungen finden und neue Wege im Flugzeugentwurf einschlagen.

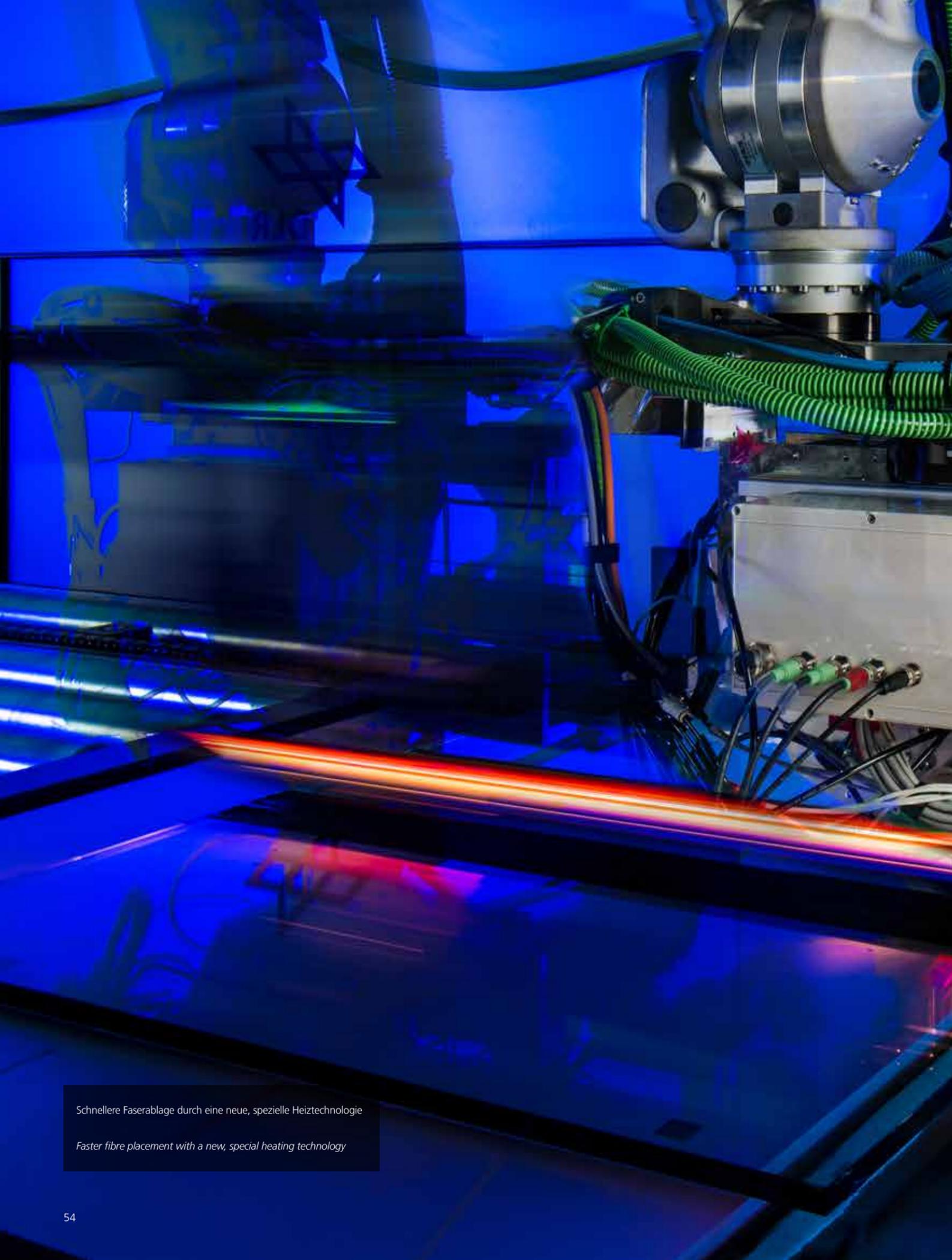


*Wirkweise des strukturintegrierten Deformationselements: Oberflächenreibung und Verformung durch Piezoelemente*

*Effects of the structure-integrated deformation element: surface friction and deformation by piezo elements*

Autor:  
Dr.-Ing. Lennart Weiß





Schnellere Faserablage durch eine neue, spezielle Heiztechnologie

*Faster fibre placement with a new, special heating technology*

## Lernende CFK-Prozessierung

Zielsetzung ist die Vertiefung des Verständnisses der physikalischen Vorgänge bei der Herstellung von CFK-Bauteilen mit dem Ziel der Entwicklung einer selbststabilisierenden Prozessführung.

### **Self-controlled CFRP processing**

*Self controlled CFRP processing is one of our most promising concepts for automation in the field of production of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) structures, but still in its infancy. With our competencies in ultrasonic NDT, process-simulation, and in the field of adaptronics as well as our long-lasting experience in CFRP production technologies, our scientists can build on a unique combination of knowledge.*

Volles Spektrum – Fertigungsüberwachung von Rotorblättern \_\_\_\_\_ 56  
*Full spectrum – optical monitoring of wind turbine rotor blade manufacturing*

Qualitätsgesicherte Liquid Composite Moulding (LCM)-Prozesse \_\_\_\_\_ 58  
*In-situ monitoring and adjustment of LCM processes*

CoRe HeaT – brandheiße Faserlegetechnologie \_\_\_\_\_ 60  
*CoRe HeaT – a new heating method for fast fibre placement*

Smart-Work-Station (SWS) – Kostenbewertung in Echtzeit \_\_\_\_\_ 62  
*Smart Work Station (SWS) – concept of real-time eco-efficiency assessment in composite manufacturing*

Mit Schall die Pultrusion verbessern \_\_\_\_\_ 64  
*With sound to a better pultrusion*

# Volles Spektrum – Fertigungsüberwachung von Rotorblättern

Full spectrum – optical monitoring of wind turbine rotor blade manufacturing

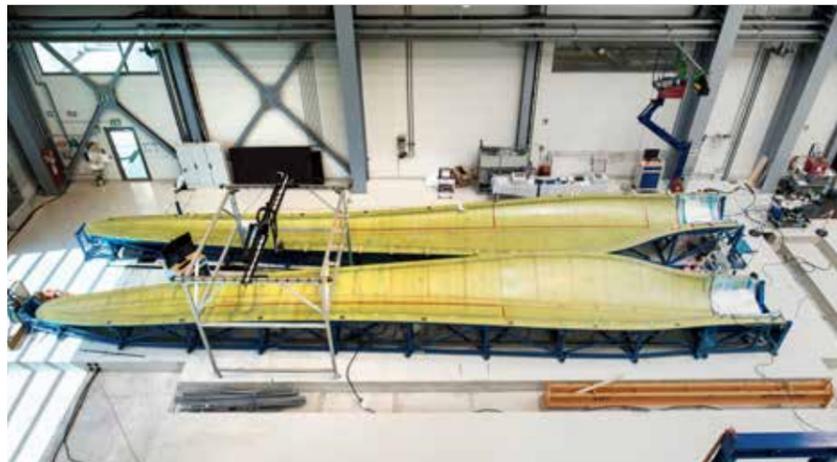
**Die Fertigung von Rotorblättern für die Windkraftindustrie ist ein komplexes und aufwändiges Unterfangen. Glasfaserhalbzeuge, Kohlenstofffasern und Harz müssen auf einer großen Fläche in die richtige Position gebracht werden. Das muss in einem bestimmten Zeit- und Temperaturfenster geschehen. Dabei lassen die in die Form eingebauten Temperaturfühler bisher nur eine indirekte Messung zu. Eine detailliertere Einsicht in den Prozess könnte dabei helfen, Abweichungen der Bedingungen zu erkennen und rechtzeitig eingreifen zu können. Diesen Ansatz verfolgt das Qualitätsüberwachungssystem E.V.A.R. des DLR in Stade.**

## Summary

The process for manufacturing of rotor blades is very critical. In order to achieve high component quality, resin infusion and curing must follow a curve within a narrow temperature window. So far, the only way to measure the temperature is through the use of thermocouples within the tooling providing indirect measurements only. To address this issue, DLR in Stade is working on a quality assurance system for rotor blade manufacturing. The system includes ultrasonic sensors attached to the mould for contactless flow front detection and a 5-axis mobile optical monitoring array with a thermographic and visible spectrum camera. The mould is also equipped with more than 30 thermocouples per side, providing even more detailed temperature information. All available data is passed to the master controller, which in return controls the mould heating. This control platform will be used to implement and test algorithms, which control the curing process based on the actual component quality.

## Überwachung von oben und unten

Wie der Einsatz moderner Sensorik Einblicke in den Ablege- und Aushärteprozess von Glasfasern und Harzsystemen gewähren kann, wird zurzeit beim DLR in Stade erprobt: Piezokeramiken in Vertiefungen an der Unterseite eines beheizbaren Formwerkzeugs senden Schallwellen im Ultraschallfrequenzbereich aus. Diese durchqueren das ebenfalls aus GFK bestehende Formwerkzeug und werden teilweise am Übergang zur Rotorblattschale reflektiert. Je nachdem, ob sich Harz oberhalb des Sensors befindet, verändert sich das reflektierte Signal. So können Harzankunft und Fließgeschwindigkeit ermittelt werden, auch wenn die Oberfläche von einem anderen Bauteil wie z. B. dem Gurt verdeckt ist. Da mit dieser Technologie die Position der Fließfront nur punktuell und nicht flächig ermittelt werden kann, befindet sich eine Messzelle im Aufbau, die ein um 5 Achsen bewegliches, hochauflösendes Kamerasystem für das sichtbare Spektrum mit sich führt. Dies ermöglicht eine globale, visuelle Überwachung des Infusionsprozesses. Parallel ist auch eine Thermografiekamera am Messkopf installiert, die Temperaturen großflächig messen kann. In Kombination mit den über 30 Temperaturfühlern in der Form können kritische Exothermien frühzeitig erkannt werden, sodass sich eine Überhitzung des Materials verhindern lässt.



Die DLR 20 Formhälften und die optische Messzelle von oben

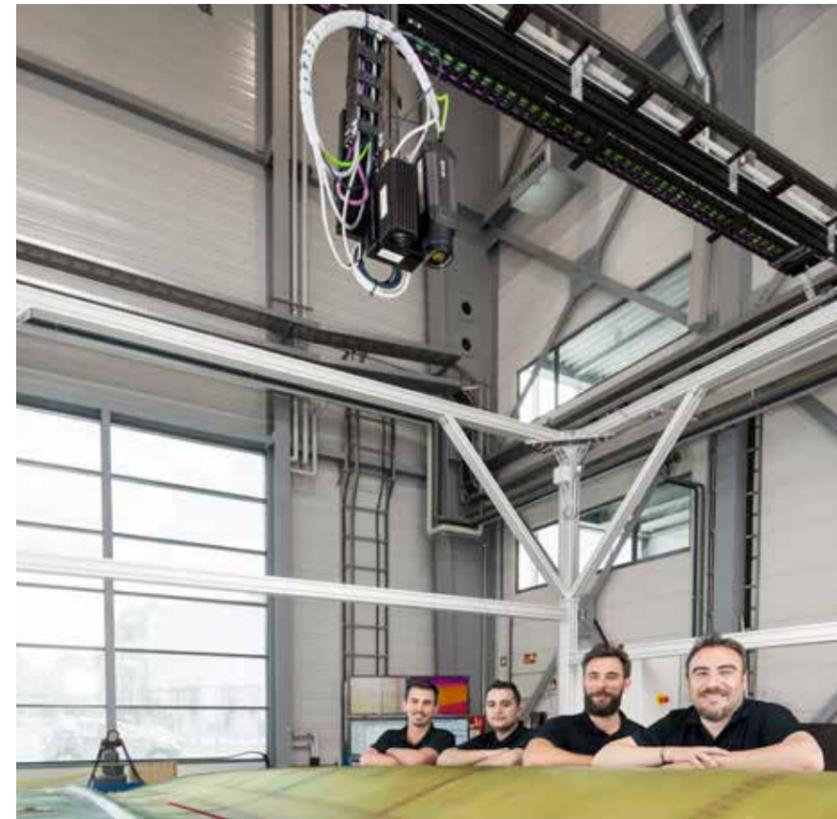
The DLR 20 Mold and the optical Monitoring Cabin from above

## Qualitätsorientierte Aushärtung

Bei der Herstellung von Rotorblättern erfolgt die Ansteuerung der Heizung nach einem festgelegten Temperaturprofil mit festen Zeitintervallen. Es werden bei der Regelung also keine Qualitätsmerkmale berücksichtigt. Hier setzt das DLR Stade mit einer Transferleistung aus der Luftfahrtindustrie an. Das übergeordnete Steuerungssystem „E.V.A.R. – Erkennen, Verarbeiten, Analysieren, Reagieren“ erhält sämtliche verfügbaren Informationen aller Sensoren und ist in der Lage, in den Aushärteprozess einzugreifen. Dabei können einzelne Heizfelder dynamisch angepasst werden, um die chemische Reaktion des Harzsystems im optimalen Prozessfenster zu halten. Das System wird 2017 erstmals beim Bau von Rotorblättern für eine experimentelle Windkraftanlage getestet.

Der schwenkbare Endeffektor ist mit zwei bildgebenden Hightech Sensoren ausgestattet

The slewing end effector is equipped with two high-tech imaging sensors



Autoren:  
Deniz Akin, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Hakan Ucan  
Dipl.-Ing. Philipp Zapp



# Qualitätsgesicherte Liquid Composite Moulding (LCM)-Prozesse

*In-situ monitoring and adjustment of LCM processes*

**Das kontinuierliche Überwachen und Anpassen von Injektionsprozessen verspricht, Nacharbeiten und Ausschussraten in der Produktion von Faserverbundstrukturen zu reduzieren. Das Ziel ist die fehlerfreie und vollständige Benetzung bei jedem Injektionsprozess einer Serie. In einem Ansatz werden Sensordaten und neuronale Netze in Verknüpfung mit einer Fließsimulation zur Überwachung, Voraussage und Bewertung des Injektionsprozesses eingesetzt. Treten während der Injektion trockene Stellen auf, dient eine neue Simulationsmethode zur Beschreibung des Auflösungsverhaltens dieser Gaseinschlüsse. Auf Basis der generierten Informationen wird das Produktionssystem zukünftig selbstständig Korrekturmaßnahmen durchführen, die zur bestmöglichen Tränkung führen.**

## Summary

*Continuous monitoring of the injection process allows a targeted adjustment of process parameters in order to prevent rework and scrap parts due to incomplete impregnation. The stated goal is an error-free and complete resin impregnation. One promising approach is the use of sensor data and neural networks for flow monitoring in combination with flow simulations. If dry spots occur during injection, a new simulation method is used to describe their resolution behaviour. In the future, the production system should be able to independently undertake corrective measures, which lead to the best possible impregnation based on the generated information.*

## Prozesssimulation und -überwachung

Je nach Bauteilkomplexität und Fertigungstechnologie sind bei einer Serienproduktion starke Abweichungen vom geplanten Injektionsverlauf zu beobachten. Fertigungsbedingte Abweichungen der drapierten, trockenen Verstärkungsstrukturen (Preforms) erschweren dabei die Vorhersage des zu erwartenden Fließbildes. Dadurch bleiben Nacharbeiten und Ausschuss als Teil von Prozesskosten nicht aus. Ziel ist es, neben der Dokumentation des Fertigungsprozesses, Fertigungsabweichungen schnellstmöglich zu erkennen, um in einem zweiten Schritt frühzeitig Korrekturmaßnahmen einleiten zu können. Um eine effiziente Bewertung auf Bauteilebene bereits während der Fertigung durchzuführen und Korrekturmaßnahmen abzuleiten, findet ein Abgleich von Online-Messdaten und Simulationsparametern mit Hilfe eines neuronalen Netzwerks statt. Das Online-Messsystem erfasst während der Fertigung Injektionsdruck, Vakuumdruck und Harzankunft an zuvor definierten Positionen (vgl. Liebers, *Einer für alles – kleine Low-cost-Ultraschallsensoren überwachen alle wichtigen Parameter*, Innovationsbericht 2016, S. 45). Die erfassten Parameter werden mit Simulationsergebnissen korreliert, sodass möglicherweise trocken bleibende Bereiche simulativ identifiziert werden können.

Simulation des Verhaltens eines Gaseinschlusses im Druckfeld eines LCM-Prozesses

*Simulation of dry spots behaviour in the pressure field of an LCM process*

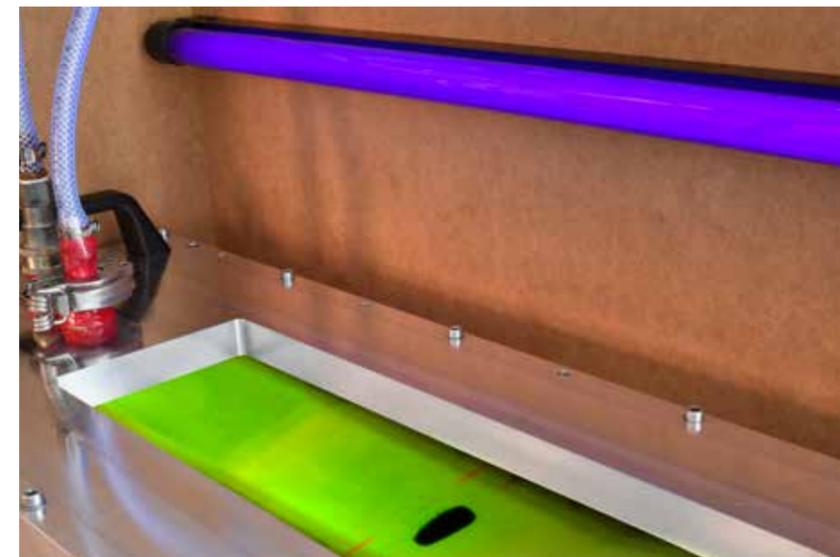


## In-situ-Prozessbewertung und -korrektur

Identifiziert das Produktionssystem eine oder mehrere trockene Stellen, soll es autonom individuelle Entscheidungen zur Selbstanpassung treffen. Diese „Systemintelligenz“ benötigt quantifizierbare Bewertungskriterien. Zur Beschreibung des Auflösungsverhaltens von trockenen Bereichen im Druckfeld von LCM-Prozessen wird eine numerische Simulation entwickelt. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten und der porösen Beschaffenheit der Faserhalbzeuge basiert die zweiphasige Simulation des Luft-Harz-Systems auf dem Druck-Sättigungs-Ansatz, der nach dem Darcy-Gesetz formuliert ist. Ein modifiziertes Permeabilitätsmodell nach Brooks und Corey zeigt gute Übereinstimmung mit experimentellen Versuchsergebnissen zu vertretbaren Rechenzeiten. Das relative Permeabilitätsmodell berücksichtigt den Einfluss der Strömung jeder Phase in Gegenwart der anderen Phase. Die entwickelte Simulation ermöglicht das Ableiten von Korrekturmaßnahmen zur Auflösung trockener Stellen. Hinsichtlich des Ziels, Nacharbeiten und Ausschussraten in der Produktion von Faserverbundstrukturen zu senken, wird der Gegenstand weiterführender Untersuchungen die Ermittlung eines geeigneten Ersatzmodells zur effizienten Bestimmung optimaler Fertigungsparameter im Falle des Auftretens von trockenen Stellen sein.

Untersuchung des Verhaltens von Gaseinschlüssen im Druckfeld eines LCM-Prozesses

*Investigation of dry spots behaviour in the pressure field of an LCM process*



Autor:  
Dominic Bertling, M.Eng.



# CoRe HeaT – brandheiße Faserlegetechnologie

*CoRe HeaT – a new heating method for fast fibre placement*

**Die Continuous Resistance Heating Technology (CoRe HeaT) ist eine Alternative zu Infrarot-, Heißgas- oder Laser-Heizvorrichtungen. Die am DLR in Stade in Entwicklung befindliche Technologie wird derzeit beim Automated Fibre Placement (AFP)-Verfahren getestet. Ein Anpassen auf ähnliche Prozesse wie beispielsweise Wickeln oder Flechten ist jedoch einfach möglich. Besondere Stärken des Verfahrens sind extrem hohe Heizraten und gute Regelbarkeit. Dies kommt besonders bei der Verarbeitung von bebinderten Trockenfasern oder thermoplastischen Prepregs zum Tragen, bei denen hohe Prozesstemperaturen erforderlich sind.**

## Summary

*At the DLR in Stade, CoRe HeaT is developed as an alternative heating method for the automated fibre placement process (AFP). However, the technology can also be used for similar processes like winding or braiding. It offers extreme heating rates and a fast response time allowing maximum productivity, only limited by the speed of robotics. An experimental AFP end effector using CoRe HeaT has been built up. First trials and the production of test laminates with dry fibre materials are ongoing. The layup of a thermoplastic slit tape (PEKK) with 1 metre per second and a target temperature of 400 degrees Celsius showed promising results. Future tests will further determine the influences of CoRe HeaT on the production process of preforms and the mechanical properties of parts built with it.*

## Aufheizen von Kohlenstofffasern

Die bei AFP-Anlagen weit verbreitete Infrarot-Heiztechnologie stößt bei neuen Trockenfaser-materialien an ihre Grenzen. Um die benötigten Prozesstemperaturen von bis zu 180 °C und mehr zu erreichen, ist eine Reduzierung der Ablagegeschwindigkeit nötig oder die Länge der Heizstrecke muss deutlich erhöht werden. Zudem sind aufgrund der thermischen Trägheit der Technologie die Beschleunigungs- und Stoppvorgänge bei AFP-Anlagen mit Infrarotstrahlern besonders kritisch. Für die Ablage von thermoplastischen Tapes mit Temperaturen bis über 400 °C kommen heutzutage meist Laser für das Heizen zum Einsatz. Nachteilig dabei sind die im Vergleich höheren Kosten für diese Heiztechnologie und die Notwendigkeit der lasersicheren Schutzeinhausung.

