



Innovationsbericht 2023 Institut für Systemleichtbau

Innovation Report 2023
Institute of Lightweight Systems



Vorwort

Preface

Dear readers of the Innovation Report 2023,

We are glad to present you with the new Innovation Report of the Institute of Lightweight Systems and appreciate your interest in opening and reading it.

In the middle of this year, the Lightweighting Strategy of the [Federal Government](#) was adopted, which we already anticipated when further developing the organisation of our institute. Since this year, we have been pooling all of our research activities on sustainability technologies and the capability to life cycle evaluation of lightweight structures in the new ECO department. We will continue to intensify our work on this important issue. We account for the significance of lightweighting for the economic development of Germany as emphasised in the strategy by supporting our transfer activities with a new department for lightweight innovation.

However, we aim at going slightly beyond the Lightweighting Strategy of the Federal Government. This ambition is specifically reflected in the new name we have chosen for our institute in 2023: DLR Institute of Lightweight Systems.

What is meant by lightweight systems? What does it mean to us?

From our point of view, lightweight systems design is based on three pillars:

Firstly, material lightweight design, in which the strengths and stiffnesses related to material density are significantly important. The second pillar is constructive lightweight design with a focus on optimally exploiting as little material as possible.

The third pillar aims at also integrating other, non-loadbearing functions – systems – into the lightweight structure. This is what lightweight systems means: materials being used in different system components also contribute to the load transfer of the structure. In this way, the lightweight structure is transformed from a system carrier to a system. Helpful in this process are the multifunctional materials of adaptive systems and the suitability of fibre composites for the integration of system functions based on the specific manufacturing process.

This further development of lightweight design to lightweight systems poses huge challenges, for now there are conflicts of goals between individual functions. These can only be solved when focusing on the final product the lightweight structure is to serve: the entire aircraft, the entire vehicle. Hence, lightweight systems must be tightly crosslinked with the other disciplines of product development such as aerodynamics, flight mechanics, propulsion technology, and others. Lightweight systems also require new tools. At our Science Day on October 12, 2023, we would like to discuss with you whether and, if so, how artificial intelligence may help us to improve design and building of structures.

Understanding and mastering such complex interactions are essential prerequisites for the competitiveness of German engineering work and economy. Research on and development of these correlations is what we consider to be our contribution to the Lightweighting Strategy of the Federal Government.

Join us on our way into a future where any lightweight structure – understood as a system – is used in a resource-conserving and cycle-efficient manner for an emission-free tomorrow.

Get inspired along these lines by this Innovation Report.

We wish you a pleasant reading.

Liebe Lesende des Innovationsberichts 2023,

wir freuen uns, Ihnen diesen neuen Innovationsbericht des Instituts für Systemleichtbau vorlegen zu können und über Ihr Interesse daran, ihn zu öffnen und zu lesen.

Seit Mitte des Jahres gibt es die Leichtbaustrategie der [Bundesregierung](#). Wir haben diese bei der Weiterentwicklung der Organisation unseres Instituts in den letzten Jahren bereits antizipiert.

In der neuen Abteilung ECO haben wir seit diesem Jahr alle unsere Forschungsaktivitäten für ressourcenschonende Nachhaltigkeitstechnologien und die Lebenszyklus-Bewertungsfähigkeit von Leichtbaustrukturen gebündelt und werden dieses wichtige Thema weiter ausbauen. Der in der Leichtbaustrategie betonten Bedeutung des Leichtbaus für die wirtschaftliche Entwicklung des Standorts Deutschland tragen wir durch eine Intensivierung unserer Transferaktivitäten in der neuen Abteilung Leichtbauinnovation Rechnung. Wir gehen aber noch etwas über die Leichtbaustrategie der Bundesregierung hinaus. Dieser Anspruch drückt sich insbesondere in dem neuen Namen aus, den wir unserem Institut dieses Jahr gegeben haben: DLR-Institut für Systemleichtbau.

Was ist mit Systemleichtbau gemeint? Was verstehen wir darunter? Leichtbau steht nach unserer Überzeugung auf drei Säulen: Zunächst der Materialeichtbau; hier sind beispielsweise die auf die Materialdichte bezogenen Festigkeiten und Steifigkeiten von maßgeblicher Bedeutung.

Als zweite Säule der konstruktive Leichtbau; hier geht es darum, durch eine geschickte Konstruktion möglichst wenig Material optimal auszunutzen.

Die dritte Säule zielt darauf, in die Leichtbaustruktur auch andere, nichttragende Funktionen – Systeme, zu integrieren. Das ist Systemleichtbau: Materialien, die in unterschiedlichen Systemkomponenten eingesetzt werden, werden auch an der Lastabtragung der Struktur beteiligt. Damit wird die Leichtbaustruktur vom Systemträger zum System. Hilfreich sind hier die Multifunktionswerkstoffe der Adaptronik und die Tatsache, dass Faserverbunde schon vom Fertigungsprozess her geeignet sind für die Integration von Systemfunktionen.

Mit dieser Weiterentwicklung des Leichtbaus zum Systemleichtbau sind auch große Herausforderungen verbunden, denn nun kommt es zu Zielkonflikten zwischen Einzelfunktionen. Diese lassen sich nur lösen, wenn das Endprodukt betrachtet wird, dem die Leichtbaustruktur dient: das Gesamtflugzeug, das Gesamtfahrzeug. Es bedarf also einer intensiven Vernetzung des Leichtbaus mit den anderen Disziplinen der Produktentwicklung wie der Aerodynamik, der Regelungstechnik, der Energietechnik und weiteren. Es braucht für den Systemleichtbau auch neue Werkzeuge. Ob und wie uns zum Beispiel die Künstliche Intelligenz helfen kann, Strukturen besser zu gestalten und zu fertigen, wollen wir auf unserem diesjährigen Wissenschaftstag am 12. Oktober mit Ihnen diskutieren. Aus dem Verständnis und der Beherrschung solcher komplexen Wechselwirkungen heraus aber speist sich die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Ingenieursarbeit und Wirtschaft. In der Erforschung und Entwicklung dieser Zusammenhänge sehen wir unseren Beitrag zur Leichtbaustrategie der Bundesregierung.

Begleiten Sie uns auf dem Weg in eine Zukunft, in der Leichtbau – als System verstanden – ressourcenschonend und kreislaufeffizient eingesetzt wird für ein emissionsfreies Morgen. Lassen Sie sich durch diesen Innovationsbericht in diesem Sinne inspirieren.

Viel Spaß beim Lesen wünschen Ihnen



Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann
Institutsdirektor



Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach
Stellvertretender Institutsdirektor

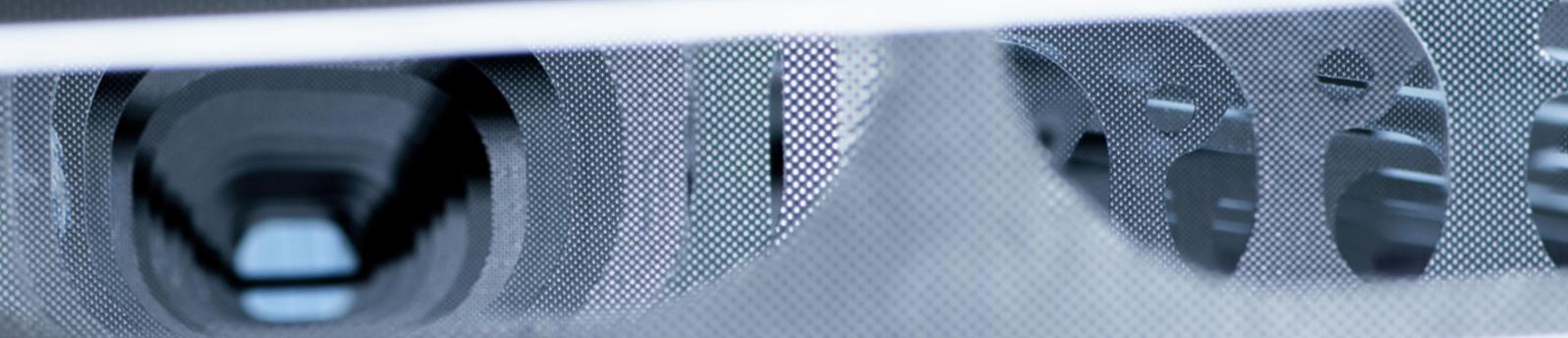


Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider
Abteilungsleitung Leichtbauinnovation

INHALT

Contents

Das Institut im Überblick _____	06
The institute in a nutshell	
Den Systemleichtbau der Zukunft gestalten – Kooperation, Transfer und Innovation _____	08
Shaping the lightweight system construction of the future – cooperation, transfer and innovation	
Systemleichtbau veranschaulicht _____	10
Lightweight systems illustrated	
Sensor-KI-Systeme – technische Nervensysteme der Zukunft _____	12
Sensor AI systems – technical nervous systems of the future	
Angewandte Mathematik und Quantencomputing im Systemleichtbau _____	14
Quantum Computing in Lightweight Systems	
Material _____	16
Material	
Wasserstofftanks dauerhaft dicht – Permeation und Leckage auf dem Prüfstand _____	18
Hydrogen tanks permanently tight – permeation and leakage on the test rig	
Klein, kleiner, nano – wie Nanopartikel die Leistungsfähigkeit von Klebstoffen für Windkraftrotorblätter steigern ____	22
Small, smaller, nano – how nanoparticles increase the performance of adhesives for wind turbine rotor blades	
Das richtige Material am richtigen Platz – multifunktionale Bauteile durch additive Fertigung _____	24
The Right Material in the Right Place – multifunctional components through additive manufacturing	
Methoden _____	26
Methods	
Kryogen küsst Hochtemperatur – Strukturversuche unter Extrembedingungen _____	28
Thermomechanical structural testing of thermal protection systems	
Wie am Schnürchen – wie faserverstärkte Filamente zum lasttragenden Bauteil angeordnet werden _____	30
Like clockwork – how fibre-reinforced filaments are arranged to form the load-bearing component	
Konstruktion _____	32
Construction	
Flügel leicht gemacht – composite design für klimaneutrale Flugzeuge _____	34
Lightweight wings – composite design for climate-neutral aircraft	
Statische Charakterisierung eines Windrotorblattes _____	36
Static characterisation of a wind rotor blades	
Chassis und Separationsmechanismus des IDEFIX-Rovers _____	38
Chassis and separation mechanism of the IDEFIX rover	



Produktion	40
Production	
Verschmelzen der realen und virtuellen Welt am Beispiel einer Vielholmer-Landeklappe	42
Merging the real and virtual world demonstrated on a multispar flap	
Speicherung von kryogenem Wasserstoff in Composite-Flugzeigtanks	44
Storage of liquid hydrogen in composite aircraft tanks	
Additive Funktionalisierung – Eine industriell verfügbare Material- und Prozesskombination mit Auszeichnung	46
Additive functionalisation – an industrially available material and process combination with an award	
Transfer zu höherer Composite-Qualität mit der DIN SPEC 35255	48
Transfer to higher composite quality with DIN SPEC 35255	
Induktives Eis-Schutzsystem: thermisch stark verbunden, mechanisch leicht zu trennen	50
Inductive ice protection system: thermally strongly bonded, mechanically easy to separate	
System	52
System	
Structural Health Monitoring System – bereit für den Einsatz	54
Structural Health Monitoring System – ready for application	
Effiziente Flugzeugtriebwerke: Was wir von den Vögeln lernen können	56
Efficient aircraft engines: learning from birds	
Wie eine sanfte Brise – semiaktive Schallreduktion an Windenergieanlagen	58
Like a gentle breeze – semi-active noise reduction on wind turbines	
Strukturintegrierte Superkondensatoren miniaturisieren elektrische Antriebe	60
Structurally integrated supercapacitors miniaturise electric drives	
Es wird kalt – eine Versuchsanlage für neuartige Hubschrauber-Enteisungssysteme	62
It's getting cold – a test facility for novel helicopter de-icing systems	
Nachhaltigkeit	64
Sustainability	
Kreislaufführung in der additiven Fertigung	66
Cycle management in additive manufacturing	
Das Institut im Detail	68
The institute in detail	
Abteilungen	70
Departments	
Geschäftsfelder	77
Business areas	
Veröffentlichungen 2022/2023	84
Publications 2022/2023	
Patente 2022/2023	86
Patents 2022/2023	

DAS INSTITUT IM ÜBERBLICK



www.dlr.de/sy



www.dlr.de/zlp



Leichtbau.dlr.de

Das DLR-Institut für Systemleichtbau 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, Produktionstechnologien, Adaptronik und Nachhaltigkeitstechnologien orientiert sich das Institut entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung anpassungsfähiger, effizient gefertigter, toleranter Leichtbaustrukturen.

Hochleistungsleichtbau:

anpassungsfähig – effizient – tolerant

Mit seinen kreativen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern an den Standorten Braunschweig und Stade ist das DLR-Institut für Systemleichtbau Partner für Industrie, Hochschulen, DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), Forschungseinrichtungen, Ministerien und Zulassungsbehörden. Zur Klärung von Fragen der Stabilität, Festigkeit und Thermalanalyse betreiben wir einzigartige Versuchs- und Fertigungseinrichtungen wie das gemäß DIN ISO EN 17025 durch Nadcap zertifizierte Prüflabor, thermomechanische Prüfstände, eine Beulanlage für dynamische Bauteilbelastungen sowie mehrere Forschungsautoklaven. Neben grundlegenden Arbeiten in der Zukunftsforschung fokussiert sich das Institut auf fünf Geschäftsfelder in der Anwendungsforschung. Sie dienen der Durchführung von großen praxisorientierten Projekten mit abteilungsübergreifendem und interdisziplinärem Charakter.

Aufseiten der universitären Grundlagenforschung ist das Institut durch Partnerschaften und Kooperationen mit der Technischen Universität Braunschweig, der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, der Technischen Universität Clausthal und weiteren Universitäten verbunden. Aufseiten der anwendungsorientierten Forschung ist durch die Schaffung des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) und durch das Engagement in einem Kundenzentrum mit Airbus sowie dem VPH in Bremen auch die Nähe zum industriellen Kunden gewährleistet. Darüber hinaus ist das Institut auf einem Plateau für Kleinflugzeuge in Aachen vertreten.

Kontakt / Contact

DLR –
Institut für Systemleichtbau

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

E-Mail: leichtbau@dlr.de

ZLP in Stade CFK-WingLab
ZLP in Stade CFK-WingLab



The institute in a nutshell

The DLR Institute of Lightweight 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 environmental protection.

The institute bridges the gap between fundamental research and industrial application. The expertise of the Institute of Lightweight Systems in multifunctional materials, structural mechanics, composite design, composite technologies, adaptions, and sustainability technologies is orientated along the entire process chain of manufacturing 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 institutions, ministries, and civil aviation authorities. In order to deal with strength, stability, and thermo-mechanical problems we operate unique experimental facilities like the Nadcap certified static test laboratory in accordance with DIN ISO EN 17025, 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, TU Clausthal and other academic institutions. Moreover, the institute has established the Center for Lightweight Production Technology (ZLP) and the involvement in a customer centre with Airbus as well as at the VPH in Bremen, proximity to industrial customers is also guaranteed. In addition, the institute is represented on a platform for small aircraft in Aachen.

Anlagen und Einrichtungen (von oben nach unten)

Facilities and equipment (top down):

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

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

Laborautoklav
Lab autoclave

ECOMAT – Heimat des VPH
ECOMAT – home of the VPH

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

Forschungsautoklav BALU®
Research autoclave BALU®

Wissenswert Leichtbau – Begegnungsraum für
kreative Workshops
Wissenswert Leichtbau – meeting place
for creative workshops



Den Systemleichtbau der Zukunft gestalten – Kooperation, Transfer und Innovation

Shaping the lightweight systems of the future –
cooperation, transfer and innovation

Die enge Zusammenarbeit mit Wirtschaftspartnern – vom Start-up über mittelständische Unternehmen bis zu multinationalen Konzernen – bildet das Fundament, auf dem wir gemeinsam die Zukunft des Systemleichtbaus aufbauen. Dabei steht immer im Fokus, Wissen zu transferieren und Innovationen zu ermöglichen. Damit möchten wir mit unseren Partnern Beiträge für ein emissionsfreies Morgen durch intelligenten Systemleichtbau leisten.

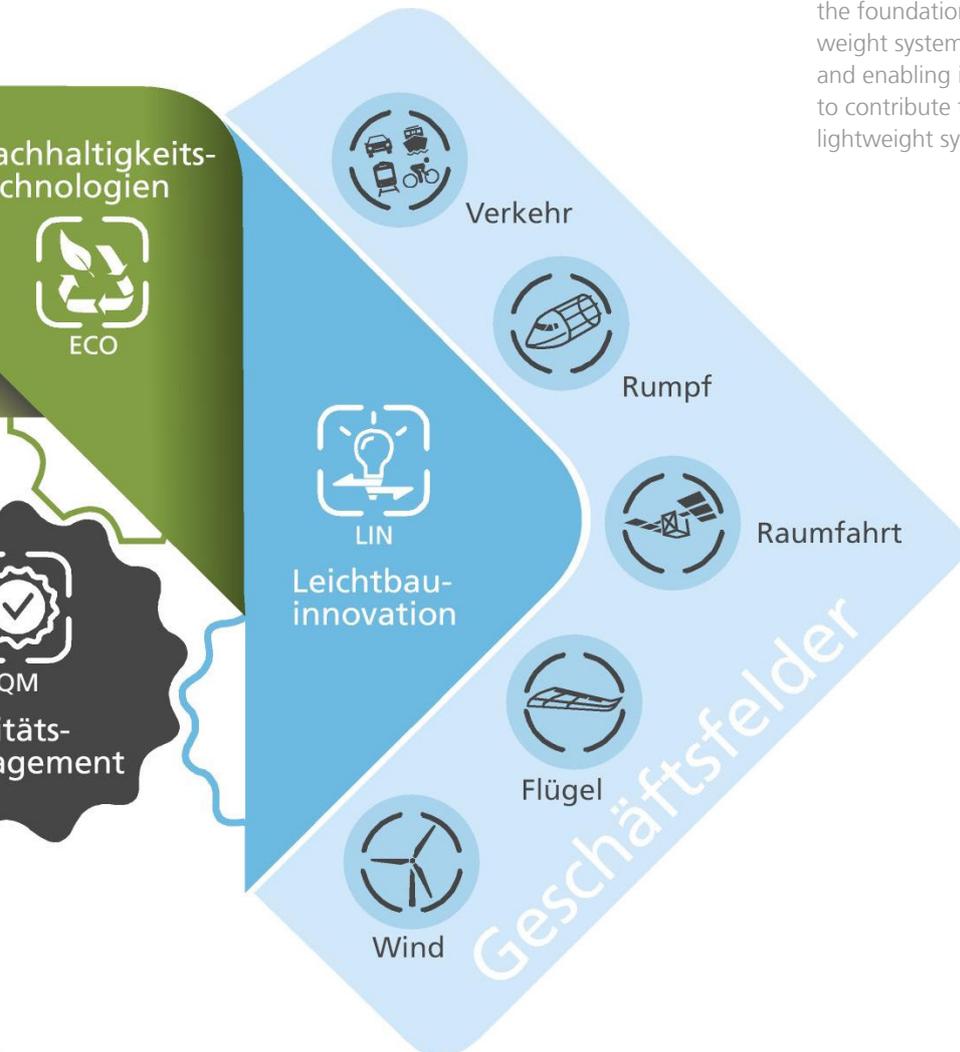
Das Institut für Systemleichtbau verfolgt langfristige Innovationen in den vier Strategiefeldern Additive Composite Structures, Vom Gesamtentwurf zur Zertifizierung, Digitalisierung und Industrie 4.0 sowie Wasserstoff. Diese Strategiefelder werden von den wissenschaftlichen Abteilungen aus unterschiedlichen Perspektiven aufgegriffen und generiertes Wissen über die Geschäftsfelder in die Anwendung transferiert. Hierzu unterhält das Institut neben zertifizierten Testlaboren eine umfassende Forschungsinfrastruktur, welche die Entwicklung, Erprobung und Ausreifung von Technologien bis in das industrielle Umfeld ermöglicht. Unser Ziel ist es, in enger Zusammenarbeit mit Wirtschaftspartnern neues Wissen zu generieren und über die Partner in relevante Marktumfelder zu transferieren. Wir begleiten die Wirtschaftspartner hierbei als verlässlicher Forschungspartner von der Idee bis zur Umsetzung.

Die Möglichkeiten der Zusammenarbeit sind dabei so vielfältig wie die vorhandenen Forschungsfelder. Von gemeinsamen Forschungsverbunden, über Direktbeauftragungen



Summary

Close cooperation with business partners – from start-ups and medium-sized companies to multi-national corporations – forms the foundation on which we jointly build the future of lightweight systems. The focus is always on transferring knowledge and enabling innovation. In this way, we and our partners want to contribute to an emission-free tomorrow through intelligent lightweight systems.



bis zum informativen Austausch ist die beste Kooperationsweise so individuell wie Ihre persönliche Fragestellung. Dabei profitieren Sie von der vorhandenen Forschungsinfrastruktur sowie etablierten Netzwerken. Ebenfalls bieten wir Ihnen stets auch unser Wissen für Ihr individuelles Marktumfeld an. Über Transferprojekte, Schutzrechte und Lizenzen erhalten Sie niederschwellig und unkompliziert Zugang zu unseren Technologien. Denn nur gemeinsam entstehen aus Kooperation und Wissenstransfer auch Innovationen.



Wir begleiten Sie als verlässlicher Forschungspartner von der Idee bis zur Umsetzung. Sprechen Sie uns an!

Ansprechpartner:
Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider
Maik Titze, M. Sc.

E-Mail:
servicedesk-systemleichtbau@dlr.de



Systemleichtbau veranschaulicht

Lightweight systems illustrated

DLR@#JEC

Vom 25. bis 27. April 2023 war das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt mit dem Institut für Systemleichtbau und dem Institut für Bauweisen und Strukturtechnologien auf der JEC World 2023 in Paris vertreten. Mit den besonderen Schwerpunkten auf der Out-of-Autoclave-Technologie und der additiven Funktionalisierung stellten die Institute ihre neuesten Durchbrüche in Forschung, Technologien und Anwendung vor.



Wie schnell und genau ist ein Roboter? Was passiert, wenn man Gummibärchen in flüssigen Stickstoff taucht? Warum ist Ketchup eine nicht-newtonsche Flüssigkeit, Honig aber schon? Wie funktioniert der 3D-Druck und was hat es mit dieser Infusion auf sich?

Das alles konnten sieben Kinder beim Zukunftstag 2023 am 27. April 2023 am ZLP-Standort in Stade herausfinden. Sie traten in einem Malwettbewerb gegen einen unserer GroFi@-Roboter an, testeten die Infusion, inklusive Leckageerkennung, an einem Schwamm und untersuchten verschiedene Materialien im Rheometer. Schließlich entdeckten sie, wie man ein Gummibärchen wie Glas zum Zerspringen bringt. Das alles natürlich nicht, ohne etwas zu lernen und viele Fragen zu stellen.

Das französische Space-Tec-Start-up GAMA und unser Institut gaben am 5. Juni 2023 offiziell ihre Zusammenarbeit bei der GAMABeta-Mission bekannt. GAMA plant, während der gemeinsamen Mission ein Sonnensegel im Weltraum zu entfalten und aktiv zu navigieren.

Das DLR wird einen 4-Mast-Entfaltungsmechanismus beisteuern, der von einem neuartigen modularen und skalierbaren Space-Mast-Konzept abgeleitet ist. Der Start des Testsatelliten ist für 2025 geplant.





Wenige Tage zuvor stand der Prototyp aus dem Projekt Enerwing_xM noch auf dem Prüfstand und absolvierte seine ersten Tests. Am 13.06.2023 reiste er auf die LightCon. Dort wurde er dem versammelten Fachpublikum vorgestellt. Die Forschenden erklärten den Interessierten gerne jedes Detail der superleichten Flugwindkraftanlage.

Ende Juli fand dann der erste Probestart der Flugwindanlage unter der Leitung des Projektpartners EnerKite GmbH statt.

Seit dem 15. August 2023 ist der Forschungspark Windenergie WiValdi eröffnet. Schon im Mai 2023 stellte das DLR die ersten beiden Windenergieanlagen auf. Mit dieser einmaligen Großforschungsanlage will das DLR die Windenergie effizienter, wirtschaftlicher und leiser machen.

Auch die Forschungsarbeiten aus unserem Institut werden bei der Erreichung dieser Ziele mitwirken.



Am 18. September 2023 wurde das DLR Innovation Lab EmpowerAX für das Projekt „EmpowerAX: Additive Funktionalisierung zur kosteneffizienten Fertigung von Kompositen“ in der Kategorie Kooperation mit dem Innovationspreis Niedersachsen 2023 ausgezeichnet. Die erfolgreiche Umsetzung des Bauteils wurde gemeinsam mit 11 Kooperationspartnern verwirklicht.

Wenn Sie regelmäßig das Neueste aus unserem Institut erfahren wollen, folgen Sie uns doch auf LinkedIn:

www.linkedin.com/company/dlr-sy



Sensor-KI-Systeme – technische Nervensysteme der Zukunft

Sensor AI systems – technical nervous systems of the future

Summary

Technically complex systems – whether in aviation, space, energy or transport – nowadays require intelligent solutions for condition monitoring and adaptation. Fused sensor AI concepts are particularly promising in this context. They link diverse data collected by a sensor network, compensate for possible errors and outliers, expand the data set and interpret it. The sensor AI systems currently being developed at DLR should thus enable, among other things, more precise service life assessments and predictive maintenance measures for wind turbines.

Technisch komplexe Systeme – ob im Bereich Luftfahrt, Raumfahrt, Energie oder Verkehr – erfordern heutzutage intelligente Lösungen zur Zustandsüberwachung und Anpassung. Fusionierte Sensor-KI-Konzepte sind in diesem Zusammenhang besonders vielversprechend. Sie verknüpfen diverse von einem Sensornetzwerk erfasste Daten, kompensieren mögliche Fehler und Ausreißer, erweitern den Datensatz und interpretieren ihn. Mit den derzeit am DLR entwickelten Sensor-KI-Systemen sollen somit u. a. präzisere Lebensdauerbewertungen und vorausschauende Wartungsmaßnahmen für Windenergieanlagen möglich sein.

Sensor-KI-Systeme als Wettbewerbsvorteil

Wirtschaftliche Faktoren, wie gestiegene Energie- und Personalkosten, technologische Fortschritte im Bereich KI und ein verstärkter Fokus auf Effizienz und Nachhaltigkeit sowie ein wachsender Bedarf an Echtzeitentscheidungen, bspw. durch autonome Anwendungen, haben dazu beigetragen, dass die Relevanz von Sensor-KI-Konzepten in den letzten Jahren gestiegen ist. Zugleich sind fortschrittliche Sensortechnologien erschwinglicher geworden. Aus diesem Grund sind moderne Sensor-KI-Systeme ein „Game Changer“ und unerlässlich für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit technisch komplexer Systeme.

Das technische Nervensystem

Im Rahmen des dreijährigen DLR-Impulsprojekts [SAFER²](#) arbeitet ein Netzwerk aus Experten von 12 Instituten und Einrichtungen zusammen, um gemeinsam fusionierte Sensor-KI-Ansätze zu entwickeln. Ziele des Projekts sind u. a. die Schaffung einer konsistenten Sensordatengrundlage, die Entwicklung robuster KI- und Regelungsmethoden sowie die Erprobung der Praxistauglichkeit der Methoden an fünf Hardware-Demonstratoren.

Die miteinander vernetzten Sensoren und die KI-Modelle bilden eine Art „Nervensystem“ aufgrund der Analogie in ihrer Topologie und Funktionsweise. Ähnlich wie beim menschlichen Nervensystem können Sensor-KI-Systeme verschiedene innere und äußere Einflüsse erfassen und ganzheitlich interpretieren, um ein umfassendes Bild der Umgebung oder des Systems zu erhalten. In Kombination mit Reglern und Aktuatoren kann in Echtzeit auf sich ändernde Umstände reagiert werden.

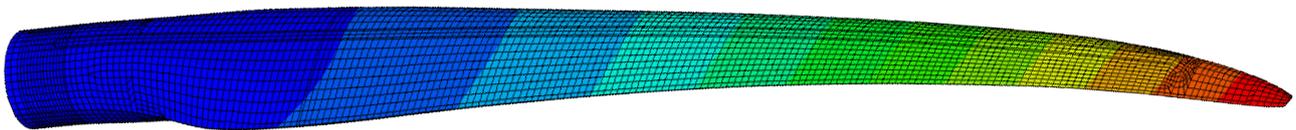
Sensor-KI-Systeme können vielfältig eingesetzt werden: Für autonome Anwendungen, wie Fahrzeuge und Drohnen, zur Vereisungserkennung an Rotorblättern oder zur Detektion von Strukturschäden an Windenergieanlagen. Sie tragen zu einer verbesserten Zustandsüberwachung und -bewertung bei, minimieren das Risiko schwerwiegender Schäden oder kritischer Zustände durch frühzeitige Erkennung und erhöhen die Sicherheit für Personen und Anlagen.



Modalanalyse des Smartblade2 Windrotorblatts / Modal analysis of the Smartblade2 wind rotor blade

Autor:

Christopher Gorsky, M.Sc.



FE-Modell des Smartblade2 Rotorblatts *FE model of the Smartblade2 rotor blade*

Vorausschauende Lösungen für Windenergieanlagen

Laut Bundesverband Windenergie e. V. und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz sind derzeit etwa 30.000 Windenergieanlagen in Deutschland in Betrieb mit einer Leistung von rund 125 TWh, was knapp 22 % der Bruttostromerzeugung in Deutschland entspricht. Ein weiterer Ausbau der Windenergie ist geplant. Damit spielen Windenergieanlagen eine entscheidende Rolle in der Energiewende.

An unserem Institut befassen wir uns in SAFER² mit dem Aspekt, Sensordaten in Kombination mit einem KI-Modell zur Erkennung von Strukturschäden an Windenergieanlagen zu verwenden. Dies umfasst die Interpretation von Zustandsgrößen, wie Dehnungen und Verformungen, und die Bestimmung lokaler Steifigkeits- und Spannungsverteilungen mit KI-Algorithmen, auf deren Basis die Strukturintegrität bewertet werden kann. So können Schäden durch Impacts und Materialermüdung frühzeitig erkannt, Prognosen zur Lebensdauer getroffen sowie vorausschauende Wartungsmaßnahmen („Predictive Maintenance“) eingeleitet werden, wodurch sich Ausfallzeiten reduzieren lassen.

Auf Basis verfügbarer Messdaten aus abgeschlossenen Windprojekten, wie [Smartblade2](#) und [DFWind2](#), wurde ein erstes KI-Konzept entwickelt: Ein Multi-Layer-Perceptron, das mit Hilfe des Backpropagation-Lernverfahrens für relevante Lastszenarien lokale Steifigkeitsverteilungen und -veränderungen ermittelt. Für kleine, abstrahierte Modelle können bereits Fehlergenauigkeiten mit einem mittleren quadratischen Fehler unter 5 % und einem Bestimmtheitsmaß über 95 % erzielt werden. Im Weiteren erfolgt u. a. die Applikation auf realitätsgetreue Windenergieblattmodelle und die Erweiterung der verfügbaren Sensordaten durch Implementierung virtueller Sensoren, welche die Datengrundlage an den Stellen erweitern sollen, wo keine Sensordaten vorliegen.

Mit Hilfe neuer Messdaten aus geplanten experimentellen Untersuchungen wird das bestehende KI-Modell weiterentwickelt und validiert. Als physischer Hardware-Demonstrator dient eine Windenergieblattspitze, die im Windkanal DNW-NWB am DLR-Standort Braunschweig untersucht wird.



Smartblade2-Windrotorblatt mit Sensornetzwerk *Smartblade2 wind rotor*

Beschleunigungssensoren *Acceleration sensors*



Angewandte Mathematik und Quantencomputing im Systemleichtbau

Quantum Computing in Lightweight Systems Construction

Summary

Applied mathematics and optimisation are key factors for efficient and quality-assured industrial production. In particular, their combination with data enables precise planning, control and monitoring of manufacturing processes. Here, we present two current applications developed at the Institute of Lightweight Systems. First, the loading optimisation of autoclaves in composite manufacturing using combinatorial optimisation and quantum computing to minimise process time and energy consumption. And second, automated leakage detection in vacuum setups, which has the potential to speed up a manual search process by orders of magnitude.

Autoklav BALU® in Stade mit unterteilter Ladefläche. Jede Zelle kann durch ein Bauteil belegt werden.

Autoclave BALU® in Stade with subdivided loading area. Each cell can be occupied by one component.



Angewandte Mathematik und Optimierung sind Schlüsselfaktoren für eine effiziente und qualitätsgesicherte industrielle Produktion. Insbesondere ihre Kombination mit Daten ermöglicht eine präzise Planung, Steuerung und Überwachung von Fertigungsprozessen. Hier präsentieren wir zwei aktuelle am Institut für Systemleichtbau entwickelte Produktionsprozesse, bei denen wir die Optimierung neuerdings auch mit Hilfe des Quantencomputings angehen.

Beladungsoptimierung für Autoklaven

In der Faserverbundfertigung erfolgt die Aushärtung von Bauteilen in Autoklaven unter Druck und Temperatur. Sollen mehrere Bauteile unterschiedlicher Geometrie gleichzeitig ausgehärtet werden, beeinflusst ihre Anordnung die Wärmeverteilung und damit die für eine hinreichende Aushärtung aller Bauteile erforderliche Prozesslaufzeit. Industrielle Autoklavprozesse erfolgen täglich mit Beladungsszenarien mit bis zu mehreren hundert heterogenen Bauteilen. Deren Zusammensetzung kann stark variieren und ist oft nur kurzfristig planbar.

Im Rahmen des DLR-internen [Projekts ELEVATE](#) (Enhanced probleM solving with quAntum compuTErs) entwickeln wir einen auf kombinatorischer Optimierung basierenden Ansatz zur Beladungsoptimierung. Das Ziel ist, Bauteile im Autoklav derart anzuordnen, dass die erforderliche Prozesszeit und damit der Energieverbrauch ein Minimum annehmen. Dabei werden auch Prioritäten berücksichtigt, welche die Dringlichkeit der Fertigstellung pro Bauteil repräsentieren. Aus der mathematischen Modellierung ergeben sich zudem Nebenbedingungen, deren Berücksichtigung bei der Optimierung unabdingbar ist, zum Beispiel die Bedingung, dass eine optimale Lösung die Platzierung mehrerer Bauteile nicht an derselben Stelle vorsehen darf.

Das resultierende Optimierungsproblem ist NP-schwer – vereinfacht ausgedrückt: Es gibt keinen Algorithmus, der eine Lösung in polynomieller Zeit finden kann. Wenn wir viele Bauteile und unterschiedliche Geometrien berücksichtigen wollen (hieraus ergibt sich die Anzahl der Variablen), kann dies auf klassischen Rechnern zu langen Laufzeiten führen, die einem praktischen Nutzen entgegenstehen. Gleichzeitig stellen schwere kombinatorische Optimierungsprobleme einen vielversprechenden Anwendungsfall für Quantencomputer dar. Durch sogenannte Quanten-Annealing-Systeme rückt das schnelle Lösen solcher Probleme in greifbare Nähe. Gemeinsam mit Quantenexperten vom Institut für Softwaretechnologie des DLR und Optimierungsexperten von der TU Braunschweig arbeiten wir an einer Problemlösung in der Quantendomäne.



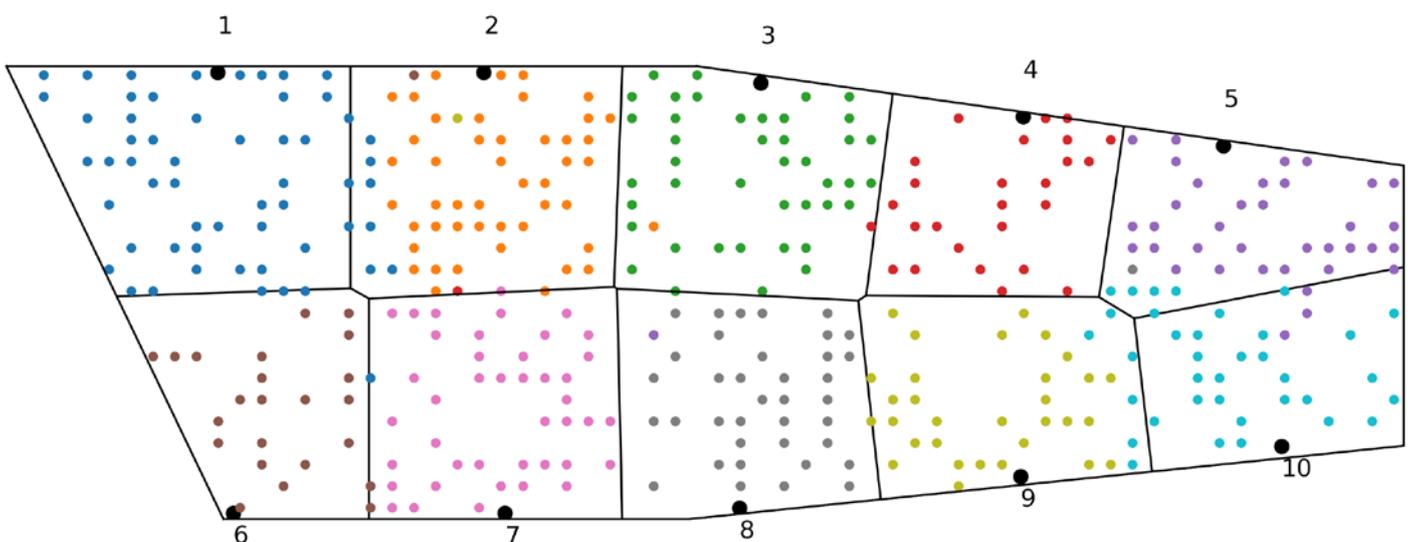
Autor:

Dr. rer. nat. Christoph Brauer

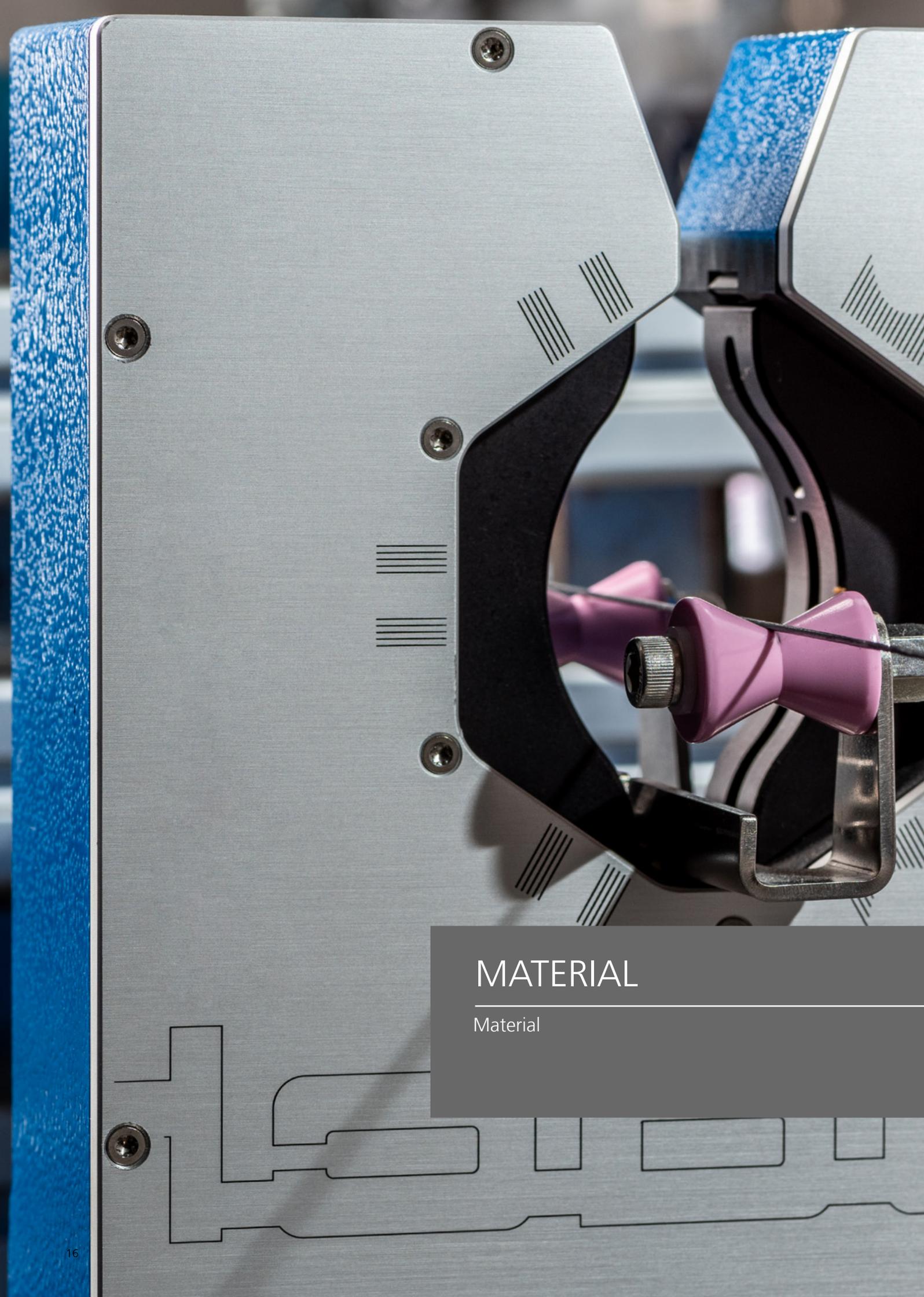
Leckage-Lokalisierung in Vakuumaufbauten

Um bei der Aushärtung von Bauteilen gleichmäßigen Oberflächendruck zu erzeugen, werden in der Faserverbundproduktion Vakuumaufbauten eingesetzt. Leckagen treten in der Vakuumfolie regelmäßig auf, verursacht zum Beispiel durch Fremdkörper. Um Qualitätsmängeln im Endprodukt vorzubeugen, müssen vorab sämtliche Leckagen repariert werden. Die Herausforderung: Kleine Leckagen sind durch das menschliche Auge meist nicht wahrnehmbar und zudem ist die Suchfläche sehr groß. Im Fall eines Flügels erstreckt sie sich potenziell auf über 400 Quadratmeter. Zur Lokalisierung ist die Verwendung von Richtmikrofonen und Thermokameras gängige Praxis. Jedoch bindet sie oftmals Personal für Stunden. Eine automatisierte Lösung ist daher von großem Interesse.

Gemeinsam mit der Airbus Aerostructures GmbH, der HTK Hamburg GmbH und der TU Braunschweig verfolgen wir das Ziel, Ansätze zur automatisierten Leckage-Lokalisierung zu industrialisieren. Die Basis bilden Sensoren von HTK, die den Gasdurchfluss an Vakuumschlüssen in Echtzeit messen. Der Gesamtfluss wird bereits heute zur Dichtheitsprüfung verwendet. Durch eine geschickte Kombination der Messwerte einzelner Sensoren mit Voronoi-Diagrammen lassen sich Leckagen genau lokalisieren. Voronoi-Diagramme sind ein Werkzeug aus der algorithmischen Geometrie mit vielfältigen Anwendungsgebieten. Hier wird die Bauteiloberfläche in Regionen unterteilt, die in nächster Nähe zu einzelnen Vakuumschlüssen liegen. So lässt sich aus Sensordaten auf Bereiche schließen, die Leckagen enthalten.



Voronoi-Diagramm eines Flügels mit zehn Sensoren. Die Punkte entsprechen den Leckagen und die Farben den Vorhersagen.
Voronoi diagram of a wing with ten sensors. Points correspond to leakages and colours to predictions.



MATERIAL

Material

Wasserstofftanks dauerhaft dicht – Permeation und Leckage auf dem Prüfstand _____	18
Hydrogen tanks permanently tight – permeation and leakage on the test rig	
Advanced Reinforcements für neue effiziente Antriebs- und Flugzeugkonfigurationen _____	20
Advanced reinforcements for new efficient propulsion and aircraft configurations	
Klein, kleiner, nano – wie Nanopartikel die Leistungsfähigkeit von Klebstoffen für Windkraftrotorblätter steigern _____	22
Small, smaller, nano – how nanoparticles increase the performance of adhesives for wind turbine rotor blades	
Das richtige Material am richtigen Platz – multifunktionale Bauteile durch additive Fertigung _____	24
The right material in the right place – multifunctional components through additive manufacturing	

Wasserstofftanks dauerhaft dicht – Permeation und Leckage auf dem Prüfstand

Hydrogen tanks permanently tight – permeation and leakage on the test rig

Summary

The global climate goals require, among other things, a massive reduction of greenhouse gas emissions in aviation. Hydrogen as an alternative energy source for aircraft appears to be a promising solution, as it causes barely any climate-damaging emissions. One of the biggest challenges lies in the storage of liquid hydrogen (LH2) at cryogenic temperatures. Efficient and safe LH2 storage systems are crucial. Lightweight system design can help with this.

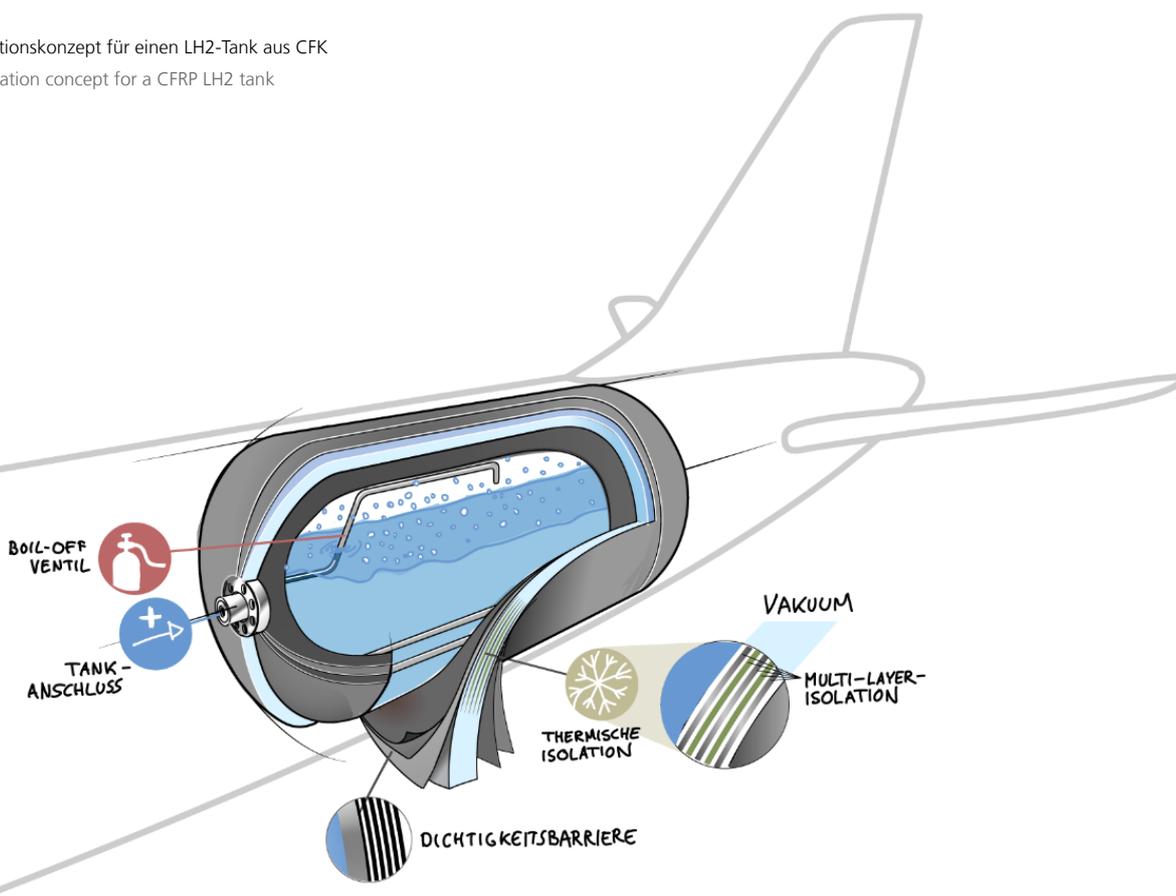
Die weltweiten Klimaziele erfordern u. a. eine massive Reduktion von Treibhausgasemissionen auch in der Luftfahrt. Wasserstoff als alternative Energiequelle für Flugzeuge erscheint als vielversprechende Lösung, da er im Vergleich zu Kerosin kaum klimaschädliche Emissionen verursacht. Eine der größten Herausforderungen liegt in der Speicherung von flüssigem Wasserstoff (LH2) bei kryogenen Temperaturen. Effiziente und sichere LH2-Speichersysteme sind entscheidend. Der Systemleichtbau kann dabei helfen.

Vorbild Thermoskanne

Aktuelle LH2-Flugzeugtankkonzepte setzen auf das bewährte Prinzip der Thermoskanne. Ein Vakuum zwischen zwei Tankwänden mit spezieller Isolation (z. B. Multi-Layer) koppelt die Umgebung thermisch ab und minimiert Wärmeverluste. Die Aufrechterhaltung des Vakuums über lange Zeit ist entscheidend. Mit weiterentwickelten Materialien und neuartigen technischen Lösungen arbeiten Forschung und Industrie daran, die Isolierung effizienter und das Vakuum beständiger zu machen.

Die Effektivität des Isolationskonzeptes hängt von der Qualität des Vakuums zwischen den Tankhüllen ab. Wesentliche Phänomene hierbei sind Permeation und Leckage. Permeation ist die Diffusion von Wasserstoff durch die Tankwand. Vakuümigüte und Isolationswirkung nehmen allmählich ab. Dies ist unvermeidlich und mit technischen Maßnahmen lediglich reduzierbar. Leckagen mit größeren Volumenströmen sind dagegen unbedingt zu verhindern.

Isolationskonzept für einen LH2-Tank aus CFK
Insulation concept for a CFRP LH2 tank



Autor:

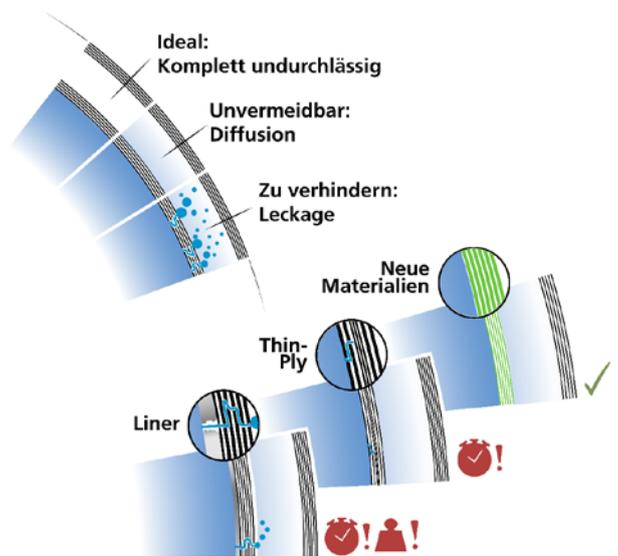
Josef Koord, M. Sc.



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

Konzepte für leckagedichte Innentanks

Es gibt drei Konzepte für leckagedichte Innentanks: Das Liner-Konzept will mit einer Metall- oder Kunststoffbarriere eine Leckage vermeiden, kann die eigentliche Ursache aber nicht beheben. Beim Thin-Ply-Konzept sollen besonders dünne Einzellagen (Thin Plies) Mikrorissnetzwerke und damit Leckagen verhindern. Das dritte, aussichtsreichste Konzept zielt darauf ab, mit kryooptimierten Materialien Mikrorissnetzwerke gar nicht erst entstehen zu lassen. Im Gegensatz zum Liner- und Thin-Ply-Konzept entfallen zusätzliche Barrierschichten mit deutlichen Gewichts- und Fertigungsvorteilen.



Permeation und Leckage am Innentank
Permeation and leakage at the inner tank wall

Neuartige Prüftechnik für Technologieentwicklung und -bewertung

Permeabilitätsuntersuchungen sind essenziell für die Dichtheitsbeurteilung. Ein eigens entwickelter neuartiger Prüfstand ermöglicht die Bestimmung von Permeabilität und Leckage bei Raumtemperatur. Permeabilitätstests können mehrere Tage dauern, da Diffusion ein sehr langsamer Prozess ist. Um Zeit zu sparen, lassen sich bis zu sechs Prüfkörper gleichzeitig testen. Mit anschließendem Eintauchen der Prüfkörper in ein kryogenes Medium lässt sich die thermische Belastung bei extremen Temperaturen simulieren. Der Clou ist die Verwendung von Helium als Ersatzgas und Flüssigstickstoff (LN2) als Ersatzmedium für LH2. Ähnliche Molekülgrößen und vergleichbare Siedepunkte (-253 °C vs. -196 °C) erlauben diese Vorgehensweise und ermöglichen schnell wichtige Erkenntnisgewinne. Die so entwickelten Lösungen müssen allerdings noch unter LH2-Bedingungen ihre Tauglichkeit beweisen.

Die Entwicklung von LH2-Tanks aus CFK wirft viele Fragen auf. Der hier gezeigte Ansatz hilft, grundlegende Fragestellungen sicher, kosten- und zeiteffizient zu beantworten und die Entwicklung zu beschleunigen.



Prüfaufbau für Permeabilitätsmessungen bei kryogenen Temperaturen
Test setup for permeability measurements at cryogenic temperatures



Prüfstand für Permeabilitätsmessungen bei Raumtemperatur
Test rig for permeability measurements at room temperature

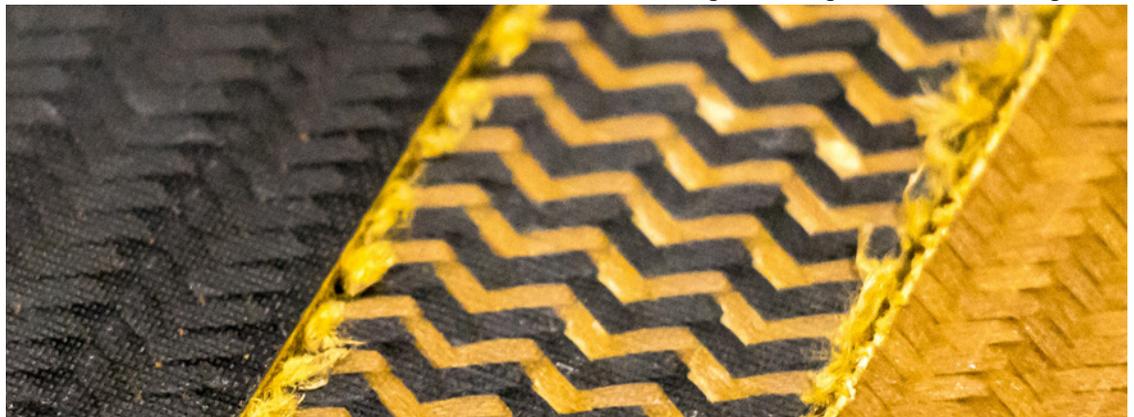
Advanced reinforcements für neue effiziente Antriebs- und Flugzeugkonfigurationen

Advanced reinforcements for new efficient propulsion and aircraft configurations

Summary

New propulsion concepts and aircraft configurations require fuselage protection against engine debris or ice shedding. Laminates made of triaxial braided fabrics were investigated within the Clean Sky 2 programme. Static and dynamic mechanical tests revealed that a pure PBO laminate as well as a hybrid Carbon-PBO laminate are unsuitable as load-bearing structural materials due to distinct delamination growth. Since the hybrid laminate failed mainly at the clamping, better results might be achieved by adjusting the fibre distribution and specimen geometry.

Ballistische Laminare auf Basis triaxialer geflochtener Kohlenstofffasern, Kohlenstoff-PBO-Fasern und PBO-Fasern (v. l. n. r.)
Ballistic laminates based on triaxial braided carbon fibres, carbon-PBO fibres and PBO fibres (l. t. r.)



Kohlenstofffasern (C-Fasern). Bei diesen Faserarchitekturen ermöglichen die Multiaxialität der Einzelschicht (Faserwinkel: 0° und $\pm 60^\circ$) und das komplexe Schädigungsverhalten im Bereich der Faser-Kreuzungspunkte eine gesteigerte Energieaufnahme. Eine umfassende Charakterisierung des Impact-Verhaltens verschiedener Materialkombinationen erfolgte in Hochgeschwindigkeitsbeschussversuchen am Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie. Am Institut für Systemleichtbau stand die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeiten und Ermüdungsverhalten, im Fokus.

Geflechte auf dem Prüfstand

In statischen und dynamischen Zugversuchen an drei Laminaten aus geflochtenen gleich ausgerichteten Einzelschichten konnte ein sehr unterschiedliches mechanisches Verhalten beobachtet werden. Das C-Faser-Laminat erreichte bei Belastung in 0° -Faserichtung eine Zugfestigkeit von 720 MPa, die in der Größenordnung quasi-isotroper Luftfahrtlaminare liegt. Die Festigkeit in Querrichtung war mit 550 MPa 24 % geringer, da nur Quer- und Off-Axis-Beanspruchungen vorliegen.

Autor:

Dr.-Ing. Till Julian Adam



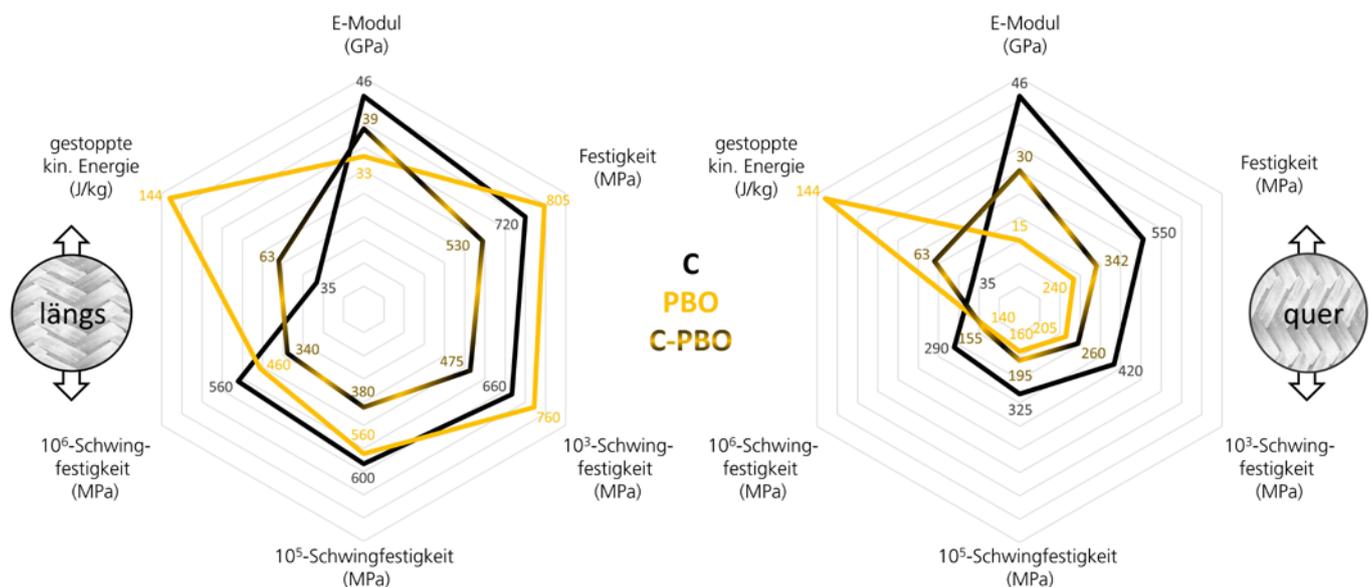
Verglichen mit dem C-Faser-Laminat ermöglichte die Verwendung der um 30 % festeren PBO-Faser eine um immerhin 12 % höhere Laminatfestigkeit (805 MPa). Unter transversaler Last versagte das Laminat aufgrund der geringen Faser-Matrix-Haftung jedoch schon bei einer Zugspannung von 240 MPa. Im Gegensatz zu dem in beiden Richtungen spröde durch Faserbruch versagenden C-Faser-Laminat zeigte das PBO-Laminat ein durch ausgeprägte Delaminationen gekennzeichnetes Versagensverhalten mit Faserauszug unter Längszug und Schubverzerrung unter Querzug. Die Ermüdungsfestigkeiten beider Laminats zeigten ähnliche Tendenzen. Das PBO-Laminat war bis auf den Bereich sehr hoher Schwingbeanspruchungen und sehr kurzer Lebensdauern unterlegen.