## Ablage von bebindertem Trockenfasermaterial

*Placement of bindered dry fibre material*



## Die CoRe-Heiztechnologie

Die Vorzüge der CoRe-Heiztechnologie sind kurze Ansprechzeiten und hohe Heizraten. Selbst bei Zieltemperaturen von weit über 400 °C ist eine Limitierung der Ablagegeschwindigkeit oder Start-/ Stopp-Dynamik nicht erforderlich. Zudem erlaubt die vergleichsweise kostengünstige neue Technologie die Konstruktion sehr leichter und kompakter Endeffektoren. Ein Nachteil ist, dass sich nur Kohlenstofffasern aufheizen lassen und z. B. Glas- oder Aramidfasern nicht für die Technologie geeignet sind.

## Experimenteller Endeffektor

Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik am Standort Stade wurde ein AFP-Endeffektor aufgebaut der mit CoRe HeaT arbeitet. Mit einem Portalroboter wurden damit bereits erste Probeplatten gelegt. Ziel erster Versuchsreihen ist es, den Einfluss der neuen Technologie auf die Preformfertigung sowie das finale Bauteil zu bestimmen. Aktuell sind dabei bebinderte Trockenfasern im Fokus. Erste Ablageversuche von Polyetherketonketon (PEKK) Slit Tapes mit bis zu einem Meter pro Sekunde Ablagegeschwindigkeit waren jedoch so vielversprechend, dass als Nächstes die Ablage von thermoplastischen Prepregs genauer untersucht werden wird.



Autor:  
Dipl.-Ing. Yannis Grohmann



Der CoRe HeaT experimentelle Endeffektor

*The CoRe HeaT experimental end effector*

# Smart-Work-Station (SWS) – Kostenbewertung in Echtzeit

Smart Work Station (SWS) – concept of real-time eco-efficiency assessment in composite manufacturing

Die Smart-Work-Station (SWS) ist ein echtzeitfähiges Messsystem für Produktionskosten. Als erstes System dieser Art dient es der Entscheidungsunterstützung in der Faserverbundproduktion. Die SWS versorgt als Datenerhebungssystem das von unserem Institut entwickelte Eco-Efficiency Assessment Model (EEAM). Ein wesentliches Ziel der Faserverbundindustrie ist die Reduktion der Fertigungskosten, um den Einsatz von Faserverbundkomponenten zu erhöhen. Industrie 4.0 erreicht dies durch Vernetzung und Online-Bewertung der Produktionssysteme. Innerhalb der vernetzten Systeme erhebt die SWS automatisch und reproduzierbar Prozessdaten.

## Summary

Smart Work Station (SWS) is the first of its kind real-time eco-efficiency data collection system. In the era of Industry 4.0, the SWS concept opens up new possibilities in cost assessment of composite production. Unlike conventional assessment concepts, which are performed with laborious field data collection or assumptions, SWS collects all cost-related data automatically within a distinct system boundary in real-time. SWS detects the fibre, resin, ancillaries, energy consumption, equipment operation time, work time and facility utilisation, which are all measured with a unified timestamp. By uploading these collected data to the eco-efficiency assessment model (EEAM), which was developed by the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems, the manufacturing cost is calculated and provided live within SWS. Furthermore, SWS enables a set of other real-time quality assurance decision support.

## Kostenrelevante Produktionsdaten

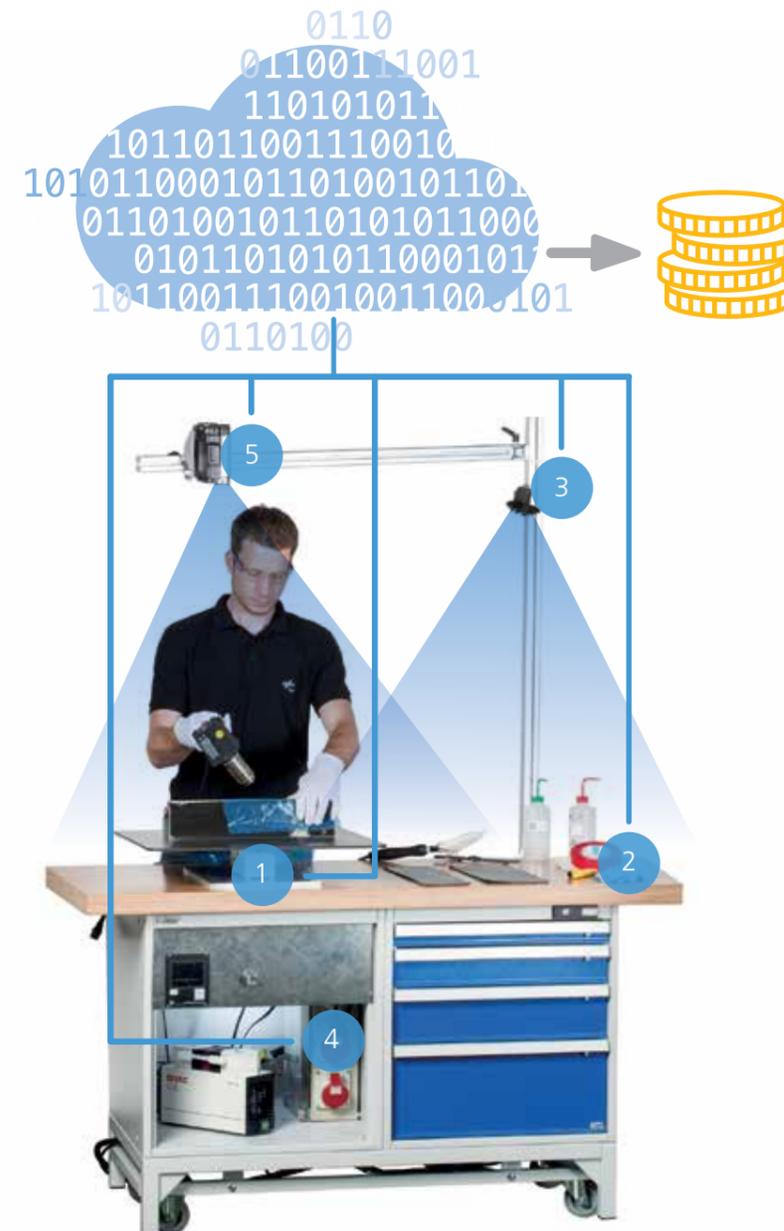
Konventionelle Kostenbewertungen der Faserverbundfertigung werden auf Basis von Daten abgeschlossener Prozesse durchgeführt. Da in der Praxis die Datenerhebung sehr aufwändig ist, werden echte Messdaten teilweise durch Annahmen ersetzt. Für die Bewertung hat darüber hinaus auch die Definition der Systemgrenzen eine besondere Bedeutung. Ein Vergleich von Produktionssystemen ist nur bei identischen Systemgrenzen möglich. Befreit von Annahmen und aufwändiger manueller Datenerhebung bietet das SWS-Konzept eine echtzeitfähige Erhebung von realen Daten. Die SWS generiert dabei alle relevanten Daten selbst unter Berücksichtigung regelbarer Systemgrenzen.

## Echtzeit-Datenerhebung

Obwohl Energie- und Auslastungsmessungen schon in vielen automatisierten Industrieprozessen implementiert oder generiert wurden, gab es vor der SWS kein allgemeingültiges Konzept zur Datenerhebung von ökonomisch relevanten Prozessgrößen mittels eines echtzeitfähigen Messsystems.

Die im Jahr 2017 entwickelte SWS für den manuellen Preforming-Prozess stellt alle relevanten Daten zur Bewertung, unabhängig vom Automationsgrad, zur Verfügung. Die SWS dokumentiert Faser- und Harzmengen sowie Betriebsstoffe, Energieverbräuche, Anlagenbetriebs- und Arbeitszeiten sowie Flächenbelegungen mit einem gemeinsamen Zeitstempel. Mit präzisen, in der SWS integrierten Waagen und mit Hilfe von materialcodierten optischen Erfassungssystemen werden die Massen der Materialverbräuche dokumentiert. Fest zugeordnete Strommesssysteme messen nicht nur den Stromverbrauch, sondern auch die Betriebszeiten der Anlagen. Die Arbeitszeiten der Mitarbeiter werden anonymisiert mittels Infrarotkameras ermittelt.

Die Verknüpfung der SWS mit dem EEAM ermöglicht die Berechnung der direkten und indirekten Kosten in Echtzeit. In CleanSky2 wird die SWS unter anderem zur Bewertung der Fertigung einer Flugzeugflügelvorderkante im Projekt New Innovative Aircraft Configurations and Related Issues (NACOR) sowie DLR-intern im Projekt SmartBlades2 implementiert.



Autor:  
Ali Al-Lami, M.Sc.



- 1 - Integrierte dedizierte Waage
- 2 - Integrierte universale Waage
- 3 - Materialcodierten Erfassungssystemen
- 4 - Strommesssystem
- 5 - Infrarotkamera

- 1 - Integrated dedicated load sensors
- 2 - Integrated universal load sensors
- 3 - Material code scanning system
- 4 - Electricity meter
- 5 - Infrared camera

# Mit Schall die Pultrusion verbessern

*With sound to a better pultrusion*

**Pultrusion ist die Analogie des Stahlgusses in der Faserverbundfertigung. Sie erlaubt die Herstellung von strangförmigen Bauteilen, in beliebiger Länge, bei nahezu gleichbleibender Qualität. Der Einsatz einer Aushärtungsüberwachung erlaubt die Optimierung der Produktivität und der Sicherung der Qualität. Genau an dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt an, welches das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adapttronik gemeinsam mit der TU Braunschweig im Rahmen eines DFG-geförderten Projektes durchführt. Durch die Entwicklung einer prozessintegrierten Sensorik zur Messung des Harzvernetzungsgrades wird eine Geschwindigkeitsregelung für die Pultrusion ermöglicht und so die Produktivität maximiert. Zusätzlich werden auf diese Weise Qualitätsabweichungen frühzeitig erkannt. So können Abweichungen vom Soll bereits in der Produktion erkannt und Ausschussbauteile genau eingegrenzt werden.**

## Summary

*As a continuous production process of composite pre-products, pultrusion becomes more important because of the growing areas of application of composite materials. To minimize the rejection rate in the pultrusion process at high process speed, both the position of the mandrel and the cure of the resin must be measured during the whole process and, if necessary, regulated.*

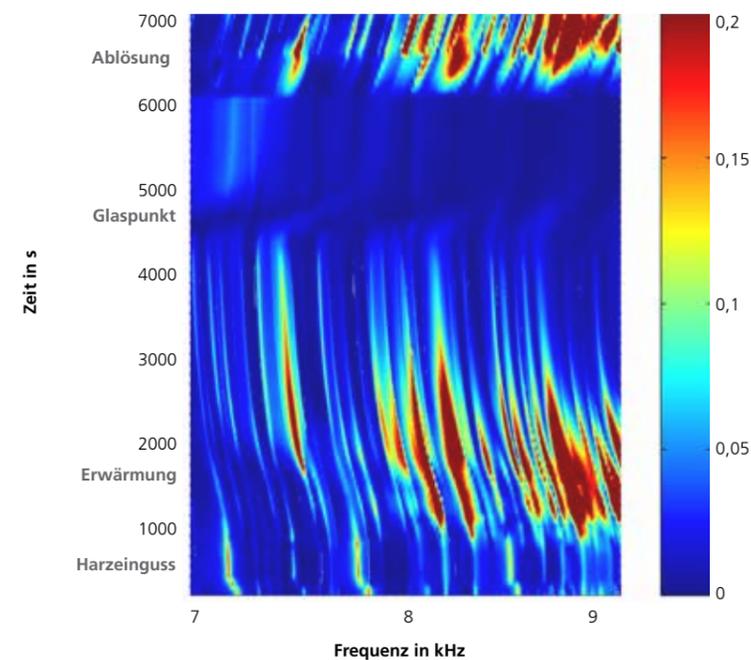
*In the ongoing research project, an inline sensor technology was developed, which allows continuous monitoring of the whole process. The production speed can thus be optimised while maintaining excellent precision and material variant levels.*

Messergebnisse der Aushärtungsüberwachung während der Aushärtung eines Epoxidharzes (als Wasserfalldiagramm dargestellt)

Measurement results of the cure monitoring system for the curing of an epoxy resin (shown as a waterfall chart)

## Mit Ultraschall durch Stahl sehen

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Aushärtung eines Epoxidharzes zu bestimmen. In der Pultrusion sind die meisten davon jedoch wegen der rauen Umgebungsbedingungen ungeeignet. Durch die starke Abrasion und die hohen Temperaturen innerhalb des Werkzeugs werden Sensoren in direktem Kontakt mit dem Pultrudat sehr schnell zerstört. Aus diesem Grund bleiben nur indirekte Messverfahren. Besonders geeignet ist hier eine Abwandlung des Verfahrens, welches im Innovationsbericht 2016 unter der Überschrift „Einer für alles – kleine Low-cost-Ultraschallsensoren überwachen alle wichtigen Parameter“ zur Messung des lokalen Aushärtegrades von Faserverbundbauteilen mittels Ultraschall vorgestellt wurde. Ultraschall kann das Werkzeug durchdringen und der veränderte Reflexionsgrad erlaubt eine Aussage über den Aushärtezustand des Werk-



stückes. Pulsgestützte Ultraschallüberwachung ist jedoch wegen der hohen Anforderungen an Messgeschwindigkeit und Messgenauigkeit teuer. Eine Alternative stellt die Ultraschallresonanzspektroskopie dar. Bei dieser Methode wird das Resonanzverhalten des Werkzeugs ausgenutzt und eine Eigenmode zwischen Werkstück und Sensor innerhalb des Werkzeugs angeregt. Die Amplitude dieser Eigenmode ist größtenteils von der Änderung der Schallimpedanz des Pultrudats abhängig und kann mit einem piezoelektrischen Sensor direkt gemessen werden. Durch diese Technik ist es möglich, den Aushärtegrad des Pultrudats ortsgenau zu bestimmen, ohne eine Veränderung an der Werkzeugoberfläche durchzuführen. Die Sensorik ist somit wesentlich robuster, langlebiger und weniger invasiv als berührende Messverfahren.

Autor:  
Dipl.-Ing. Christian Pommer



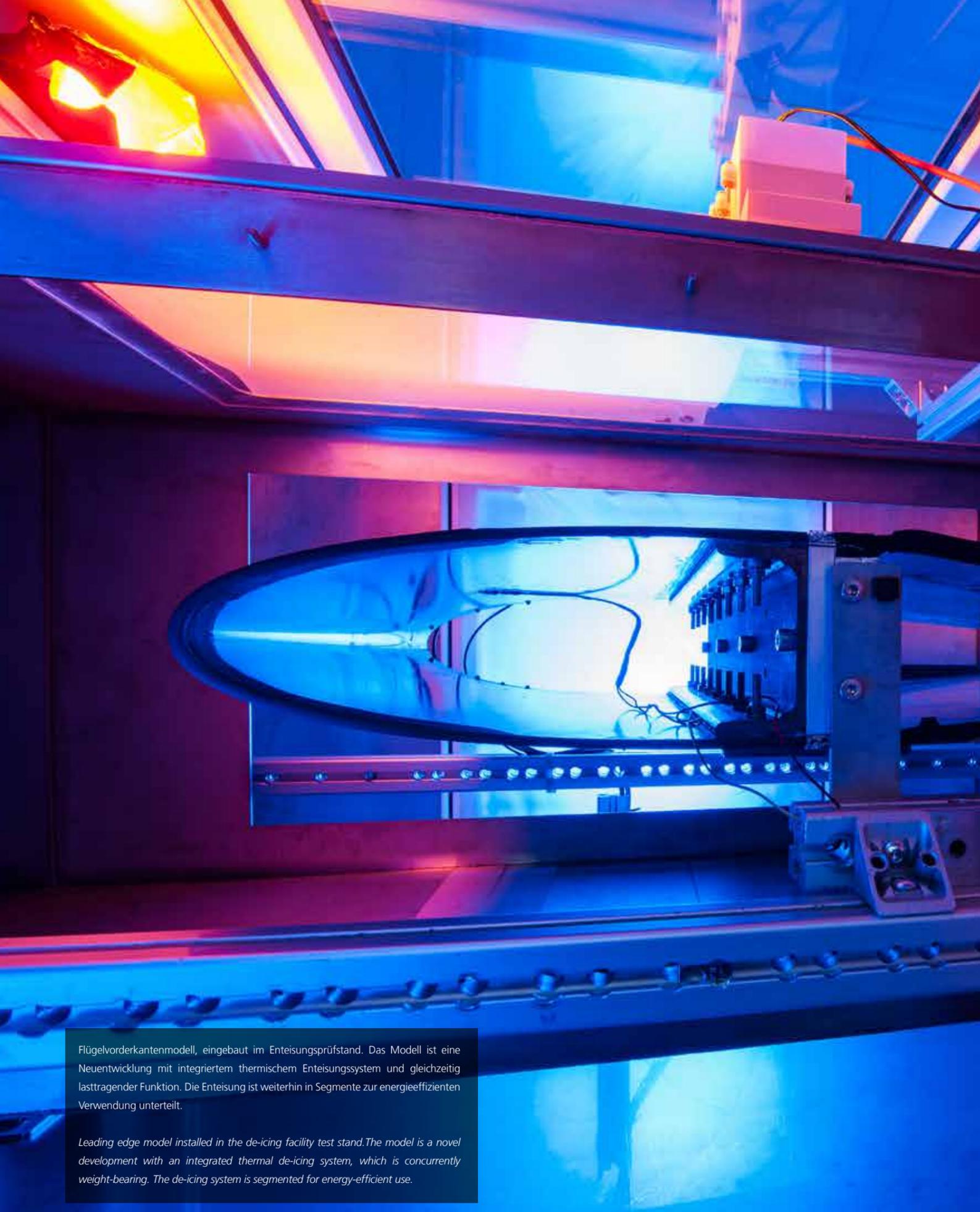
## Seit Jahren bewährte Elektronik

Für die Elektronik dieses Messsystems können gut erforschte und häufig verwendete elektrische Anlagenschaltungen verwendet werden, welche schon seit Jahren in der Radiotechnik eingesetzt werden. Dies stellt einen enormen Kosten- und Verlässlichkeitsvorteil dar. Die hierfür benötigten Komponenten werden in großer Stückzahl von einer Vielzahl von Herstellern eingesetzt, was zu sehr hohen Messgütern bei geringen Kosten führt. Die Funktionsfähigkeit der Aushärtungsüberwachung sowie der Messelektronik konnte bereits in Versuchen an einer Experimental-Pultrusionsanlage nachgewiesen werden. Aktuell werden verschiedene Sensorformen und ein erster Prototyp für eine günstige Verarbeitungshardware erprobt. Die Messmethode wurde für die Pultrusion entwickelt, ist aber auch in anderen Bereichen einsetzbar. So ist beispielsweise ein Einsatz in RTM-Verfahren denkbar.

Forschungspultrusionsanlage der TU Braunschweig

Scientific pultrusion machine owned by TU Braunschweig





Flügelvorderkantenmodell, eingebaut im Enteisungsprüfstand. Das Modell ist eine Neuentwicklung mit integriertem thermischem Enteisungssystem und gleichzeitig lasttragender Funktion. Die Enteisung ist weiterhin in Segmente zur energieeffizienten Verwendung unterteilt.

*Leading edge model installed in the de-icing facility test stand. The model is a novel development with an integrated thermal de-icing system, which is concurrently weight-bearing. The de-icing system is segmented for energy-efficient use.*

## Autark agierende Faserverbundsysteme

Dieses Zukunftsforschungsfeld umfasst Themen zu Struktursystemen mit hoher Funktionsintegration, die selbstständig eine entsprechende Zielgröße einstellen oder ermitteln können.