Gemischte Fasern – gemischte Resultate

Im nächsten Schritt wurde untersucht, die spezifischen ballistischen und strukturellen Eigenschaften beider Fasertypen in einem Hybridlaminat vorteilhaft zu kombinieren. Ein Laminat mit gleichen Anteilen aus C- und PBO-Fasern zeigte zwar eine höhere Querzugfestigkeit (342 MPa), jedoch nahm die Längszugfestigkeit im Vergleich zum CFK-Laminat um 26 % ab (530 MPa). Ursächlich hierfür sind die Unterschiede in Bruchdehnung und Steifigkeit der Fasern, die zu einem Probenversagen im Einspannungsbereich führten. Auch unter Ermüdungslasten schnitt das Hybridlaminat schlecht ab. Lediglich in Querrichtung wurde verglichen mit dem reinen PBO-Laminat eine geringe Verbesserung der Ermüdungseigenschaften erreicht.

Neue Orientierung

Die Ergebnisse der mechanischen Versuche verdeutlichen, dass sowohl das PBO-Laminat als auch das hybride C-PBO-Laminat keine herausragenden Struktureigenschaften besitzen. Angesichts des Versagens des Hybridlaminats nahe der Einspannung gilt jedoch zu überprüfen, ob durch Anpassung der Probengeometrie höhere Festigkeiten erreichbar sind. Zudem ist eine Optimierung der Verteilung von C- und PBO-Fasern denkbar, um eine höhere Deformationskompatibilität zu erzielen.



Materialkennwerte der Längs- und Querrichtung: E-Modul, Zugfestigkeit, Schwingfestigkeiten für Lebensdauern von 10³, 10⁵ und 10⁶ Lastwechseln, Impact-Ergebnisse des Instituts für Bauweisen und Strukturtechnologie

Material properties of the longitudinal and transverse directions: Young's modulus, tensile strength, fatigue strengths for lifetimes of 10³, 10⁵ and 10⁶ load cycles, impact results of the Institute of Structures and Design

Klein, kleiner, nano – wie Nanopartikel die Leistungsfähigkeit von Klebstoffen für Windkraftrotorblätter steigern

Small, smaller, nano – how nanoparticles increase the performance of adhesives for wind turbine rotor blades

Summary

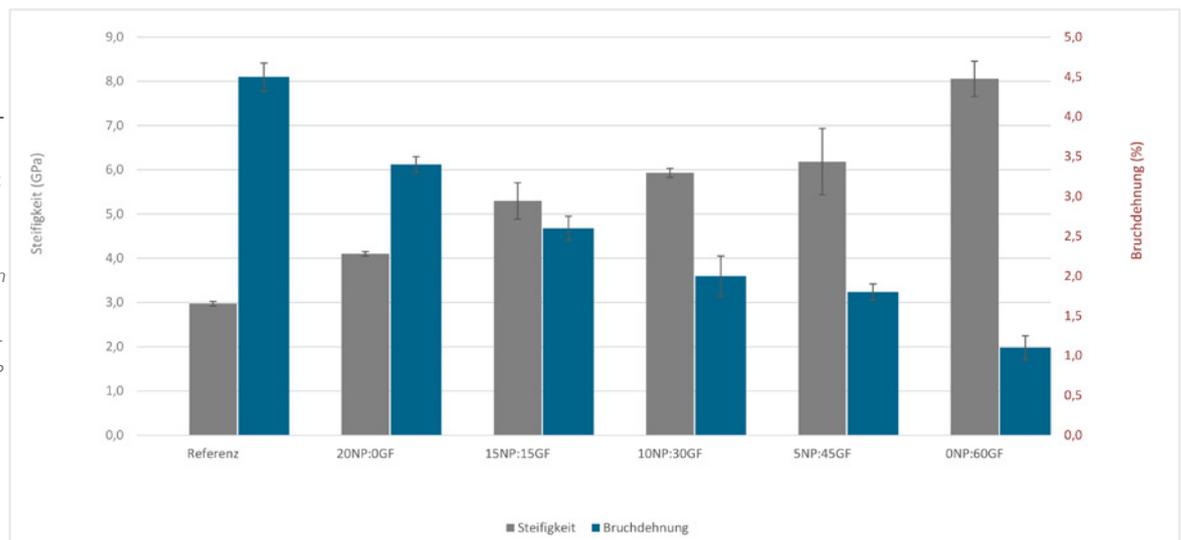
Due to global warming, the need for clean energy sources like wind energy is constantly growing. The rotor blades of wind turbines consist of composite shells bonded together. Thus, requirements for adhesives increase with the size of the rotor blades. In the wind industry, short fibres are used to improve stiffness and fracture toughness of adhesives. However, the short fibres also lead to reduced elongation at break. This can be counteracted by the use of nanoparticles. Therefore, the DLR is working on enhanced adhesives for the wind industry in cooperation with research and industrial partners.

Der Ausbau von Stromerzeugung durch Windenergie leistet einen entscheidenden Beitrag zur klimaneutralen Energieversorgung der Bundesrepublik. Aufgrund der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Flächen müssen zukünftige Windenergieanlagen eine höhere Wirtschaftlichkeit und einen verbesserten Nutzungsgrad aufweisen. Insbesondere die Entwicklung größerer Rotorblätter ist hierfür entscheidend. Etablierte Werkstoffe stoßen jedoch mit Zunahme der Blattgrößen an ihre Leistungsgrenzen. Rotorblätter bestehen aus großen, halbschalenförmigen Faserverbundbauteilen, die miteinander verklebt sind. Diese Bauweise bedingt lange und dicke Klebstoffnähte, die maßgeblich die Gesamtfestigkeit des Blattes bestimmen. Der Entwicklung von leistungsstarken Klebstoffen für eine neue Generation von sehr großen Anlagen kommt daher eine entscheidende Bedeutung zu. Im Rahmen des BMWK-Verbundprojekts HANNAH entwickelt und erprobt das DLR in Kooperation mit Forschungs- und Industriepartnern (Universität Hannover, Fraunhofer, INVENT, TECOSIM, Zeisberg Carbon) neuartige hybride Klebstoffe. Hierfür werden konventionelle Füllstoffe in Kombination mit Nanopartikeln eingesetzt. Ziel ist eine verbesserte Kohäsions- und Dauerfestigkeit des modifizierten Klebstoffsystems, bei dessen Konfektionierung auch spezifische Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit und Temperatur zu berücksichtigen sind.

Warum Nanopartikel?

Die Integration von nanoskaligen Partikeln ermöglicht neben konventionellen Füllstoffen, wie Kurzfasern, eine weitere Verbesserung der Materialeigenschaften. Nanoskalige Partikel besitzen sehr große spezifische Oberflächen, weshalb wichtige Verarbeitungseigenschaften, wie eine hohe Viskosität, bereits bei geringen Füllstoffanteilen effektiv eingestellt werden können. In der Windkraftindustrie müssen Klebstoffe thixotrop sein, um den Auftrag von dicken Schichten zu gewährleisten und das Wegfließen des Klebstoffs auf dem Füge teil zu verhindern. Darüber hinaus müssen eine möglichst blasenfreie Applikation und eine ausreichende Verarbeitungszeit sichergestellt sein. Neben den Prozesseigenschaften ist die mechanische Leistungsfähigkeit der Klebstoffe entscheidend für deren Einsatz in hoch beanspruchten Rotorblättern. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Kurzfasern

Zugsteifigkeit und Bruchdehnung von Klebstoffen mit unterschiedlichen Füllstoffgehalten; GF: Kurz-Glasfaser; NP: Nanopartikel; Zahlen: Gewichtsprozent
Stiffness and elongation at break for adhesives with varying filler content; GF: short fibre; NP nanoparticle; numbers: weight percent



Autor:

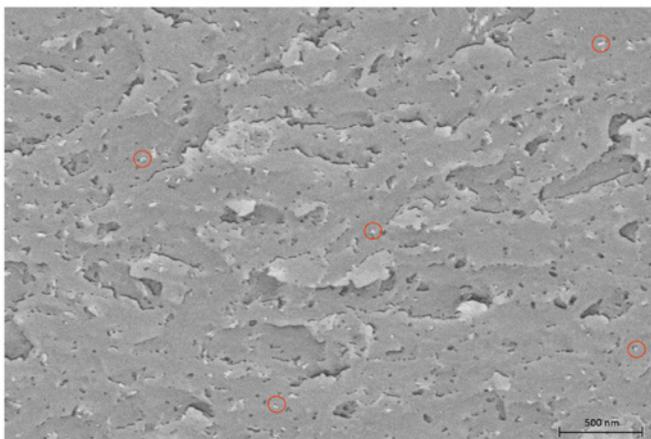
Dr.-Ing. Maximilian Jux



Klebstoffraupe (ca. 20 x 10 cm) auf Fügefläche im Wurzelbereich der Rotorblattschale
Adhesive bead (ca. 20 x 10 cm) on the joint surface in the root area of the rotor blade shell

verstärkte Klebstoffe eine höhere Steifigkeit (Faktor 2,7) und Risszähigkeit (Faktor 3) besitzen. Gleichzeitig sinkt aufgrund der Kurzfasern jedoch die Bruchdehnung. Diesem Effekt kann mit Hilfe von Nanopartikeln entgegengewirkt werden. Die Kombination beider Füllstoffe ermöglicht somit ein maßgeschneidertes hybrides Klebstoffdesign.

Anwendungsnahe Erprobung



REM-Bild von Harzsystem mit zehn Gewichtsprozent Nanopartikeln. 14 nm große Primärpartikel (siehe Markierungen), homogen verteilt.
SEM picture of resin system with ten weight-percent nanoparticles. 14 nm primary particle size (see markers), homogeneous distribution.

Im Laufe ihrer Betriebszeit sind Windkraftanlagen vielen Umweltbelastungen ausgesetzt. Auch während der Herstellung von Rotorblättern können bereits Umwelteinflüsse, wie erhöhte Temperaturen und Feuchtigkeit, in der Fertigungs- und Lagerumgebung auftreten. Diese Umweltbelastungen können eine Degradation der mechanischen Eigenschaften der Rotorblätter verursachen und letztendlich zu einem vorzeitigen Bauteilversagen führen. Die am DLR entwickelten Klebstoffe werden daher auch bei feuchtwarmen Klimabedingungen eingelagert und bei erhöhten Temperaturen getestet. Es hat sich gezeigt, dass die Diffusion des Wassers durch die Füllstoffe verlangsamt wird. Dem entgegen steht jedoch eine steigende Feuchtigkeitsaufnahme mit zunehmendem Kurzfasergehalt. Daher ist es zielführend, den Kurzfasergehalt zu reduzieren, um Wassereinlagerungen möglichst gering zu halten.

Das richtige Material am richtigen Platz – multifunktionale Bauteile durch additive Fertigung

The right material in the right place – multifunctional components through additive manufacturing

Summary

Additive manufacturing enables effort-less/simplified production of complex, multifunctional components by combining materials with different functionalities in a single manufacturing process. However, the availability of corresponding semi-finished products in the form of filaments or granules is limited. As part of the „Additive Composite Structures“ (AddCompS™) strategic field, the necessary laboratory infrastructure has been established to develop and test functionalised high-performance thermoplastics for additive manufacturing. From the integration of antimicrobial particles to the production of continuous fibre-reinforced filaments using an innovative ultrasonic impregnation technology, various applications have already been demonstrated.

Viele Unternehmen profitieren mittlerweile von den einzigartigen Vorteilen der additiven Fertigung. Die große Flexibilität in der Materialauswahl, die geringen Werkzeugkosten und die neuen Freiheitsgrade im Bauteildesign sind entscheidende Vorteile gegenüber konventionellen Prozessen. Aus diesen Gründen ist diese Technologie insbesondere für die Herstellung von komplexen Leichtbaustrukturen eine kostengünstige und ressourcenschonende Fertigungsalternative. Besondere Vorteile entstehen, wenn verschiedene Materialien in einem Bauteil kombiniert werden. Hierbei erlaubt die additive Fertigung, die unterschiedlichen Materialien genau dort im Bauteil zu positionieren, wo die entsprechende Funktionalität benötigt wird. Somit können komplexe, multifunktionale Bauteile in einem einzigen Fertigungsprozess realisiert werden. Eine große Herausforderung stellt die eingeschränkte Verfügbarkeit geeigneter funktionalisierter Halbzeuge dar. Im Rahmen des Strategiefeldes „Additive Composite Structures“ (AddCompS™) ist am Institut für Systemleichtbau daher die notwendige Laborinfrastruktur aufgebaut worden, um insbesondere funktionalisierte Hochleistungsthermoplaste speziell für die additive Fertigung zu entwickeln und zu erproben.

Ein Labor, viele Möglichkeiten

Thermoplastische Kunststoffe lassen sich als maßgeschneidertes Werkstoffsystem gezielt auf den jeweiligen Anwendungsfall anpassen. Durch die Integration von Additiven oder Faserverstärkungen können geeigneten Basispolymeren zusätzliche Funktionalitäten verliehen werden. In den AddCompS™-Laboren stehen hierfür unterschiedliche Anlagen zur Verfügung. Mit einem gleichläufigen Doppelschneckenextruder werden verschiedenste Partikel in Hochleistungsthermoplaste eingearbeitet.

Je nach 3D-Druckverfahren wird das modifizierte Granulat entweder direkt verdrückt oder zu Filamenten weiterverarbeitet. Für diesen Veredelungsschritt ist das AddCompS™-Labor mit einem speziellen Einschneckenextruder ausgestattet, der die Herstellung qualitativ hochwertiger Filament-Chargen ermöglicht. Im Rahmen eines industriellen Kooperationsprojektes wird diese Infrastruktur beispielsweise dazu eingesetzt, Hochleistungsfilamente mit antimikrobiellen Eigenschaften zu entwickeln. Anschließend werden diese funktionalisierten Halbzeuge in den vorhandenen 3D-Druckprozessen genutzt, um Bauteile mit integrierten antimikrobiellen Oberflächen für den Flugzeuginnenraum herzustellen. Durch die strengen Anforderungen der Luftfahrtindustrie kommen kommerzielle antimikrobielle Filamente, die in der Regel auf Standardkunststoffen basieren, an ihre Grenzen. In dem Projekt stehen daher besonders Hochleistungspolymere im Fokus.



Ein Labor, viele Möglichkeiten – Das AddCompS™-Labor
One laboratory, many possibilities – The AddCompS™ Lab

Autoren:

Fabian Kühnast, M. Sc.

Maik Titze, M. Sc.

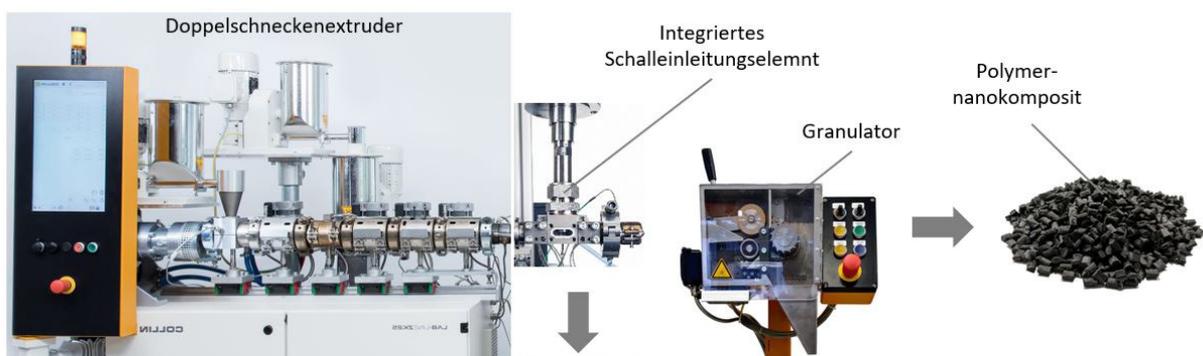


Ein Labor, viele Möglichkeiten – das AddCompS™ -Labor

Neben dem Einmischen von Partikeln liegt ein weiterer AddCompS™-Schwerpunkt auf der Entwicklung von 3D-Druck-Filamenten mit Endlosfaserverstärkung. Derartige Halbzeuge ermöglichen die Integration lastpfadgerechter Verstärkungen und dadurch die additive Fertigung leichter und gleichzeitig hochbelastbarer Bauteile. Hierfür ist im Rahmen eines Projektes eine Laboranlage entstanden, die die Herstellung solcher Filamente direkt aus den Ausgangsmaterialien (Kunststoffgranulat und Faseroving) erlaubt. Der entwickelte Prozess setzt auf eine innovative Imprägnier-Technologie mit Hilfe von Ultraschall. Dabei entstehen durch die Einleitung hochfrequenter Schallwellen in einen kontinuierlichen Extrusionsprozess oszillierende Druckfelder, die eine effektive Imprägnierung der Endlosfasern auf kleinem Bauraum ermöglichen. Komplettiert wird die Laborinfrastruktur durch verschiedene 3D-Druck-Anlagen sowie ein umfangreich ausgestattetes Prüffeld. Dadurch besteht die Möglichkeit, alle entwickelten Halbzeug-Typen direkt prozess- und materialseitig zu bewerten.

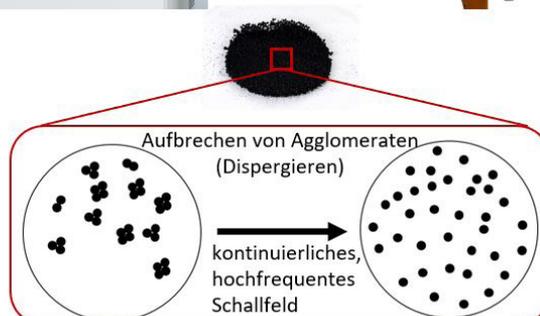
Der nächste Schritt – Polymernanokomposite durch Ultraschall

Weiterführende Forschungsarbeiten im Bereich der thermoplastischen Halbzeugherstellung fokussieren eine Weiterentwicklung der Ultraschalltechnologie. Gemeinsam mit Industriepartnern ist es das Ziel, die Technologie auszureifen und in ein industrielles Umfeld zu überführen. Einerseits gelingt dadurch eine kosteneffiziente Herstellung endlosfaserverstärkter Halbzeuge, andererseits wird eine effiziente Möglichkeit zur Funktionalisierung von Hochleistungsthermoplasten durch Nanopartikel geschaffen. Insbesondere der Einsatz von Nanopartikeln bietet für die Funktionalisierung von Polymeren große Vorteile, da diese bei gleichem Gewicht eine signifikant größere Oberfläche als ihre mikroskaligen Pendanten aufweisen und dadurch deutlich stärkere Wechselwirkungen mit dem Matrixmaterial ausbilden können. Durch die große Oberfläche neigen Nanopartikel jedoch zur Bildung von stabilen Agglomeraten, die mit aktuellen Verarbeitungsverfahren oft nicht ausreichend aufgebrochen werden können. Hier setzt die Ultraschalltechnologie an. Durch die lokale Integration von Schalleinleitungselementen in den Doppelschneckenextruder kann Ultraschall in einem kontinuierlichen Extrusionsprozess genutzt werden, um Agglomerate wirkungsvoll bis auf die Nanoebene aufzubrechen und zu vereinzeln. Die Realisierung hoher Dispersionsgüten ist die Voraussetzung, damit zusätzliche Funktionalitäten in thermoplastischen Hochleistungswerkstoffen bestmöglich zum Tragen kommen können.



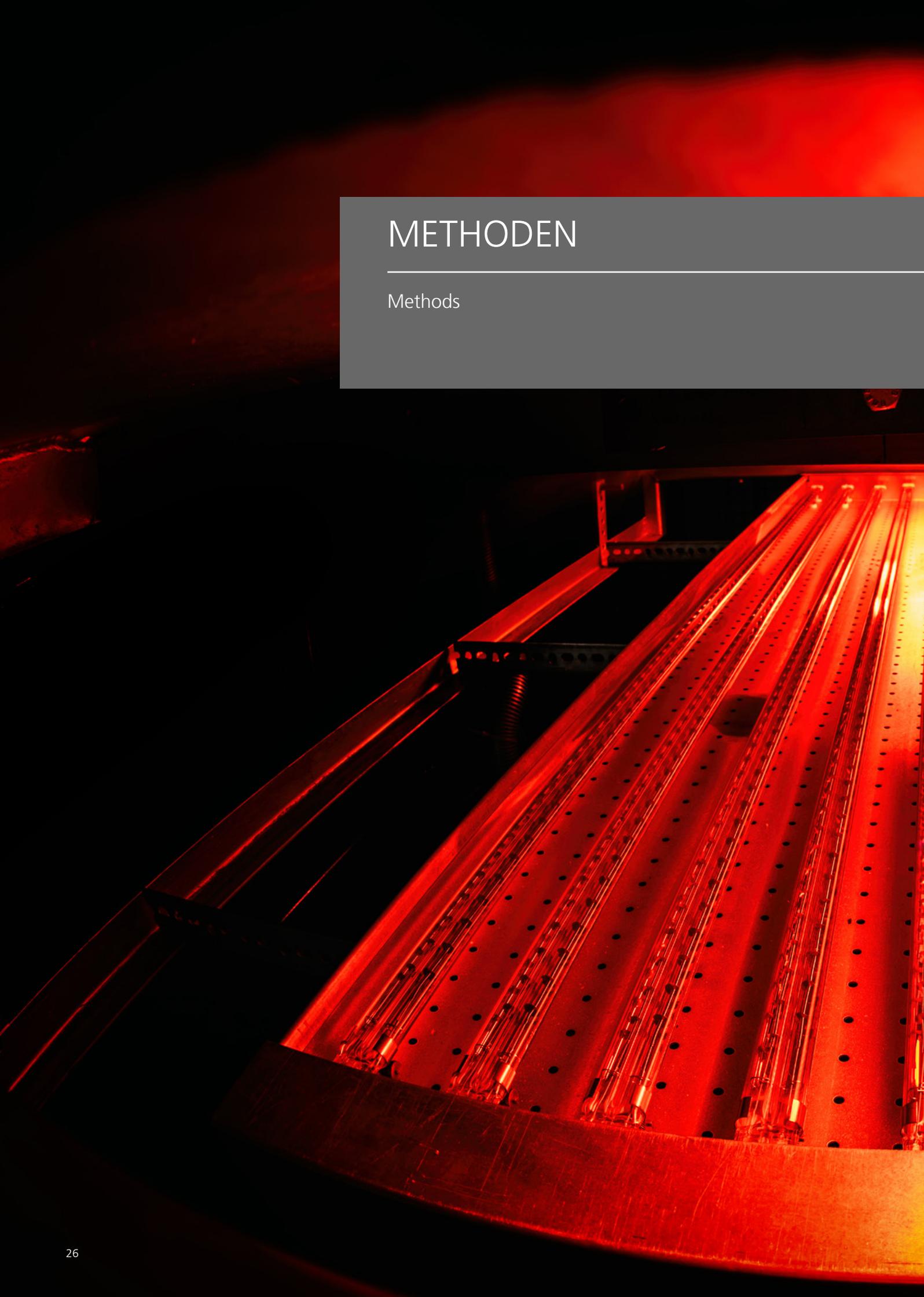
Herstellung von Polymernanokompositen durch Kombination von Doppelschneckenextrusion und Ultraschallbehandlung

Manufacturing of polymer nanocomposites by combination of twin-screw extrusion and ultrasonic treatment



METHODEN

Methods



Kryogen küsst Hochtemperatur –
Strukturversuche unter Extrembedingungen _____ 28
Thermomechanical structural testing of thermal protection systems

Wie am Schnürchen – Wie faserverstärkte Filamente
zum lasttragenden Bauteil angeordnet werden _____ 30
Like clockwork – how fiber-reinforced filaments are arranged to form the load-bearing component



Kryogen küsst Hochtemperatur – Strukturversuche unter Extrembedingungen

Thermomechanical structural testing of thermal protection systems

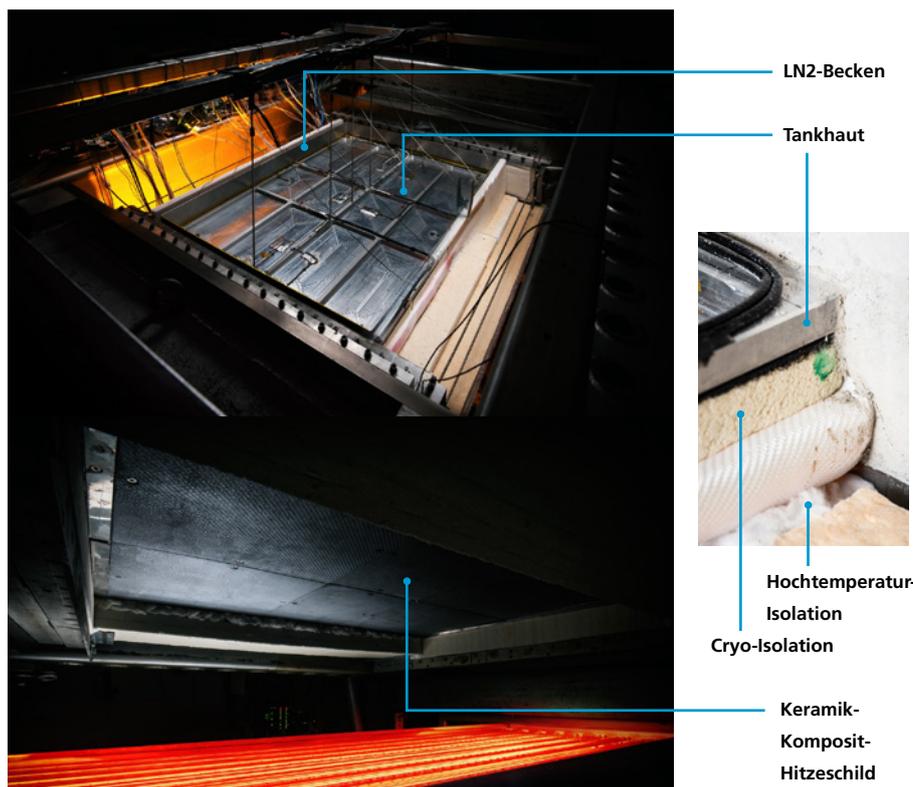
Summary

Extreme thermomechanical conditions, such as those encountered by reusable rocket boosters, pose significant challenges for structural integrity. Recent testing conducted at the THERMEX facility simulates these critical conditions. These tests subject the structure to a combination of extreme factors, including cryogenic temperatures on one surface, intense heat loads on the opposite surface, and simultaneous axial mechanical loading. The current programme is designed to explore the thermal and mechanical performance of multi-layer thermal protection systems. The data collected further enables a thorough examination of the underlying structural phenomena and holds the potential to drive advancements in testing methodologies and analysis capabilities.

Zukünftige Strukturkonzepte für die Luft- und Raumfahrt sollen eine deutliche Leistungssteigerung gegenüber dem heutigen Stand der Technik aufweisen. Für kombinierte thermomechanische Belastungen sind viele der bisher getroffenen Annahmen zu konservativ, um die strukturelle Leistungsfähigkeit gänzlich auszuschöpfen. Extreme Belastungen ergeben sich, wenn Temperaturänderungen Verformungen erzeugen und gleichzeitig auch hohe mechanische Lasten wirken. Ein Beispiel dafür stellen wiederkehrende Raketenbooster dar. Im Inneren wird flüssiger Wasserstoff als Treibstoff gelagert, während die Außenhülle durch die Reibungshitze erwärmt wird. Einen solchen Zustand experimentell darzustellen, ist aufgrund der extremen Randbedingungen und Temperatureinflüsse extrem herausfordernd. Diesen Weg zu gehen, ist aber notwendig, um die Modelle zur Bewertung und Auslegung solcher Strukturen zu validieren.

Extreme Testbedingungen in der THERMEX-Anlage

Die thermomechanische Versuchsanlage THERMEX ermöglicht experimentelle Untersuchungen an komplexen Strukturen unter extremen kombinierten Lastbedingungen. Dies beinhaltet die gezielte Wahl thermischer Lasten in Analogie zur Flugbelastung. Beispielhaft ist eine Strukturseite mit flüssigem Stickstoff (kurz „LN2“, -196°C) kryogen beansprucht, während auf der anderen Strukturseite eine Hochtemperaturbelastung von bis zu 1000°C aufgebracht ist.



Teststruktur im THERMEX-Versuchsaufbau

Test Structures at THERMEX test conditions

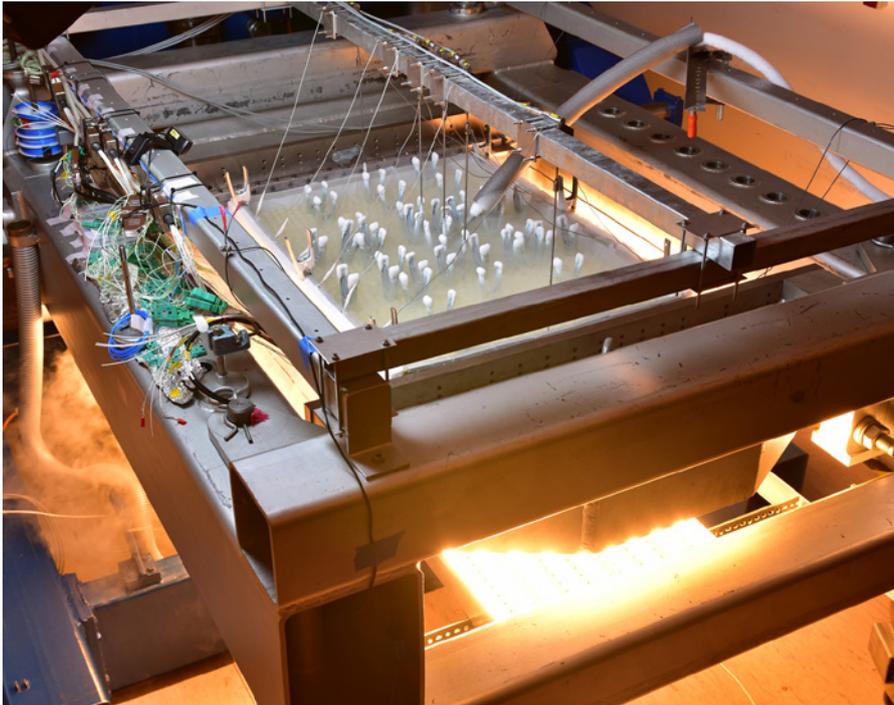
Ein weiterer Aspekt beinhaltet die Einleitung mechanischer Axiallasten von bis zu 400 kN , um zum Beispiel aerodynamische Lasten zu simulieren. Die Belastungen können gezielt gesteuert werden. Sie bilden damit die Basis zur Analyse von Strukturkonzepten. Die hohe Anzahl an Lastvariationen und die Möglichkeit, verschiedenste Strukturkonzepte zu untersuchen, fördert die Entwicklung von Analysemethoden für diese extremen Lastbedingungen und trägt zum Entwurf effizienter Strukturen bei.

Herausforderungen für den Multimaterialverbund

Bisherige Untersuchungen adressierten meist die Tragfähigkeit von versteiften Kohlefaserverbundstrukturen im oberen thermalen Grenzbereich. Zudem führen die oben beschriebenen Bedingungen zu hohen Temperaturgradienten. Für eine Verbundstruktur aus verschiedenen Materialien sind die thermomechanischen

Autor:

Dipl.-Ing. Martin Liebisch



Lasten sehr anspruchsvoll. Die Materialien haben unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten, verschiedene thermische Grenzbereiche und stark abweichendes thermisches Ausdehnungsverhalten. Die hohen Temperaturgradienten verursachen dadurch hohe Dehnungsgradienten über der Strukturdicke. Die resultierenden Spannungen können kritisch sein und Schädigungen im Bauteil sowie in den Schichtanbindungen verursachen. Derartige Strukturversuche dienen der Untersuchung der Anwendungsgrenze der einzelnen Materialien, aber auch ihres kombinierten Verhaltens.

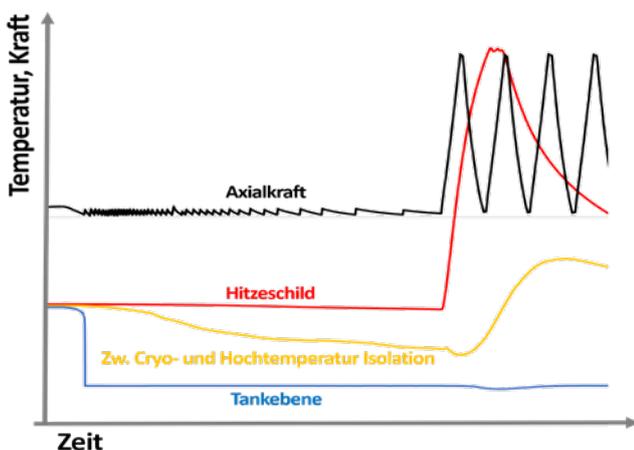
In Zusammenarbeit mit DLR-Kolleginnen und -Kollegen sind im DLR-Projekt TRANSIENT zwei unterschiedliche Tank-Konzepte (aus Aluminium bzw. Kohlefaserverbundmaterial) für Raketenbooster mit entsprechenden Thermalschutzsys-

Strukturversuch mit befülltem Stickstoffbad und Infrarot-Thermallast.
Structural testing with liquid nitrogen pool and infrared thermal loading

temen (TPS) untersucht worden. Der Aufbau des TPS besteht aus einem Polymerschäum als Isolation im Bereich negativer Temperaturen, einem kissenartigen Hochtemperaturschutz und aus keramischen Faserverbundplatten als Außenhaut. Zwischen diesen Schichten werden elektrische und optische Sensoren genutzt, um das thermische und mechanische Strukturverhalten zu bestimmen. Dabei stellen die unterschiedlichen Eigenschaften der Materialschichten und die Temperaturprofile verschiedene Herausforderungen an die Messmethodik dar. Die Experimente helfen zugleich auch, geeignete Sensorik für den realen Einsatz zu erproben. Die Teststrukturen stellen eine Vereinfachung der Anwendung dar. Dadurch wird der Entwicklungsprozess derartiger Strukturen beschleunigt und die Kosten durch geringeren Testaufwand reduziert.

Ausblick

Die gewonnenen Daten sind vielfältig hilfreich. Sie dienen dazu, um die untersuchten Strukturen und ihre Phänomenologie besser zu verstehen und tragen zur stetigen Weiterentwicklung von Versuchsmethodik und Analysefähigkeiten bei.



Beispielhafter Versuchsverlauf anhand einzelner Sensoren
Exemplary sensor history throughout testing

Wie am Schnürchen – wie faserverstärkte Filamente beim Druck eines lasttragenden Bauteil angeordnet werden

Like clockwork – how fibre-reinforced filaments are arranged to form the load-bearing component

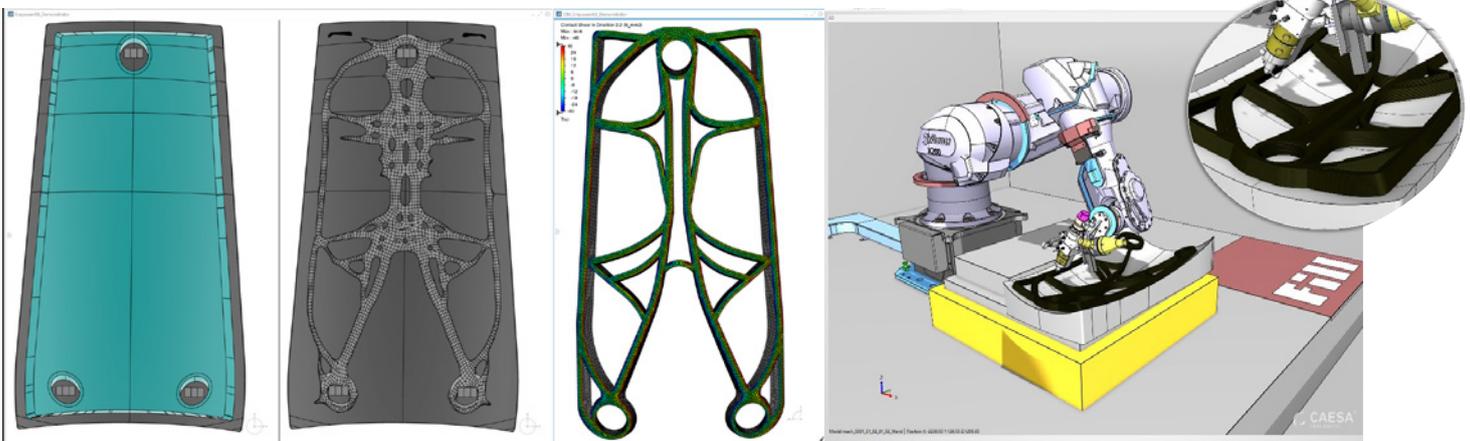
Summary

The holistic consideration of design, material, and manufacturing process is the key to exploiting the full potential of additive manufacturing. However, how do we find the optimal triad without extensive testing campaigns or years of experience? By employing an end-to-end simulation chain. A topology-optimized multi-material design, taking into account additive manufacturing, could be developed and virtually tested in advance. By aligning the fiber-reinforced filaments precisely along the load paths, a very lightweight design is created with minimal material usage and without the need for a mold. The DLR Innovation Lab EmpowerAX, where the demonstrator was manufactured, has won the Innovation Award Lower Saxony 2023 in the „Collaboration“ category..

Erst die ganzheitliche Betrachtung von Design, Material und Herstellungsprozess ermöglicht die Ausschöpfung des vollständigen Potenzials der additiven Fertigung. Doch wie findet man den optimalen Dreiklang ohne umfangreiche Testkampagnen oder jahrelange Erfahrung? Durch den Einsatz einer durchgängigen Simulationskette konnte ein topologieoptimiertes Multimaterial-Design unter Berücksichtigung der additiven Fertigung entwickelt und vorab virtuell getestet werden. Durch die Ausrichtung der faserverstärkten Filamente exakt entlang der Lastpfade entsteht ein sehr leichtes Design bei minimalem Materialeinsatz und ohne die Notwendigkeit eines Formwerkzeugs. Das DLR Innovation Lab EmpowerAX, in dem der Demonstrator gefertigt wurde, hat den Innovationspreis Niedersachsen 2023 in der Kategorie „Kooperation“ gewonnen.

Topologieoptimiertes Design

Anwendungsfall ist eine zu versteifende Komposit-Schale, die einer Windlast von 360 km/h ausgesetzt ist und sich nur minimal verformen darf (linkes Bild in Abb. 1). Zur Ableitung des optimalen Designs analysierte der Partner [PRIME aerostructures GmbH](#), ein österreichisches Unternehmen für die Entwicklung, Konstruktion und Analyse von Luft- und Raumfahrtstrukturen, verschiedene Designs in der Softwarelösung [3DEXPERIENCE](#), eine von Dassault Systèmes entwickelte Unternehmens- und Innovationsplattform. Die herausfordernden Optimierungsziele sind die Maximierung der Steifigkeit bei gleichzeitiger Minimierung der Scherspannungen zwischen den Rippen und der Komposit-Schale. Die Variation der Designparameter Rippenbreite, Rippenhöhe und Rippenabstände liefert nach mehreren Iterationsschleifen das in der Mitte dargestellte Design. Die Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen führt schließlich zum finalen Design (rechts).



Links: Ausgangsgeometrie, Mitte: topologieoptimiertes Design, rechts: finales Design unter Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen (PRIME Aerostructures GmbH)
Left: initial design, center: topology optimized design, right: final design considering manufacturing constraints (PRIME Aerostructures GmbH)

Pfadplanung mit der Software CAESA [SWMS Systemtechnik Ing. GmbH]
Path planning in CAESA [SWMS Systemtechnik Ing. GmbH]

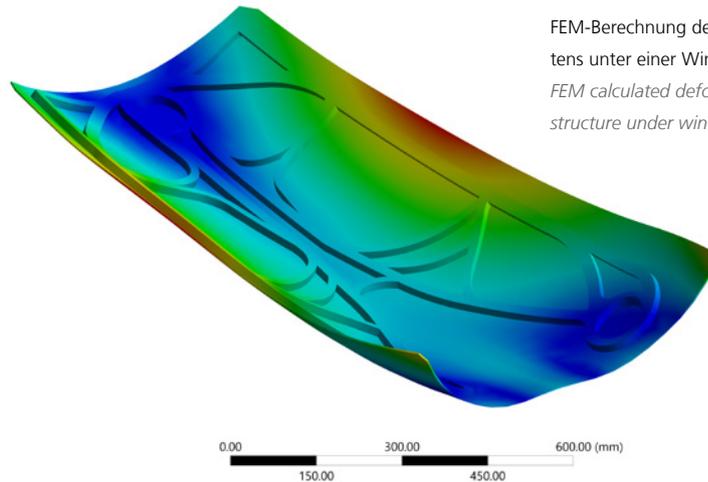
Autoren:

Dr.-Ing. Robert Hein
Felix Winkelmann, M.Sc.



Pfadplanung

Der nächste Arbeitsschritt umfasst das Zerlegen des Bauteils in einzelne Ablegepfade, das sogenannte Slicing. Diese Aufgabe erfolgte durch den Partner [SWMS](#), ein Anbieter für Softwarelösungen in den Bereichen PLM, Internet of Things und Automated Composite Manufacturing. Das übergeordnete Ziel ist die Ableitung eines möglichst durchgängigen Druckpfads. Wesentliche Vorteile sind die Reduzierung von Druckzeiten und des Energieverbrauchs durch Vermeidung von Leerfahrten, höhere Produktionsraten und das Schneiden endlosfaserverstärkter Stränge. Die Umsetzung erfolgte durch die Implementierung entsprechender Algorithmen in die eigene Software [CAESA](#). Als Ergebnis steht ein maschinenlesbares Format zur Verfügung, sodass der Druck direkt auf einer roboterbasierten Anlage starten kann.

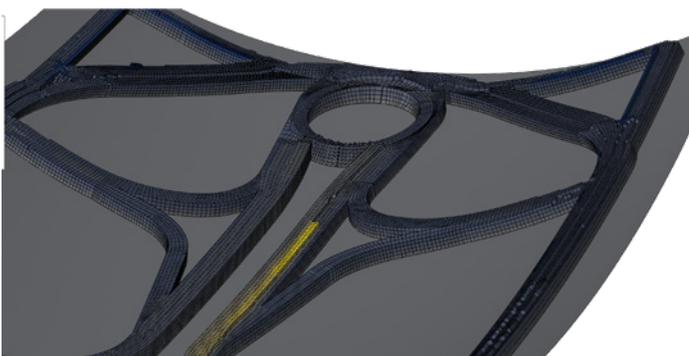


FEM-Berechnung des Verformungsverhaltens unter einer Windlast von 360 km/h
FEM calculated deformation behavior of the structure under wind load of 360 km/h

Strukturanalyse und Prozesssimulation

Die Fibrify Design Suite des Partners [9TLabs](#), der die Additive Fusion Technology (AFT) entwickelt hat – eine Kombination aus additiver Fertigung und Formpressen für die Serienproduktion von faserverstärkten Hochleistungsbauteilen – ermöglicht die Vorbereitung der Pfadplanung für faserverstärkte Bauteile. Das Besondere an der Software ist u. a. die direkte Schnittstelle zur kommerziellen FEM-Software Ansys. Dies ermöglicht die unmittelbare Analyse der Auswirkung von unterschiedlichen Ablegestrategien auf das strukturelle Verhalten. Für die Pfadplanung steht ein Add-on in Ansys Space Claim zur Verfügung. Die Übertragung der Ablegepfade sowie der richtungsabhängigen Materialeigenschaften basiert auf dem offenen Austauschformat HDF5CC. So lässt sich die von [SWMS](#) durchgeführte Pfadplanung auf ein Strukturmodell in Ansys Mechanical übertragen. Das obige Bild zeigt die vom Partner [Ansys](#) ermittelten Verformungen unter dem oben genannten Lastfall.

Der letzte Arbeitsschritt beinhaltet die Überprüfung der Fertigbarkeit mit Hilfe einer 3D-Druckprozesssimulation in Abaqus. Basierend auf dem geplanten Pfad und in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit und der Extrusionstemperatur erfolgt die Berechnung der Bauteiltemperaturen Schicht für Schicht. Das Augenmerk liegt hierbei auf der Prüfung, ob die Temperaturfenster, die für eine feste Schichtanhaftung notwendig sind, eingehalten werden. In einem nachgelagerten Berechnungsschritt erfolgt, basierend auf den Temperaturfeldern, die Berechnung der zu erwartenden fertigungsbedingten Eigenspannungen und Bauteil deformationen.



Temperaturverteilung während des Druckprozesses
Temperature distribution during the printing process

Die demonstrierte Simulationskette zeigt die Möglichkeiten, die kommerzielle Softwarehersteller zur Entwicklung von additiv gefertigten Bauteilen bieten. Die ganzheitliche Analyse von verschiedenen Designs, Materialkombinationen und Fertigungsprozessen erlaubt schließlich die Ableitung optimaler Bauteile. Aktuell laufende und zukünftige Forschungsprojekte zur Digitalisierung der Bauteilentwicklung und -fertigung treiben intensiv die Entwicklung von digitalen Bauteilzwillingen voran.



KONSTRUKTION

Construction



Flügel leicht gemacht –
Composite Design für klimaneutrale Flugzeuge _____ 34

Lightweight wings – composite design for climate-neutral aircraft

Statische Charakterisierung eines Windrotorblattes _____ 36

Static characterisation of a wind rotor blade

Chassis und Separationsmechanismus des IDEFIX-Rovers _____ 38

Chassis and separation mechanism of the IDEFIX rover

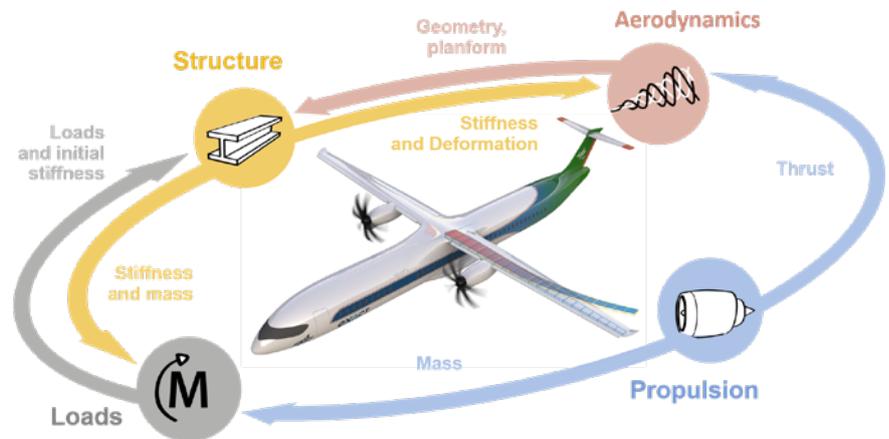
Flügel leicht gemacht – Composite Design für klimaneutrale Flugzeuge

Lightweight wings – composite design for climate-neutral aircraft

Summary

Which technologies lead towards achieving a sustainable and climate-friendly aviation? How can these technologies be integrated into relevant aircraft architectures? These questions are comprehensively explored within the scope of the EXACT project. For the design and evaluation of corresponding aircraft concepts, a multidisciplinary design process has been established. Therein, the structural design of the wing is provided by the lightworks framework with high computational efficiency.

Mit welchen Technologien gelingt die Transformation zum klimaneutralen Luftverkehr? Wie lassen sich diese Technologien in Flugzeugarchitekturen integrieren? Diese Fragen will das EXACT-Projekt gesamtheitlich untersuchen. Zur Auslegung und Bewertung derartiger Flugzeugkonzepte dient ein eigens aufgebauter multidisziplinärer Entwurfsprozess. Das lightworks-Framework stellt darin die Methoden zur Flügelauslegung mit hoher Recheneffizienz bereit.



Interdisziplinäre Wechselwirkungen im Flugzeugentwurf
Interdisciplinary interactions within aircraft design

Klimaneutrales Fliegen bis 2040

Vor dem Hintergrund der Pariser Klimaziele muss der stetig wachsende Luftverkehr seine Umweltwirkungen drastisch reduzieren. Klimaneutrales Fliegen erfordert grundlegend neue Antriebe und deren Integration in entsprechende Flugzeugkonfigurationen. Die größten Einsparungspotenziale bieten elektrische, hybrid-elektrische oder auf Wasserstoff basierende Konzepte für Größen von mehr als 50 Sitzen und einer Reichweite von mindestens 1000 km. Diese Konfigurationen gesamtheitlich zu bewerten, ist Inhalt des EXACT-Projekts. Das Institut für Systemleichtbau entwickelt dazu das Strukturdesign des Flügels über einen Optimierungsprozess.

Allein geht es nicht – der multidisziplinäre Entwurf

Die Effizienz eines Flugzeugs hängt von vielen miteinander wechselwirkenden Disziplinen wie Aerodynamik, Strukturdesign, Antriebstechnologie etc. ab. So verändert z. B. die Anordnung neuer Triebwerke oder Energiespeichersysteme die Belastung der Struktur im Flugbetrieb. Um diese Effekte zu bewerten, haben wir gemeinsam mit weiteren DLR-Instituten eine Toolkette für die Berechnung der Strukturmasse aufgebaut. Ein besonderer Fokus lag dabei auf einer hohen Rechengeschwindigkeit zur schnellen Bewertung vieler verschiedener Konzeptentwürfe. Die einzelnen Tools sind über die [Integrationsumgebung RCE](#) zu einem Prozess verbunden. Der Datenaustausch zwischen den Tools erfolgt über das [CPACS-Format](#), das entwurfsspezifische Parameter des Flugzeugs speichert.

Autoren:

Dr.-Ing. David Zerbst
Dipl.-Ing. Sascha Dähne



Strukturauslegung mit lightworks

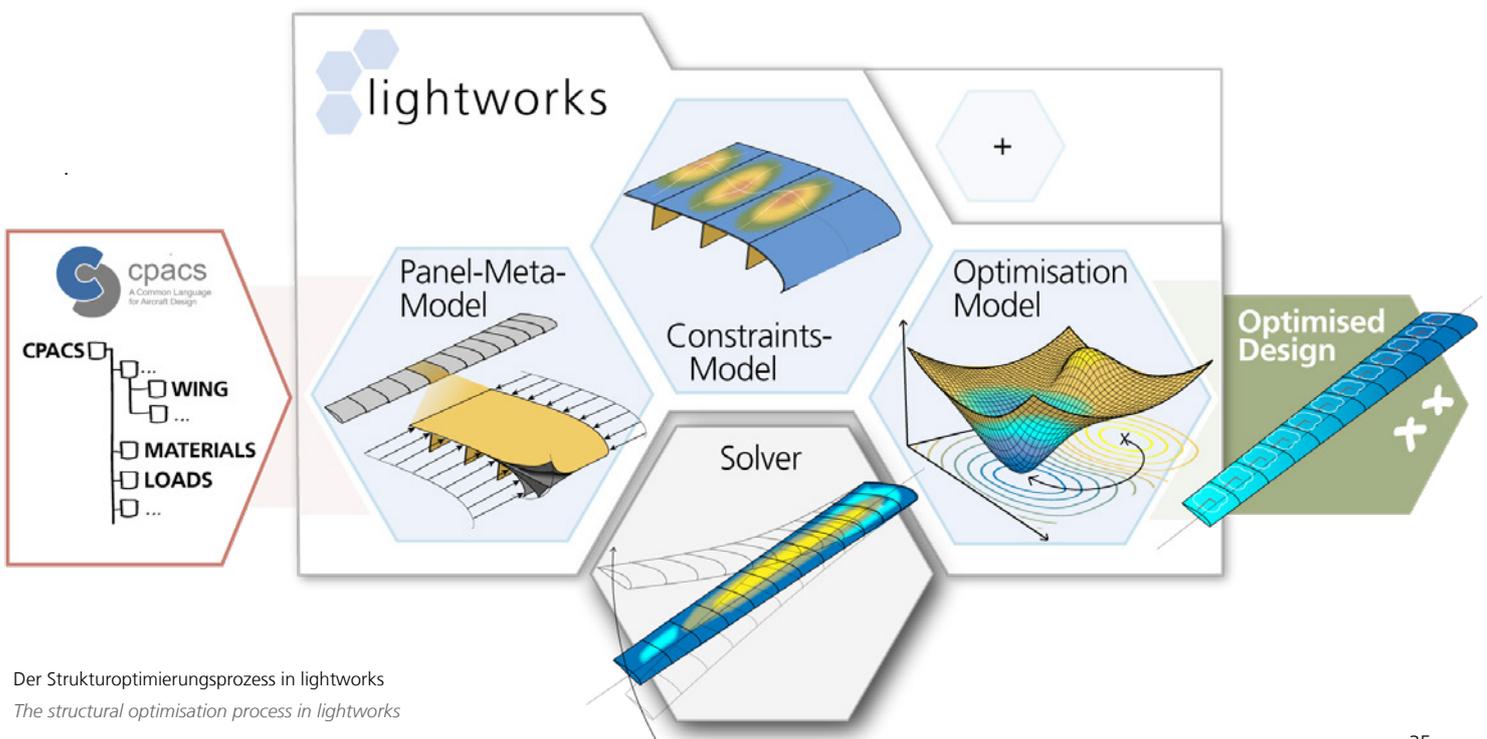
Die institutseigenen Tools steuern in der Gesamtentwurfs-Kette die Flügelstruktur bei. Seit jeher ist das Ziel der Strukturauslegung die Minimierung der Masse unter Einhaltung von Versagensgrenzen. Dies ist in lightworks als Optimierungslösung für einen automatisierten Prozess implementiert. Das Framework hält dabei verschiedene Faserverbundparametrisierungen, Auslegungskriterien und Algorithmen vor. Zur Bereitstellung einer hohen Recheneffizienz setzt lightworks auf gradientenbasierte Optimierungsverfahren, die bei Problemen mit sehr vielen Variablen höhere Konvergenzraten erreichen. Die Flügel-Innen-topologie liefert der Modellgenerator DeLiS. Spannungen und Verformungen des Flügels stellt der Solver PreDoCS auf Basis von analytischen Balkenmodellen für die Optimierung bereit. So lassen sich die Auswirkungen unterschiedlicher Tank- und Antriebskonzepte oder Geometrien auf die Flügelstruktur untersuchen.



Klimaneutrale Flugzeugkonzepte im EXACT-Projekt
Climate-neutral aircraft concepts within the EXACT project

... und was kommt raus?

Ein Mittelstreckenflugzeug mit 250 Passagieren und Wasserstoffantrieb kann aufgrund der größeren Treibstoffmenge die Tanks nicht mehr im Flügel unterbringen wie bei kerosinbetriebenen Konfigurationen. Mit den fehlenden Tankmassen entfällt auch das entlastende Moment am Flügel, das den aerodynamischen Kräften entgegenwirkt. Dieser Effekt sowie der längere Rumpf für die Unterbringung der H₂-Tanks führen zu höheren Lasten an der Flügelstruktur. Deren Kompensation erhöht die Flügelmasse um 10 %. Dies ist eine von vielen Erkenntnissen, die das EXACT-Projekt bereits geliefert hat.



Der Strukturoptimierungsprozess in lightworks
The structural optimisation process in lightworks

Statische Charakterisierung eines Windrotorblattes

Static characterisation of a wind rotor blade

Summary

Wind turbines play a crucial role for a sustainable energy supply in Germany. Two research facilities with a total of six highly instrumented rotor blades have been manufactured and equipped for the research wind farm WiValdi in Krummendeich as part of the DFWind2 project. An important step in the development of wind turbines is the testing of the rotor blades, which form the heart of these turbines. To ensure the safety and efficiency of these blades, they are tested for their bending and torsion properties. One such experiment has recently been carried out by a team of researchers from DLR, the University of Oldenburg and the Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems. Researchers are evaluating the sensor data in continuous operation, looking for further optimisation potential for future turbines.

Windkraftanlagen spielen für eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland eine entscheidende Rolle. Zwei Forschungsanlagen mit insgesamt sechs hochinstrumentierten Rotorblättern sind im Rahmen des Projekts DFWind2 für den Forschungswindpark WiValdi in Krummendeich gefertigt und ausgestattet worden. Ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung von Windenergieanlagen ist die Prüfung der Rotorblätter, die das Herzstück dieser Anlagen bilden. Um die Sicherheit und Effizienz dieser Blätter zu gewährleisten, werden sie auf ihre Biege- und Torsioneigenschaften getestet. Ein solches Experiment ist kürzlich von einem Team von Forschenden des DLR, der Universität Oldenburg und dem Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme durchgeführt worden. Forschende werten die Sensordaten im Dauerbetrieb aus und suchen dabei nach weiteren Optimierungspotenzialen für zukünftige Anlagen.

Labore sind nicht immer klein

Die sechs knapp 58 Meter langen und 16 Tonnen schweren Windrotorblätter sind hochinstrumentiert. Die integrierten Sensoren sollen zukünftig das Anlagenverhalten und die Interaktion zwischen den Anlagen vermessen. Ein gutes Verständnis über das Rotorblattverhalten ist dabei entscheidend für die korrekte Interpretation der Sensordaten. Daher ist das erste der sechs Windrotorblätter im Vorfeld nach Vorgaben des DLR am Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme getestet worden. Dazu wird das Blatt an einen massiven Prüfblock geschraubt und mit Seilen an einen Hydraulikzylinder angeschlossen. Außerdem sind an vordefinierten Radien entlang der Längsachse des Blattes insgesamt fünf Lastscheren befestigt, welche jeweils für die Dauer eines Tests mit dem Hydraulikzylinder verbunden werden. Das Spannen des Seils führt so zu einer punktuellen Belastung auf das Windrotorblatt in Richtung des Hallenbodens. Der Versuchsaufbau greift dabei auf [Erfahrungen](#) eines im Projekt [Smartblades2](#) am DLR gebauten 20-m-Rotorblatts zurück.

An jeder Lastschere des Blattes ist ein vordefiniertes Be- und Entlastungsprofil mit mehreren Haltestufen bis zur Maximalkraft untersucht worden. Nach Abschluss eines Tests wird das Rotorblatt vom Prüfblock gelöst und um 90° gedreht, um sukzessive alle Hauptrichtungen und abschließend auch das Torsionsverhalten zu bestimmen.

Zwischen Hydraulikzylinder und Lastschere montierte Seilzugsensoren messen die Durchbiegung des Blattes, während alle auf das Rotorblatt wirkenden Kräfte bekannt sind. Auf diese Weise ist das statische Biegeverhalten vollständig experimentell ermittelbar. Zusätzlich zeichnen die integrierten Sensoren im Inneren des Blattes die resultierenden Dehnungen in den Hauptachsen auf. Lokale Messergebnisse von ausgewählten Bereichen der Struktur sind anschließend mit den Erwartungswerten aus Simulationsmodellen verglichen worden.



Windrotorblatt mit angebauten Lastscheren in Ruhelage. Hinterkante unten.

Wind rotor blade with attached load shears in rest position. Trailing edge at the bottom.

Autor:

Marc Garbade, M. Sc.



Windrotorblatt mit angebauten Lastscheren in Ruhelage. Saugseite unten.

Wind rotor blade with attached load shears in rest position. Suction side down.

Perspektivische Verwertung der Daten

Die erhobenen Sensordaten erlauben Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten des Windrotorblattes im späteren Dauerbetrieb. Ein mit den Daten kalibrierter Algorithmus ist in der Lage, in Echtzeit die tatsächlich anliegende Belastung zu ermitteln. Die unter Laborbedingungen ermittelten Kennwerte dienen dabei als Referenz, um die im Betrieb auftretenden Spitzen- und Dauerlasten strukturmechanisch zu überwachen und zu bewerten. Dies erlaubt exaktere Vorhersagen über die Lebensdauer von Windrotorblättern, was die Entwicklung zukünftiger Rotorblätter hinsichtlich Sicherheit, Gewicht, Effizienz und Kosten optimieren kann.



Drehung des Windrotorblattes unter Zuhilfenahme eines Autokrans

Rotation of the wind rotor blade with the aid of a truck-mounted crane

Chassis und Separationsmechanismus des IDEFIX-Rovers

Chassis and separation mechanism of the IDEFIX rover

Summary

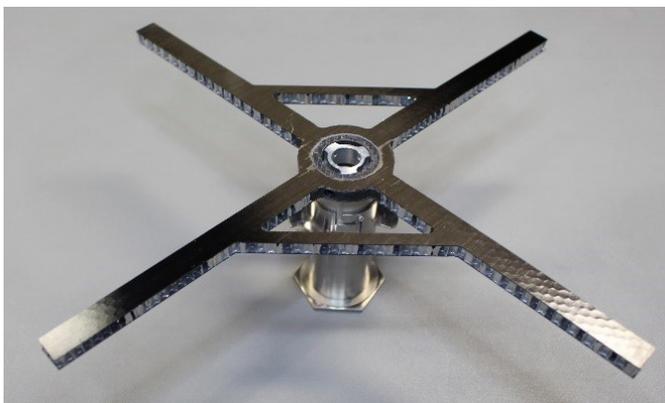
Travelling – driving – exploring... sounds like a holiday, but very briefly it also forms the cornerstones in the development of the MMX rover "IDEFIX" and its supporting structure. The MMX rover is to explore the surface of the Martian moon Phobos and demonstrate driving under microgravity. The data obtained in the process will be used to calibrate instruments on the MMX mothership and to prepare for landing. In addition, there is the so-called Mechanical-Electrical-Communication and Separation System. The MECSS connects the rover with the MMX mothership and the lander control centre during the launch and flight phase. Both structures were developed and built by the Institute of Lightweight Systems.