### **Autonomous composite structures**

*Building autonomous CFRP structures is our vision of function integration. Any active system today requires external energy, at least for control and actuation. The omission of the wiring is one of the conditions for an increasing application of function integration in structures. Our scientists know the vision and are looking for contributions to its realisation.*

Runter kommen sie (n)immer! Solarbetriebene Stratosphärenplattformen <i>Long-endurance stratosphere vehicle – solar-powered HALE platform (High Altitude Long Endurance)</i>	68
Adaptives Helikopter-Rotorblatt im Windkanal Conception, design, construction, and qualification of an adaptive helicopter rotor blade for wind tunnel tests	70
Leicht und leise – weniger Lärm in der Flugzeugkabine <i>Active-passive-hybrid noise reduction methods for novel fuselage structures</i>	72
Pneumatische Skelette – morphende Strukturen aus dem 3D-Drucker <i>New pressure-actuated morphing structures produced through 3D printing</i>	74
Aus der Tiefkühltruhe in den Windkanal <i>New methods for local ice detection</i>	76

# Runter kommen sie (n)immer! Solarbetriebene Stratosphärenplattformen

Long-endurance stratosphere vehicle – solar-powered HALE platform  
(High Altitude Long Endurance)

**Die zeitlich nahezu unbegrenzte Stationierung unbemannter Flugzeuge in der Stratosphäre (Solar-HALE: High Altitude Long Endurance) stellt eine der großen Herausforderungen in der Fliegerei dar. Treibende Kraft ist dabei die Option, kostenintensive und unter Umweltgesichtspunkten wenig nachhaltige Satelliten durch unbemannte solarbetriebene Luftfahrzeuge zu ersetzen. Auch das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik arbeitet neben diversen anderen Instituten des DLR an Lösungen hierzu. Dabei setzt das Institut insbesondere auf kleinskalige Fluggeräte, die einen besseren Kompromiss aus Aufwand und Nutzen versprechen.**

## Summary

At the German Aerospace Center (DLR), the vision of high-altitude platforms has been investigated ever since it was introduced to the aviation community in the 1980s. With the increasing efficiency of both battery and solar cells, this vision is on the verge of solid practical implementations, which would enable use cases in the fields of communication, observation, and remote sensing in various industries all around the world. For long-endurance missions, spanning over multiple days or even weeks, high-altitude platforms must have a well-balanced energy management to charge the batteries during the days and use the stored energy to stay in position during the nights.

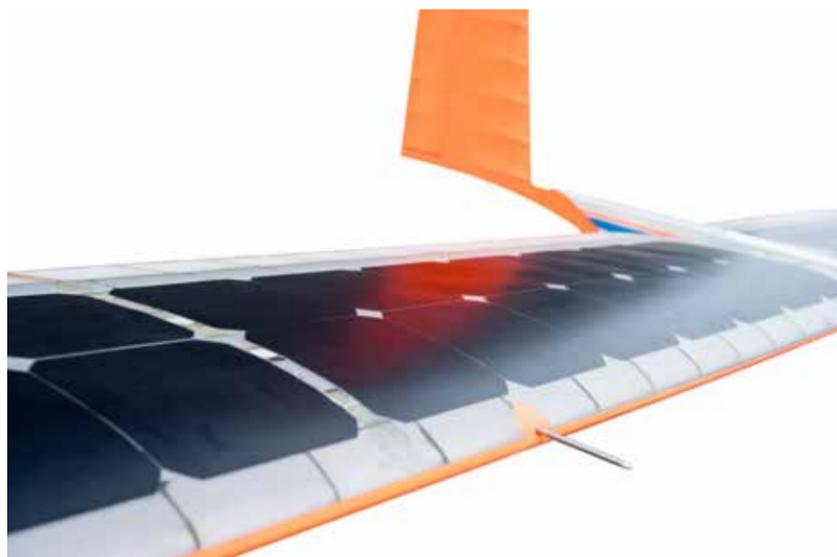
The Solar-HALE team of the DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems is designing and building a first demonstrator named "Carbon Swift" for the first overall system evaluation and first flight in summer 2017.

## Kompromissloser Leichtbau

Neben der Atmosphärenforschung ist besonders die Erdbeobachtung, z. B. zur Einschätzung von Gefährdungslagen durch Erdbeben und Überschwemmungen, von steigender Bedeutung. Auch die Koordination humanitärer Einsätze kann durch die Verfügbarkeit von Echtzeit-Informationen aus dem Krisengebiet deutlich effizienter gestaltet werden. Diverse Studien zeigen, dass die Machbarkeit einer derartigen Plattform durch aktuelle technologische Fortschritte in greifbare Nähe gerückt ist. Insbesondere die Miniaturisierung elektronischer Bauelemente und Computer sowie die deutliche Steigerung der Energiedichte von Akkumulatoren sind in diesem Zusammenhang entscheidend. Die im Flugzeugbau bekannte

Strukturintegrierte Solarzellen auf der Flügeloberseite

Structure integrated photovoltaic cells within the upper wing cover



„Breguet“-oder Reichweitenformel zeigt außerdem eine direkte Abhängigkeit der dauerhaften Stationierbarkeit vom Gewicht des Luftfahrzeugs. Gerade hier ist das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, durch Einsatz von Hochleistungs-CFK-Strukturen, gefordert, die Abflugmasse auf das minimal mögliche Limit zu reduzieren.

## „Größer“ nicht gleich „besser“

Die Studien belegen auch, dass größer nicht unbedingt besser ist und die Flächenbelastung durch Skalierungseffekte mit zunehmender Größe überproportional ansteigt. In einem gemeinsamen Ansatz mit dem Institut für Flugsystemtechnik soll der Stand des dauerhaften Fluges von Solarflugzeugen auf Basis hochwertiger, aber kommerziell verfügbarer Technik (Akkus, Solarzellen, Avionik) und extrem leichter Faserverbundstrukturen demonstriert werden, um eine frühestmögliche Nutzung dieser innovativen Perspektive zu ermöglichen.

Im Laufe des Jahres 2016 und der ersten Quartale 2017 wurde mit Hilfe studentischer Initiative ein Solar-HALE-Demonstrator entworfen und gebaut. Mit seinen gut 5 Kilogramm Gesamtgewicht sowie strukturell eingebetteten Solarzellen soll „Carbon Swift“ im Sommer 2017 zu seinem Erstflug starten und wenn möglich, aus gesetzlichen Gründen, in 300 Meter Flughöhe, autonom über eine Dauer von 36 Stunden in der Luft bleiben.

Das Solar-HALE-Team: Jörg Nickel (links), Philip Zimmermann (rechts) und ihr Baby „Carbon-Swift“, nicht anwesend: Pascal Lipke, Andreas Bärschneider

The Solar-HALE-Team: Jörg Nickel (left), Philip Zimmermann (right) and their baby "Carbon Swift", missing: Pascal Lipke, Andreas Bärschneider



Autor:  
Dipl.-Ing. Michael Hanke



# Adaptives Helikopter-Rotorblatt im Windkanal

*Conception, design, construction, and qualification of an adaptive helicopter rotor blade for wind tunnel tests*

**Die Reduktion von Vibrationen und Lärm ist ein wichtiges Ziel in der Hubschrauberforschung. Aktiv verwindbare Rotorblätter können hierzu einen Beitrag leisten, jedoch stellt die Integration der auf Zug beanspruchten Aktuatorik eine Herausforderung dar. Mit Hilfe eines neuen Rotorblattdesigns ist es gelungen, auftretende Lasten in aktiv verwindbaren Rotorblättern zu reduzieren und vor allem für eine gleichmäßige Dehnungsverteilung innerhalb der Aktuatorik zu sorgen, um somit Schäden vorzubeugen. Die Langlebigkeit aktiver Rotorblätter kann so gesteigert werden und bildet damit die Grundlage für eine gezielte und effiziente Nutzung der aktiven Verwindungstechnologie.**

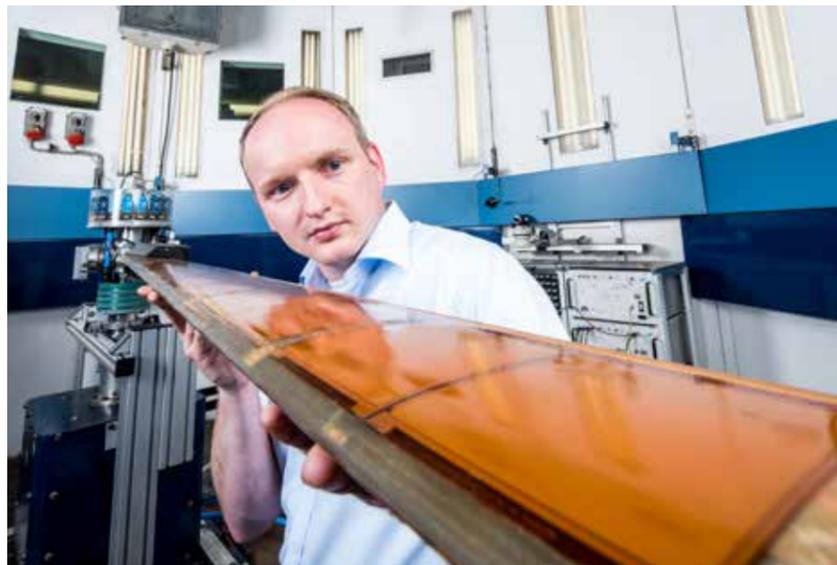
## Summary

*Actuators embedded in the skin of a helicopter rotor blade can produce a twist, which influences the propagation of the air turbulence. In this way, vibration and noise can be significantly reduced. However, the actuators are subjected to considerable loads due to the centrifugal force. Based on the DLR project STAR, the design of an active twist rotor blade has been adapted so that the loads in the actuator system can be significantly reduced and furthermore evenly distributed. In addition to a new actuator design, the use of carbon fibre composite for the spar and additional straps near the trailing edge increase the durability of a new generation of active twist rotor blades, which is the basis for a specific and efficient use of the active twist technology. A first prototype of the newly designed rotor blade has already been built. After completion of the qualification phase, a four-blade set represents the next step on the way to the planned wind tunnel test.*

## Fliehkraft vs. Aktuator

Hubschrauberrotorblätter sind enormen Belastungen ausgesetzt, die zu einem Großteil aus den Fliehkraften resultieren. Diese müssen bei aktiv verwindbaren Rotorblättern nicht nur von der lasttragenden Struktur aufgenommen werden, sondern wirken ebenso auf die zugempfindliche Aktuatorik. Eingebettet in die Haut des Rotorblattes, sind diese piezokeramischen Fasern in der Lage, das gesamte Rotorblatt zu verformen und somit Einfluss auf die Ausbreitung von Luftwirbeln zu nehmen. Das Ziel ist es, Vibrationen, Geräuschemissionen und den Bedarf an benötigter Leistung deutlich zu reduzieren.

Basierend auf den Erkenntnissen des DLR-Projekts STAR (vgl. Schulz, Riemenschneider, Mendrock, Opitz, Keimer, Kalow, *Active Twist Rotors – From the Idea to the Wind Tunnel Model*, Innovationsbericht 2012, S. 35) ist es gelungen, ein Rotorblattdesign zu finden, das die Belastung für die Piezokeramiken reduziert und den hohen Anforderungen an die Festigkeit bei gleichzeitig hoher Performance gerecht wird.



Untersuchungen der Wirksamkeit des neuen Blattdesigns im Schleuderversuchsstand

*Investigations of the efficiency of the new blade design in a centrifugal test rig*

## Design und Qualifizierung

Das neue Design umfasst verschiedene Anpassungen, sowohl auf materieller als auch struktureller Ebene. Unter anderem kommt ein neuartiges Aktuator-Layout zur Anwendung. Weiterhin ermöglicht die Kombination eines angepassten Holms aus Kohlefaser (CFK) und der Verwendung von CFK-Bändern an der Hinterkante die effiziente Nutzung des verfügbaren Bauraums. Hierbei stellt auch die Integration einer Vielzahl an Druck- und Dehnungssensoren und deren Kabeln eine große Herausforderung dar.

Die Fertigung eines Rotorblattprototyps basierend auf dem neuen Design wurde im Frühjahr 2017 abgeschlossen. Tests im Schleuderturm bestätigen die Wirksamkeit des neuen Blattdesigns. In dem Versuch werden Dehnungsverteilungen an verschiedenen radialen Positionen gemessen. Die Analyse der Daten zeigt, dass die auf das System wirkenden Lasten reduziert und gleichmäßig im Querschnitt verteilt werden. Für die weitere Qualifizierung des neuen Rotorblattes wurden neben Laboruntersuchungen auch Röntgen- und CT-Aufnahmen gemacht. Diese helfen dabei, den Fertigungsprozess in Richtung einer Standardisierung zu verbessern.

Nach Abschluss der Qualifizierungsphase stellt der Bau eines kompletten vierblättrigen Blattsatzes den nächsten Schritt auf dem Weg zum geplanten Windkanalversuch im deutsch-niederländischen Windkanal (DNW) dar.

In das Rotorblatt integrierte Aktuatorik und Drucksensorik

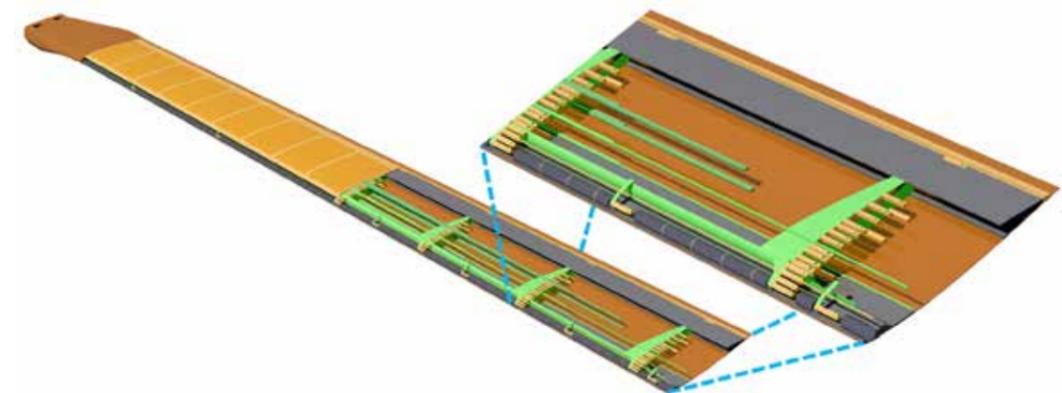
*Actuators and pressure sensors integrated in the rotor blade*



Autor:  
Dipl.-Ing. Steffen Kalow

## Prototypdesign mit komplexer Instrumentierung

*Design of the new prototype with complex instrumentation*



# Leicht und leise – weniger Lärm in der Flugzeugkabine

*Active-passive-hybrid noise reduction methods for novel fuselage structures*

**Gitterversteifte Rumpfstrukturen (Gridstrukturen) sind potenziell leichter als ihre konventionellen Pendanten in Stringer-Spant-Bauweise. Die Gewichtsvorteile gehen jedoch zu Lasten der Akustik, weil leichte und hochsteife Rumpfstrukturen den Schall sehr effizient leiten und somit hohe Störpegel in der Kabine hervorrufen können. Während Lärmreduktionsmaßnahmen für konventionelle Rumpfstrukturen seit längerem am DLR erforscht werden (vgl. Algemissen, Haase, Unruh, Misol, *Aktive Lärmreduktion im aeroakustischen Windkanal-Experiment*, Innovationsbericht 2016, S. 57), sind die vibroakustischen Eigenschaften von Gridstrukturen wenig erforscht. Es ist jedoch zu erwarten, dass die geänderten geometrischen und dynamischen Eigenschaften von Gridstrukturen auch neue Akustikmaßnahmen erfordern. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 880 forscht das DLR seit 2016 an einer Kombination aus aktiven und passiven (aktiv-passiv-hybriden) Lärmreduktionsmaßnahmen für Rumpfstrukturen zukünftiger Flugzeuge. Im Fokus stehen innovative Konzepte zur leichtbaukonformen Reduktion von tieffrequentem Kabinenlärm.**

## Summary

*Grid-stiffened panels are considered a promising lightweight alternative to conventional fuselage structures. The low transmission loss, however, may induce high noise levels in the cabin. Tailored solutions are required to provide sufficient low-frequency transmission loss with acceptable mass. A combination of active and passive (active-passive-hybrid) damping treatments is investigated at the example of a flat, grid-stiffened fuselage panel. The fuselage panel is excited by loudspeakers in such a way that the induced structural vibration and sound radiation is similar to cruise condition with a dominating turbulent boundary layer excitation. Numerical simulations are carried out to assess and optimise the performance of acoustic treatments. The research work is done within the framework of the Sonderforschungsbereich (SFB) 880. The activities started in 2016. Financial support provided by the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft – DFG) is gratefully acknowledged.*

## Maßgeschneiderte Akustikmaßnahmen

Die Umsetzung von Akustikmaßnahmen für Leichtbaustrukturen erfordert häufig einen Kompromiss zwischen Masse und Schalldämmung. Dies gilt insbesondere bei tiefen Frequenzen, weil dort die Schalldämmung direkt von der Masse abhängt (Massengesetz). Maßgeschneiderte Akustikmaßnahmen sind gefordert, um den bestmöglichen Kompromiss für ein Bauteil

Bestimmung der abgestrahlten Schalleistung des Gridpaneels mit einer Schallintensitätsmesssonde

*Measurement of the radiated sound power of the grid panel with a sound intensity probe*



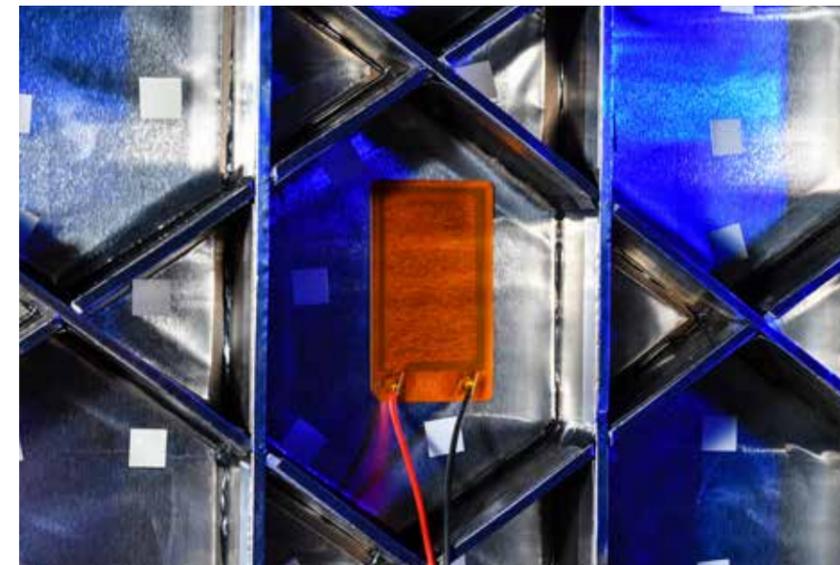
zu erzielen. Aus diesem Grund werden im Rahmen des SFB 880 aktiv-passiv-hybride Maßnahmen am Beispiel eines luftfahrttypischen Gridpaneels erforscht. Als Versuchsträger dient ein ebenes, tridirektional versteiftes Paneel, welches mit Lautsprechern in Schwingung versetzt wird. Dabei werden die Lautsprecher so angesteuert, dass sie die Anregung einer turbulenten Grenzschicht ersetzen und ein ähnliches Schwingungs- und Schallfeld wie im Reiseflug entsteht. Für diesen Lastfall werden aktiv-passiv-hybride Dämpfungsmaßnahmen experimentell erprobt. Flankierend erfolgen Simulationen mit einem Finite-Elemente-Strukturmodell, um Varianten von Akustikmaßnahmen zu bewerten und zu optimieren.

## Neue Lastpfade und Geometrie für die Akustik nutzen

Maßgeschneiderte Lösungen sind für jedes Bauteil individuell. Im Unterschied zu klassischen orthogonal versteiften Paneelen mit relativ großen Hautfeldern besitzen Gridpaneel mehr Rippen und kleinere Hautfelder. Ein wesentliches Ziel der Forschungsarbeiten ist es daher, zu untersuchen, ob eine gezielte Nutzung der geometrischen und dynamischen Eigenschaften von Gridpaneelen zu besseren Akustikmaßnahmen führt. Messergebnisse einer auf die Rippendynamik optimierten Dämpfungsmaßnahme zeigen eine Reduktion der abgestrahlten Schalleistung des Gridpaneels von bis zu 20 Dezibel pro Kilogramm in Terzbändern. Diese und andere Maßnahmen werden gegenwärtig im Rahmen des SFB 880 systematisch erforscht.

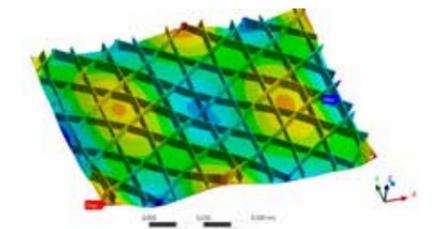
Gridpaneel mit aktiv-passiv-hybriden Dämpfungsmaßnahmen

*Grid panel with active-passive-hybrid damping*



Berechnete Schwingungseigenform des Gridpaneels aus der FE-Simulation

*Calculated vibration mode of the grid panel from FE simulation*



Autoren:  
Dr.-Ing. Malte Misol  
Maik Titze, M.Sc.