Reisen – Fahren – Erkunden ... klingt wie Urlaub, bildet aber sehr verkürzt auch die Eckpfeiler in der Entwicklung des MMX-Rovers „IDEFIX“ und seiner tragenden Struktur. Der MMX-Rover soll die Oberfläche des Marsmondes Phobos erkunden und das Fahren unter Mikrogravitation demonstrieren. Die dabei gewonnenen Daten dienen zur Kalibrierung von Instrumenten auf dem MMX-Mutterschiff sowie zur Landungsvorbereitung. Dazu kommt noch das sogenannte Mechanical-Electrical-Communication and Separation System. Das MECSS verbindet den Rover während der Start- und Flugphase mit dem MMX-Mutterschiff und mit dem Lander-Kontrollzentrum. Beide Strukturen hat das Institut für Systemleichtbau entwickelt und gebaut.

Leichtbau mit System

Die maximale Startmasse des Rovers darf 24,85 kg nicht überschreiten. Der Bauraum ist durch Nachbarinstrumente auf der Explorationsplattform der MMX-Sonde begrenzt. Während des Raketenstarts und der Landung auf Phobos wirken Beschleunigungen bis zum 28-Fachen der Erdbeschleunigung auf den Rover. Wie bei einem Wurf landet der Rover ballistisch. Dabei ist die Energie des Landeaufpralls ohne Beeinträchtigung des Rovers zu absorbieren. Nach der Landung sind die mechanischen Lasten mit nur noch etwa 1/2000 der Erdgravitation vernachlässigbar klein. Die Rover-Struktur besteht aus über 160 miteinander verklebten Einzelteilen. Chassis und Interface-Struktur in CFK-Aluminium-Sandwichbauweise sind maximal steif und halten die Strukturmasse so gering wie möglich. Zusätzliche CFK-Versteifungsrippen auf der Innenseite dienen der weiteren Aussteifung und Lastverteilung.

Die Deckelplatte des Rovers ist besonders beansprucht und muss über einen extremen Temperaturbereich von -145 bis +75 °C formstabil bleiben. Dabei auftretende Eigenspannungen können zu Mikrorissen im Material oder Verklebungen führen. Der Vorteil von CFK: Die Wärmedehnung ist extrem gering. Verbindungen zu Aluminiumteilen mit 10-fach höherer Wärmedehnung erfordern besondere Lösungen, wie besonders elastische Klebstoffe und darauf zugeschnittene Fügestellen. Für Kabelhalterungen lassen sich zum Beispiel besonders gut isolierende und sehr dehnbare Aramid- und Glasfasern einsetzen.



Flugeinheit des Push-Off-Mechanismus, der im Zentrum des MECSS installiert wird
Flight model of the push-off mechanism, which is going to be installed in the centre of the MECSS



Struktur der MECSS-Flugeinheit
Structure of MECSS flight unit

Autor:

Dipl.-Ing. Michael Lange

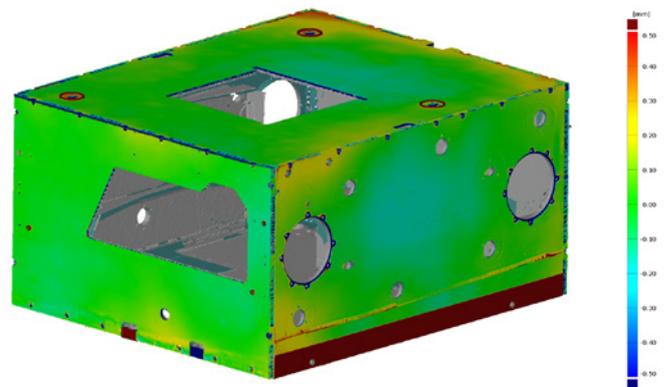


Alle Einzelteile der Deckelplatte müssen mit Ausnahme der hochisolierenden obersten Schicht elektrisch miteinander verbunden sein. Zum Rest des Chassis ist eine nahezu vollständige elektrische Isolierung erforderlich. Die Deckelplatte mit den Solargeneratoren und ihrer Elektronik muss rund 16 % der Rover-Gesamtmasse tragen. Der Masseanteil der Deckelplatte (324 g) am voll ausgerüsteten Rover (23,12 kg) beträgt nur 1,5 % und zeigt den enormen Leichtbau-Charakter dieser Teilstruktur.

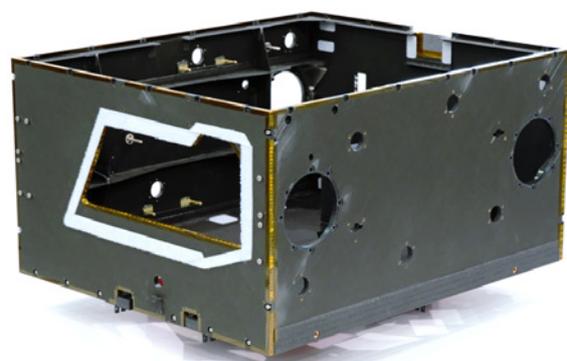
Auf und davon

Die zweite am Institut für Systemleichtbau entwickelte und gebaute Hauptstruktur ist die des Mechanical-Electrical-Communication and Separation Systems MECSS. Die ungewöhnlich anmutende X-Form und Höhe der CFK-Sandwichkonstruktion ergibt sich daraus, dass das Separationssystem im MECSS integriert ist. Es besteht aus einem Halte- und Trennmechanismus mit lösbaren Bolzen in jeder der vier Ecken. Damit sind Rover und MECSS während der Start- und Flugphase fest mit dem Mutterschiff verbunden. Nach Lösen der Bolzen vor der Landung drückt der im MECSS befindliche Push-Off-Mechanismus den Rover ab. Das Funktionsprinzip hat ebenfalls das Institut für Systemleichtbau entwickelt: eine Feder, die sich nach dem Lösen der Bolzen entspannt und so den Rover auf eine Geschwindigkeit von circa 20 cm/s beschleunigt. Danach befindet sich der Rover im freien Fall auf Phobos. Nach der Landung des Rovers und dem Aufrichten und Entfalten der Solarmodule beginnt der wissenschaftliche Teil der Mission.

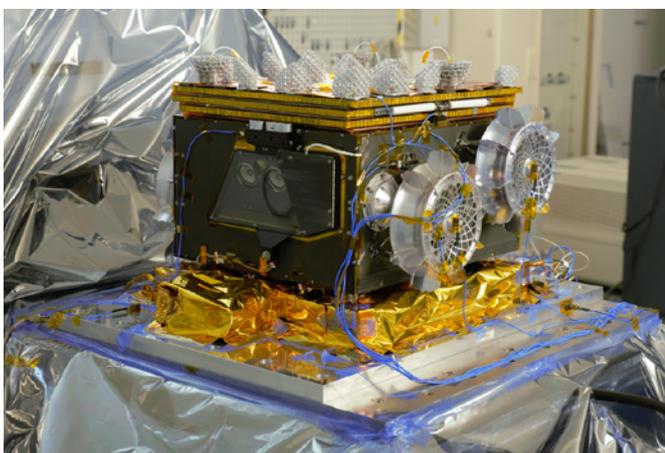
Mittlerweile sind alle Strukturbauteile ausgeliefert; der Rover ist integriert und qualifiziert. Im November 2023 wird der Einbau auf dem Mutterschiff stattfinden. Der Start in Richtung Marsystem ist für September 2024 geplant.



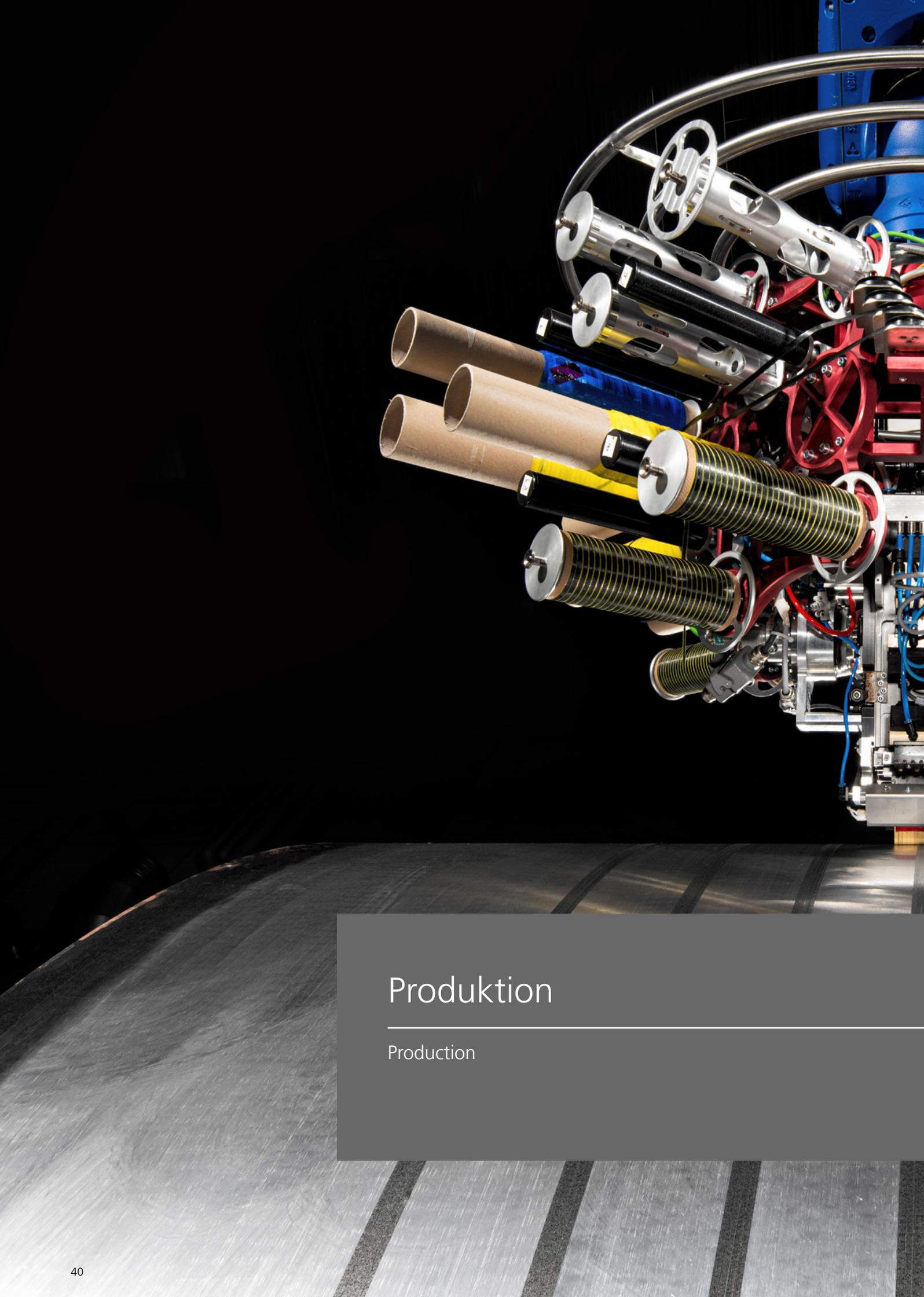
Optische Vermessung der Chassisflugeinheit
Optical dimension measurement of the chassis flight structure



Flugeinheit der Chassis-Struktur Struktur und der Deckelplatte vor der Systemintegration
Flight unit of the chassis and top plate structure before system integration



Shaker-Akzeptanztest mit der Rover- und MECSS-Flugeinheit
Shaker Acceptance Test with the rover and MECSS flight unit



Produktion

Production



Verschmelzen der realen und virtuellen Welt am Beispiel einer Vielholmer-Landeklappe _____	42
Merging the real and virtual world demonstrated on a multispar flap	
Speicherung von kryogenem Wasserstoff in Composite-Flugzeugtanks _____	44
Storage of liquid hydrogen in composite aircraft tanks	
Additive Funktionalisierung – eine industriell verfügbare Material- und Prozesskombination mit Auszeichnung _____	46
Additive functionalisation – an industrially available material and process combination with an award	
Transfer zu höherer Composite-Qualität mit der DIN SPEC 35255 _____	48
Transfer to higher quality for composites with DIN SPEC 35255	
Induktives Eis-Schutzsystem: Thermisch stark verbunden, mechanisch leicht zu trennen _____	50
Inductive ice protection system: Thermally strongly bonded, mechanically easy to separate	

Verschmelzen der realen und virtuellen Welt am Beispiel einer Vielholmer-Landeklappe

Merging the real and virtual world demonstrated on a multispar flap

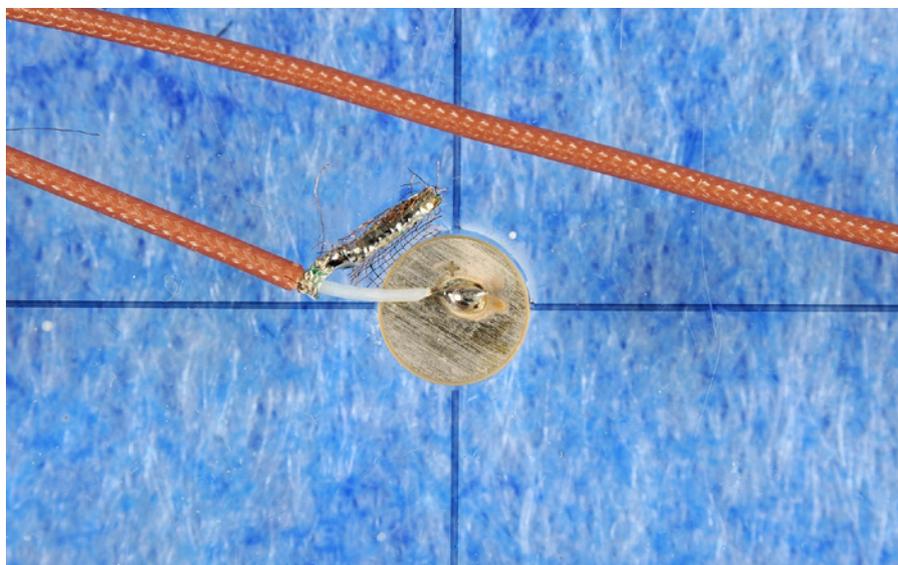
Summary

Structural integration has a positive effect on performance and cost efficiency of composite components, but there is an increased risk of manufacturing problems due to higher process complexity. Monitoring the process with dedicated sensor systems is an enabler of future-proof composite structures that provide long endurance, improved cost efficiency and an outstanding lightweight design. To evaluate the sensor setup in a realistic and highly relevant production scenario the manufacturing of a 3 m span multispar flap structure in a pressure-assisted closed mould process has been chosen. Instead of a press, an autoclave has been used to keep the mould closed during injection and curing.

Strukturintegration ist ein erfolgreicher Ansatz zur Optimierung von Faserverbundstrukturen, da ein Großteil des Montageaufwands entfällt und keine gewichtsrelevanten Laminatverstärkungen für Verbindungselemente (Bolzen, Nieten) erforderlich sind. Die höhere Komplexität der Bauteilarchitektur führt aber auch zu komplexeren Formwerkzeugen und Fließfrontverläufen. Die Harzfließfront ist davon abhängig, wie sich die Faserpreform lokal in die Kavität des Formwerkzeugs einbettet. Eine Überpressung des Fasermaterials verlangsamt den Harzfluss, wohingegen eine unzureichende Füllung und insbesondere Spalte den Harzfluss unkontrolliert beschleunigen. Unterschiedliche Materialdicken im Formwerkzeug führen ggf. zu Temperaturgradienten und somit zu einer ungleichmäßigen Aushärtung der Matrix. Die Überwachung des Prozesses mit spezialisierten Sensoren bietet die Möglichkeit, Abweichungen früh zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Zielbauteil und Sensorintegration

Integrale aerodynamische Vielholmer-Strukturen vereinen ein fasergerechtes Design mit einer guten Fertigbarkeit. Für die Fertigung dieser Struktur wird im [Projekt VPH2.0](#) – im Rahmen des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und der [Beteiligungs- und Managementgesellschaft Bremen mbH \(BAB\)](#) – ein allseitig definiertes Formwerkzeug mit inneren Kernmodulen benötigt. Daraus ergibt sich ein prozesstechnischer Ansatz, der den Prinzipien des Resin Transfer Mouldings (RTM) folgt und der auf einem druckfesten, geschlossenen Formwerkzeug basiert. Die Platzierung der Sensoren erfolgt zum Teil am Formwerkzeug und im Falle der faseroptischen Sensoren direkt im Laminat. Hierbei ist es sinnvoll, zwischen außen liegenden Sensoren (Ultraschallsensoren, Thermoelemente) und Sensoren im Abformbereich (dielektrische Sensoren) zu unterscheiden. Außen liegende Sensoren haben den Vorteil, dass sie einfacher angeschlossen werden können. Innen liegende Sensoren haben dagegen den direkten Kontakt zum Bauteil. Für die Herstellung des Versuchsbauteils bzw. für das Zuhalten des Formwerkzeugs wurde RTM-untypisch anstatt einer Presse der Stader Forschungsautoklav verwendet.

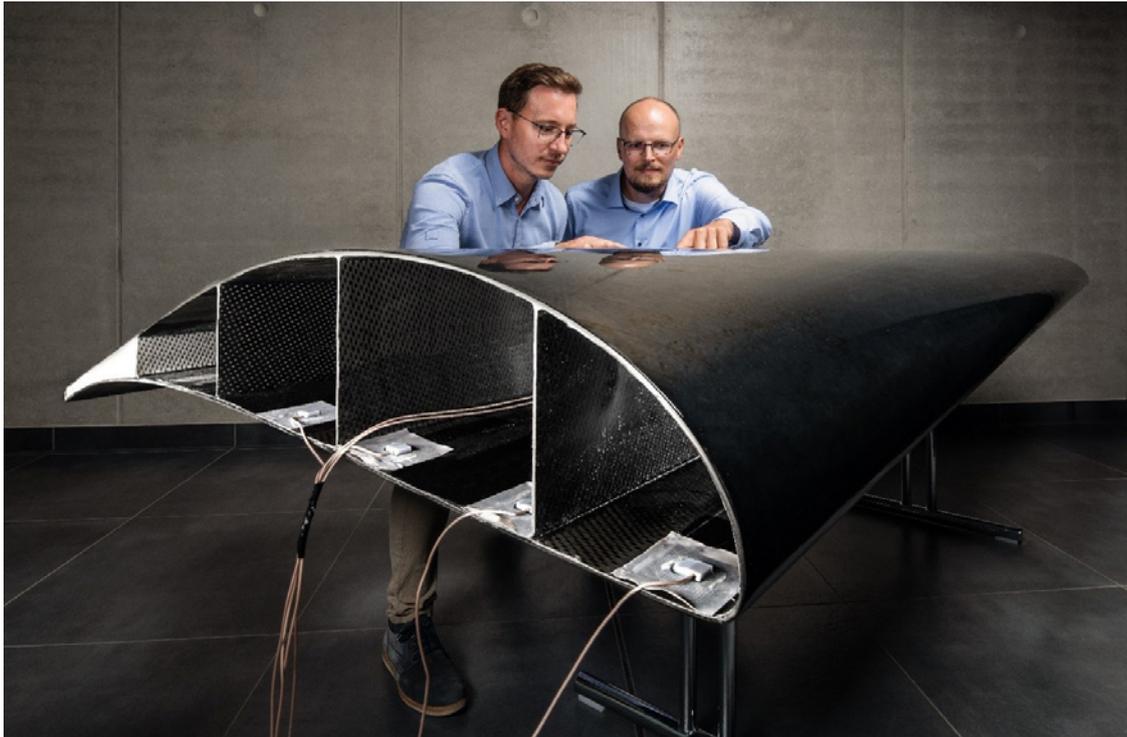


Vielholmer-Landeklappe mit integrierten SHM-Sensoren

Multispar flap with integrated SHM sensing system

Autoren:

Dipl.-Ing. Bram van de Kamp
Dr.-Ing. Markus Kleineberg
Dipl.-Ing. Martin Rädels



Piezokeramische
Ultraschallsensoren zur
Detektion von Fließ-
front- und Vernetzungs-
fortschritt
Piezoceramic ultrasonic
sensors for detecting
flow front and curing
progress

Der individuelle digitale Zwilling

Bei der konventionellen Überwachung des Herstellungsprozesses von Faserverbundbauteilen werden die Prozessrandbedingungen gemessen, z. B. mit Hilfe von Thermoelementen. So wird die Einhaltung eines zuvor spezifizierten Prozessfensters, aus zeitlich veränderlicher Temperatur, Druck und Zeit, nachgewiesen. Der individuelle Status des Bauteils im Fertigungsprozess bleibt aber unbekannt. Prozessfehler, die durch dieses Überwachungsnetzwerk nicht detektiert werden können, werden toleriert und führen zu Abminderungsfaktoren bei der Bauteilauslegung. Der Anspruch an einen individuellen digitalen Bauteil-Zwilling geht darüber weit hinaus. Hierbei wird für jedes gefertigte Bauteil der Status (Füllgrad, Vernetzung) räumlich aufgelöst im Prozess überwacht und digital dokumentiert. Am Beispiel der Vielholmer-Landeklappe messen spezialisierte Sensoren die Durchtränkung und im Anschluss die Gelierung des Harzsystems. Beim Durchgang der Fließfront und bei der Vernetzung ändern sich die Eigenschaften des Bauteils. Zur Gewinnung dieser Daten kommen verschiedene Sensoren zum Einsatz. Ultraschallsensoren messen die akustischen Eigenschaften. Die faseroptischen Sensoren können räumlich aufgelöst Dehnungen im Laminat detektieren. Dielektrische Sensoren messen Änderungen der Permittivität. Dadurch können kleinere Abminderungsfaktoren gewählt und bei Abweichungen individuell auf diese eingegangen werden. Im Rahmen des Projekts VPH2.0 wird der so geschaffene digitale Zwilling in der Fertigung genutzt, um die vorher durchgeführten Simulationen zu validieren. Das Verständnis der physikalischen Vorgänge und die entwickelten Messmöglichkeiten ebnen so den Weg zur Ertüchtigung von Simulationsmethoden als Nachweismittel in einer zunehmend virtuellen Zertifizierung.

Speicherung von kryogenem Wasserstoff in Composite-Flugzeugtanks

Storage of liquid hydrogen in composite tanks

Summary

In 2021, the HyStor project has been launched to define, investigate and evaluate critical design features of a liquid hydrogen tank from a manufacturing perspective. The focus is on fibre laying technology with an integrated rotary axis. Here, HyStor makes a significant contribution to being able to develop the existing system technology in an application-specific way. In addition to investigating fibre-laying technologies, a Structural Health Monitoring (SHM) system based on guided ultrasonic waves (Lamb waves) is being developed for use under cryogenic boundary conditions as part of the project. The research started in HyStor will be continued in the TACOMA project.

Im Jahr 2021 ist das DLR-Institut für Systemleichtbau mit dem NBank-Projekt HyStor (Hydrogen Storage) als erstem deutschen Projekt zur Speicherung von flüssigem Wasserstoff (LH2) in Composite-Tanks für die Anwendung in der Luftfahrt gestartet. LH2-Tanks sind ein Kernelement für die Realisierung zukünftiger emissionsarmer Flugzeuge. Composite-Tanks zur LH2-Speicherung wurden bisher nur vereinzelt in der Raumfahrt eingesetzt und sind für die Luftfahrt noch Neuland. Dies betrifft die komplette Kette von der grundsätzlichen Machbarkeit eines gasdichten Tanks über den sicheren Betrieb bis zu dessen erfolgreicher Zertifizierung. Die Herausforderung für die Fertigung liegt dabei auf der Dichtigkeit bei -253 °C (Siedetemperatur von Wasserstoff) bei gleichzeitig anliegendem Innendruck. Daher liegt der Fokus in HyStor zunächst auf den Fertigungsaspekten. Untersucht wird dafür die Fertigung kritischer Strukturkomponenten eines Faserverbund-Wasserstofftanks im Dom- und Zylinderbereich. Die Forschungsarbeiten erfolgen gemeinsam mit den Partnern Airbus Operations GmbH, Ariane Group GmbH, Brötje-Automation GmbH, INVENT GmbH und Infactory Solutions GmbH. Durch die branchenübergreifende Partnerlandschaft können in der Raumfahrt bestehende Erkenntnisse in die Luftfahrt übertragen werden.

Fertigung eines LH2-Tanks auf der GroFi®-Anlage in Stade

Der Fokus von HyStor liegt auf der Faserlegetechnologie unter Nutzung einer Rundachse. Hier leistet HyStor einen wesentlichen Beitrag, um die bestehende Anlagentechnologie von SY in Stade, die GroFi®-Anlage (Roboter-AFP-Anlage), anwendungsspezifisch weiterzuentwickeln. Zudem wird im Projekt parallel die Fähigkeit des Faserwickelprozesses betrachtet und hinsichtlich der Eignung für einen kryogenen Wasserstofftank untersucht. Der Faserwickelprozess bietet unter Umständen zwar Geschwindigkeitsvorteile im zylindrischen Bereich, sorgt aber gleichzeitig für eine Materialaufdickung im Dombereich. Die Aufdickung kann mittels Faserlegetechnologie vermieden werden und HyStor bietet die Möglichkeit, die Vorteile beider Technologien zu bewerten. Zur Untersuchung der kritischen Konstruktionsmerkmale wurde in HyStor ein Wickelwerkzeug mit einem Durchmesser von 3 m und einer Länge von 2,5 m beschafft (s. Foto). Das Werkzeug besteht aus einem Mantelwerkzeug und einer Zentralachse, auf der das Werkzeug mittels Zentrierschrauben aufgespannt wird. Über die Zentrierschrauben wird auch der Rundlauf und Toleranzausgleich realisiert. Das Wickelwerkzeug dient zur Überprüfung der Einbindung der Rundachse in die Anlagensteuerung, zur Überprüfung der Fähigkeiten der Offline-Programmierung sowie zur Überprüfung des Legebilds bei der Ablage von Carbonfasern.

Realisierung der permanenten Schadensüberwachung kryogener Composite-Tanks

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes liegt auf der Realisierung eines Sensorsystems zur Strukturüberwachung. Hierbei soll ein Structural-Health-Monitoring-System, das auf geführten Ultraschallwellen (Lambwellen) basiert, für den Einsatz unter kryogenen Randbedingungen entwickelt werden. Die wesentliche Herausforderung eines SHM-Systems für kryogene Wasserstofftanks ist die robuste Detektion von Defekten bei extrem niedrigen Temperaturen sowie bei Temperaturschwankungen und Füllstandänderungen während des Betriebs. Im Projekt HyStor wurden robuste SHM-Sensoren auf Basis von Piezokompositen entwickelt. Weiterhin wurden verschiedene Schadensindikatoren in den SHM-Signalen mit verschiedenen Typen von Defekten untersucht und deren Eignung unter kryogenen Bedingungen geprüft.

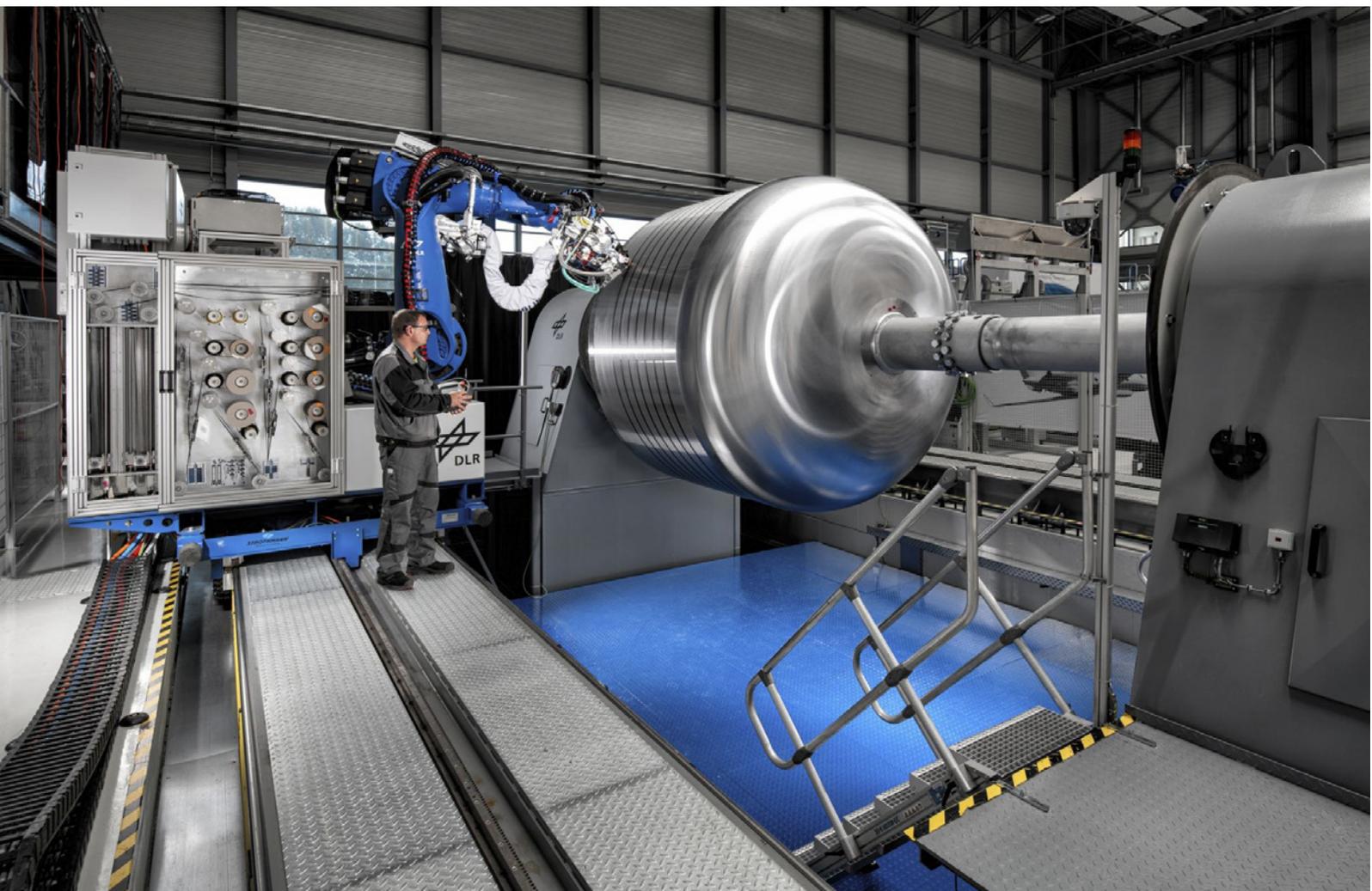
Autoren:

Dr.-Ing. Christian Bülow
Philipp Sämann, M. Sc.
Dipl.-Ing Bram van de Kamp



Fortführung der Arbeiten im Projekt TACOMA

Die in HyStor begonnenen Arbeiten zur Realisierung kryogener Composite-Tanks werden im LuFo-Projekt TACOMA fortgeführt. TACOMA bündelt eine Reihe von Arbeiten zur Fertigung, zur SHM-Überwachung und zur Ökobilanzierung des Innentanks bei einem doppelschaligen Konzept. Ziel des Projektes ist es am Ende mit dem Technologie-Reifegrad (TRL) 3 die grundsätzliche Machbarkeit der Speicherung von flüssigem Wasserstoff in Composite-Tanks nachzuweisen. Da sich die Partner Airbus, Brötje und INVENT ebenfalls an TACOMA beteiligen, ist zudem eine Kontinuität in der Erforschung der Technologien sichergestellt. Neben diesen drei Partnern sind zudem die Lufthansa Technik und die Ostseestahl GmbH & Co. KG an dem Projekt beteiligt. Parallel zu TACOMA erfolgen die Untersuchungen zur Realisierung eines entsprechenden Außentanks im Partnerprojekt HyTank, ebenfalls unter Beteiligung unseres Instituts.