# Pneumatische Skelette – morphende Strukturen aus dem 3D-Drucker

*New pressure-actuated morphing structures produced through 3D printing*

**Die Kombination von festen Materialien und Fluiddruck kann Strukturen mit doppelten Funktionen schaffen. So sind glatte, aktiv in ihrer Form veränderliche Oberflächen erreichbar, die trotz äußerer Lasten in der gewünschten Form bleiben. Ein neuer luftdruckaktuierter morphender Flügel, der mit der PolyJet-3D-Druck-Technologie gefertigt ist und aus verschiedenen Druckzellen besteht, zeigt dieses Prinzip auf. Die Hinterkante kann sich bis  $\pm 18^\circ\text{C}$  bei 1,5 bar bewegen. Je nach Ansteuerung werden verschiedene Bewegungsmodi realisiert. Durch die gewählte Zellarchitektur sind Wölbung, Profiltiefe, Verwindung, Pfeilung und Zuspitzung einstellbar. Flugzeuge, die mit derartigen Flügeln ausgestattet sind, könnten ihre Form – ähnlich wie ein Vogel – kontinuierlich adaptieren. Entscheidend dabei ist, dass derartige Strukturen ihre Oberflächengröße ändern können. Der Flügel kann seine Größe ändern, während die Geometrie in drei Dimensionen glatt bleibt. So ergeben sich aerodynamisch vorteilhafte Strukturen.**

## Summary

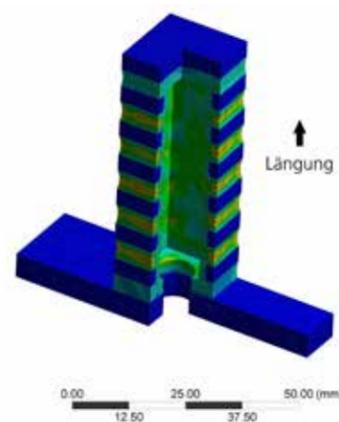
*A new morphing wing trailing edge featuring cells that elongate due to pressurised air demonstrates multiple smooth shape changes in wing camber, chord length, twist, sweep, and taper. Fabricated from PolyJet and composite 3D printing, the 400-millimetre chord prototype combines rubber-like and rigid-like digital materials in a way similar to hydrostatic skeletons found in nature. Each cell is orthotropic in stiffness, with low stiffness in the axial direction and high stiffness in the perpendicular direction, allowing the cell to elongate with low perpendicular deformation. Pressurising different combinations of cells leads to the different mode shapes. The six-cell demonstrator deflects  $\pm 18$  degrees at 1.5 bar and research is ongoing to increase size, material stiffness, and working pressure. Such a morphing device may reduce fuel and harmful aircraft emissions by adapting wing size and geometry smoothly in three dimensions in flight.*

## Zelldesign aus der Natur

In Spannweitenrichtung gibt es drei Druckzellen im oberen und drei im unteren Bereich des Flügels. Wenn eine Zelle unter Druck gesetzt wird, verlängert sie sich entlang ihrer Achse, was mit einer nur sehr geringen Querverformung einhergeht und was insbesondere zum Erreichen eines glatten äußeren Profils von Bedeutung ist. Die Zelle erreicht diese Bewegung durch eine niedrige Steifigkeit entlang ihrer Längsachse bei gleichzeitig hoher Quersteifigkeit. Eine Zelle besteht aus Gummi mit getrennten Ringen aus steifem Material. In der Natur finden sich für

Finite-Elemente-Modell, das die Dehnungsverteilung bei aufgebrachtem Druck zeigt

Cutaway diagram showing finite element strain distribution results of a pressure cell when pressurised



Druckzelle, hergestellt mit dem PolyJet 3D-Druckverfahren

Pressure cell produced by PolyJet 3D printing



derartige Strukturen verschiedene Beispiele: So nutzen Würmer, Seeanemonen, Krebstiere, Stachelhäuter und teilweise Säugetiere „hydrostatische Skelette“ zur Realisierung von Bewegungen und zur strukturellen Unterstützung. Diese Skelette haben keine festen Knochen und benutzen stattdessen Muskelfasern, die eine Flüssigkeit verschieden ausgerichtet umschließen, um ihre Länge oder Steifigkeit zu ändern. Ein weiteres biologisches Konzept ist die Bewegung von Pflanzen durch die Variation des Zelldrucks (vgl. Gramüller, *Auslegung und experimentelle Validierung formvariabler Zellstrukturen*, Innovationsbericht 2015, S. 51).

## Aus dem 3D-Drucker „gewachsen“

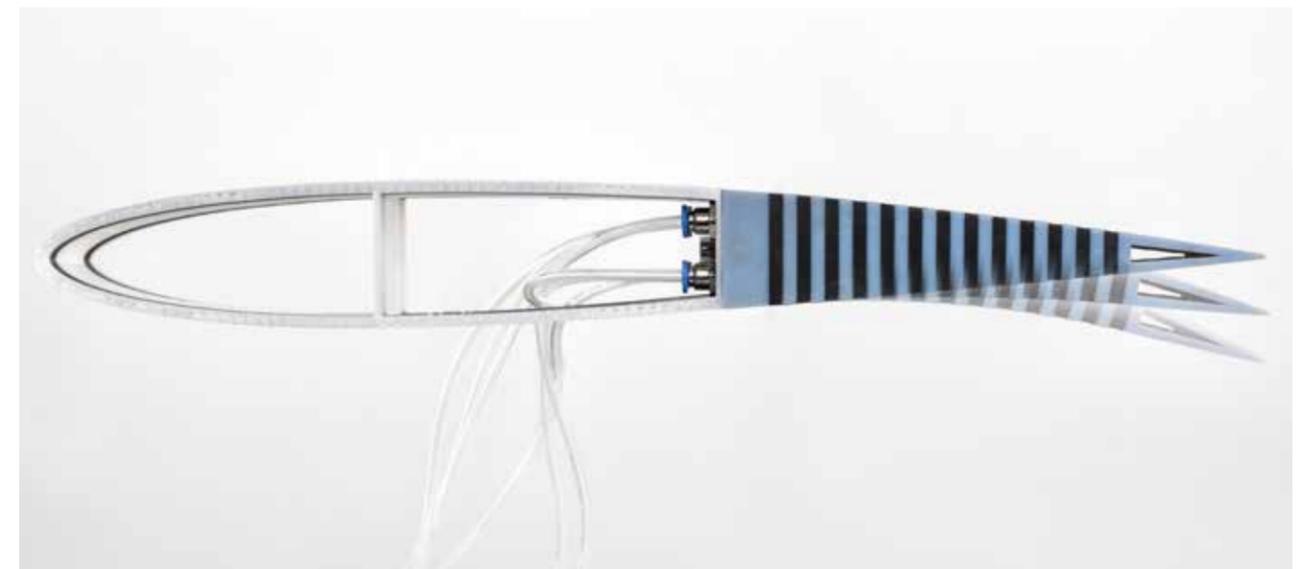
Das verwendete PolyJet-Druckverfahren nutzt flüssige Materialien, die unter UV-Licht aushärten. Durch die Kombination unterschiedlicher PolyJet-Druckmaterialien sind in einem Bauteil Bereiche mit unterschiedlichen Steifigkeiten erreichbar. Die Flügelvorderkante wurde mit einem Kohlenfaser-Kunststoff-Drucker gefertigt und ist daher relativ steif. In zukünftigen Arbeiten werden die Größe, die Materialsteifigkeit und der Luftdruck erhöht werden. Diese Arbeit ist Bestandteil aktueller Forschungsaktivitäten zur Funktionalintegration bei additiven Fertigungsverfahren.

Autor:  
Dr.-Ing. Srinivas Vasista



Druckaktivierte Zellen in der Hinterkante eines Flügelprototyps (400 mm)

Trailing edge morphing wing prototype (400 mm) with multiple integrated pressure cells



# Aus der Tiefkühltruhe in den Windkanal

*New methods for local ice detection*

**Vereisung betrifft sowohl die Luftfahrt als auch den Energiesektor. Für beide gilt: Sie reduziert die Leistungsfähigkeit von aerodynamischen Profilen, verursacht Kosten beim Einsatz von Enteisungssystemen, führt zum Stillstand von Anlagen und kann zum Sicherheitsproblem werden. Die neuen Konzepte zur lokalen Eiserkennung erkennen einen Eisansatz direkt am Ort der Vereisung. Die Vorteile liegen im kosteneffizienteren Einsatz der Enteisungssysteme, in der Erhöhung der Sicherheit und in der Vermeidung von Ertragsausfällen. Dies hilft beim Betrieb von Starr- und Drehflüglern und von Windenergieanlagen. Hier können energieintensive Enteisungssysteme frühzeitiger und zielgerichteter eingesetzt werden, wodurch die Betriebskosten reduziert, der Ertrag gesteigert oder die verbleibende Reichweite erhöht werden kann.**

## Summary

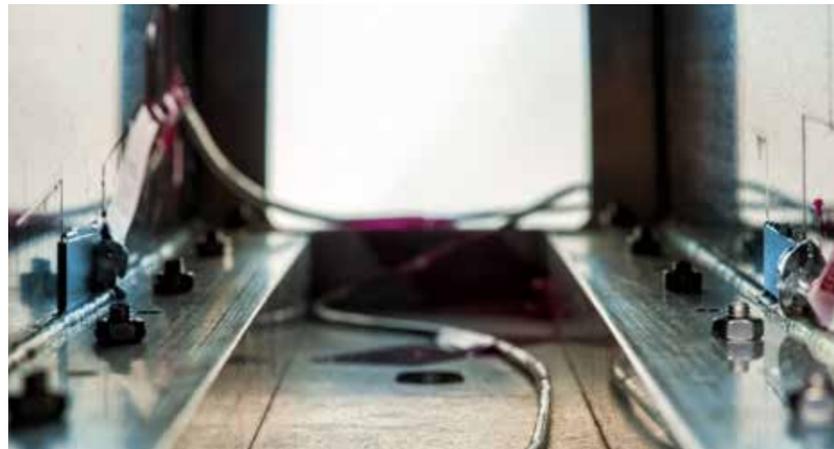
*Icing research at DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems comprises ice detection, mechanical and thermal de-icing. The new concepts enable fixed-wing and rotary aircraft as well as wind turbines to detect ice accretion locally and fast and to remove it with lower energy consumption in relation to existing thermal de-icing systems. The new ice detection technologies enable the detection directly at the place of formation by using structure-borne noise or the crystallisation heat that is set free when the water droplets turn from fluid to solid. With those direct measurements, the safety and the energy efficiency can be increased by turning on the de-icing facility punctually and turning it off when not necessary any more. Thereby, the energy losses through ice-induced aerodynamic degradation are reduced to a minimum and the energy consumption of the de-icing facility itself is limited to the essential energy amount.*

## Lokale Eiserkennung

Die Eiserkennung kann über verschiedene Ansätze erfolgen. Ausschlaggebend dafür sind die Anforderungen, welche sich an die Eiserkennung selbst richten wie auch solche, die aus den Struktur- und Betriebsbedingungen resultieren. So kann für eine äußerst schnelle Reaktion die Detektion des Vereisungsprozesses gewählt werden. Für eine Bestimmung der Eisdicke oder die Überwachung eines größeren Bereichs kommt hingegen eher die Erkennung über Körperschall in Frage. Ersteres funktioniert durch die Überwachung der Energiebilanz an einem Punkt der Struktur. Diese ändert sich durch das Anfrieren von Wasser, da durch den Phasenwechsel Wärme freigesetzt wird. Beim Körperschall werden geführte Wellen durch die Struktur geleitet, welche mit dem Eis interagieren. Auch ändert sich das gesamte Schwingverhalten einer Struktur durch den Eisansatz, wodurch dieser erkannt wird.

Innenansicht eines Flügelvorderkantenmodells aus CFK mit applizierter Sensorik zur Erkennung eines außen liegenden Eisansatzes

*Interior view of a leading edge demonstrator with applied sensors for detecting an outer ice accretion*



## Im Windkanal getestet

Je näher das erzeugte Eis dem im Flugbetrieb ist, desto genauer kann auch eine Aussage über die Fähigkeit eines Systems zur Eiserkennung und zur Enteisung getroffen werden. Daher wird die Eissensorik in einem Windkanal getestet, welcher in einer Tiefkühlzelle steht. In diesen werden Wassertropfen eingesprüht, welche von der Strömung beschleunigt werden und bis zum Auftreffen auf die Prüfkörper auf die Lufttemperatur herabgekühlt sind. Auf dem Prüfkörper gefrieren diese dann und erzeugen die charakteristischen Eisarten Klar-, Rau- und Mischeis, welche sich auch in der Luftfahrt und im Energiesektor wiederfinden lassen. Neben der Eiserkennung werden am Standort Braunschweig neue, energieeffiziente Enteisungssysteme entwickelt. Partner in aktuellen und zukünftigen Projekten sind beispielsweise Airbus, Airbus Helikopter, Fraunhofer und die Technische Universität Braunschweig. Ziel ist die Übertragung der Technologien zur Eiserkennung und Enteisung auf Strukturen wie Vorflügel und Hubschrauberrotorblätter.

Beginnender Eisansatz am CFK-Flügelvorderkantenmodell im Windkanal des Instituts für Adaptronik und Funktionsintegration der Technischen Universität Braunschweig

*Leading edge demonstrator made from CFRP in the wind tunnel (Technical University of Braunschweig – Institute of Adaptronics and Function Integration) with beginning ice accretion*



Detektor zur Erkennung des Vereisungsprozesses über die Wärmebilanz. Der Detektor kann bündig montiert werden.

*Sensor for the detection of the icing process by heat balance. The detector can be flush mounted.*



Autor:  
Dipl.-Ing. Christian Mendig



Zellular beheizbares Werkzeug und Infrarotthermografie integriert in die bestehende Anlagentechnik des Forschungsautoklaven. Das umgesetzte Regelkonzept erlaubt die thermische und zeitliche Optimierung des Aushärtprozesses.

Cellular heatable tooling and infrared thermography integrated in an existing plant engineering of the research autoclave. The implemented control concept enables thermal and temporal optimisation of the curing process.

## Nachhaltige Produktionsprozesse

Der jüngste Forschungsbereich des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik umfasst die Gesamtheit der Prozesse zur qualitätsgesicherten und ressourceneffizienten Fertigung von anpassungsfähigen Faserverbundstrukturen in industriellem Maßstab.

### **Sustainable composites processes**

*Sustainable composites processes will finally become a very important topic in the future for us. Not only the lightweight and multifunctional structure itself will support the idea of sustainability, but also the way how this structure is produced. Our scientists know about the need for further cost reduction, but very soon there will also be a demand for reduction of consumables in production and minimisation of scrap. The development of precise, effective and in-line quality automation along the production processes will be a new research field for us.*

Wir brauchen eine neue Haut! Flugzeugrumpf aus Faser-Metall-Laminat \_\_\_\_\_ 80  
*Automated production of fuselage structures made of fibre-metal laminates for the new short range*

Schneller geht's im Team! Effiziente Fertigung von Flügelschalen \_\_\_\_\_ 82  
*Team strength and focused heat for large structures – efficient wing cover manufacturing*

Kleine Serien ganz groß: vollautomatisiert und wirtschaftlich \_\_\_\_\_ 84  
*High-rate production of low-rate products – how automation can become economical even for low production rates*

Die COPRO®-Technologie – Profilpreforming voll automatisiert \_\_\_\_\_ 86  
*The COPRO® technology – preforming of profiles fully automated*

# Wir brauchen eine neue Haut! Flugzeugrumpf aus Faser-Metall-Laminat

*Automated production of fuselage structures made of fibre-metal laminates for the new short range*

**Der Einsatz von Fasermetal laminaten aus glasfaserverstärktem Kunststoff und Aluminium ermöglicht aufgrund der geringen Ermüdung, der hohen Schadenstoleranz und Restfestigkeit wesentliche Vorteile gegenüber einem Rumpfhautfeld aus monolithischen Aluminiumwerkstoffen. Dieser Hybridwerkstoff wird bereits flächig im Großraumflugzeug A380 des Airbuskonzerns an den oberen Rumpfschalen eingesetzt. Damit jedoch nicht genug: durch die Weiterentwicklung der eingesetzten Materialien und einer neuen Bauweise sollen zukünftig sehr dünne Laminat mit einer um 50 Prozent geringeren Hautdicke gegenüber dem Stand der Technik realisiert werden. Das bringt neben den genannten Vorteilen ebenso eine Gewichtsreduzierung mit sich und macht das Material für Flugzeuge der nächsten Generation interessant. Eine neue Prozesskette zur erstmaligen automatisierten Rumpfschalenfertigung dieser dünnen FML-Bauteile steht vor allem im Hinblick auf die Hautfelddimensionen im Maßstab 1:1 im Mittelpunkt der Forschungsarbeiten des DLR.**

## Summary

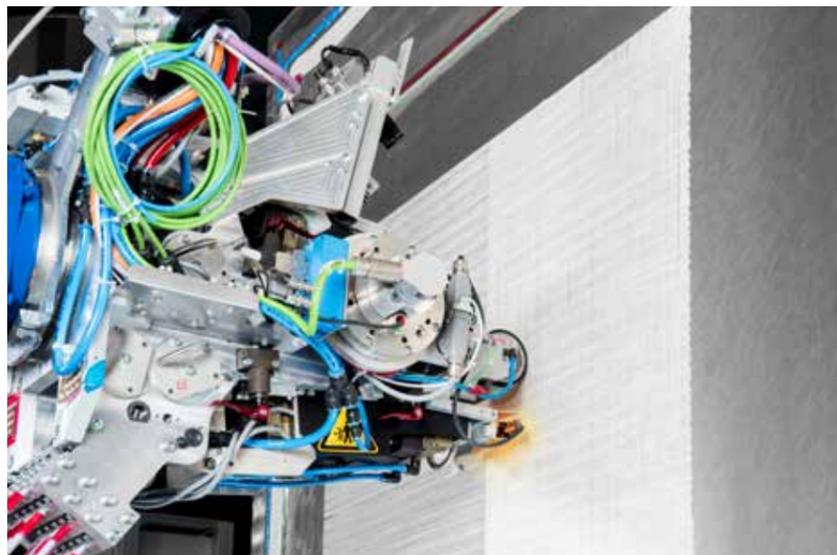
*The use of fiber-aluminum laminates allows substantial advantages over a fuselage skin made of monolithic aluminum materials due to the low fatigue, the high load tolerance and the resistance to residual stress. This material has already been used in the wide body aircraft of the Airbus Group A380 on the upper fuselage shells. However, this is not enough: due to the further development of the used materials and the construction methods, very thin FML with a 50 per cent lower skin thickness will be able to be realized in the future compared to the state of the art in the Airbus A380. In addition to the above-mentioned advantages, this also results in a weight reduction and makes this material interesting for next generation aircrafts. A new process chain for the automated fuselage shell manufacturing of these thin FML components is the focus of DLR's research work, especially with respect to scale 1:1.*

## FML ante portas!

Obwohl Bauteile aus FML bereits seit Jahren im Flugzeugbau eingesetzt werden, ist der Automatisierungsgrad in der Herstellung der entsprechenden Bauteile minimal. Das DLR fokussiert seine Forschungsarbeiten im Bereich der automatisierten Ablage- und Aushärteprozesskette mit einer integrierten Prozessüberwachung. Die Automated Fibre Placement-Technologie (AFP) stellt in diesem Zusammenhang insbesondere für stark gekrümmte Bauteile eine prozesssichere, vollautomatisierte und verschnittarme Lösung der Glaspregablage dar. Erste Untersuchungen der automatisierten Ablage haben gezeigt, dass Krümmungsradien, die in

Automatisierte Ablage von dünnen Glasfaserstreifen mittels der Automated Fibre Placement-Technologie (AFP)

*Automated layout of thin glass-fibre strips using the Automated Fibre Placement technology(AFP)*



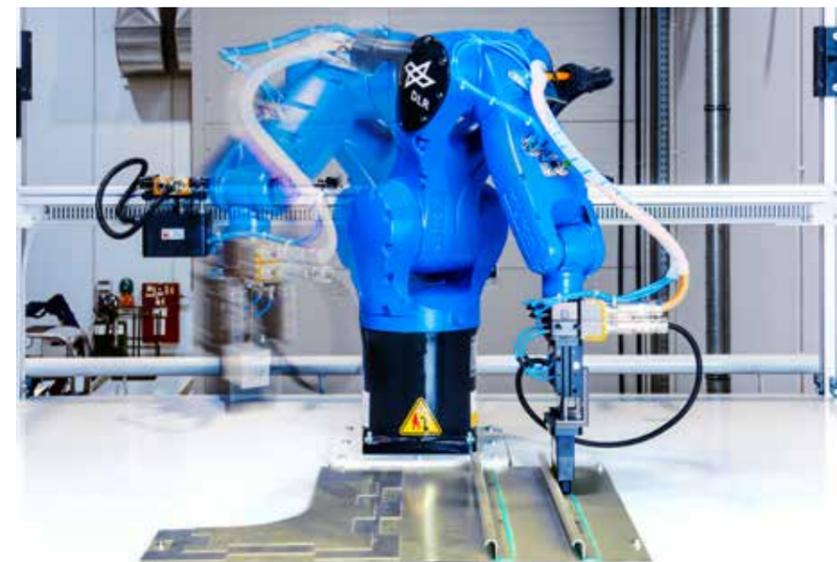
einem Rumpfsegment eines heutigen Airbus A320 vorkommen, mit der richtigen Einstellung der Prozessparameter problemlos und passgenau abgelegt werden können. Hierbei wird bei der Ablage auf eine Prozessüberwachung gesetzt, die auf der Grundlage eines Laser-Lichtschnitt-Sensors die Bauteilqualität überwacht und somit die manuellen Prüfaufwände reduzieren soll. Bei der Vorverklebung der Versteifungselemente des Rumpfsegments, wie sie Stringer und Doppler darstellen, wird auf eine Technologie zurückgegriffen, die bereits bei kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) erfolgreich eingesetzt wurde: induktive Erwärmung. Anders als beim Induktionsherd, der zu einem großen Anteil Ummagnetisierungseffekte für die Erwärmung nutzt, werden hier nur Wirbelströme genutzt. Da die Versteifungselemente aus Aluminium eine gute Leitfähigkeit besitzen, die nur um den Faktor 1,5 schlechter ist als bei Kupfer, ist der Wirkungsgrad für diesen Anwendungsfall völlig ausreichend, um eine stabile Vorverklebung zu realisieren. Bisherige Versuchsreihen zeigen Ergebnisse, die den Stand der Technik per Infrarotwärmerung, was Prozesszeiten und Verklebungsqualität angeht, deutlich hinter sich lassen.