Erste Versuche auf dem 3-m-Tankwerkzeug von DLR-SY in Stade

First trials on the 3 m tank tool of DLR-SY in Stade

Additive Funktionalisierung – eine industriell verfügbare Material- und Prozesskombination mit Auszeichnung

Additive functionalisation –

an industrially available material and process combination with an award

Summary

Resource conservation and cost efficiency! These are the major challenges in today's production processes. And this is precisely where Additive Functionalisation comes into place, specifically linking established manufacturing processes with the design freedom and agility of fibre-reinforced additive manufacturing. A concept of material and process combination is presented by the DLR Innovation Lab EmpowerAX with eleven partly international industrial partners using the example of a generic aerospace structure. The cooperation and technological approach are winners of the Innovation Award of Lower Saxony 2023.

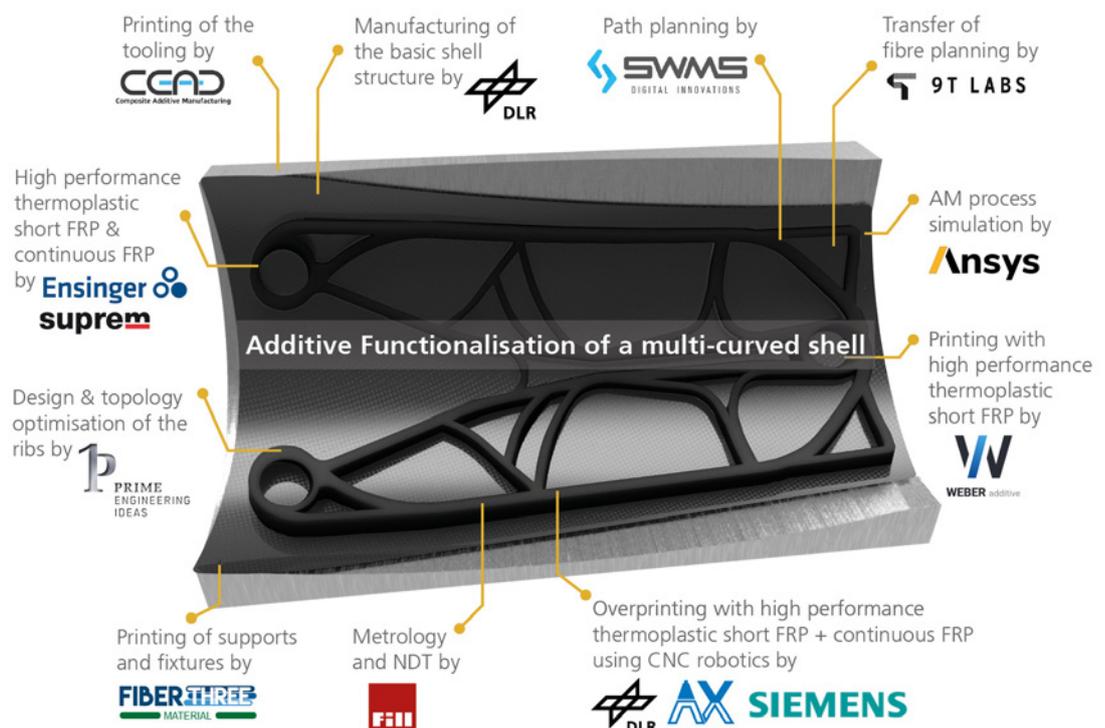
Ressourcenschonung und Kosteneffizienz! Das sind die großen Herausforderungen in heutigen Produktionsprozessen. Und genau hier kommt die additive Funktionalisierung zum Einsatz, die etablierte Fertigungsprozesse gezielt mit der Designfreiheit und Agilität der faserverstärkten additiven Fertigung verknüpft. Ein Konzept der Material- und Prozesskombination, welches das DLR Innovation Lab EmpowerAX eindrucksvoll mit elf teils internationalen Industriepartnern am Beispiel einer generischen Luftfahrtstruktur demonstriert. Kooperation und technologischer Ansatz sind als Sieger des Innovationspreis Niedersachsen 2023 ausgezeichnet worden.

Das richtige Material mit dem richtigen Prozess an den richtigen Platz

Das Innovation Lab EmpowerAX demonstriert den technologischen Ansatz der additiven Funktionalisierung eindrucksvoll mit elf teils internationalen Industriepartnern am Beispiel des EmpowerAX-Demobauteils. An einer generischen Luftfahrtstruktur finden an jeder Subkomponente konsequent die richtigen Werkstoffe und die richtigen Prozesse Anwendung. So wird eine konventionell gefertigte Thermoset-Schale mit Hilfe des robotischen 3D-Drucks versteift und gezielt mit Endlosfasern verstärkt. Die Beiträge der Industriepartner erstrecken sich dabei entlang der industriellen Prozesskette vom Design über die Materialauswahl sowie Faser- und Pfadplanung bis hin zum Druck und der Qualitätssicherung.

Eine industriell verfügbare Prozesskette zur additiven Funktionalisierung

An industrially available process chain for additive functionalization



Autorin:

Xenia Stumpf, M.Sc.



Kombination statt Substitution – Das Konzept der additiven Funktionalisierung

Die additive Funktionalisierung ist vielfältig und reicht vom Aufdrucken lokaler Verstärkungsrippen über die Integration von Montage- und Klebehilfen bis zum Einbringen elektrischer Leiterbahnen in ein Bauteil. Die Grundstruktur des Bauteils kann hierbei mit einem etablierten Verfahren, wie zum Beispiel dem Tapelegen, zur Fertigung großflächiger Strukturen hergestellt werden. Mittels faserverstärktem 3D-Druck wird das Bauteil entsprechend seiner Anforderungen nachträglich additiv funktionalisiert. Vor diesem Hintergrund findet der faserverstärkte 3D-Druck hier ein Anwendungsgebiet mit großem Mehrwert. Die Kombination der hervorragenden mechanischen Eigenschaften von Kurz- und Endlosfasern (SFR & CFR) mit der Technologie des 3D-Drucks erlaubt die präzise Orientierung der Verstärkungsfasern entlang kritischer Lastpfade. So muss Material nur dort aufgebracht werden, wo es wirklich benötigt wird. Dies ermöglicht eine kosten- und zeiteffiziente Umsetzung individualisierter Leichtbaustrukturen.



EmpowerAX Demo-
bauteil – additive
Funktionalisierung einer
mehrfach gekrümmten
Schale
EmpowerAX demo part
– additive functionalisa-
tion of a multi-curved
shell

Eine durchgängige Prozesskette als Schlüssel zum Erfolg

Die **digitale Prozesskette** ist für die Umsetzung der additiven Funktionalisierung unverzichtbar. Für das Aufdrucken der Verstärkungsrippen durch WEBER Additive auf die mehrfach gekrümmte Thermoset-Schale benötigt der robotische 3D-Drucker eine Anleitung, wie diese gedruckt werden soll – die sogenannte Pfadplanung. Die Pfadplanung nimmt eine Schlüsselrolle im Kontext der robotischen additiven Fertigung ein, da mit dieser entschieden wird, an welcher Stelle der Druck begonnen und beendet werden und ob es im Druckprozess An- und Absetzpunkte geben soll. Für das **EmpowerAX Demobauteil** übernimmt diese Planung SWMS mit ihrer innovativen Softwareumgebung CAESA, welche vom digitalen Zwilling über die Pfadplanung bis zur umfassenden Simulationsumgebung alle notwendigen Bausteine für den robotergestützten, großformativen 3D-Druck erfolgreich vereint. Für den Druck der Rippenstruktur entwickelte das SWMS-Team einen digitalen Zwilling der Roboterzelle und validierte in der Simulationsumgebung eine optimale Bewegungsführung des Roboters. So gelingt es, Fehler und Potenziale vor Durchführung des tatsächlichen Drucks zu identifizieren und eine optimierte Druckstrategie zu entwickeln. Das Ergebnis: der Druck der Verstärkungsrippen mit nur einem An- und Absetzpunkt – genau wie beim bekannten Haus vom Nikolaus.

Der wichtigste Baustein zur Realisierung des EmpowerAX-Demobauteils Demonstrators und des zugrunde liegenden Konzepts der additiven Funktionalisierung ist jedoch die starke interdisziplinäre Kooperation zwischen dem DLR als Forschungseinrichtung und den elf teils internationalen Industriepartnern. Eine Zusammenarbeit, für die das Projekt am 18. September 2023 vom Innovationsnetzwerk Niedersachsen als Sieger des Innovationspreises in der Kategorie „Kooperation“ ausgezeichnet wurde. Mit dem Konzept der additiven Funktionalisierung demonstriert das DLR Innovation Lab, EmpowerAX wie der Systemleichtbau der Zukunft aussehen kann – physisch wie digital.

Transfer zu höherer Composite-Qualität mit der DIN SPEC 35255

Transfer to higher quality for composites with DIN SPEC 35255

Summary

What is needed to facilitate or even enable the widespread use of fibre-reinforced composites in all industries? How can we help to safely raise the lightweight potential of this family of materials and increase confidence in the use of composites?

The idea: In cooperation with Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) and experts from a wide range of industries and institutions, to develop for the first time a standard that defines and specifies the "Quality requirements for composite processes" across all industries. In short: the creation of DIN SPEC 35255!

Was braucht es, um den umfassenden Einsatz von Faserverbundwerkstoffen (Composites) branchenübergreifend zu erleichtern oder überhaupt erst zu ermöglichen? Wie können wir dabei helfen, das Leichtbaupotenzial dieser Werkstoffgruppe sicher zu heben und das Vertrauen in Composites zu steigern?

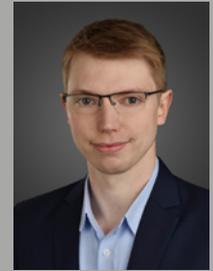
Die Idee: Gemeinsam mit dem Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) und Expertinnen und Experten verschiedenster Branchen und Institutionen erstmalig einen Standard erarbeiten, der branchenübergreifend die „Qualitätsanforderungen an Composite-Prozesse“ festlegt und konkretisiert. Kurzum: Die Entwicklung der DIN SPEC 35255!

Notwendigkeit der DIN SPEC 35255

Faserverbundwerkstoffe (Composites) erreichen ihre endgültigen Materialeigenschaften erst nach dem Herstellungsprozess und sind empfindlich gegenüber jedweder Art von Fertigungs- und Prozessabweichungen. Gemäß der bekannten DIN EN ISO 9001 aus dem Qualitätsmanagement ist die Fertigung von Composites als „spezieller Prozess“ zu betrachten. Das bedeutet u. a., dass sich ohne eine zerstörende Prüfung keine hundertprozentige Aussage über die Qualität des resultierenden Composite-Bauteils und die Einhaltung der einzelnen Prozessschritte treffen lässt. Dies ist nicht praxisgerecht und verbessert letzten Endes weder die Produktqualität noch das Vertrauen in die Werkstoffe.



Entstehung des Standes der Technik für Composites (Quelle: Fraunhofer IFAM)
Development of the state of the art for composites (source: Fraunhofer IFAM)



Autor:

Marcel Andres, M. Sc.

Abhilfe soll ein für Composites weiterentwickeltes Qualitätsmanagementsystem (QMS) nach DIN EN ISO 9001 bieten, welches Fehlermöglichkeiten in den einzelnen Prozessschritten ausschließt.

Eine nachweisbare und verbesserte Werkstoffqualität steigert das Vertrauen in Composites. So lassen sich neue Leichtbauanwendungen erschließen. Eine Strategie, die bereits seit Langem in der Schweiß- und auch in der Klebetechnik erfolgreich ist.

Ein starkes Team

Um dem ambitionierten und umfangreichen Anwendungsbereich der DIN SPEC 35255 gerecht zu werden, hat das Fraunhofer IFAM in Bremen ein Konsortium aus Vertretern der verschiedensten Branchen und entlang der gesamten Composite-Prozesskette gebildet. Das DLR-Institut für Systemleichtbau arbeitet maßgeblich mit und treibt den Technologietransfer voran.

Nach der DIN SPEC ist vor der DIN

Mit der Veröffentlichung der DIN SPEC ist ein wichtiger Meilenstein erreicht – eine Basis für die Qualitätsverbesserung bei verschiedensten Composite-Anwendungen in der Zukunft. Die nächsten Monate werden zeigen, ob der Entwurf der DIN SPEC bereits sämtliche Aspekte entlang der Prozesskette enthält und ob die Bedürfnisse aller Branchen erfasst sind. Das Ziel besteht nun darin, die DIN SPEC zu ergänzen und in eine gültige DIN-Norm zu überführen. Daran wird das DLR weiter mitarbeiten.

Forschungseinrichtungen	Zertifizierungsstellen	Industriepartner
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Systemleichtbau	F & E Technologiebroker Bremen GmbH (Zertifizierungsstelle TBBCert)	Airbus DS Airborne Solutions
Fraunhofer IFAM (Initiator)	TC-Kleben GmbH	BKT GmbH
SKZ – KFE gGmbH		BÜFA Composite Systems GmbH & Co. KG
		DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH
		Fr. Fassmer GmbH & Co. KG
		thyssenkrupp Marine Systems GmbH

Die DIN SPEC 35255 steht unter folgendem Link für alle Interessierten zum Download zur Verfügung:

<https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-35255/373719663>



Induktives Eis-Schutzsystem: thermisch stark verbunden, mechanisch leicht zu trennen

Inductive ice protection system: thermally strongly bonded, mechanically easy to separate

Summary

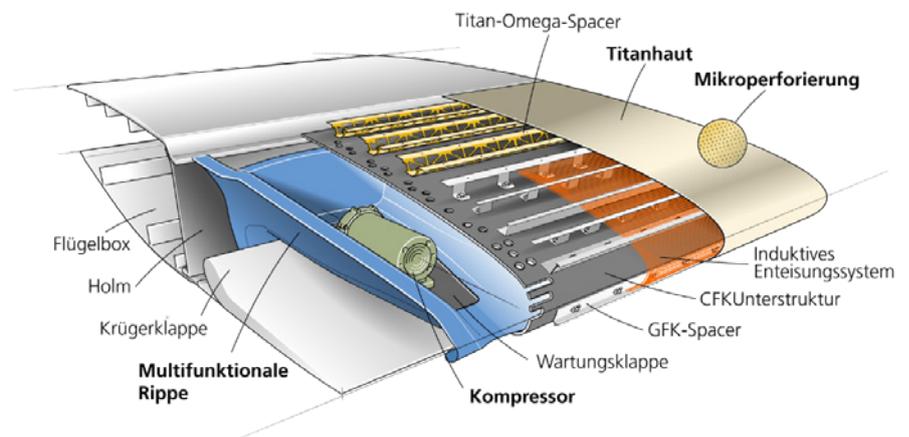
By reducing frictional losses, laminar airfoils provide a significant contribution to sustainable aviation. The ECHO and HLFC-WIN projects are investigating hybrid-laminar wing structures with active suction. One of the technological issues relevant to certification is ice-protection.

An ice protection system with inductive energy transfer provides non-contact heating and mechanical decoupling from the outer skin avoiding surface blocking, as well as enabling an efficient maintenance scenario.

Challenges include focusing heat on the outer skin, as well as the design of the coils themselves. In this context, the weight-specific performance shows a strong relationship with the geometry and design of the installed coils. Initial tests on a stabiliser show promising results, but also confirm the disadvantages of a retrofit solution.

An integrated inductive ice-protection system on a hybrid-laminar wing demonstrator is operating successfully and provides near-reality heating in the laboratory, allowing the results to be extrapolated to the actual de-icing case. The distribution of heat is in line with expectations. With regard to metallic secondary components, the go-ahead can be given – integrated bolts and nuts do not show any critical heating.

Durch Verringerung der Reibungsverluste leisten laminare Tragflächen einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Luftfahrt. In den Projekten ECHO und HLFC-WIN werden hybrid-laminare Flächentragwerke mit einer aktiven Absaugung untersucht. Ein zulassungsrelevanter Teil der technologischen Fragestellungen dabei ist die Enteisung.



Small-Scale Demonstrator im Projekt HLFC-WIN mit induktiver Enteisung

Small-scale demonstrator of the HLFC-WIN project with inductive ice-protection system

Gesucht wird ein System, welches zu der vorliegenden Struktur, zu modernen Triebwerken und Systemstrukturen, aber auch zu den Anforderungen laminarer Tragflächen passt. Hier kommt die induktive Energieübertragung ins Spiel: Berührungslose Erwärmung mit hohen Leistungen und eine elektrische Energieversorgung passen perfekt zu den Anforderungen. Die berührungslose Erwärmung verhindert ein Verblocken der mikroperforierten Oberflächen und ermöglicht zudem eine physische Entkopplung des Enteisungssystems von der aerodynamischen Außenhaut. Im Wartungsfall kann die Außenhaut entsprechend schnell und günstig ohne das Enteisungssystem getauscht werden.

Herausforderungen der induktiven Erwärmung

Ein zeitlich veränderliches Magnetfeld führt in der Außenhaut zu wärmeerzeugenden Wirbelströmen. Grundsätzlich ist eine Erwärmung für alle elektrisch leitfähigen Materialien möglich. Im vorliegenden Anwendungsfall ist dieser Umstand jedoch zunächst problematisch, da neben der Zielstruktur auch die Substruktur aus CFK sowie metallische Verbindungselemente in direkter Nähe zum Installationsraum liegen und möglicherweise kritisch erwärmt werden.

Es steht daher die Frage im Vordergrund: Kann die induktive Erwärmung hinreichend fokussiert die Titan-Außenfläche erwärmen oder kommt es zu einer kritischen Erwärmung sekundärer Komponenten?



Autor:

Sven Ropte, M. Sc.

Erste Demonstration am Höhenleitwerk

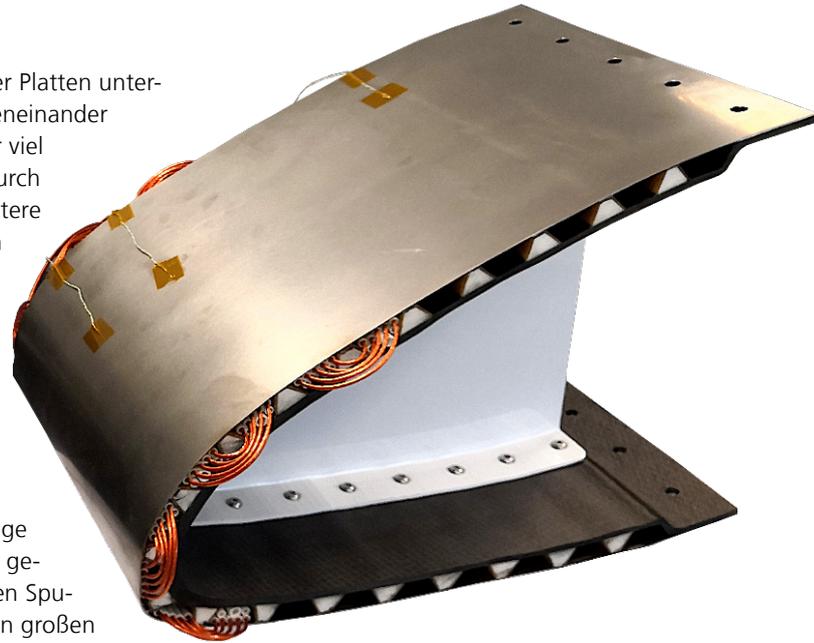
Die Selektivität der induktiven Erwärmung wird anhand ebener Platten untersucht. Repräsentative Proben von CFK und Titan werden nebeneinander dem gleichen Magnetfeld ausgesetzt. Hier zeigt sich eine sehr viel geringere Erwärmung der CFK-Struktur, welche sich zudem durch einen geschickten Laminataufbau weiter reduzieren lässt. Weitere Untersuchungen werden hinsichtlich der gewichtsspezifischen Leistungen in Abhängigkeit von der Spulenkonfiguration mit Hilfe numerischer Simulationen durchgeführt

An dem sogenannten „Demo A4“, einem Segment eines hybrid-laminaren Höhenleitwerks, wird zudem ein induktives Heizsystem „nachgerüstet“. Neben dem Erwärmungsverhalten kann die simulativ berechnete Induktivität der Spule validiert werden. Es zeigen sich jedoch auch die erwarteten Nachteile des Nachrüstens: Schmale Spulen, bedingt durch enge Bauräume, haben geringere Leistungsdichten und damit auch geringere Wirkungsgrade. Zudem treten durch die überstehenden Spulen an den Kanten sehr starke Erwärmungen auf, welche einen großen Teil der Gesamtleistung stellen und eine Beurteilung des Erwärmungsverhaltens sekundärer metallischer Bauteile (Bolzen) erschweren.

Integration eines induktiven Enteisungssystems in eine HLFC-Flügelstruktur

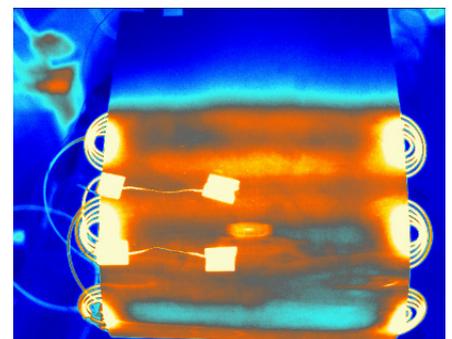
Mit den Erkenntnissen aus dem Höhenleitwerk werden die Untersuchungen zur Enteisung am Flügel angegangen. Anhand simulativer Studien können Kennzahlen für den Vorentwurf, aber auch Strategien und Empfehlungen für das Design erarbeitet werden. So zeigt sich zum Beispiel anhand der gewichtsspezifischen Leistung der Spule, welche im untersuchten Parameterraum von 1500 bis 3500 W/kg reicht, ein bedeutender Einfluss der Geometrie und Ausführung derselbigen.

Die Integration eines induktiven Enteisungssystems erfolgte anschließend auf dem Small-Scale Demonstrator, einer hybrid-laminaren Flügelstruktur aus dem Projekt HLFC-WIN. Drei 2-lagige Spulen sind jeweils um einen „Spacer“ herum installiert. Die Installation und der Betrieb verlaufen erfolgreich und ermöglichen eine realitätsnahe Erwärmung im Labor und damit die Extrapolation der Ergebnisse auf den Enteisungsfall. Die Verteilung der Wärme entspricht den Erwartungen. Bezüglich metallischer Sekundärkomponenten kann Entwarnung gegeben werden – integrierte Bolzen und Muttern zeigen keine kritische Erwärmung.



Induktive Erwärmung am hybrid-laminaren Höhenleitwerks-Demonstrator

Inductive heating on the hybrid-laminar HTP demonstrator

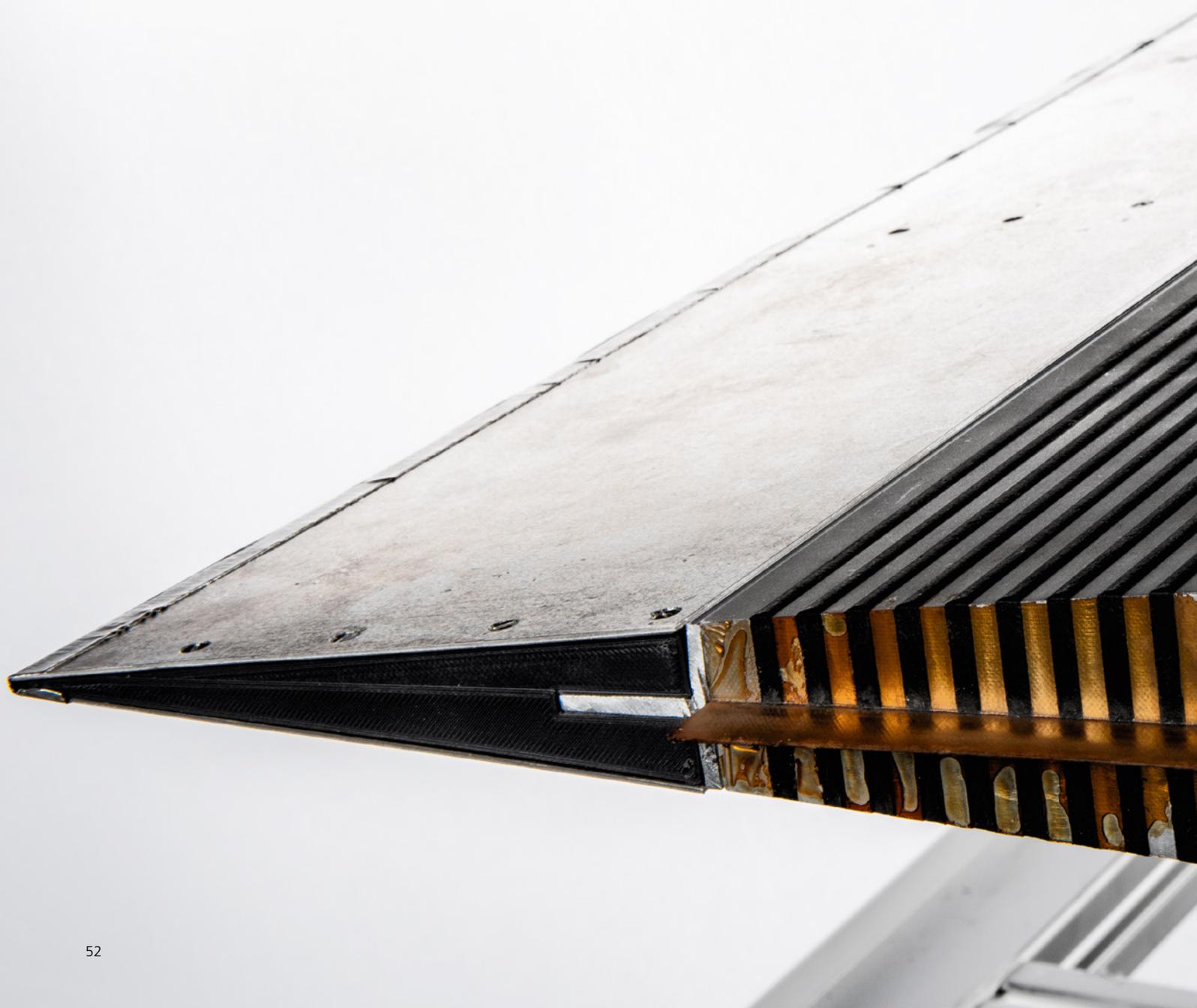


Infrarot-Bild zur induktiven Erwärmung am Höhenleitwerk

Infrared image for inductive heating on the HTP

SYSTEM

System



Structural Health Monitoring System – bereit für den Einsatz _____	54
Structural Health Monitoring System – ready for application	
Effiziente Flugzeugtriebwerke: Was wir von den Vögeln lernen können __	56
Efficient aircraft engines: learning from birds	
Wie eine sanfte Brise – semiaktive Schallreduktion an Windenergieanlagen _____	58
Like a gentle breeze – semi-active noise reduction on wind turbines	
Strukturintegrierte Superkondensatoren miniaturisieren elektrische Antriebe _____	60
Structurally integrated supercapacitors miniaturise electric drives	
Es wird kalt – eine Versuchsanlage für neuartige Hubschrauber-Enteisungs- systeme _____	62
It's getting cold – a test facility for novel helicopter de-icing systems	

Structural Health Monitoring System – bereit für den Einsatz

Structural Health Monitoring System – ready for application

Summary

Structural Health Monitoring (SHM) based on ultrasonic guided waves is a novel technology using permanently attached actuator and sensor networks, data acquisition and data evaluation systems to enable in-service inspection of aircraft structures. A decentralised and modular architecture of the SHM system has been developed, which can be adapted to different application scenarios and exhibits low installation and assembly effort. The system architecture is based on a modular and robust SHM array and a local distribution of the individual electronic hardware components of the SHM system.

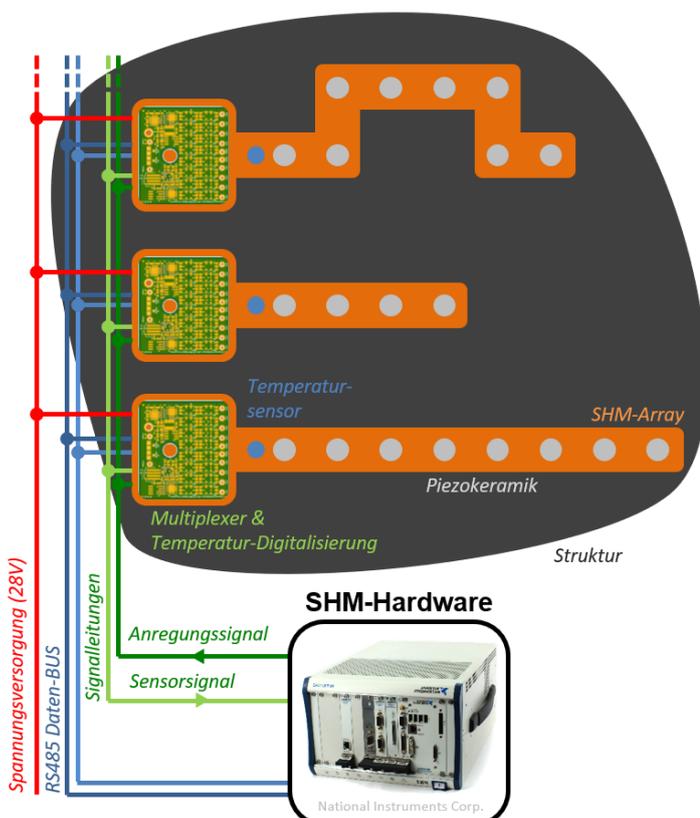
Überzeugende und einfach umzusetzende technische Lösungen sind ein Schlüsselfaktor für die praktische Anwendung von Structural-Health-Monitoring-Systemen (SHM). Erst wenn diese Voraussetzungen geschaffen sind, können die vollen Potenziale von SHM-Systemen erschlossen werden. Diese bestehen in der Erhöhung der Verfügbarkeit von Luftfahrzeugen, einer Reduktion der Wartungskosten durch bedarfsgerechte Wartungsintervalle oder einem erweiterten Leichtbaupotenzial durch die Reduzierung von Sicherheitsfaktoren.