## Quo vadis?

Die oben genannten Technologien sollen bis zum Jahr 2020 in Projekten des Luftfahrtforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) auf den Technologiereifegrad 6 entwickelt werden. Die weitere Verwertungsperspektive der entwickelten Technologien bezieht sich auf eine Verwendung in neuen Programmen im Hinblick auf den Einsatz an Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen sowie bei zukünftigen Flugzeugderivaten bzw. leistungsgesteigerte Varianten existenter Programme von bekannten Flugzeugherstellern.

Induktive Vorverklebung von Versteifungselementen

*Inductive prebonding of stiffeners*



Faser-Metall-Laminat aus nächster Nähe

*Fibre-metal laminate at close range*



Autoren:

Dipl.-Ing. Hakan Uçan

Deniz Akin, M.Sc.

Dipl.-Ing. Christian Kromholz

Dipl.-Ing. Chinh Nguyen



# Schneller geht's im Team! Effiziente Fertigung von Flügelschalen

*Team strength and focused heat for large structures – efficient wing cover manufacturing*

**Hinsichtlich der Effizienz steigen die Anforderungen an Fertigungsprozesse großskaliger Faserverbundstrukturen stetig. Die Entwicklung und Optimierung von Fertigungstechnologien ist dafür als alleiniger Lösungsansatz nicht ausreichend. Vielmehr müssen neuartige Produktionsstrategien entwickelt und erprobt werden. Im LuFo V-1-Projekt EWiMa wird daher erstmals der Faserlegeprozess mit zwei koordiniert arbeitenden Fertigungseinheiten realisiert. Zudem wird die Einbindung eines aktiv beheizten Formwerkzeugs in den Autoklavprozess betrachtet.**

## Summary

*Besides the further development of existing production technologies of large carbon fibre reinforced (CFR) structures, completely new manufacturing strategies have to be modelled and tested to counteract the striven production rate of 60 AC/month. Within the LuFo V-1 funded project "Efficient Wing Cover Manufacturing" (EWiMa), therefore the fibre layup of a wing cover with two manufacturing units working simultaneously will be tested and demonstrated for the first time using the GroFi® plant of the ZLP in Stade. Due to a simulated process, a time saving of 38 per cent is expected.*

*In addition, the use of a segmentally heatable curing tool is investigated. By using a thermal camera system, mounted in the research autoclave of the ZLP in Stade, the triggering of the heatable tool is completely made by the autoclave control system. Besides an improvement of the manufacturing quality, a time saving for the energy-intensive autoclave process and thus a reduction of the manufacturing cost is expected with this approach.*

## Mit vielen Händen schneller ans Ziel

Die für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge angestrebten Fertigungsraten von 60 AC/Monat sind in der Fertigung großflächiger Faserverbundbauteile mit heutigen Technologien wirtschaftlich nur schwer erreichbar. Neben Detailverbesserungen bestehender Fertigungstechnologien müssen daher zudem neue Produktionsstrategien entwickelt und erprobt werden. Im LuFo V-1-Projekt EWiMa erfolgt dazu erstmals die Fertigung einer Flügelschale aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) unter Verwendung zweier koordiniert arbeitender Fertigungseinheiten auf der Forschungsplattform GroFi® des ZLP in Stade. Als Demonstratorbauteil wurde ein generisches Flügelschalenmodell mit einer Grundfläche von 15 Quadratmetern und einer Spannweite von 8 Metern entwickelt. Das Laminatdesign der Flügelschale weist dabei alle Merkmale eines zukünftigen CFK-Flügels für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge auf. Auf Basis der Offlineprogrammierung für eine Einheit wurde mittels eines speziell entwickelten Algorithmus die Ablaufplanung für eine automatisierte Fertigung mit zwei Einheiten generiert. Anhand einer Simulation konnte für die vorliegende Flügelschale sowie den Einsatz zweier koordiniert arbeitender Einheiten eine Zeitersparnis von 38 Prozent ermittelt werden. Das Modell der Simulation wird mittels der realen Fertigung des Demonstrators ab Ende 2. Quartal 2017 validiert.



Koordinierte Mehrkopf-Faserablage  
Coordinated multi-head fibre layup



## Bei Bedarf lokale Wärme

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Reduzierung der Fertigungskosten und -zeiten sowie zur Steigerung der Fertigungsqualität von Großstrukturen aus CFK ist die Betrachtung des zeit- und energieintensiven Autoklavprozesses. Im LuFo V-1-Projekt EWiMa wird daher die Verwendung eines segmentweise beheizbaren Formwerkzeugs in Kombination mit einer verfahrbaren Infrarotkamera, welche sich in einem kühlbaren Druckbehälter im inneren Autoklaven befindet, verfolgt. Alle Komponenten werden über die übergeordnete Recheneinheit MASTERBOX in die Regelung des Forschungsautoklaven des ZLP in Stade eingebunden. Die ersten Untersuchungen des segmentweise beheizbaren Flügelwerkzeugs zeigen ein gutes Regelverhalten und können die Ergebnisse der Vorversuche bestätigen: Die Temperaturunterschiede über der Länge und der Dicke des Werkzeugs können innerhalb eines Toleranzbandes gehalten werden. Die endgültige Definition des Toleranzbandes wird Anfang 3. Quartal 2017 festgelegt, wenn das Werkzeug mit einem vollständigen Laminat im Forschungsautoklav mit dem oben beschriebenen System ausgehärtet wird.

In die Autoklavregelung eingebundenes, beheiztes Formwerkzeug

*Heatable tool, integrated in the autoclave control unit*



Automatisierte Faserablage  
Automated fibre placement process



Autoren:  
Dipl.-Ing. Dominik Delisle  
Dipl.-Ing. Hakan Uçan  
Markus Schreiber, M.Sc.



# Kleine Serien ganz groß: vollautomatisiert und wirtschaftlich

*High-rate production of low-rate products – how automation can become economical even for low production rates*

**Je höher die Stückzahl, desto größer der Bedarf an Automation. Was bei der Produktion von 2.000 Pkws am Tag unumgänglich ist, will für 750 Flugzeuge im Jahr wohl überlegt sein. Dennoch bietet Automation viele Vorteile gegenüber einer händischen Fertigung. Reproduzierbarkeit, Planbarkeit und Geschwindigkeit sind drei davon. Doch hohe Kosten für Anlageninvestitionen rentieren sich nur bei hohen Stückzahlen. Die logische Folgerung: Industrie 4.0 scheint auch der Schlüssel zur dritten industriellen Revolution im Faserverbund-Flugzeugbau zu werden.**

## Summary

*The higher the production rate, the higher the need for automation. But also for lower rates, automation is beneficial when it comes to reproducibility and precision. Aircraft parts are usually built shipset-wise, which means that every other produced part is a different one. The only effective way to organise logistics and production planning for lot size 1 is a dynamically balanced line with vertical and horizontal communication. This means that all data concerning the current status of product and machine must be available for every other part of the process including management, customer, and service provider. Also process calibration becomes important when there is no way for process initialisation after start-up because of differing parameters and initial conditions for each part.*

*Transparent processes, crosslinked communication of conditions, self-organised and balanced production lines are mandatory for lot size 1 production of aircraft parts, which is the key for economical production.*

## Losgröße 1

Grundsätzlich gibt es nur wenige Gleichteile in Flugzeugen. Spantsegmente sind alle lang und gekrümmt, aber eben auch verschieden lang und verschieden stark gekrümmt. Die Rippen eines Leitwerks sind eigentlich einfache Platten mit Versteifungen, Löchern und Anschlüssen – nur eben in verschiedenen Größen.

Aber was ist eigentlich so schwer daran, nacheinander verschiedene Faserverbund-Bauteile automatisiert herzustellen? Natürlich benötigt man verschiedene Formen, Greifer, Halbzeuge und Hilfsstoffe. Und man benötigt die richtigen Programme, CAD-Daten und Parameter. Und man benötigt eine Logistik, die alles zur rechten Zeit an den rechten Ort bringt.

Damit ist eine Anlage imstande, nacheinander Spantsegmente verschiedener Längen und Krümmungen zu produzieren, gefolgt von Rippen für Seitenleitwerk, Höhenleitwerk und Flügel. Auch Schalentteile für Klappen, Ruder und Leitwerke können so realisiert werden. Oder doch nicht? Warum keine chargenweise Produktion auf einer Anlage? Flugzeugteile werden i. d. R. pro Flugzeug als „Shipset“ gebaut und geliefert, um weiteren logistischen Aufwand



Justieren der Sensorik eines Multifunktions-Endeffektors  
*adjusting sensors of a multifunctional end effector*

und Lagerflächen gering zu halten. Das erleichtert auch die Produktionsplanung und -programmierung, da in festen Sequenzen produziert werden kann. Aber was passiert, wenn ein Bauteil fehlerhaft ist und nachproduziert werden muss? Wie können Wartungsintervalle eingeplant werden? Eine dynamisch getaktete Prozesskette erlaubt, dass je nach Produktbedarf und Anlagenverfügbarkeit die passende Aktion startet. Die Daten dafür müssen die vernetzte Anlage und das vernetzte Produkt liefern, die ihren derzeitigen Status genau kennen.

## Kalibrieren statt Einfahren

Eine weitere Herausforderung ist es, dass Prozesse nicht richtig eingefahren werden können, wenn für jedes Bauteil andere Parameter und Ausgangszustände gelten. Hier ist es wichtig, die Anlagenparameter bauteilneutral erfassen zu können, um vor einem Prozessschritt den Anlagenzustand bewerten und die Prozessparameter kalibrieren zu können. Entscheidend ist die Kommunikation zwischen Anlage, Bauteil, Bediener, Auftragsmanagement und auch Serviceanbieter, also die Kernaspekte von Industrie 4.0: die horizontale und die vertikale Integration. Sie ermöglichen Losgröße 1 und damit Auslastung und wirtschaftlichen Betrieb von Großserienanlagen auch für Kleinserienbauteile.

Autoren:  
Dipl.-Ing. (FH) Sven Torstrick  
Ingmar Hessen, M.Sc.



Flexible Produktion mit Losgröße 1 auf der RTM-Prozesskette „Evo“

*Flexible lotsize-1-production on RTM-processchain „Evo“*



# Die COPRO®-Technologie – Profilpreforming voll automatisiert

*The COPRO® technology – preforming of profiles fully automated*

**Die COPRO®-Technologie (Continuous Preforming for Composite Profiles) ist ein am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickeltes Verfahren für die effiziente Fertigung von gekrümmten Faserverbundprofilen. Sie stellt eine wirtschaftliche Alternative zu den etablierten Wickel-, Flecht- und Pressverfahren dar und ist die einzige bekannte Fertigungstechnologie, die auf die Flexibilität und Effizienz des Rollformens setzt. Mit ihr lassen sich selbst komplexe Faserverbund-Profilgeometrien wie z. B. Spante, Stringer und Dachspriegel kontinuierlich fertigen und den etablierten Konsolidierungsprozessen zuführen. Integriert in die RTM-Prozesskette stellt die Technologie in Verbindung mit trockenen Faserhalbzeugen eine zukunftssträchtige Möglichkeit zur CFK-Bauteilfertigung auch in den Serienprozessen des Automobil- und Flugzeugbaus dar.**

## Summary

*DLR has invented and developed a novel production process for composite profiles. The COPRO® technology is based on a roll forming process and combines several sequential production steps into one continuous process to form complex 3D-variable profile preforms for stringers, frames, spars, roof and floor members or side sills with various cross sections. These profiles are made to suit all available injection and infusion processes. The technology can process carbon, glass, or aramid fibres as well as thin metal sheets for hybrid applications. The technology was spun off into the company COPRO® Technology GmbH and provides machines and services for the efficient manufacturing of composite profiles for aerospace and automotive applications.*

## Flexibilität für die Serie

Die automatisierte COPRO®-Technologie integriert die üblicherweise handlingintensiven sequenziell ablaufenden Produktionsschritte eines roboter- oder pressenbasierten Prozesses in einen kontinuierlichen Schritt. Dadurch reduzieren sich die Verarbeitungsschritte, in denen das Material geschädigt werden kann und die Zykluszeiten werden verkürzt. Durch die stufenlose Variation der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den rotierenden Walzenpaaren können textile Profilpreforms mit frei einstellbaren Krümmungsradien realisiert werden.

COPRO®-Funktionsdemonstrator zur Fertigung von Spantpreforms

*COPRO® functional demonstrator for the production of frame preforms*



Eine Anpassung an unterschiedliche Profilgeometrien ist durch die Modulbauweise und programmierbare Konfiguration der Rollformtechnologie in kurzer Zeit möglich. Die Fertigung von ganzen Bauteilfamilien ist so mit niedrigen Investitionskosten möglich. Die Preformingkosten können gegenüber einer sequenziellen Prozessfolge um bis zu 35 Prozent gesenkt werden. Mit der COPRO®-Technologie können Profilquerschnitte wie C, Z, T oder  $\Omega$  im kontinuierlichen Fertigungsprozess für Stringer, Spante, Dachspriegel etc. hergestellt werden. Die gleichzeitige Verarbeitung von mehreren Lagen ist dabei genauso möglich wie In-line-Integration von Verstärkungslagen oder Patches. Für Hybridanwendungen ist auch eine gleichzeitige Verarbeitung von Glasfaser-, Aramid- und Carbonfaserhalbzeugen oder auch Metallbändern möglich. Über Funktionsdemonstratoren konnte die Technologie sowohl für Flugzeugspante als auch Karosserieprofile validiert werden.

## DLR-Ausgründung COPRO Technology GmbH

Um die Technologie der Industrie verfügbar zu machen, haben deren Entwickler das DLR Spin-off COPRO Technology GmbH gegründet. Über die Ausgründung bieten die Gründer Maschinen, Bauteile und Dienstleistungen zur effizienten Fertigung von Faserverbund-Profilbauteilen auf Basis kundenspezifischer Anforderungen für Luftfahrt- und Automotiveanwendungen an. Die COPRO Technology GmbH wurde für die JEC World 2017 als eines von 10 internationalen Start-ups für den Startup Booster nominiert und präsentierte sich dort in einem eigenen Start-up-Bereich.

Sensorik zum qualitätsgesicherten Rollformen

*Sensors for quality controlled roll forming*



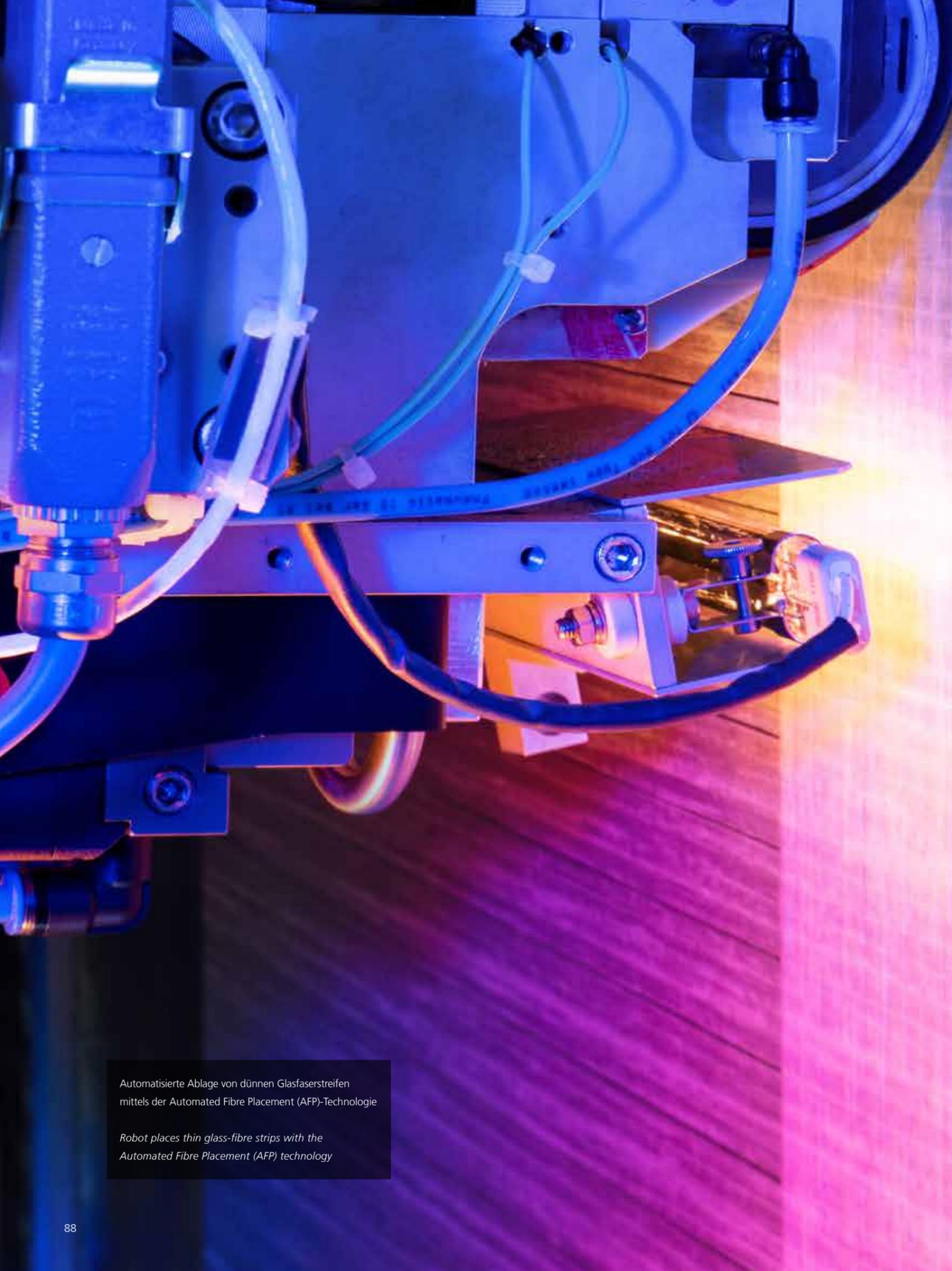
Ausgehärteter Spant

*Frame after curing*



Autoren:  
Dipl.-Ing. Arne Stahl  
Dipl.-Ing. Henrik Borgwardt





Automatisierte Ablage von dünnen Glasfaserstreifen mittels der Automated Fibre Placement (AFP)-Technologie

*Robot places thin glass-fibre strips with the Automated Fibre Placement (AFP) technology*

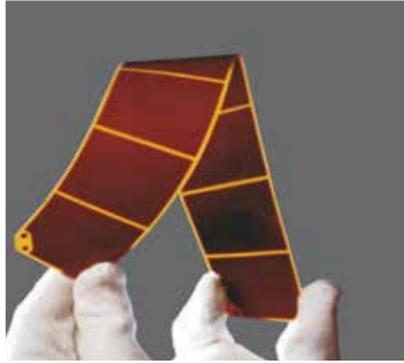
## Das Institut im Detail

In den Innovationsfeldern, sechs Fachabteilungen und Schwerpunkten der Anwendungsforschung erarbeitet das Institut eine Vielzahl von Veröffentlichungen sowie Patenten. Strategische Partnerschaften und Kooperationen mit mehreren Universitäten ermöglichen eine breit gefächerte Lehrtätigkeit.

### *The institute in detail*

*In the fields of innovation, six departments and core themes of applied research, the institute is working on a wealth of publications and patents. Strategic partnerships and cooperation with several universities enable wide-ranging teaching activities.*

Abteilungsprofile <i>Departments</i>	90
Schwerpunkte der Anwendungsforschung <i>Key areas of applied research</i>	96
Selbstorganisierte multifunktionale Strukturen für den adaptiven Leichtbau <i>Self-organising multifunctional structures for adaptive lightweight constructions</i>	102
Veröffentlichungen 2016–2017 <i>Publications 2016–2017</i>	104
Patente 2016–2017 <i>Patents 2016–2017</i>	106



# Multifunktionswerkstoffe

*Multifunctional Materials*

## Summary

*The department of Multifunctional Materials is doing research on the development, characterisation, and qualification of advanced fibre composite materials. New materials with superior properties are a prerequisite for technological innovations. Especially the integration of new functionalities is the key to further enhance the competitiveness and application range of composite materials. The department of Multifunctional Materials operates facilities for static and dynamic testing of materials and structures. In combination with a well-equipped thermoanalysis lab and long-standing experience in non-destructive testing with ultrasound, new material systems from coupon level and beyond can be evaluated.*

## Vom Werkstoff zum intelligenten Materialsystem

Die Abteilung Multifunktionswerkstoffe konzentriert sich auf die Entwicklung, Charakterisierung und Qualifizierung von Faserverbundwerkstoffen mit überlegenen Eigenschaften und neuen Funktionalitäten. Beispielsweise werden durch die Konditionierung von Harzen mit nanoskaligen Partikeln mechanische Kennwerte, Brandeigenschaften und Prozessierbarkeit entscheidend verbessert. Darüber hinaus werden weitere Funktionswerkstoffe mit sensorischen und aktuatorischen Eigenschaften für die Integration in adaptive Verbundstrukturen erschlossen. Das Arbeitsgebiet erstreckt sich dabei von sehr grundsätzlichen Untersuchungen im Bereich der Carbon Nano Tubes (CNTs) bis zur Entwicklung serienreifer Piezokomposite in Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Gemeinsam mit internationalen Partnern und in interdisziplinären Wissenschaftler-Teams fokussiert sich die Forschung auf folgende Bereiche:

- Faserverbundwerkstoffe & Nanokomposite
- Smart Materials
- Structural Health Monitoring (SHM)
- Werkstoffcharakterisierung

## Kompetenzen

Die Abteilung Multifunktionswerkstoffe betreibt Anlagen zur statischen und dynamischen Prüfung von Werkstoffen und Strukturen. In Verbindung mit einer umfangreich ausgestatteten Thermoanalyse sowie den Kompetenzen in der zerstörungsfreien Ultraschallprüfung können neue Werkstoffsysteme – vom Halbzeug bis zum Coupon und darüber hinaus – bewertet werden. Die Prüftechniken werden in Richtung Prozessüberwachung und Structural Health Monitoring (SHM) von Faserverbundstrukturen in Fertigung und Betrieb weiterentwickelt.

Leistungsprofil:

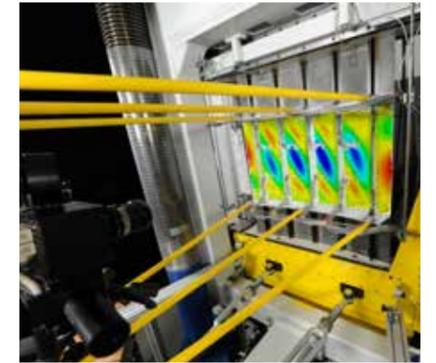
- Untersuchung neuer textiler Halbzeuge
- Verbesserung und Entwicklung neuer Injektionsharze
- Nanotechnologie in Faserverbundwerkstoffen (Nanocomposites)
- Naturfaserverstärkte Kunststoffe
- Smart Materials
- Piezokomposite
- Structural Health Monitoring (SHM)
- Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (NDT)
- Statische und dynamische Prüfung von Werkstoffen und Strukturen
- Thermoanalyse und Mikroskopie



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Peter Wierach

# Strukturmechanik

*Structural Mechanics*



## Vom Phänomen über die Modellbildung zur Simulation

Die Abteilung Strukturmechanik konzentriert sich auf die Entwicklung neuer Simulationsmethoden und -werkzeuge, die sich in den gesamten Berechnungsprozess effektiv integrieren lassen und damit im Rahmen eines Concurrent/Integrated-Engineering-Konzepts bereits in der frühen Entwurfsphase anwendbar sind. Dabei werden Methoden für den simulationsbasierten Entwurf und die Modellierung des Lebenszyklus von Leichtbaustrukturen der Luft- und Raumfahrt, der Verkehrstechnik und der Windenergie entwickelt. Gleichzeitig steht die experimentelle Validierung der neuen Methoden im besonderen Blickpunkt, da die Abteilung mit ihren Versuchsanlagen herausragende Möglichkeiten und Erfahrungen auf diesem Gebiet hat. Gemeinsam mit internationalen Partnern und in interdisziplinären Wissenschaftler-Teams fokussiert sich die Forschung auf folgende Bereiche:

- Schnelle und genaue Entwurfsmethoden
- Innovative Prüf- und Messverfahren
- Virtuelle Strukturen für den ganzen Lebenszyklus

## Kompetenzen

Die Abteilung Strukturmechanik entwickelt neue Analysemethoden (numerisch und experimentell) für Faserverbunde von der Material- bis zur Gesamtstrukturebene.

Leistungsprofil:

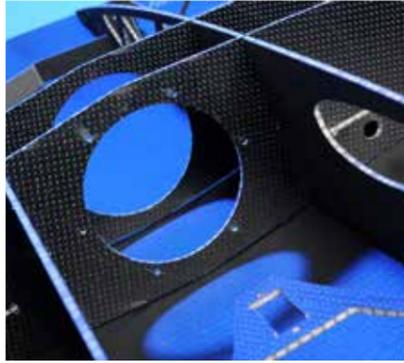
- Festigkeitsanalyse (3D-Verbunde, 2D-Methoden)
- Strukturelle Stabilität (Nachbeulverhalten, Imperfektionstoleranz, dynamisches Beulen, Robust Design)
- Schadenstoleranz (Versagenskriterien, Impact, Restfestigkeit, Degradation, Ermüdung)
- Effects of Defects (EoD), u. a. Faserwelligkeiten und Poren
- Fertigungsprozess-Simulation und „As Built“-Bewertung (z. B. Aushärtung, Schwindung, Verzug, Eigenspannungen)
- Toleranzanalyse unter Berücksichtigung probabilistischer Streuungen und Unsicherheiten
- Thermalanalyse/Thermomechanik (z. B. Berechnungsmodelle für thermisch und thermomechanisch hoch belastete Bauteile)
- Multiskalenansätze (u. a. Global-Local, Submodellierung)
- Multiphysikalische Analysen (z. B. thermisch-chemisch-mechanisch)
- Methoden und Prozessketten für den effektiven Gesamtentwurf (u. a. Flugzeug, Rotorblatt von Winfkraftanlagen)
- Mess- und Versuchstechnik für phänomenologische, validierende und qualifizierende Versuche (z. B. Beulanlage, Spantbiegeversuch, dynamischer Fallprüfstand, 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



# Funktionsleichtbau

Composite Design

## 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 electrical conductivity, acoustic noise absorption, information transmission, etc.

## 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
- Bauteil-, Werkzeug- und Anlagendesign für eine effiziente und kostengünstige CFK-Produktion
- Multifunktionale Strukturen in Faserverbundbauweise

## Kompetenzen

Am Ende der Prozesskette steht die Konstruktion, zu der die Realisierung eines montagegerechten Toleranzmanagements und eines geeigneten Werkzeugkonzepts zählen. 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:

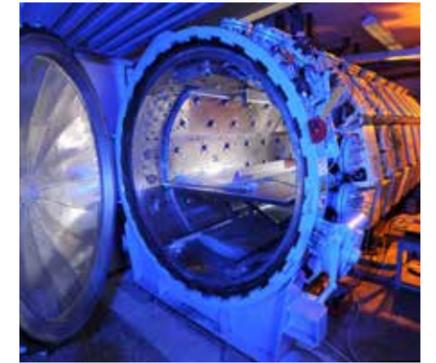
- Funktionsbauweisen, Konstruktion und Berechnung
- Design mit Funktionswerkstoffen
- Kinematische Mechanismen
- Probabilistik
- Formvariable Strukturen
- Entfaltbare Strukturen
- Bionik
- Hybride Konzepte



Abteilungsleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

# Faserverbundtechnologie

Composite Technology



## Summary

The department of Composite Technology undertakes research on the development and assessment of tailored composite manufacturing strategies. Research activities have their focus on reproducible preforming technologies, process-optimised tooling concepts, intelligent infusion strategies, process-adapted thermal management, and detailed cost assessment concepts.

The increasing degree of structural integration without increasing production risks is one of the key enablers of future composite applications. To achieve this goal, our approach is to monitor all critical production parameters and provide methods to automatically compensate identified process deviations for all relevant production scenarios.

## Fertigungskonzepte für unterschiedliche Produktionsrandbedingungen

Die Faserverbundtechnologie erforscht und entwickelt Fertigungsprozesse sowie Werkzeug- und Anlagenkonzepte für endlosfaserverstärkte Hochleistungsbauteile unter Berücksichtigung der kundenspezifischen Produktionsrandbedingungen. Die Bandbreite der Forschung erstreckt sich dabei von kostenoptimierter Massenproduktion für Automotive-Anwendungen bis zu gewichtsoptimierten Leichtbaustrukturen für die Luft- und Raumfahrt. Durch eine Integration von Zusatzfunktionen und eine Reduktion des Montageaufwands wird insbesondere kostenseitig die Attraktivität der Faserverbundkomponente erhöht.

## Kompetenzen

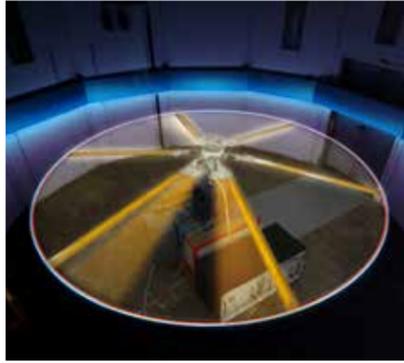
Aktuelle Forschungsaktivitäten sind insbesondere auf die Reduktion der Fertigungskosten durch Prozessautomatisierung, energiesparende Prozessanlagentechnik, verkürzte Prozesszeiten, prozessbegleitende Qualitätsüberwachungsmaßnahmen und die Einbindung nutzungsoptimierter Halbzeuge ausgerichtet. Darüber hinaus wird schwerpunktmäßig die Leistungssteigerung von Faserverbundkomponenten durch die prozesstechnische Einbindung innovativer Faser- und Matrixhalbzeuge und die Umsetzung strukturmechanisch optimierter Bauweisen untersucht.

Leistungsprofil:

- Umsetzung optimierter Bauweisen in Demonstratoren und Testbauteilen
- Fertigungstechnische Erprobung innovativer Faser-, Matrix- und Binderhalbzeuge
- Entwicklung optimierter (z. B. energie-, kosten- und zeitsparender) Formwerkzeuge, Anlagen und Prozesse
- Entwicklung qualitätsgesicherter Fertigungsketten
- Fertigungskonzepte für hochintegrale Multifunktionsbauteile
- Abschätzung von Fertigungskosten und Erarbeitung von Kostenoptimierungsstrategien
- Prozessautomatisierung



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Markus Kleineberg



# Adaptronik

Adaptronics

## Summary

Since 1989, the department of Adaptronics 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, control strategies, and power conditioning, electronics across all lines of business can be realised. Applications range from space systems to fixed-wing and rotary-wing aircraft, automotive, optical systems, machine tools, medical systems, and infrastructure.

An adaptive system has the capability of responding to changing environmental and operational conditions (such as vibrations and shape change). 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.

## Von der Struktur zum adaptiven System

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, die Strukturwerkstoffe, verteilte Sensorik und Aktuatorik sowie optimierte Regelungs- und Leistungselektronik in sich vereinen, quer durch alle Branchen realisiert werden. Die Anwendungen reichen von Raumfahrtssystemen zu Starr- und Drehflüglern, von Verkehrssystemen zu optischen Systemen, von Werkzeugmaschinen zu Robotern. Ein adaptronisches System hat die Fähigkeit, auf veränderliche operationelle Bedingungen (wie z. B. Schwingungen oder Formänderungen) zu reagieren. Mikroprozessoren analysieren die Signale der Sensoren und verwenden integrierte Regelungsalgorithmen zur Ansteuerung der Aktuatoren, um so lokal Kräfte/Verformungen/Dämpfung zur Anpassung des elasto-mechanischen Strukturverhaltens einbringen zu können.

Innerhalb von nationalen und internationalen interdisziplinären Teams fokussiert die Abteilung Adaptronik ihre Forschung auf folgende Gebiete:

- Aktive Vibrationsunterdrückung (z. B. bei Parallelrobotern, Antennen)
- Aktive Lärmreduktion (z. B. in Magnetresonanztomografen, CFK-Rümpfen)
- Aktive Gestaltkontrolle (z. B. für Hochauftriebssysteme, Rotorblätter)
- Autark agierende Systeme (z. B. Energy Harvesting, elektromechanische Netzwerke)

## Kompetenzen

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

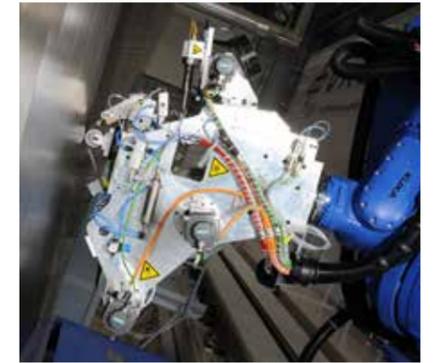
- Experimentelle Methoden für strukturdynamische und vibroakustische Systemanalyse
- Experimentelle Verformungsanalyse für große Strukturen
- Entwicklung von Sensor- und Aktuatorssystemen
- Modellierung und Simulation komplexer adaptronischer Systeme
- Reglerentwicklung und -implementierung
- Systemintegration und Validierung
- Demonstration adaptronischer Systeme und deren Komponenten



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

# Verbundprozesstechnologie

Composite Process Technology



## Für den nachhaltigen Gesamtprozess

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) bietet die Möglichkeit, Projekte und Forschungsaufgaben unter Berücksichtigung der industriellen Anwendung in realistischen Szenarien und Maßstäben auszuführen. Durch die Simulation und reale Ausführung neuer Produktionsanlagen können Effekte erforscht werden, welche typischerweise in der Skalierung der Ergebnisse der Grundlagenforschung in die späteren Serien auftreten. Zudem können so bereits vor der Serienproduktion Aussagen über die Robustheit der jeweiligen Prozesse getroffen und Abhilfen entwickelt werden. Das Hauptziel dabei ist, das für ein Bauteil optimale Produktionsverfahren in Bezug auf Qualität, Kosten, Fertigungszeit und Ressourceneffizienz zu finden. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der Forschung, den Produktionsanlagenherstellern und den Endanwendern ist Voraussetzung für einen schnellen Transfer von Forschungsergebnissen aus dem Institut in Serienanwendungen

## Kompetenzen

Die Abteilung Verbundprozesstechnologie stellt den Großteil der Mitarbeiter des ZLP in Stade. Sie führt Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Multikopf-Faserablage, der automatisierten RTM-Fertigung und qualitätsgesicherter Aushärteprozesse durch. Die Abteilung ist zudem für den Betrieb der folgenden drei Großanlagen des ZLP Stade verantwortlich:

- GroFi: szenarioflexible Großanlage für kombiniertes Fibre Placement und Tapelegen. Bauteilgröße bis zu 18 Meter x 5,5 Meter Durchmesser; bis zu acht koordiniert arbeitende Legeplattformen für hohe Ablageraten
- EVo: voll automatisierte Produktionslinie für FVK-Großserienbauteile in Preforming/RTM-Technologie; Bauteilgrundriss bis zu 2 Meter x 2,5 Meter
- Balu: Forschungsautoklav für qualitätsgesicherte und ressourceneffiziente Aushärteprozesse; Beschickungsmaße 20 Meter x 5,8 Meter; Temperaturen bis 420 °C

Leistungsprofil:

- Prozessautomatisierung
- Prozessüberwachung und Fehlermanagement
- Entwicklung von multifunktionalen Endeffektoren und zugehöriger Peripherie
- Interaktion von Formwerkzeug, Prozessgut und Endeffektor
- Kombination von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Ablageprozessen
- Steuerung & Optimierung von Mehrkopf-Faserablageprozessen
- Multifunktions-Formwerkzeuge
- Prozessdaten-Management

## Summary

The department of Composite Process Technologies provides the scientific backbone of the Center for Lightweight Production Technology (ZLP) in Stade. By doing fundamental research work in the field of advanced fibre placement, automated RTM processes, autoclave technology, and production technologies are developed and tested for application. By testing and simulation of processes in a full-scale dimension, effects can be explored, which otherwise could have shown up at later utilisation of the technology. Hence, the complete process chain can be examined prior to industrial realisation.



Abteilungsleiter:  
Dr.-Ing. Jan Stüve

# Schwerpunkt Rumpftechnologie

Fuselage

## Summary

CFRP fuselage comprises concepts for future aircraft fuselages, mainly based on carbon fibre composites. Special emphasis is placed on the detailed design of large cutouts, i.e. for the passenger and cargo doors. The major challenge is to reduce the weight of the primary fuselage structure at the same or better safety than the predecessor, but at lower costs. Different improved materials, designs, and manufacturing processes will be developed, analysed, simulated, and tested. The DLR project "CFRP Fuselage Next Generation" brings together all research topics. One demonstrator, which is in production now, will demonstrate improved impact resistance, integrated fire safety, new 3D stringers, and integral high-performance hybrid steel CFRP connections. Technologies especially developed for high production rates at low recurring costs like inductive pre-forming and micro-wave resin heating will be enhanced. Experts from all institute departments and partner institutes are working closely together to achieve a safer, more comfortable, and highly efficient aircraft.



Dieser Schwerpunkt umfasst Konzepte für den Flugzeugrumpf der Zukunft, der Strukturkomponenten aus faserverstärkten Kunststoffen wie CFK beinhaltet. Ziel ist eine Gewichts- und Kostenreduktion bei erhöhter Robustheit, v. a. hinsichtlich Stabilität, Festigkeit und Impact-Sicherheit. Hierfür sollen entscheidend verbesserte Werkstoffe, Entwurfs- und Nachweisverfahren, Herstellungsprozesse, Validierungstests sowie Funktionsintegrationen den Weg zu innovativen Bauweisen ebnen, die sich z. B. von der klassischen Stringer-Spant-Bauweise lösen und fasergerechte Topologien ermöglichen. Im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsprojekten werden z. B. Demonstratoren in Integral-, Grid- und Sandwich-Bauweise entwickelt, die u. a. auch große Ausschnitte für Passagier- und Frachtraumtüren sowie neuartige Strukturelemente und hybride CFK-Metall-Verbindungen beinhalten. Ein weiteres Augenmerk gilt der Entwicklung von Testanlagen zur phänomenologischen Untersuchung, zur Kennwertermittlung und zur Validierung von Berechnungsmethoden, u. a. in den Bereichen Festigkeit, Stabilität, Fatigue und Thermomechanik. Durch weiterentwickelte Fertigungsverfahren und prozessintegrierte Überwachungs- und Regelungsverfahren sollen die Herstellungsprozesse signifikant beschleunigt und die Robustheit der Bauteile erhöht werden. Als industrielle Anwendungsfälle stehen hierbei die Fertigungstechnologien für Großbauteile (z. B. Rumpfschalen im Fibre-Placement-Prozess) und für Volumenbauteile (hohe Stückzahl, z. B. Spante im RTM-Prozess) im Fokus.



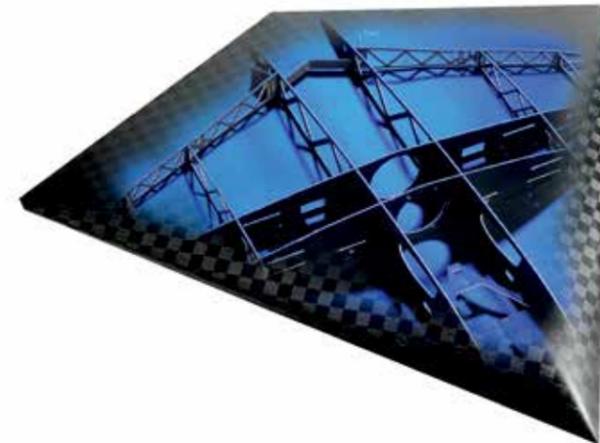
Schwerpunktleiter:  
Dr.-Ing. Janko Kreikemeier

# Schwerpunkt Spezialstrukturen

Special Structures

## Summary

Special structures are mainly related to advanced military aircraft applications. The work is especially focused on unmanned aerial vehicles (UAV), high-flying reconnaissance platforms, and other special civil applications. The main objectives of this research field are to provide the technologies, methodologies, and materials needed to develop composite structures under the premises of affordability and specialised functionalities. Major areas of interest are antennas integrated in the composite structure, stealth structures, which minimise the reflection of radar waves, and the radome design for combat aircraft. The military background of customer requirements, regulations, etc. was the main rationale to comprise these projects in a dedicated focus. The special structures research field dedicates its resources to three areas: "Affordable Fibre-Reinforced Plastics", "Multifunctional Structures", and "Structural Design and Simulation Processes". The first area addresses low-cost production, manufacturing, and maintenance of fibre-reinforced UAV structures. The second area investigates fibre-reinforced structures with special electromagnetic requirements, e.g. electromagnetic transparency, absorption, or emission. The third area is dedicated to the virtual development of primary UAV structures.



Spezialstrukturen sind alle fliegenden Strukturen, die sich nicht den klassischen Großkomponenten Flügel und Rumpf moderner Verkehrsflugzeuge zuordnen lassen, an die aber ganz besondere Anforderungen gestellt werden. Dies trifft naturgemäß auf eine Reihe militärischer Anwendungen zu, etwa auf die gesamte Plattform unbemannter Luftfahrzeuge (UCAV – Unmanned Combat Aerial Vehicles), auf spezielle Teile von Luftfahrzeugen, wie das Radom von Kampfflugzeugen, oder auf den Laminarflügel hoch fliegender Aufklärungsplattformen, ebenso aber auch auf spezielle zivile Einsatzzwecke. Besondere elektromagnetische Anforderungen, wie etwa die Einbettung von Antennen in die Verbundstruktur oder niedrige Radarreflexionen, erfordern Technologien, Methoden und Werkstoffe, die in diesem Schwerpunkt erforscht werden. Die Arbeiten konzentrieren sich gegenwärtig auf die kostengünstige Fertigung, das Design und die Wartung von UAV-Strukturen, auf die Kombination bestimmter elektromagnetischer Eigenschaften mit Faserverbunden sowie auf die virtuelle Entwicklung von UAV-Strukturen. Auch die Forschungsthemen Morphing bzw. formvariable Strukturen treten zunehmend unter dem Aspekt der Forderung nach Radartarnung in den Vordergrund.