Structural Health Monitoring System

Ein SHM-System besteht aus einem Netzwerk von permanent applizierter Sensorik, Aktuatorik sowie aus Hard- und Softwarekomponenten zur Signalanregung, -verarbeitung und -analyse. Mit Hilfe des SHM-Systems werden geführte Ultraschallwellen (Lambwellen) in der Struktur angeregt. Die Wellen breiten sich großflächig in der Struktur aus und interagieren mit Schäden. Anhand verschiedener Interaktionsmechanismen lassen sich Rückschlüsse auf Schadensort, -art und -größe ziehen. Wie sich die einzelnen Systemkomponenten effizient und kostengünstig in den Fertigungs- und Assembly-Prozess von Luftfahrtstrukturen integrieren lassen, ist eine zentrale Fragestellung für den praktischen Einsatz von SHM-Systemen.

Dezentrale und modulare System-Architektur

Als Antwort auf diese Frage wurde im DLR eine dezentrale und modulare SHM-Systemarchitektur entwickelt, die sich flexibel auf verschiedene Anwendungsszenarios anpassen lässt und einen geringeren Installations- und Verkabelungsaufwand besitzt (siehe Bild 1). Das Konzept basiert auf einem modularen SHM-Array und einer dezentralen und sensornahen Verteilung der einzelnen elektronischen Hardware-Komponenten des SHM-Systems. Um einzelne piezokeramische Wandler innerhalb des SHM-Netzwerks individuell anzusteuern, wird eine Multiplexer-Elektronik genutzt, die lokal auf jedem SHM-Array integriert ist. Durch den Multiplexer sind bis zu acht piezokeramische Wandler mit den zentralen Signalleitungen verschaltet. Außerdem verfügt das SHM-Array über zusätzliche Temperatursensoren, deren Signal bereits am Sensor digitalisiert wird. Alle SHM-Arrays sind an einen zentralen Kabelbaum (Daisy-Chain-Prinzip) angeschlossen. Der Kabelbaum setzt sich aus zwei Signalleitungen zur Anregung und zum Empfang von Lambwellen sowie aus einer BUS-Leitung, die zur Steuerung der Multiplexer und zum Auslesen des Temperatursignals genutzt wird, zusammen. Durch die dezentrale Anordnung der Hardware-Komponenten und die Nutzung eines zentralen Kabelbaums sind der Verkabelungsaufwand und das Gewicht des SHM-Systems wesentlich reduziert.



Architektur des dezentralen SHM-Systems

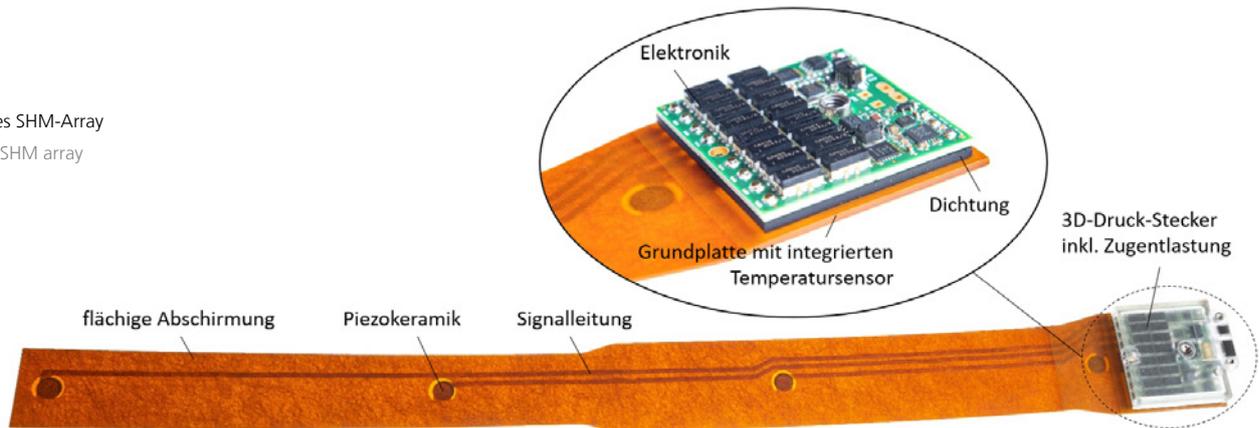
Architecture of the decentralised SHM system

Autoren:

Dr.-Ing. Daniel Schmidt
Maria Moix-Bonet, M. Sc.
Dipl.-Ing. Jan Petersen



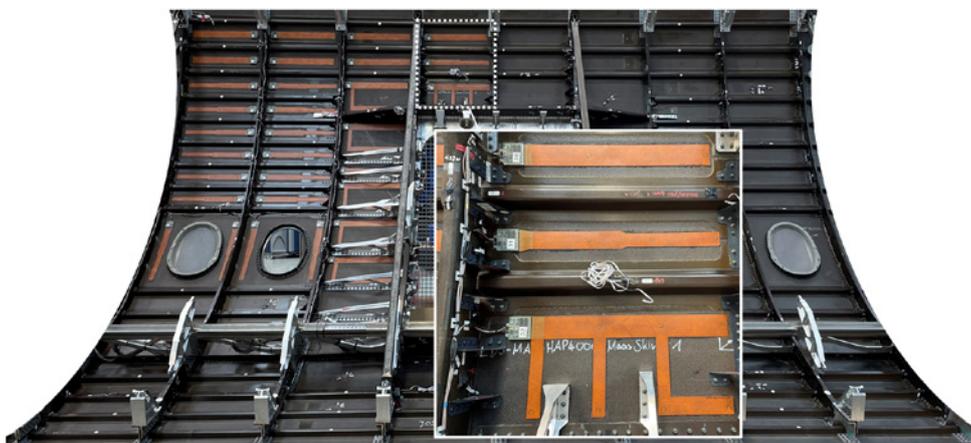
Modulares SHM-Array
Modular SHM array



Passt auf jede Anwendung

Das modulare SHM-Array basiert auf der Piezokomposite-Technologie (DuraAct™), die am DLR entwickelt wurde. Hierbei sind die bruchempfindlichen Piezokeramiken in ein Epoxidharz eingebettet, wodurch die Keramik mit einer Druckvorspannung beaufschlagt wird und somit den im Betrieb auftretenden Zug- und Biegebeanspruchungen widerstehen kann. In das Array sind die einzelnen Signalleitungen der Piezokeramiken inkl. Abschirmung und einer zentralen Grundplatte integriert. In die Grundplatte ist zusätzlich ein Temperatursensor eingebettet. Die elektrische Verbindung zwischen Grundplatte und Multiplexer-Elektronik ist über Federkontakte realisiert, wodurch die Elektronik mechanisch von der Flugzeugstruktur entkoppelt ist. Um die Federkontakte vor auftretender Kondensationsfeuchte im Flugbetrieb zu schützen, wird eine flächige Dichtung genutzt. Zum Zwecke eines vereinfachten Montage-Prozesses sind die Elektronik-Platinen, die mit Dichtung und einem Steckergehäuse vorausgerüstet sind, bereits mit einem vorkonfektionierten Kabelbaum verbunden. Während der Montage muss nur das Steckergehäuse mit der Grundplatte des SHM-Arrays verschraubt werden. Das SHM-Array kann sowohl in den Fertigungsprozess der Faserverbundstruktur integriert werden (Co-Bonding) als auch nachträglich mit einem Klebprozess (Secondary Bonding) auf die Struktur appliziert werden. Das SHM-Array (ohne Elektronik) ist derart konzipiert, dass es als Halbzeug in typische Fertigungsprozesse (180°C, 7 bar) und Vakuum-aufbauten von Faserverbundstrukturen eingebracht werden kann.

Zum Test des SHM-Systems unter repräsentativen Fluglasten wurde eine Airbus-A350-Türumgebungsstruktur mit SHM-Arrays ausgestattet. Bild 3 gibt einen Eindruck, wie sich das modulare SHM-Array an die jeweilige Einbausituation und den verfügbaren Bauraum flexibel anpassen lässt.



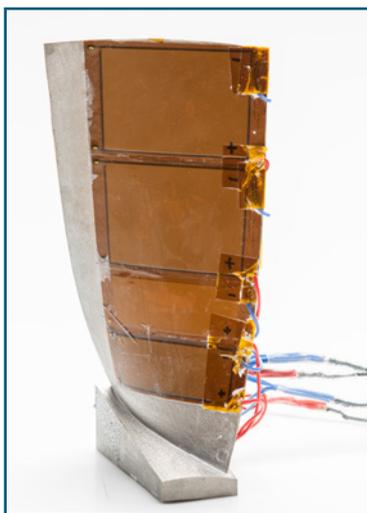
Türumgebungsstruktur mit installierten SHM-Arrays
Door Surround Structure with integrated SHM Arrays

Effiziente Flugzeugtriebwerke: Was wir von den Vögeln lernen können

Efficient aircraft engines: learning from birds

Summary

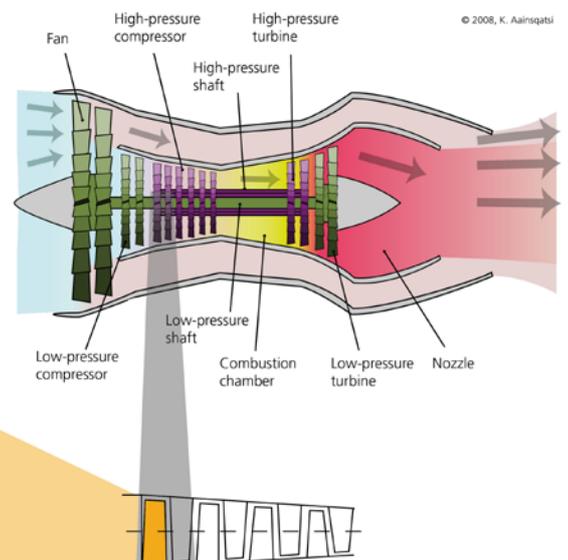
When we look at how birds fly, we can see that they modify the shape of their wings during flight. They do this because they know that, to be more performant, faster and, among other things, get their food, they need to adapt to different flying conditions such as those resulting from variable winds. Aircraft engines consist of several blades acting like small wings, each of them helping to rotate each engine stage and propel the aircraft. Unfortunately, the blades of all current aeronautical engines are rigid and offer the same profile all throughout flight. This remains so despite the fact that aircraft, as birds, also encounter a wide variety of environmental conditions during their missions. As a result, during most flight phases engine blades are not operating with an ideal shape and cannot reach their best levels of performance. Since engines are a crucial component regarding aircraft efficiency, engine blades capable of adapting to different flight phases can improve overall engine and aircraft performance while reducing fuel consumption, toxic emissions and costs, and while becoming more environmentally friendly.



Da können die Flugzeugkonstrukteure nur staunen: Vögel verändern die Form ihrer Flügel während des Fluges, sind dadurch wendiger, an wechselnde Winde anpassungsfähig und gemessen an ihrer Größe extrem energieeffizient. Dagegen weisen die starren Schaufeln der Flugzeugtriebwerke während des gesamten Reiseflugs das gleiche Profil auf. Gängige Triebwerke bestehen aus einer Vielzahl von Schaufeln, die wie kleine Flügel wirken und dazu beitragen, die einzelnen Triebwerksstufen zu drehen und somit das Flugzeug anzutreiben. Dabei sind auch Flugzeuge und deren Triebwerke während ihres Einsatzes veränderlichen Umweltbedingungen ausgesetzt. Sie besitzen in den meisten Flugphasen daher nicht die ideale Form und erreichen dadurch nicht ihre beste Performance. Hinsichtlich der Energieeffizienz übernehmen Triebwerke eine entscheidende Rolle. Triebwerks-schaufeln, die sich an unterschiedliche Flugphasen anpassen können, verbessern die Gesamtleistung von Triebwerk und Flugzeug deutlich. Sie senken den Kraftstoffverbrauch, die Schadstoffemissionen und schonen so die Umwelt. Bei den beschauften Triebwerksstufen hat die Verdichterstufe den größten Einfluss auf die Energieeffizienz. Dies liegt daran, dass der Verdichter für die Erhöhung des Drucks und der Temperatur des einströmenden Luftstroms verantwortlich ist.

Triebwerke und Morphing

Der Verdichter muss dafür sorgen, dass der Luftstrom ideale Bedingungen für eine optimale Verbrennung vorfindet. Aktuell sind die Verdichterschaufeln geometrisch so ausgelegt, dass sie auf der Reiseflughöhe oder beim höchsten Punkt des Steigflugs ihren maximalen Wirkungsgrad haben. Diese Auslegungsgeometrie nennt man Designgeometrie. Für den Betrieb unter anderen Flugbedingungen, sogenannten Off-Design-Bedingungen, erfolgt bislang eine gewisse Anpassung durch



Morphende Schaufeln für den Hochdruckkompressor
Morphing blades for the high-pressure compressor

Autorin:

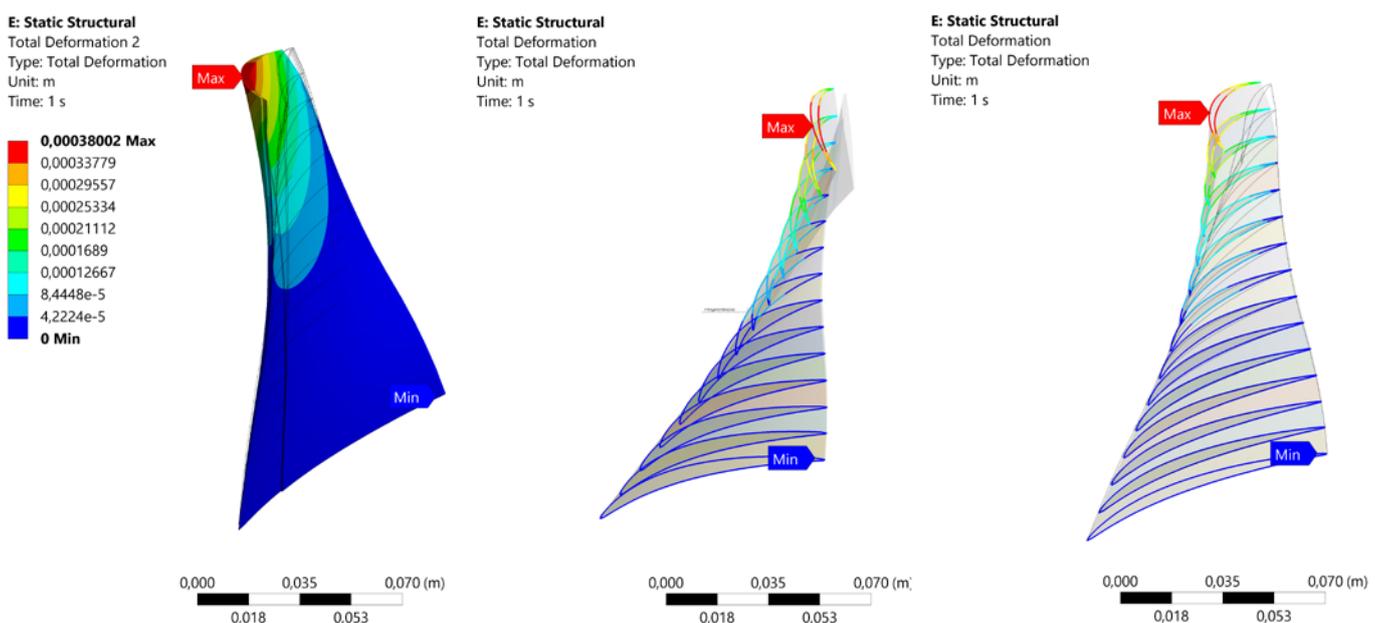
Dipl.-Ing. Zhuzhell Montano



eine Variation der Drehzahl. Diese Anpassung ist aber nicht ausreichend, um Verluste zu vermeiden. Doch durch den Einsatz aktiver Materialien könnten Verdichterschaufeln auch unter Off-Design-Bedingungen eine deutlich bessere Performance liefern. Piezokeramische Aktuatoren oder auch Stellelemente aus Formgedächtnislegierungen sind in der Lage, die Form der Verdichterschaufeln während des Flugs zu verändern. Das Potenzial solcher Morphing-Verdichterschaufeln haben das DLR-Institut für Leichtbausysteme und die TU Braunschweig im Rahmen des Exzellenzclusters Sustainable and Energy-Efficient Aviation (SE²A) gemeinsam untersucht.

Die Wissenschaft dahinter

Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur Umwandlung von Standardschaufelarchitekturen in morphende Schaufeln entwickelt. Das Verfahren nimmt eine aerodynamische Schaufelgeometrie als Referenz, die nahezu beliebig sein kann, aber dem Design der gewählten Schaufel im Auslegungspunkt entsprechen sollte, und wandelt sie in eine Morphing-Schaukel um. Dazu werden lasttragende Aktuatoren, die aus Fasern oder dünnen Platten bestehen, in die Schaufeloberflächen integriert. Wenn sich die multifunktionalen Aktuatoren ausdehnen oder kontrahieren, verändern sie die Form der Schaufel in geeigneter Weise. Durch geschickte Ausnutzung der Richtungseigenschaften dieser Aktuatoren ist es möglich, sie so in die Schaufeln zu integrieren, dass immer eine bestimmte aerodynamische Form erreicht wird. Auch die Unterschiedlichkeit der Schaufelformen wirkt sich auf die Luftströmung durch die Verdichterstufe aus, wobei z. B. unterschiedliche Anstell- und Wölbungswinkel der Schaufeln zu unterschiedlichen Druckverhältnissen und Massenströmen führen – beide stehen in engem Zusammenhang mit der Leistung der Stufe und somit des Triebwerks. Ein weiteres Ergebnis dieses Projekts ist die Erkenntnis, dass es auch in der Präsenz sehr starker Fliehkräfte möglich ist, das Leistungsverhalten der Stufe gezielt zu variieren. Zudem wurde das Konzept unter statischen Bedingungen mit einem Prototyp validiert. Die Weiterentwicklung aktiver Technologien und ihr Einsatz bei zukünftigen Triebwerksschaufeln besitzen das Potenzial, die Energieeffizienz eines Triebwerks zu steigern und damit einen großen Schritt weiter in Richtung einer grüneren und umweltfreundlicheren Luftfahrt zu ermöglichen.



Beispiel-Verformungen für die Gesamtschaukel und in den aerodynamischen Profilschnitten
Exemplary morphed blade geometries for the whole blade and at aerodynamic sections

Wie eine sanfte Brise – semiaktive Schallreduktion an Windenergieanlagen

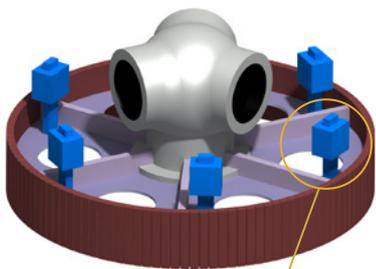
Like a gentle breeze – semi-active noise reduction on wind turbines

Summary

Wind turbines are one of the cornerstones of climate neutrality, but due to the principle of sound radiation, they can only be erected at a minimum distance from inhabited areas. In addition to the aeroacoustic noise on the blades, sound is generated by vibrations on the generator of the turbine. These vibrations are then transmitted via the drive train to the nacelle and the rotor blades. From there, they can lead to perceptible sound radiation. The vibrations at the generator are caused by alternating forces resulting from different magnetic fields in the air gap. These can also be felt on a small scale, e.g. on a bicycle dynamo.

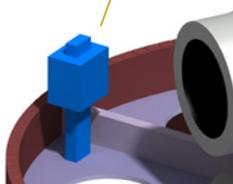
Anbringung der Tilger außen am Rotor des Generators

Absorber attachment at the outer rim of the rotor



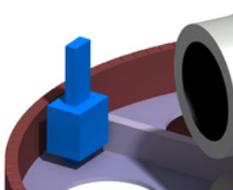
Masse am Ende des Federbalkens: geringe Eigenfrequenz

Mass at the end of the beam: low eigenfrequency



Masse am Fußpunkt des Federbalkens: Hohe Eigenfrequenz

Mass at attachment point of spring beam: High eigenfrequency



Windenergieanlagen stellen einen der Grundpfeiler der Klimaneutralität dar, können jedoch aufgrund der prinzipbedingten Schallabstrahlung nur mit entsprechendem Mindestabstand zu bewohnten Gebieten errichtet werden. Neben den aeroakustischen Geräuschen an den Blättern entsteht Schall aus Schwingungen am Generator der Anlage. Diese Schwingungen werden anschließend über den Antriebsstrang auf die Gondel und die Rotorblätter übertragen. Von dort aus können sie zu einer wahrnehmbaren Schallabstrahlung führen. Ursache der Schwingungen am Generator sind Wechselkräfte in Folge unterschiedlicher Magnetfelder im Luftspalt. Diese lassen sich z. B. auch im Kleinen an einem Fahrraddynamo fühlen. Wenn es gelänge, diese Schwingungen möglichst an der Quelle zu reduzieren, könnte dies die Akzeptanz von Windenergieanlagen in der Bevölkerung deutlich verbessern und die Erschließung weiterer Standorte für die Klimaneutralität ermöglichen.

Mit verstellbaren Tilgern gegen den Schall

Da sich die schwingungserregenden Rastmomente im Generator prinzipbedingt nicht vermeiden lassen, muss eine andere Lösung für diese Herausforderung gefunden werden. Schwingungsreduzierende Maßnahmen direkt am Generator stellen daher eine aussichtsreiche Möglichkeit dar, den abgestrahlten Schall zu verringern. Eine Analyse des Schalls lieferte die Erkenntnis, dass die Frequenz, bei der der Schall auftritt, ein Vielfaches der Rotordrehfrequenz ist. Eine einfache und effektive Möglichkeit, eine solche Schwingung zu reduzieren, stellen Schwingungstilger dar. Dabei handelt es sich um zusätzliche schwingungsfähige Feder-Masse-Systeme, deren Wirkung darin besteht, die Schwingung aus der zu beruhigenden Grundstruktur in sich selbst zu verlegen, wo die Schwingung erstens nicht stört und zweitens die Schwingungsenergie in Wärme dissipiert werden kann. Der wesentliche Nachteil der Tilger besteht jedoch darin, dass sie in ihrer grundlegenden Form nur auf eine feste Frequenz abgestimmt werden können. Für Windenergieanlagen sind Tilger mit konstanter Frequenz nicht nutzbar, da sich die Frequenz der Schwingungen, die es zu beruhigen gilt, mit der Rotordrehzahl und somit mit dem Wind ändert. Hier setzt die Forschung des Instituts an: Frequenzvariable Tilger, bei denen sich die Tilgerfrequenz nachführen lässt, können den genannten Nachteil überwinden und somit auch zur Beruhigung der Schwingungen in der Windenergieanlage genutzt werden. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts DampedWEA wurde daraufhin ein frequenzvariabler Schwingungstilger entworfen, gebaut und an einem realen Generator einer Windenergieanlage beim Industriepartner vermessen.

Der Frequenz nachlaufen

Bei der Übertragung des Tilgerkonzeptes auf die Windenergieanlage entstehen zwei Herausforderungen: Erstens ist die Tilgerfrequenz der variablen Betriebsdrehzahl nachzuführen. Zweitens treten die Schwingungen in zwei verschiedenen Raumrichtungen auf: in Drehrichtung des Rotors und senkrecht zur Drehachse nach außen. Gesucht wird daher ein Tilgeraufbau, der in zwei Raumrichtungen wirken kann und dessen Wirkungsfrequenz angepasst werden kann. Dazu wurde eine Reihe von Konzepten für die Frequenznachführung bei gleichzeitiger Wirkung in zwei Richtungen erdacht und simulativ bewertet. Eine auf einem federnden Balken verschiebbar gelagerte Masse erwies sich dabei als das passende Konzept in Bezug auf die erreichbaren Frequenzen und den Fertigungsaufwand. Die Position der Masse auf dem Balken bestimmt in diesem Konzept die Schwingungs- und damit Arbeitsfrequenz des Tilgers: Je weiter sie zur Balkenspitze wandert, desto langsamer schwingt der Tilger, also umso niedriger ist die Frequenz. Dies ist ähnlich zu einem Fadenpendel, dessen Frequenz kleiner wird, wenn die Länge des Fadens erhöht wird. Der rechteckige Balkenquerschnitt erlaubt zudem, unterschiedliche Frequenzen in den beschriebenen Richtungen zu bedämpfen, wobei die Eigenfrequenzen in beiden Richtungen mit dem Verschieben der Masse gleichzeitig verändert werden. Die Änderungen der Frequenzen sind dabei konstruktiv so zu gestalten, dass sie zu den Erfordernissen des Generators passen.

Vom Prototyp zum Teststand

Autoren:

Dr.-Ing. Martin Pohl
Alexander Kokott, M. Sc.



Basierend auf dem geschilderten Prinzip wurde ein Tilgersystem ausgelegt und ein Prototyp gebaut. Von herausragender Bedeutung ist hierbei die Lagerung der Masse auf dem federnden Balken. Diese muss zwei auf den ersten Blick unvereinbare Charakteristiken erfüllen: Zum einen soll sie möglichst steif sein, damit die Masse spielfrei auf dem Balken bewegt werden kann und so die notwendige Eigenfrequenz des Tilgers erreicht wird. Zum anderen muss sie in Verstellrichtung nachgiebig sein, damit die Masse auf dem Balken verschiebbar ist. Gelöst wurde dieser Widerspruch, indem die Masse durch vorgespannte Stützrollenlager auf dem Balken gelagert wird. Somit ist die für das Erreichen der zu bedämpfenden Frequenz erforderliche Steifigkeit senkrecht zum Balken gewährleistet. Gleichzeitig erlaubt die Wälzlagerung geringe Verstellkräfte trotz starker Vorspannung der Lagerung, wodurch die Verstellung mit einem kleinen Elektromotor bewerkstelligt werden kann. Eingestellt wird der Tilger im Anschluss mittels eines Computers, der die Drehzahl des Rotors sowie die Bewegungen am Ende des Federbalkens auswertet und daraufhin den Motor ansteuert.

Abbildung 2 zeigt den Prototyp des Tilgers. Die entlang des Balkens (blau) bewegliche Masse (gelb) befindet sich im Zentrum auf dem Balken. Mit dem Tilgerfuß (links, grün) wird der Tilger am Generator befestigt.

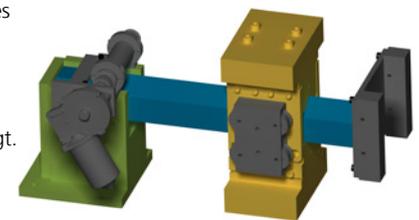
Gleichzeitig ist dort der Antrieb (grau) angebracht. Nicht dargestellt ist der Antrieb mittels Zahnriemen, mit dem die Masse elektrisch automatisch verstellt werden kann.

Mit diesem Aufbau erfolgte zunächst die Laborvermessung des Tilgers. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich dessen Eigenfrequenz und somit auch die Frequenz, die der Tilger am Generator bedämpfen kann, in einem weiten Bereich verändern lässt. Für den oben gezeigten Prototypen konnte die Eigenfrequenz in der einen Richtung um mehr als einen Faktor zwei verändert werden. Damit lässt sich ein weiterer Drehzahlbereich der Anlage abdecken. Für einen Komponentenversuch am Generatorprüfstand des Industriepartners wurden noch weitere Tilger gefertigt, da ein Tilger allein an einem so großen Bauteil, wie dem Generator einer Windenergieanlage, nicht ausreicht. Bei diesem Komponentenversuch konnte mittels 12 Tilgern gezeigt werden, dass sich das Schwingungsniveau bei der relevanten Zielfrequenz um bis zu 70 % senken lässt. Dazu war es erforderlich, die Tilger mittels eines Computers und Sensoren auf der Spitze des Tilgers individuell auf die Zielfrequenz einzustellen.

Gefördert durch:

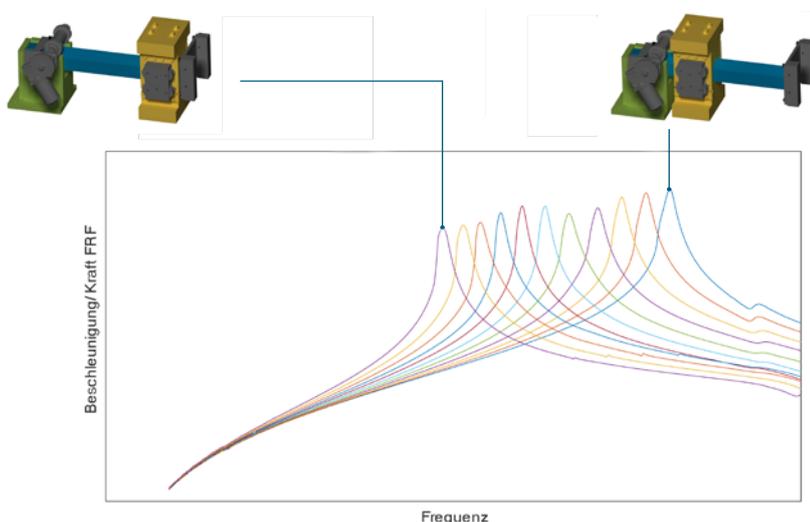


aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Computermodell des frequenzvariablen multi-axialen Tilgers

Computer model of the frequency-variable multi-axial absorber



Veränderung der Eigenfrequenz des Tilgers (höchster Punkt der jeweiligen Kurve) bei neun verschiedenen Positionen der Masse

Change in the eigenfrequency of the absorber (highest point of the respective curve) at nine different positions of the mass

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen in Damped-WEA wurde ein in zwei Richtungen wirkender frequenzvariabler Tilger entworfen, gebaut und sowohl im Labor als auch an einem echten Generator einer Windenergieanlage vermessen. Es konnte dabei gezeigt werden, dass sich das Schwingungslevel reduzieren lässt und ebenso, dass die Verstellung des Tilgers eine Anpassung auf verschiedene Rotordrehzahlen ermöglicht. Für die zukünftige Anwendung der Technologie ist nun im Anschluss die Anpassung des Tilgers auf eine Anwendung in der Serie notwendig, sodass die Tilger in größerer Stückzahl kostengünstig herstellbar sind.