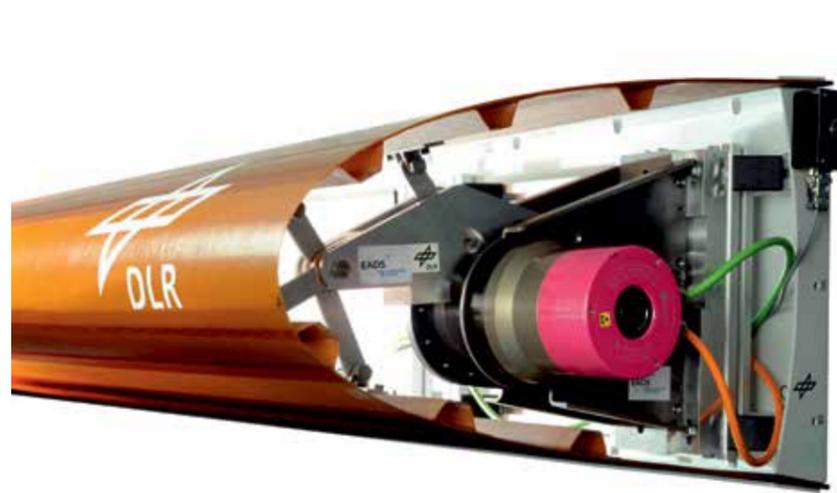
Schwerpunktleiter:  
Dipl.-Ing. Michael Hanke

# Schwerpunkt Steuerflächen und Leitwerke

Aerodynamic Control Surfaces

## Summary

High-Lift is the keyword for technologies dealing with future aircraft providing the required lift at low flight velocities as well as allowing for novel wing designs. Prominent technology examples are the gapless smart droop nose and the adaptive slat for wing leading-edge applications as well as various innovative trailing-edge devices. Along with structure-system integration aspects of active flow control applications and additional structural wing components for laminar wing technology, the research activities support aircraft manufacturers in their endeavour to substantiate the challenging goals for novel aircraft with improved environmental compatibility (reduction of drag, emissions, and noise). The activities in the High-Lift research field are not just concentrated on the wings' leading and trailing edge, but closely involved in developments of future wings. All High-Lift projects are highly multi-disciplinary so that the institute's entire scientific expertise is required.



Die Steuerflächen und Leitwerke übernehmen vielfältige Aufgaben zur Steuerung des Flugzeugs. Dazu gehören sowohl die klassischen Hochauftriebssysteme an der Vorder- und Hinterkante des Flügels wie z. B. Landeklappen und Vorflügel als auch klassische Steuerflächen wie z. B. das Querruder, die Spoiler und das Höhenleitwerk mit Höhenruder sowie das Seitenleitwerk mit dem Seitenruder. Im Institutsschwerpunkt „Steuerflächen und Leitwerke“ steht die Entwicklung, Integration und Bewertung von neuartigen Strukturen für Steuerflächen und Leitwerken im Fokus. Dies sind vor allem Steuerflächenkonzepte welche die klassische Aufgabenverteilung der Steuerflächen, wie z. B. Querruder nur zur Rollsteuerung, verlassen. Das Ziel sind einerseits multifunktionale Steuerflächen. Hier sind z. B. Landeklappen zu nennen, die über eine schnell aktivierte Hinterkante für die Rollsteuerung verfügen. Andererseits geht es aber auch um die Integration zusätzlicher Funktionen in klassische Strukturkomponenten wie z. B. von Systemen zur Absaugung oder Ausblasung von Luft zur Beeinflussung der Aerodynamik. Wichtige Zielsetzungen, die durch neue Konzepte von Steuerflächen, Auftriebshilfen und Leitwerken erreicht werden sollen, sind z. B. Lärmreduktion, Minimierung des Widerstands, Reduzierung von Manöver- und Böenlasten, Erhöhung der Landeleistung wie z. B. steile und langsame Anflüge etc.



Schwerpunktleiter:  
Dr.-Ing. Markus Kintscher

# Schwerpunkt Weltraum

Space Technologies

## Summary

The interdisciplinary research field of 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 research missions, DLR missions, and the governing ECSS standards. Therefore, a large portion of our work focuses on spacecraft and landers for the exploration of the solar system. Notable examples are "Philae", which landed on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, and "Mascot", which was launched aboard the Hayabusa 2 mission in December 2014 and will land on the asteroid 1999 JU 3. Tailored design concepts and new production processes are routinely developed to yield the structures required for compact satellites and for the installation of instruments in satellites as well as in interplanetary missions. The second major field of work is the development of ultra-light 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.



Weltraumtechnologie ist ein herausforderndes interdisziplinäres Forschungsgebiet und unterscheidet sich ganz erheblich von den luftfahrtorientierten oder bodengebundenen Schwerpunkten. Eine starke Orientierung an den Forschungsmissionen der ESA, den DLR-eigenen Missionen, raumfahrtspezifischen Technologien und den ECSS-Standards als übergreifendem Regelwerk sind für den Schwerpunkt Raumfahrt im Institut maßgeblich. Ein Hauptarbeitsfeld sind Raumsonden und Lander für die Exploration des Sonnensystems, wie der Kometenlander „Philae“ der Rosetta-Mission und der im Dezember 2014 gestartete MASCOT-Asteroidenlander der Hayabusa-2-Mission. Auch neuartige Designkonzepte und Fertigungstechnologien für die Strukturen von Kompaktsatelliten und Instrumentenstrukturen für Satelliten und interplanetare Missionen gehören zu diesem Feld. Ein zweites Hauptarbeitsgebiet stellen die ultraleichten entfaltbaren Strukturen dar, zum Beispiel für 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 hoch belastbare Strukturen für neuartige Startsysteme. Zukünftig sollen die Raumfahrtstrukturen des Instituts zudem intelligent sein. „Sensibilisieren“, „Reagieren“ und „Heilen“ sind Schlagworte zu diesem Gedanken. Das Ziel sind Strukturen, die sich selbst überwachen und weitgehend autonom auf äußere Einflüsse reagieren.



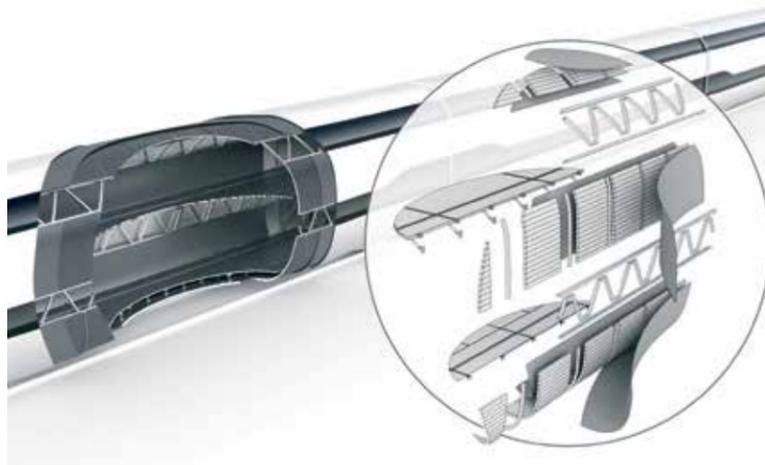
Schwerpunktleiter:  
Dipl.-Ing. Olaf Mierheim

# Schwerpunkt Verkehr

Transport

## Summary

The main area Transport focuses on projects dealing with ground transport vehicles. A number of technical developments from aeronautical research, such as lightweight and damage-tolerant structures, can also be applied to the development of ground transport. However, many traffic-related research aspects are very specific so that the corresponding projects can be coordinated more efficiently within a distinct area of research. The Institute of Composite Structures and Adaptive Systems significantly contributes to the advances of road and rail vehicles by developing novel, highly modular structures and cost-efficient, automated production processes. For instance, in the DLR project "Next Generation Train", new analysis and simulation methods for the design of railcar bodies were researched. Furthermore, multifunctional automotive structures are being developed and produced in the "Next Generation Car" project. The main challenge in this research area is achieving a sustainable mobility that balances economy, society, and ecology. Therefore, the mobility of people and goods has to be ensured, the environmental protection standards have to be maintained and safety has to be improved. Thus, multiple synergies are used and a strategic cooperation with partners from research and industry is implemented.



Der Verkehrssektor ist ein wesentlicher Eckpfeiler unserer industriellen Volkswirtschaft. Aus dem Spannungsverhältnis zwischen Mobilitätsansprüchen und negativen Mobilitätsauswirkungen ergeben sich für das DLR-Geschäftsfeld Verkehr die zentralen Herausforderungen: Sicherung der Mobilität, Schonung von Umwelt und Ressourcen und Erhöhung der Sicherheit. Dabei nimmt der Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen, auch im Hinblick auf die Elektromobilität, eine wesentliche Schlüsselrolle ein. Hierzu steht im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik das in Luft- und Raumfahrtanwendungen erworbene Expertenwissen für den Bereich Verkehr bereit. Die Projekte des bodengebundenen Verkehrs, d. h. die Forschungsarbeiten mit der Ausrichtung auf Straßen-, Schienen- und Wasserfahrzeuge, sind innerhalb des Instituts im Schwerpunkt Verkehr zusammengefasst. In den grundfinanzierten Projekten „Next Generation Car“ (NGC) und „Next Generation Train“ (NGT) werden beispielsweise multifunktionale Strukturen, hochmodulare Bauweisen und kostengünstige, automatisierte Fertigungsverfahren für Automobilanwendungen und Wagenkästen von Schienenfahrzeugen erforscht. Der Schwerpunkt Verkehr zielt auf den verstärkten Einsatz moderner Faserkunststoffverbundtechnologien in terrestrischen Verkehrsträgern ab. In Kooperation mit Herstellern aus dem Automobil- und Schienenfahrzeugbereich befinden sich dazu wirtschaftliche, hochmodulare Bauweisen und -konzepte für die industrielle Serienanwendung in der Entwicklung und sollen zukünftig stärker vorangetrieben werden.



Schwerpunktleiterin:  
Imke Roese-Koerner, M.Sc.

# Schwerpunkt Windenergie

Wind Energy

## Summary

Wind energy is an alternative energy source with a high potential for the future. Through optimising the rotor blade structure as well as new methods of construction and production processes, both weight and costs can be reduced. At the Center for Lightweight Production Technology (ZLP) in Stade and in the laboratories in Braunschweig, research from coupon to industrial scale is possible. For reduction of operating costs and for better planning of maintenance intervals, research is done on systems for Structural Health Monitoring (SHM). In the future, the operating loads will be reduced by means of adaptive trailing edges and bending-twisting coupling. Through integration of additional functionalities in the material, rotor blades cannot only be manufactured in a cost-optimised way in the future, also service life and energy yield will be considerably enhanced. A further contribution to achieve this aim are developments towards quality-controlled production. The interdisciplinary cooperation with other DLR institutes enables efficient assessment and comparison of new types of construction.



Die Windenergie ist eine alternative Energiequelle mit hohem Zukunftspotenzial. Durch eine Optimierung der Rotorblattstruktur sowie durch neue Bauweisen und Produktionsverfahren werden Gewicht und Kosten reduziert. Im Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Stade und in den Laboren in Braunschweig ist Forschung vom Coupon bis in den industriellen Maßstab möglich. Zur Reduktion der Betriebskosten und zur besseren Planbarkeit von Wartungsintervallen werden Systeme zur Strukturüberwachung entwickelt. Die Betriebslasten werden zukünftig über formvariable Hinterkantenklappen und Biege-Torsions-Kopplung verringert. Durch zusätzliche Integration von Funktionalitäten in den Werkstoff können Rotorblätter zukünftig nicht nur kostenoptimiert hergestellt werden, es werden auch Lebenserwartung und Energieausbeute gesteigert. Hierzu tragen auch Entwicklungen hin zu einer qualitätsgesteuerten Produktion bei. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit anderen DLR-Instituten ermöglicht dabei eine effiziente Bewertung und den Vergleich neuer Bauweisen.



Schwerpunktleiterin:  
Dipl.-Ing. Birgit Wieland

# Selbstorganisierte multifunktionale Strukturen für den adaptiven Leichtbau

*Self-organising multifunctional structures for adaptive lightweight constructions*

**CAMPUS**  
Funktionswerkstoffe  
und -strukturen

Eine Einrichtung der  TU Clausthal  
in Kooperation mit  Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt  
German Aerospace Center 

## Summary

*For several years, TU Clausthal, the Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin and the DLR Institute of Composite Structures and Adaptive Systems have been cooperating very successfully: they founded the common research association Campus Functional Materials and Functional Structures and received several research awards. Now, they are initiating a common PhD programme that covers 18 dissertations focusing on self-organising adaptive lightweight structures. TU Braunschweig is a cooperative member with two institutes.*

Seit mehreren Jahren forschen die TU Clausthal, die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin und das Braunschweiger DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik auf dem Gebiet der Funktionswerkstoffe erfolgreich zusammen: Sie gründeten eine gemeinsame Forschungseinrichtung, den Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen, und gewannen Forschungspreise.

Nun starten die drei Einrichtungen ein gemeinsames Promotionsprogramm, in dem 18 Promovierende adaptive Leichtbaustrukturen erforschen und entwickeln, die sich hinsichtlich ihrer Form und Bauweise selbst organisieren. Die TU Braunschweig ist mit zwei Instituten beteiligt.

## Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen

Unter diesem Titel kooperiert die TU Clausthal mit dem DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik und der BAM, um neue Funktionswerkstoffe und neue Funktionsstrukturen für zahlreiche Anwendungen zu erforschen und zu entwickeln:

- Piezoelektrische Hochlastsysteme
- Superomniphobe Oberflächen
- Anti-Icing-Flächen
- Strukturintegrierte Akkus
- Monoschichtige Blitzschutz-Systeme
- Nanosorbenten
- Transparente Photovoltaik-Systeme
- Photonische® Materialsysteme u.v.m.

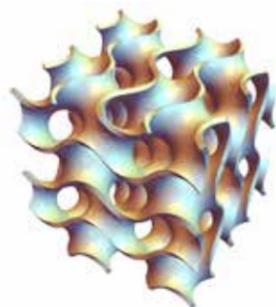
Die Forscher nutzen dazu ihre jeweilige Infrastruktur und Expertise.

Ansprechpartner sind die drei Mitglieder des Koordinierungsausschusses:

- Prof. Dr. Dieter Meiners (TU Clausthal)
- Prof. Dr. Jens Günster (BAM)
- Prof. Dr. Jörg Melcher (DLR)

Piezokeramische Membran mit minimalflächiger Geometrie

*Piezoceramic membrane with minimal surface geometry*



3D-gedruckte, flexible Leichtbaustruktur in gyroidaler Anordnung

*3D-printed, flexible lightweight construction with gyroidal structure*



## Neues gemeinsames Promotionsprogramm

18 Doktoranden erhalten in dem vier Forschungsfelder umfassenden Promotionsprogramm „Selbstorganisierte multifunktionale Strukturen für den adaptiven Hochleistungsleichtbau“ Stipendien mit dreijähriger Laufzeit vom Land Niedersachsen und der TU Clausthal. Sie gehen der Frage nach, wie sich adaptive Strukturen potenzialbasiert zu optimalen Topologien formen lassen. Impedanzangepasste und strukturkonforme aktive Bauteile sollen eine optimale Leistungsübertragung garantieren. Die Berechnung und die Generierung von Potenzialen sind der Schlüssel, denn sie generieren die optimalen formgebenden Kräftefelder bei der selbstorganisierten Herstellung.

Die vier Forschungsfelder des Promotionsprogramms sind:

1. Faserverbundstrukturen mit potenzialbasiert orientierten Fasern und mikrooptischen Sensoren
2. Selbstorganisierte und 3D-gedruckte biomimetische, hierarchische und periodische Strukturen und ihre analytische Formulierung
3. Potenzialbasiert orientierte Nanopartikel und piezoelektrische Multiphasen-Composite
4. Transparente, bleifreie Piezosysteme mit photovoltaischen und biokompatiblen Eigenschaften

Sprecher des Promotionsprogramms ist Prof. Dr. Alfred Weber von der TU Clausthal.

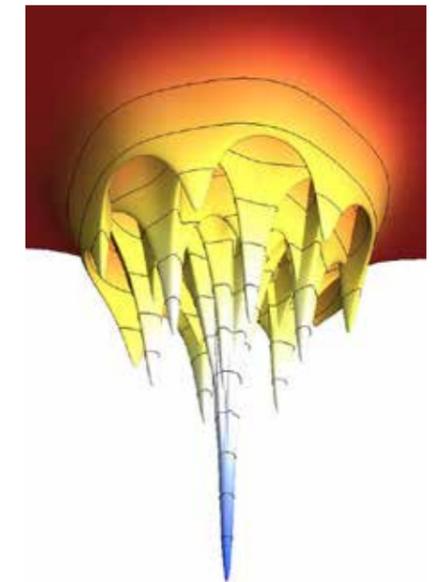
Additiv gefertigte Leichtbaustruktur in diamantischer Anordnung

*Additive manufactured lightweight structure with diamond lattice*



Typisches Potenzial während einer potenzialbasierten Formbildung

*Typical potential during a potential-based process*



Autor:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Melcher



# Veröffentlichungen 2016–2017

Publications 2016–2017

## Ausgewählte Veröffentlichungen in Büchern und Fachzeitschriften

**Bertling, Dominic und Kaps, Robert und Mulugeta, Eyob (2016)** *Analysis of dry-spot behavior in the pressure field of a liquid composite molding process*. CEAS Aeronautical Journal, 7 (4), Seiten 577–585. Springer Vienna. DOI: 10.1007/s13272-016-0207-2 ISBN 1869-5582 ISSN 1869-5582

**Geier, Sebastian und Mahrholz, Thorsten und Wierach, Peter und Sinapius, Michael (2016)** *Experimental Investigations of Actuators Based on Carbon Nanotube Architectures* In: Smart Structures and Materials Computational Methods in Applied Science, 43. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-44505-2. ISSN 1871-3033

**Haase, Thomas (2016)** *Optimal Placement of Sensors and Actuators for Feedforward Noise and Vibration Control*. In: Advances in Noise Analysis, Mitigation and Control INTECH OPEN. Seiten 51–74. ISBN 978-953-51-2674-4.

**Kappel, Erik (2016)** *Forced-interaction and spring-in – relevant initiators of process-induced distortions in composite manufacturing*. Composite Structures (140), Seiten 217–229. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.016> ISSN 0263-8223

**Krombholz, Christian und Kruse, Felix und Wiedemann, Martin (2016)** *GroFi: Large-scale fiber placement research facility*. Journal of Large-Scale Research Facilities JLSRF, 2 (A58), Seiten 1–4. DOI: [10.17815/jlsrf-2-93] ISSN 2364-091X

**Schuster, Andreas und Reimer, Lars und Neumann, Jens (2016)** *A Mesh-free Parallel Moving Least-Squares-based Interpolation Method for the Application in Aeroelastic Simulations with the Flow Simulator*. In: New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics X Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 132. Springer. Seiten 573–583. ISBN 978-3-319-27279-8. ISSN 1612-2909

**Seefeldt, Patric und Spietz, Peter und Spröwitz, Tom und Grundmann, Jan Thimo und Hillebrandt, Martin und Hobbie, Catherin Fiona und Ruffer, Michael und Straubel, Marco und Toth, Norbert und Zander, Martin (2016)** *Gossamer-1: Mission concept and technology for a controlled deployment of gossamer spacecraft*. Advances in Space Research (50), Seiten 434–456. Elsevier. DOI: 10.1016/j.asr.2016.09.022 ISSN 0273-1177

**Torstrick, Sven und Kruse, Felix und Wiedemann, Martin (2016)** *Evo: Net Shape RTM Production Line*. Journal of Large-Scale Research Facilities JLSRF, 2 (A66). DOI: <http://dx.doi.org/10.17815/jlsrf-2-125> ISSN 2364-091X

**Ucan, Hakan und Kruse, Felix und Wiedemann, Martin (2016)** *BALU: Largest autoclave research facility in the world*. Journal of Large-Scale Research Facilities JLSRF. DOI: 10.17815/jlsrf-2-94 ISSN 2364-091X

**Wagner, Ronald und Hühne, Christian und Niemann, Steffen (2016)** *Constant single-buckle imperfection principle to determine a lower bound for the buckling load of unstiffened composite cylinders under axial compression*. Composite Structures, 139, Seiten 120–129. Elsevier Ltd.. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.11.047 ISSN 0263-8223

**Bogenfeld, Raffael Marius und Kreikemeier, Janko (2017)** *A tensorial based progressive damage model for fiber reinforced polymers*. Composite Structures, 168, Seiten 608–618. Elsevier. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.02.006 ISSN 0263-8223

**Forßbohm, Tobias und Danilov, Maksim (2017)** *Temperature-sensitive Joints for water-soluble braiding mandrels*. JEC Composites Magazine, Seiten 54–55. JEC. ISSN 1639-965X

**Hesse, Christian und Papantoni, Veatriki und Algermissen, Stephan und Monner, Hans Peter (2017)** *Frequency-independent radiation modes of interior sound radiation: Experimental study and global active control*. Journal of Sound and Vibration, 401, Seiten 204–213. ISSN 0022-460X

**Hesse, Christian und Vivar Perez, Juan Miguel und Sinapius, Michael (2017)** *Frequency-independent radiation modes of interior sound radiation: An analytical study*. Journal of Sound and Vibration (392), Seiten 31–40. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.12.038 ISSN 0022-460X

**Jux, Maximilian und Finke, Benedikt und Schilde, Carsten und Mahrholz, Thorsten und Sinapius, Michael und Kwade, Arno (2017)** *Effects of Al(OH)O nanoparticle agglomerate size in epoxy resin on tension, bending and fracture properties*. Journal of Nanoparticle Research, 19 (4), Seite 139. Springer. DOI: 10.1007/s11051-017-3831-9 ISSN 1388-0764

**Köke, Hardy und Weiß, Lennart und Hühne, Christian und Sinapius, Michael (2017)** *A graph-based method for calculating draping strategies for the application of fiber-reinforced materials on arbitrary surfaces*. Composite Structures (162), Seiten 123–132. Elsevier. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.11.024 ISSN 0263-8223

**Löbel, Thomas und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2017)** *Disbond-Stopping Concepts for Bonded Composite Joints*. SAMPE Journal, 53 (1), Seiten 22–31. Society for the Advancement of Material and Process Engineering. ISSN 0091-1062

**Pohl, Martin (2017)** *An adaptive negative capacitance circuit for enhanced performance and robustness of piezoelectric shunt damping*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. ISSN 1045-389X

**Sahu, Atanu und Niyogi, Arup Guha und Bhattacharya, Partha und Rose, Michael (2017)** *A mobility based vibro-acoustic energy transmission simulation into an enclosure through a double-wall panel*. Journal of the Acoustical Society of America, 141 (6), e598-e604. Acoustical Society of America. DOI: 10.1121/1.4989729 ISSN 0001-4966

**Tripmaker, Anja und Ucan, Hakan (2017)** *Erkennung von Leckagen an FVK-Hochleistungsstrukturbauteilen*. Lightweight Design ISSN 1865-4819

**Wagner, Ronald und Hühne, Christian und Niemann, Steffen (2017)** *Robust knockdown factors for the design of axially loaded cylindrical and conical composite shells – Development and Validation*. Composite Structures (173), Seiten 281–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.031> ISSN 0263-8223

**Wagner, Ronald und Hühne, Christian und Niemann, Steffen und Khakimova, Regina (2017)** *Robust design criterion for axially loaded cylindrical shells – simulation and validation*. Thin-Walled Structures, 115, Seiten 152–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.017> ISSN 0263-8231

**Hesse, Christian und Papantoni, Veatriki und Algermissen, Stephan und Monner, Hans Peter (2017)** *Frequency-independent radiation modes of interior sound radiation: Experimental study and global active control*. Journal of Sound and Vibration, 401, Seiten 204–213. ISSN 0022-460X

## Ausgesuchte Konferenzbeiträge

**Kalow, Steffen und Opitz, Steffen und Riemenschneider, Johannes und Hoffmann, Frauke (2016)** *Results of a parametric design study to adapt the structural properties and strain distribution of active twist blades*. AHS 2016, 16.–19.05.2016, West Palm Beach, Florida, USA.

**Ucan, Hakan und Zapp, Philipp und Akin, Deniz (2016)** *Inductive Pre-Bonding of Stiffened Structural Components Made of CFRP Using the Example of Co- and Secondary Bonding Processes*. Sampe Long Beach 2016, 23.–26.05.2016, Long Beach, USA.

**Liebers, Nico und Bertling, Dominic und Kleineberg, Markus und Wiedemann, Martin (2016)** *Ultrasound Based Monitoring of Flow Front and Laminar Thickness without Contact to Part*. Flow Processes in Composite Materials, 06.–08.07.2016, Kyoto, Japan.

**Heinze, Christoph und Sinapius, Michael und Wierach, Peter (2016)** *Fast Approximation of Wave Propagation in Complex Geometries*. In: Proceedings of the 8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016). NDT.net. 8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), 05.–08.07.2016, Bilbao, Spanien.

**Liao, Guangyue und Zou, Qianwen und Geier, Sebastian und Wierach, Peter und Wiedemann, Martin (2016)** *Nanostructured all-solid-state supercapacitor based on Li1.4Al0.4Ti1.6(PO4)3 ceramic electrolyte*. 67th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (ISE 67), 21.–26.08.2016, Den Haag, Niederlande.

**Vadlamani, Shashank und Willberg, Christian (2016)** *Global-local modelling approach for the investigation of adhesive bonding in structures*. NAFEMS India Conference, 29.–31.08.2016, Bangalore, Indien.

**Pohl, Martin und Haase, Thomas (2016)** *Experimental test of semi-active shunt damping on a helicopter trim panel*. In: Proceedings of the European Rotorcraft Forum. 42. European Rotorcraft Forum, 06.–08.09.2016, Lille, Frankreich.

**Lange, Michael und Baturkin, Volodymyr und Hühne, Christian und Mierheim, Olaf (2016)** *Simulation and measurement of thermal fluxes in load-bearing bonded FRP single-lap joints*. 14th ECSSMET, 2016, 27.–30.09.2016, Toulouse, Frankreich.

**Rohwer, Klaus (2016)** *Damage and Failure Conditions for Continuous Fibre Composites*. Practicalities of Analysing Composites, 28.09.2016, Coventry, Großbritannien.

**Hühne, Christian und Niemann, Steffen (2016)** *Anisogrid design for fuselage primary structures – results of EU/RU projects Alasca and Polarbear*. 5th Aircraft Structural Design Conference, 4.–6.10.2016, Manchester, Großbritannien.

**Wille, Tobias und Heinecke, Falk und Hein, Robert und Liebisch, Martin (2016)** *Process integrated in-situ structural evaluation for significant material and cost saving by industry 4.0*. Greener Aviation Conference, 11.–13.10.2016, Brüssel, Belgien.

**Bach, Tobias (2016)** *Gradient-Based Structural Optimization of stiffened composite panels based on Detailed Finite Element Models*. In: Simulation von Composites – Bereit für Industrie 4.0?, Seiten 154–160. NAFEMS Simulation von Composites – Bereit für Industrie 4.0?, 26.–27.10.2016, Hamburg, Deutschland. ISBN 978-1-910643-06-8

**Bachmann, Jens und Hidalgo, Carme und Bricout, Stéphanie (2016)** *Life Cycle Assessment of ecological improved Composites for aviation – a review*. China-EU Conference on Green Aviation Research, 8.–11.11.2016, Shanghai, China.

**Wiedemann, Martin und Pototzky, Alexander und Torstrick, Sven (2017)** *Function Integrated Lightweight Design*. werkstoffplusauto, 15.02.2017, Stuttgart.

**Glück, Roland (2017)** *Covering Polygons with Rectangles*. In: *Theory and Applications of Models of Computation*, Proceedings, 10185, Seiten 274–288. Springer. 14th Annual Conference on Theory and Applications of Models of Computation, 20.–22.04.2017, Bern, Schweiz. DOI: 10.1007/978-3-319-55911-7 ISBN 978-3-319-55910-0 ISSN 0302-9743

**Petersen, Enno und Puzio, Tomasz und Stefaniak, Daniel und Hühne, Christian (2017)** *Einsatz der lokalen Metallhybridisierung zur Verbesserung der Fügeigenschaften von hochbelasteten Faserkunststoffverbundstrukturen*. Forum Industrial Supply, Hannover Messe, 24.–28.04.2017, Hannover, Deutschland.

**Vasista, Srinivas und Monner, Hans Peter (2017)** *3D Design of a Large-Displacement Droop-Nose Wing Device*. VIII ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials SMART2017, 5.–8.06.2017, Madrid, Spain.

**Keimer, Ralf (2017)** *Eine adaptive Primärfeder als Teil des Einzelradlaufwerks des Next Generation Trains*. 4SMARTS, 21.–22.06.2017, Braunschweig, Deutschland. ISBN 978-3-8440-5083-7

**Misol, Malte und Haase, Thomas und Algermissen, Stephan und Papantoni, Veatriki und Monner, Hans Peter (2017)** *Lärmreduktion in Flugzeugen mit aktiven Linings*. In: *Smarte Strukturen und Systeme*, Seiten 329–339. Shaker Verlag. Symposium für Smarte Strukturen und Systeme 4SMARTS, 21.–22.06.2017, Braunschweig, Deutschland. ISBN 978-3-8440-5083-7

**Pohl, Martin und Riemenschneider, Johannes (2017)** *Konzipierung, Auslegung und Vermessung einer formveränderlichen Hinterkante für ein Windenergie rotorblatt*. Shaker Verlag. Symposium für smarte Strukturen und Systeme (4SmartS), 21.–22.06.2017, Braunschweig, Deutschland. ISBN 978-3-8440-5083-7

**Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Löbel, Thomas und Holzhüter, Dirk und Hühne, Christian (2017)** *A New Joining-Device for Manufacturing Tubular Butt Joints with Higher Curing Temperatures of Film Adhesives*. AB2017 4th International Conference on Structural Adhesive Bonding, 06.–07.07.2017, Porto, Portugal.

**Rädel, Martin und Willberg, Christian und Schmidt, Jochen (2017)** *Effect of Discretization and Stochastic Material Distribution on Crack Initiation in Peridynamics*. USNC-CM 14, 17.–20.07.2017, Montreal, Canada.

**Papantoni, Veatriki und Rose, Michael und Monner, Hans Peter (2017)** *A study on the relation between the actuator placement and the characteristics of the sound radiated by a plate structure*. 24th International Congress on Sound and Vibration, 23.–27.07.2017, London, Großbritannien.

**Geier, Sebastian und Mahrholz, Thorsten und Wierach, Peter und Sinapius, Michael (2017)** *Polypyrrole-coated carbon nanotube-arrays the missing link between bucky-paper actuation and cnt-array actuation*. In: Proceedings of the ASME 2017 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. SMASIS 2017, 18.–20.09.2017, Snowbird, Utha, USA.

**Kintscher, Markus und Monner, Hans Peter (2017)** *Structural Concept of an Adaptive Shock Control Bump Spoiler*. In: SAE Techniccal Paper. SAE Technical Paper, 26.–28.09.2017, Fort Worth, Texas, USA. DOI: 10.4271/2017-01-2164 ISSN 0148-7191

# Patente 2016–2017

## Patents 2016–2017

**Schulz, Patrick; Hindersmann, Arne; Bölke, Jens:** *Klemmvorrichtung und Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils*, DE 102014114377, 02.06.2016

**Weiß, Lennart:** *Deformationselement, Deformationseinrichtung sowie Computerprogramm*, DE 102013110033, 09.06.2016

**Niemann, Steffen; Ströhlein, Tobias; Krzikalla, Philipp:** *Verfahren und Einrichtung zur Kontrolle des Feuchtigkeitsgehalts eines Bauteils*, DE 102010022454, 16.06.2016

**Meyer, Matthias; Röstermundt, Dirk; Pause, Bernhardt; Boge, Christian:** *Fertigungsanlage zur Herstellung von Faserverbundmaterial-Bauteilen*, US 9,375,907, 28.06.2016

**Stefaniak, Daniel; Bölke, Jens; Ucan, Hakan; Krombholz, Christian; Stefaniak, Daniel; Bölke, Jens:** *Leckageerkennung*, DE 502012008096.7, IT 2518465, LU 2518465, ES 2518465, DK 2518465, FR 2518465, GB 2518465, 04.08.2016

**Steffen, Olaf; Kühn, Michael; Ucan, Hakan:** *Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Bauteildicke eines Faserverbundbauteils*, DE 102013108568, 04.08.2016

**Perner, Marcus:** *Ablegekopf zum Ablegen von Fasermaterial*, DE 502011010404.9, 11.08.2016

**Nickel, Jörg; Hühne, Christian; Bartsch, Ivonne; Fink, Axel; Bold, Jens; Mierheim, Olaf; Ückert, Christian:** *Transportvorrichtung "Projekt ULD-Container"*, DE 102013100862, FR 2431302, 17.08.2016

**Röstermundt, Dirk; Perner, Marcus; Krombholz, Christian; Bock, Matthias:** *Faser-Legevorrichtung*, DE 102012102205, 08.09.2016

**Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:** *Verfahren und Vorrichtung zum Einbringen von Öffnungen in Faserhalbzeuge*, DE 102015109289, 08.09.2016

**Kleineberg, Markus; Danilov, Maksim:** *Ermittlung einer Faserorientierung*, DE 102014103219, 29.09.2016

**Perner, Marcus; Monner, Hans Peter:** *Faserlegekopf und Faserlegevorrichtung mit diesbezüglichem Faserlegekopf*, DE 102015104393, 29.09.2016

**Borgwardt, Henrik; Assing, Heiko; Stahl, Arne:** *Gekrümmte Preform*, DE 502013004913.2, GB 2633965, AT E836082, ES 2633965, SE 2633965, IT 2633965, FR 2633965, 12.10.2016

**Nguyen, Duy Chinh; Röstermundt, Dirk; Delisle, Dominik; Krombholz, Christian; Perner, Marcus:** *Faserführungssystem*, DE 102013108570, 13.10.2016

**Kruse, Frank Felix; Grohmann, Yannis:** *Nestingablage*, DE 102013104609, 20.10.2016

**Günster, Jens; Melcher, Jörg:** *Transparente akustisch wirksame Vorrichtung*, DE 502012008736.8, 09.11.2016

**Bertling, Dominic; Liebers, Nico; Opitz, Mark:** *Verfahren und Vorrichtung zur Analyse von Formkörpern als Komponenten für Faserverbundbauteile*, DE 102015114492, 17.11.2016

**Melcher, Jörg; Riemenschneider, Johannes; Mosch, Jürgen; Mahrholz, Thorsten:** *Aktuator mit nanoskaligen Strukturen*, DE 502007015293.5, 30.11.2016

**Zacharias, Fabian:** *Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff mit einem Loch*, DE 102013109995, 29.12.2016

**Danilov, Maksim:** *Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils*, DE 102010018518, 05.01.2017

**Opitz, Steffen; Riemenschneider, Johannes; Schulz, Martin:** *Verfahren zum Enteisen von Rotorblättern eines Hub-schraubers und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens an dem Hub-schrauber*, DE 2530015, PL 2530015, GB 2530015, FR 2530015, 11.01.2017

**Fingerhut, Daniel; Melcher, Christian; Melcher, Jörg:** *Schalldämpfer mit schraubenförmigem Gaskanal*, DE 10200900494, 02.02.2017

**Krombholz, Christian:** *Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Fehlstellen von abgelegten Faserhalbzeugen*, DE 102013112260, 09.02.2017

**Forßbohm, Tobias; Danilov, Maksim:** *Verbindungssystem*, DE 102014114734, 09.02.2017

**Köke, Hardy:** *Computerprogramm*, DE 202011110923, 12.04.2017

**Fink, Axel; Hühne, Christian:** *Wellenkupplung*, DE 502012010084.4, 19.04.2017

**Wolff, Johannes; Hindersmann, Arne; Könnicke, Daniela; Friedrich, Martin:** *Herstellung eines Faserverbundbauteils*, DE 502012010098.4, FR 2565020, 19.04.2017

**Bock, Matthias; Röstermundt, Dirk; Perner, Marcus:** *Faserlegekopf*, DE 102014104765, 27.04.2017

**Kleineberg, Markus; Hanke, Michael; Schmidt, Jochen:** *Herstellung eines Faserverbundbauteils*, DE 102014100630, 04.05.2017

**Opitz, Steffen:** *Strukturelement zur Ausbildung einer Oberfläche mit veränderbarer Luftdurchlässigkeit*, DE 102013109489, 11.05.2017

**Borgwardt, Henrik; Stahl, Arne:** *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Faserwickels sowie Verfahren und Anlage zur Herstellung eines T-förmigen Bauteilsegments mit einem Faserwickel*, DE 102016100335, 11.05.2017

**Hühne, Christian; Kleineberg, Markus; Niemann, Steffen; Nickel, Jörg:** *Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen*, DE 502012010358.4, FR 2508328, 17.05.2017

**Krombholz, Christian:** *Verfahren und Anlage zur Vermessung von Oberflächen*, DE 102014113395, 18.05.2017

**Kolbe, Andreas; Delisle, Dominik; Bonmann, Philip; Westphalen, Heiko; Röthig, René:** *Kettenantrieb für ketten- oder raupengetriebene Bewegungsvorrichtungen und Bewegungsvorrichtung hierzu*, DE 102016105315, 25.05.2017

**Schmidt, Jochen; Staryh, Viktor; Kleineberg, Markus; Grote, Matthias:** *Verfahren und Vorrichtung zur Montage von Bauteilen*, DE 102014100780, 22.06.2017

**Danilov, Maksim:** *Verfahren zum Temperieren und Temperiervorrichtung hierzu*, DE 102014113338, 13.07.2017

**Kappel, Erik:** *Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils, Verfahren zum Verifizieren eines Faserverbundbauteils sowie Referenzelement*, DE 102014111118, 13.07.2017

**Melcher, Jörg; Kletz, Björn; Redlich, Julian:** *Schwingungsfreie Lagerung eines Objekts an einer Struktur – Mounting an object on a structure in a vibration-free manner*, DE 2673531, FR 2673531, 26.07.2017



### JEC World in Paris mit Start-up-Wettbewerb

Das DLR wird im kommenden Jahr wieder mit einem eigenen Stand auf der JEC World, der weltweit größten Messe der Faserverbundbranche, vom 6. bis 8. März 2018 in Paris vertreten sein und seine neuesten Entwicklungen in diesem Bereich präsentieren.

#### Besuchen Sie uns am Stand E66, Halle 5a

Paris ist zugleich Schauplatz des größten internationalen Start-up-Wettbewerbs für Innovationen der Faserverbundwerkstoffindustrie. Weitere Informationen, auch zur Einreichung der Projekte, unter [bit.ly/2uPCWLS](http://bit.ly/2uPCWLS)

### JEC World in Paris with start-up competition

*In the coming year, DLR will once again attend JEC World, the world's largest trade fair for the fibre composite industry – to be held in Paris from 6 to 8 March 2018 – and will present its latest developments in this sector.*

#### Please visit us at booth E66, Pavilion 5a

*At the same time, Paris will be the venue of the largest international start-up competition for innovations in the fibre composite industry. Further information, including how to submit projects, can be found at [bit.ly/2uPCWLS](http://bit.ly/2uPCWLS)*

## Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Luftfahrt, Raumfahrt, Energie, Verkehr und Sicherheit sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten zuständig. Zudem fungiert das DLR als Dachorganisation für den national größten Projektträger.

In den 20 Standorten Köln (Sitz des Vorstands), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Bremerhaven, Dresden, Göttingen, Hamburg, Jena, Jülich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Oldenburg, Stade, Stuttgart, Trauen und Weilheim beschäftigt das DLR circa 8.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Das DLR unterhält Büros in Brüssel, Paris, Tokio und Washington D.C.

### *DLR at a glance*

*DLR is the national aeronautics and space research centre of the Federal Republic of Germany. Its extensive research and development work in aeronautics, space, energy, transport and security is integrated into national and international cooperative ventures. In addition to its own research, as Germany's space agency, DLR has been given responsibility by the federal government for the planning and implementation of the German space programme. DLR is also the umbrella organisation for the nation's largest project management agency.*

*DLR has approximately 8000 employees at 20 locations in Germany: Cologne (headquarters), Augsburg, Berlin, Bonn, Braunschweig, Bremen, Bremerhaven, Dresden, Goettingen, Hamburg, Jena, Juelich, Lampoldshausen, Neustrelitz, Oberpfaffenhofen, Oldenburg, Stade, Stuttgart, Trauen, and Weilheim. DLR also has offices in Brussels, Paris, Tokyo and Washington D.C.*

## Impressum | Imprint

### Herausgeber | *Publisher:*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) | *German Aerospace Center (DLR)*  
 Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik | *Institute of Composite Structures and Adaptive Systems*

Redaktion | *Editorial staff:* Prof. Dr. Martin Wiedemann (Direktor), Jana Hoidis (Redaktionsleitung),  
 Dr. Peter Wierach (Stellv. Direktor), Christin Herrmann (Gestaltung),  
 Prof. Dr. Jörg Melcher (Innovationsmanagement)

### Anschrift | *Address:*

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig  
 Telefon | *Phone* + 49 531 295-2301

### DLR.de/FA

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

Bilder | *Images:* DLR Fotomedien, Timm Bourry, Evi Blink, | *Copyright:* DLR (CC-BY 3.0),  
 soweit nicht anders angegeben | *unless otherwise stated.*

### Titelbild | *Cover image:*

3D-gedruckte Flügelvorderkante aus carbonfaserverstärktem Kunststoff, S. 12 und S. 74  
*3D-printed carbon fiber-thermoplastic leading edge, p. 12 and p. 74*



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

Supported by:



on the basis of a decision  
 by the German Bundestag