Strukturintegrierte Superkondensatoren miniaturisieren elektrische Antriebe

Structurally integrated supercapacitors miniaturise electric drives

Summary

Miniaturisation revolutionises satellite construction and opens the door to orbit. Small satellites are becoming increasingly popular. The growth in recent years of about 20% per year is not without reason: Miniaturisation of electronics enables ultra-compact and low-cost designs with at least the same functionality. In the DLR project DEEP (Decentralized Energy supplied Electrical Propulsion), a consortium of six DLR institutes is exploiting the advantages of the small satellite structure to test a novel electrical propulsion system, a magnetic nozzle for plasma acceleration, in combination with an equally novel hybrid power supply system based on structurally integrated supercapacitors. It is the use of these supercapacitors that makes it possible to use electromagnetic thrusters on such small satellites.

Miniaturisierung revolutioniert den Satellitenbau und öffnet das Tor zum Orbit

Kleinsatelliten erfreuen sich zunehmender Beliebtheit. Der Zuwachs in den letzten Jahren von etwa 20 % pro Jahr ist nicht unbegründet: Miniaturisierungen der Elektronik ermöglichen ultrakompakte und kostengünstige Bauweisen bei mindestens gleicher Funktionalität. In dem DLR-Projekt DEEP (Decentralized Energy supplied Electrical Propulsion) nutzt ein Konsortium aus sechs DLR-Instituten die Vorzüge der Kleinsatellitenstruktur zur Erprobung eines neuartigen elektrischen Triebwerks, einer magnetischen Düse zur Plasma-Beschleunigung, in Kombination mit einem ebenfalls neuartigen hybriden Energieversorgungssystem auf der Basis strukturintegrierter Superkondensatoren. Erst die Verwendung dieser Superkondensatoren ermöglicht den Einsatz elektromagnetischer Triebwerke auf derart kleinen Satelliten.

Vorarbeiten und Beteiligungen am Projekt DEEP

In den beiden vorangegangenen [Projekten Peak Power Platform](#) und [HySES](#) (Hybrid Solar Energy Storage) wurden strukturintegrierte Superkondensatoren erfolgreich für die Anwendung entwickelt. Als Komponente eines speziellen Energie-Ein- und -Rückspeisesystems erfolgte auch die orbitale und elektrochemische Qualifikation problemlos. Es liegt daher nahe, die strukturintegrierten Superkondensatoren nun auch für elektrische Systeme mit hohem Energiebedarf auf Satelliten energieeffizient einzusetzen. Zusammen mit dem [Institut für optische Sensorsysteme](#) in Berlin, dem [Institut für Aerodynamik](#) und Strömungstechnik in Göttingen, dem [Institut für Thermische Thermodynamik](#) in Stuttgart und dem [Institut für Werkstoff-Forschung](#) in Köln entwickelt das [Institut für Systemleichtbau](#) nun einen in den Faserverbund integrierten Superkondensator zur Versorgung des neuen elektrischen Triebwerks. Das Konzept sieht zudem eine Batterie vor, die das Institut für Technische Thermodynamik entwickelt. Sie erlaubt eine konstante Versorgung der magnetischen Düse zur Beschleunigung des Plasmas. Die Energieversorgung für die kurzzeitigen Pulse des Mikrowellengenerators zur Plasmazündung übernehmen die Kondensatoren, deren Fertigung mittels Wickeltechnologie direkt in einem Prozess zusammen mit vorimprägnierten Glasfaserlagen erfolgt. Dazu werden die flachen Superkondensatoren um die zylindrische Antenne des elektrischen Antriebs gewickelt und ausgehärtet. Diese Bauweise nutzt die moderate Abwärme der Antenne für höhere Speicherleistungen. Die multifunktionale Verbundstruktur dient zudem auch als Aufhängung für die Antenne innerhalb des Satelliten.

Die Vorteile der hybriden Energieversorgung und deren Entwicklung

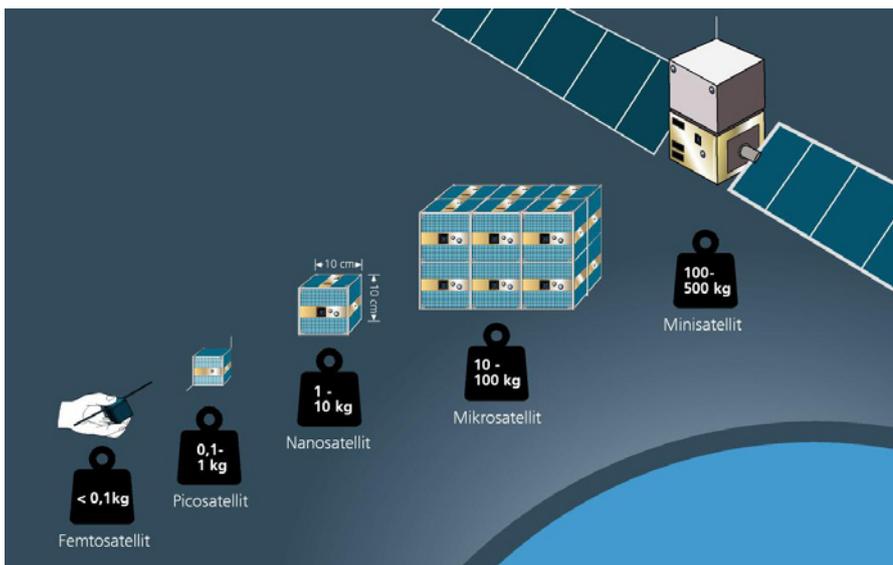
Bei der parallelen Nutzung von Superkondensator und Batterie ergeben sich herausragende Eigenschaften wie Zyklusstabilität, lange Lebenszeiten, geringe Betriebsbelastungen und eine hohe Energieeffizienz, denn die Batterie muss nicht mehr für die hohen Ströme dimensioniert sein. In der Folge sind eine längere Missionsdauer und elektrische Triebwerke von dieser Kompaktheit überhaupt möglich.

Autor:

Dr.-Ing. Sebastian Geier



Durch die Integration in die Haltestruktur des Triebwerks ist der Superkondensator eine elegante volumen- und gewichtssparende Energieversorgung. In der Vorgängermission Peak Power Platform betrug die Volumeneinsparung mehr als 80 %. Dieses Konzept ist angesichts der geringeren Platzverhältnisse in dem angestrebten Mikrosatelliten von 20 x 20 x 30 cm³ auch dringend nötig, da neben dem satelliteneigenen Bus ein weiteres Experiment mitfliegt. Zusätzlich kommt in dem Superkondensator ein polymerbasierter, fester Elektrolyt anstelle des bisher genutzten rein flüssigen Elektrolyten zum Einsatz. Die Vorteile sind eine bessere Verarbeitbarkeit, ein geringeres Risiko, den Faserverbund zu kontaminieren und die Möglichkeit einer höheren Lastübertragung. In ersten Versuchen erreichten die neuen Superkondensatoren höhere Kapazitäten und eine vergleichbare Zyklenstabilität.



Definition der Größe und Masse von Kleinsatelliten (< 500 kg)

Definition of the size and mass of small satellites (< 500 kg)

Fahrplan bis zum Satellitenstart

Das Projekt DEEP startete im Januar 2022. Im ersten Jahr befasste es sich hauptsächlich mit den Entwicklungsarbeiten zum Triebwerk, der Batterieauslegung und der Elektrolytentwicklung. Zudem erfolgte die Definition der elektrischen und mechanischen Schnittstellen im Satelliten. Aktuell werden alle Subkomponenten ausgelegt und deren Integration im eingeschränkten Satellitenraum simuliert. Erste Versuchsmuster werden dieses Jahr erprobt, so dass im Jahr 2024 das komplette System fertiggestellt werden soll. Schließlich wird das Experiment als Vorbereitung für seinen Mitflug 2025 umfangreich mechanisch, unter Strahlung und im Vakuum getestet. Der Mitflug auf einem Mikrosatelliten findet zur Erprobung der Energieversorgung und des Triebwerks 2026 statt.



Flacher Superkondensator für den Einsatz im Faserverbund

Flat supercapacitor for use in fibre composites

Es wird kalt – eine Versuchsanlage für neuartige Hubschrauber-Enteisungssysteme

It's getting cold – a test facility for novel helicopter de-icing systems

Summary

Embarking into an aircraft on a cold, snowy winter's day and arriving at your destination in adverse conditions is nothing out of the ordinary. Before take-off, the aircraft is de-iced and during the flight, anti-icing systems in the aircraft ensure that no ice can form. However, de-icing systems for aircraft cannot simply be transferred to helicopters, especially not to small and medium-weight models. For a safe flight, however, a helicopter also needs to be free of ice. Especially for rescue missions, icing is very challenging, as helicopters are often the only suitable means of transport. The investigation and development of innovative de-icing technologies for small and medium helicopters was funded by the BMWK in the InTEnt-H-project. For this purpose, an icing test facility was set up in the existing rotor tower at the Braunschweig site. Intensive cooperation between the DLR institutes of Flight Systems and Light-weight Systems has resulted a facility that is unique in Europe for testing anti-icing and de-icing systems under extreme atmospheric conditions.

Typische Vereisungsform an der Vorderkante eines Rotorblattes

Typical icing shape at the leading edge of a rotor blade

An einem kalten, verschneiten Wintertag in ein Flugzeug zu steigen und mit diesem bei widrigen Bedingungen ans Ziel zu kommen, ist nichts Außergewöhnliches. Vor dem Start wird das Flugzeug enteist und während des Fluges sorgen Anti-Icing-Systeme im Flugzeug dafür, dass sich kein Eis bilden kann. Enteisungssysteme für Flugzeuge können jedoch nicht einfach auf Hubschrauber übertragen werden, insbesondere nicht auf kleine und mittelschwere Modelle. Für einen sicheren Flug benötigt ein Hubschrauber jedoch ebenfalls Eisfreiheit. Insbesondere für Rettungsmissionen ist die Vereisung sehr herausfordernd, da Hubschrauber oft das einzige Transportmittel darstellen, welches für die Mission geeignet ist. Die Untersuchung und Entwicklung innovativer Enteisungstechnologien für kleine und mittelschwere Helikopter wurde im Projekt InTEnt-H durch das BMWK gefördert. Hierfür ist im bereits bestehenden Rotorturm am Standort Braunschweig eine Vereisungsversuchsanlage aufgebaut worden. Durch die intensive Zusammenarbeit der [DLR-Institute für Flugsystemtechnik](#) und [Systemleichtbau](#) konnte eine in Europa einzigartige Anlage für den Test von Anti- und De-Icing-Systemen unter extremen atmosphärischen Bedingungen und Zentrifugallasteinwirkung geschaffen werden.

Eine neue Versuchsanlage steht bereit

Der Rotorturm des DLR dient aktuell als Testanlage für verschiedene Rotorblattsyste-me. Ein Telemetriesystem sowie ein Schleifring übertragen eine Vielzahl an Messsignalen an das Datenerfassungssystem. Zusätzlich ist es möglich, dem Rotorsystem eine Hochvoltversorgung sowie eine Hydraulik- und Pneumatikversorgung bereitzustellen. Mit dem Einbau einer Vereisungsanlage ist der Versuchsstand nun um die Möglichkeit erweitert worden, verschiedene atmosphärische Zustände zu simulieren. Die Kühlkammer weist einen Durchmesser von 5,25 m bei einer Höhe von 6 m auf. Die im Außenbereich stehende CO₂-Kälteanlage sorgt mit einer Kühlleistung von 50 kW dafür, die Temperatur innerhalb der Kühlkammer auf bis zu -30 °C absenken zu können. Unterhalb der Decke ist ein ringförmiger Rahmen montiert, an welchem 15 Einspritzdüsen angebracht sind. Dieses Düsensystem ermöglicht das Einsprühen feiner Wassertröpfchen, welche sich abhängig von der Temperatur in der Kammer am drehenden Rotor als Eis absetzen.



Autoren:

Dipl.-Ing Steffen Kalow
Dominic Sahyoun
Rainer Bartels
Oliver Schneider

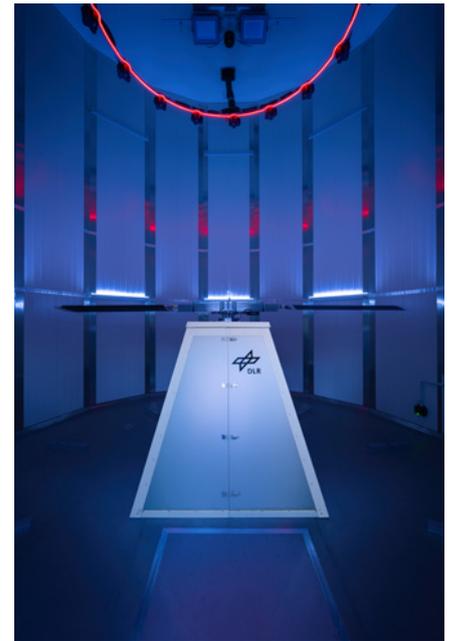


Das erste Eis – und wie es wieder verschwindet

Die erfolgreiche Inbetriebnahme der neuen Vereisungsanlage konnte bereits an einem 2-Blatt-Rotor demonstriert werden. Dieser besteht aus einem Rotorblatt mit einer permanent aktivierten Heizfolie als Anti-Icing-System sowie einem Rotorblatt mit einer temporär einschaltbaren, flüssigkeitsdurchströmten Vorderkante als De-Icing-System. Zunächst hatten erste Versuche die systematische Untersuchung von Eisansatz an der Blattvorderkante zum Ziel, um im Anschluss Erfahrungen mit Heizsystemen unter realen Vereisungsbedingungen zu sammeln. Im Versuch hält dafür das Anti-Icing-System durch Aufheizen der Folie ein Rotorblatt dauerhaft eisfrei, während das De-Icing-System des anderen Blattes ausgeschaltet bleibt. Durch den daraus entstehenden einseitigen Eisansatz am Blatt steigt die Unwucht des Rotor-systems, welche jederzeit überwacht wird. Mit dem Aktivieren des De-Icing-Systems, erhöht sich die Temperatur in der Blattvorderkante und das entstandene Eis löst sich innerhalb von Sekunden von der Oberfläche. Die Fliehkraft im rotierenden System ist dabei von entscheidendem Vorteil, denn bereits ein dünner Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche des Rotorblattes reicht aus, um das komplette Eis zu entfernen.

Wie geht es weiter?

In zukünftigen Projekten soll insbesondere die Charakterisierung der Vereisungsparameter innerhalb der Anlage im Vordergrund stehen. Zulassungsvorschriften der Luftfahrtbehörden geben Vorgaben über den atmosphärischen Zustand unter Vereisungsbedingungen, die es im Rotorturm nachzubilden gilt. Der so entstandene Prüfstand soll es ermöglichen, sowohl zukünftig entwickelte Enteisungsverfahren als auch Eiserkennungsverfahren an verschiedenen Technologiedemonstratoren unter Fliehkrafteinfluss im drehenden oder nicht drehenden System zu untersuchen und zu optimieren.



Rotorversuchsstand in der Kühlkammer mit dem an der Decke hängenden Spraying
Rotor test rig in the cooling chamber and spray bar hanging from the ceiling

Vereisung am Rotorblatt nach einem Einsprühvorgang
Icing on a rotor blade after spraying process





Nachhaltigkeit

Sustainability

Kreislaufführung in der additiven Fertigung _____ 66

Cycle management in additive manufacturing



Kreislaufführung in der additiven Fertigung

Cycle management in additive manufacturing

Summary

The increasing demands on the permissible environmental impact of technical products require the establishment and industrial development of a circular economy. In this context, novel manufacturing processes such as additive manufacturing are also taken into account. Additive material extrusion processes can make an important contribution to reducing the climate-damaging influences of future aerospace structures and offer a particularly high potential for a sustainable circular economy. At the Institute of System Lightweight Systems, standards for sustainability assessment and resource-efficient additive extrusion processes are being researched and established in the TIRIKA* project in cooperation with the aviation industry.

Die steigenden Anforderungen an die zulässigen Umwelteinflüsse durch technische Produkte erfordern die Etablierung und den industriellen Aufbau einer Kreislaufwirtschaft. Hierbei finden auch neuartige Fertigungsverfahren wie die additive Fertigung Berücksichtigung. Additive Materialextrusionsverfahren können einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung klimaschädlicher Einflüsse zukünftiger Luftfahrtstrukturen leisten und bieten ein besonders hohes Potenzial für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Am Institut für Systemleichtbau werden im Projekt TIRIKA* in Kooperation mit der Luftfahrtindustrie Standards für die Nachhaltigkeitsbewertung sowie ressourceneffiziente additive Extrusionsverfahren erforscht und etabliert.

Der Schlüssel zum Erfolg: eine zielgerichtete Bewertbarkeit

Die „Nachhaltigkeit“ einer Technologie zu bewerten stellt eine besondere Herausforderung dar. Häufig existieren keine einheitlichen Standards bezüglich Bilanzierungsrahmen und Kenngrößen. Ebenfalls fehlen oft die Voraussetzungen, um die Erhebung konsistenter Daten für eine Bewertung zu ermöglichen. Dennoch fließen Nachhaltigkeitskriterien immer häufiger als zentrale Anforderungen in zukünftige Produktentwicklungen ein. Basierend auf gemeinsamen Forschungsarbeiten mit Industriepartnern ist es gelungen, für die additive Materialextrusion eine vereinheitlichte, formalisierte Prozessbeschreibung in Anlehnung an VDI 3682 zu erstellen. Dies erlaubt die Erhebung konsistenter Datensätze sowie einen disziplinübergreifenden Austausch.

Mit Hilfe von Ökobilanz-Software und -Datenbanken entstehen Modelle, die die potenziellen Umwelteinflüsse vom Material über die Bauteilfertigung bis zum Bauteilrecycling und zur Materialaufbereitung erfassen. Mit TIRIKA-Projektpartnern werden zudem Bewertungskriterien abgestimmt, die den Einfluss der Prozesstechnologie auf die Umwelt konkret bewertbar machen und messbar gestalten. Auf diese Weise können Prozesse, Bauteile und Materialien zielgerichtet weiterentwickelt und hinsichtlich Ihrer Umwelteinflüsse optimiert werden. Dies sichert der additiven Materialextrusion eine Schlüsselrolle in der Transformation zu einer nachhaltigen Luftfahrt.

Wiederverwertung im Fokus: Materialeigenschaften erhalten

Insbesondere in der Luftfahrt finden häufig faserverstärkte Hochleistungsmaterialien Anwendung, die in der Herstellung signifikante Ressourcen binden. Die Erhaltung und Kreislaufführung dieser Materialien nach ihrer primären Verwendung reduziert sowohl den Ressourcenverbrauch als auch damit einhergehende nachteilige Umwelteinflüsse. Um eine Weiterverwertung in hochwertigen Prozessketten zu sichern, müssen die Materialeigenschaften sowie die Verarbeitbarkeit erhalten bleiben.

Für den Prozess der granulartbasierten additiven Extrusion ist es gelungen, Konzepte für ressourceneffiziente Materialkreisläufe faserverstärkter Hochleistungsmaterialien zu erarbeiten. Über mehrere Rezyklierzyklen finden umfassende Messkampagnen statt, die es erlauben, ein tiefgreifendes Material- sowie Prozessverständnis aufzubauen. Untersucht wird insbesondere, ab welchem Zeitpunkt eine Direktverarbeitung von Mahlgütern nicht mehr möglich ist. Weiterführend finden Materialauffrischungen in einem Compoundierprozess statt, mit dem Ziel, Rezyklate länger im Produktlebenszyklus zu halten.

Autoren:

Dipl.-Ing. Jens Bachmann
Maik Titze, M. Sc.
Fabian Kühnast, M. Sc.



Zusätzliche Potenziale nutzen: neue technologische Möglichkeiten

Heutige Materialextrusionsprozesse basierend auf Einschneckenextrudern verwenden hauptsächlich „frisches“ Granulat oder anteilig aufbereitetes Rezyklat. Am Institut für Systemleichtbau wird ein additives Extrusionsverfahren entwickelt, welches direkt Mahlgüter aus faserverstärkten Hochleistungsthermoplasten verarbeiten kann. Ebenfalls befinden sich neuartige Mechanismen zur Ansteuerung solcher Extrusionsverfahren in der industriellen Erprobung. Zukünftig erlauben diese die Erzielung einer höheren Bauteilqualität, indem eine präzise Vorhersage und Steuerung des Materialverhaltens während der Verarbeitung ermöglicht wird.



Compoundinganlage zur Granulatherstellung und Materialauffrischung
Compounding facility for granule production and material refreshment

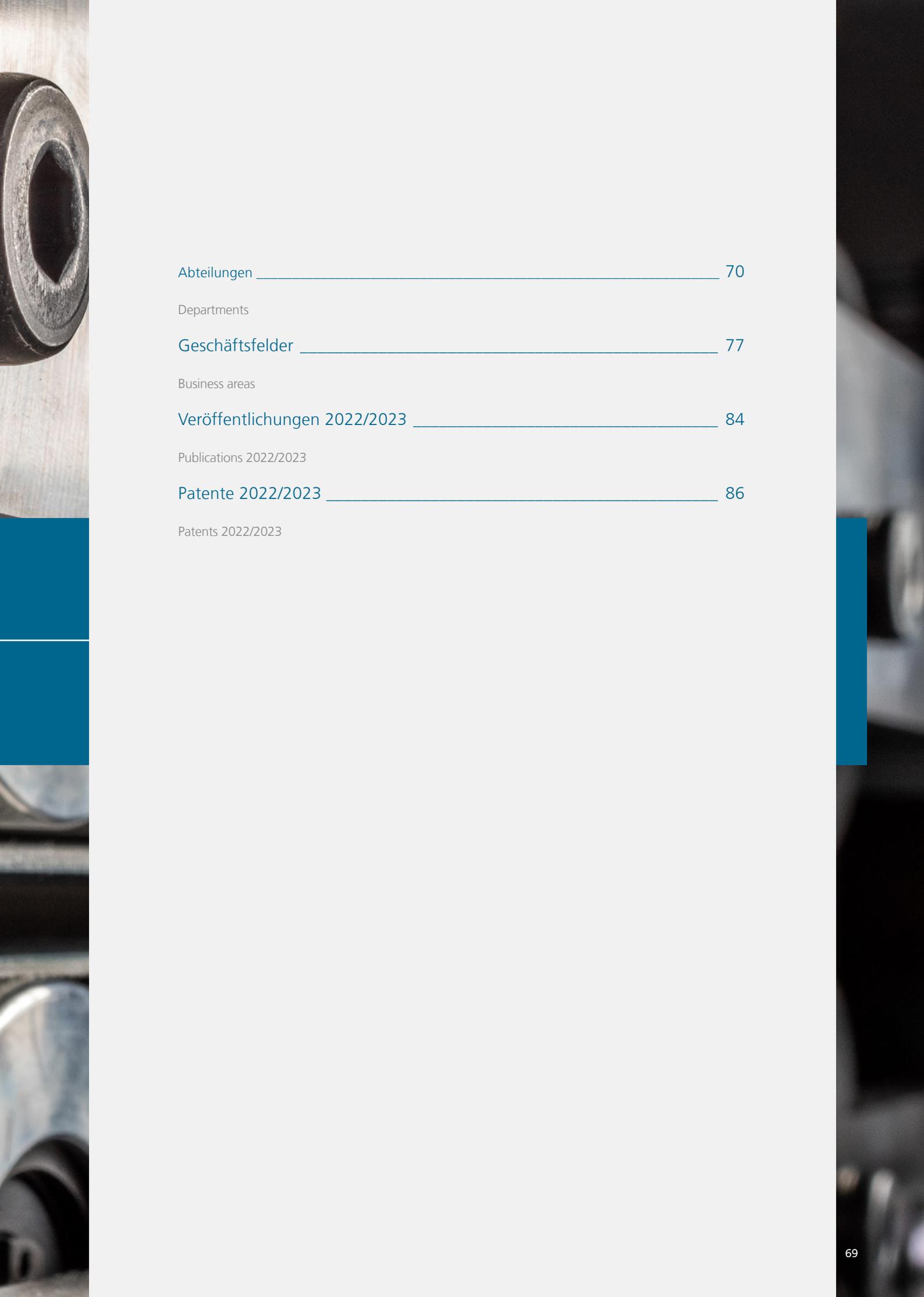


CNC-Roboteranlage für den 3D-Druck mit miniaturisiertem Granulatextruder
CNC robotic cell for 3D printing with miniaturised granule extruder

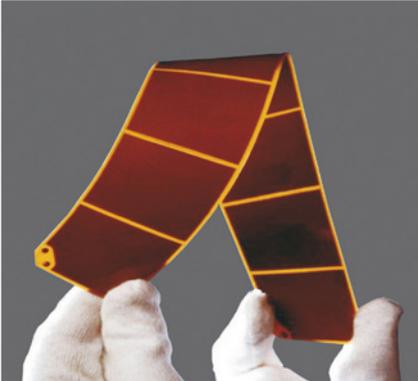


DAS INSTITUT IM DETAIL

The institute in detail



Abteilungen	70
Departments	
Geschäftsfelder	77
Business areas	
Veröffentlichungen 2022/2023	84
Publications 2022/2023	
Patente 2022/2023	86
Patents 2022/2023	



Summary

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



Abteilungsleiter:
Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach

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

Kompetenzen

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

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

Leistungsprofil

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





Vom Phänomen über die Modellbildung zur Simulation

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

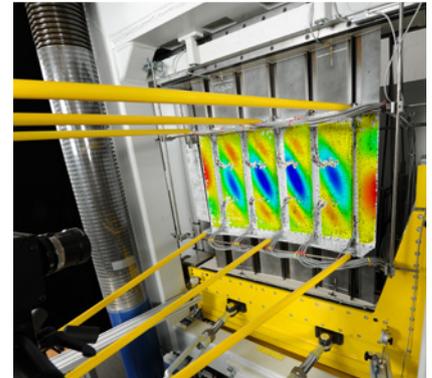
- Effiziente Entwurfsmethoden
- Innovative Prüf- und Messverfahren auf Bauteilebene
- Virtuelle Strukturen und digitaler Zwilling für den ganzen Lebenszyklus

Kompetenzen

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

Leistungsprofil

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



Summary

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



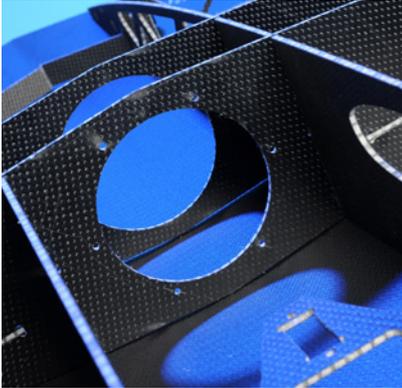
Abteilungsleiter:
Dr.-Ing. Tobias Wille





ABTEILUNG FUNKTIONSLICHTBAU

Department 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 electric conductivity, acoustic noise absorption, information transmission, etc.



Abteilungsleiter:
Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne

Von Anforderungen über Konzepte zu multifunktionalen Strukturen

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

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

Kompetenzen

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

Leistungsprofil

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





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

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

Kompetenzen

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

Überblick über die eingesetzten Großanlagen:

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

Leistungsprofil

Anwendungsgerechte Fertigungsverfahren und effiziente Erwärmungsmethoden

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

Digitalisierung / Industrie 4.0, Virtuelle Fertigung und Bewertungsmodelle

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



Summary

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



Abteilungsleitung:

Braunschweig:
Dr.-Ing.
Markus Kleineberg

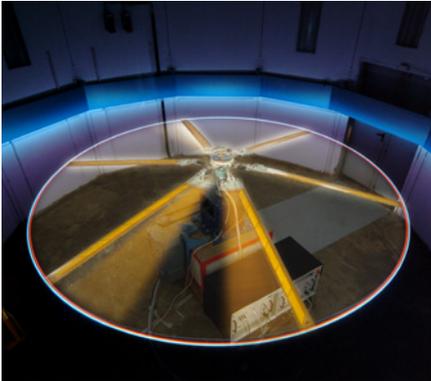


Stade:
Dr.-Ing.
Daniel Stefaniak



ABTEILUNG ADAPTRONIK

Department Adaptronics



Summary

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



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

Von der Struktur zum adaptiven System

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

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

Kompetenzen

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

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

Leistungsprofil

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





Nachhaltigkeit greifbar machen – von der Linear- zur Kreislaufwirtschaft

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

Kompetenzen

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

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

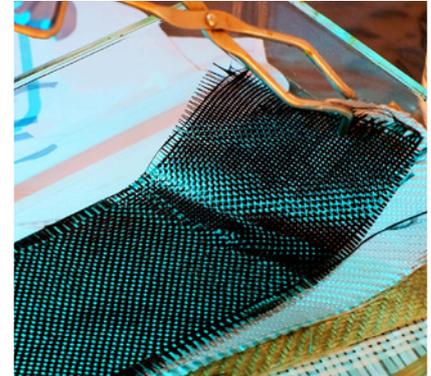
Leistungsprofil

Nachhaltigkeitsbewertung im Systemleichtbau

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

Technologieentwicklung für die werterhaltende Kreislaufführung

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



Summary

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



Abteilungsleiter:
Dr.-Ing. Steffen Opitz



ABTEILUNG LEICHTBAUINNOVATION

Department Innovation



Summary

Our institute maintains close contact with industry to facilitate successful innovation through research results. The closest possible interaction is necessary to determine the need for research and the commercial utilisation of the research results. The Lightweight Construction Innovations Department focuses on reinforcing this interface in order to enhance knowledge and technology transfer.

As the first point of contact for companies, our service desk responds to any queries on lightweight system construction and solutions to specific technical issues relating to fibre composites.

I



Abteilungsleiter:
Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider

Stärkung von Wissens- und Technologietransfer

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

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

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

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

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



Geschäftsfelder

Business areas



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

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

Large parts of the application-specific research activities of our institute can be assigned to the business fields Wings, Fuselage, Space, Transport, and Wind. A business unit manager forms the link between the researchers and the external partners in industry, science, standardisation, and politics. The close exchange with industry supports the setting of priorities in research activities, ensures the economic utilisation of research results and forms the basis for successful innovations.

Maintaining this interface is a core task for the Lightweight Innovation department in order to promote knowledge and technology transfer. This is also characterised by the responsibility of topic-related steering groups as well as innovation networks, such as the DLR Innovation Lab EmpowerAX.

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

Kontakt/Contact :

servicedesk-systemleichtbau@dlr.de





Geschäftsfeld Rumpf

Business area Fuselage

Summary

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

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

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

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

Geschäftsfeldleiter:
Dr.-Ing. Daniel Schmidt





Geschäftsfeld Flügel

Business area Wing

Die Vision des elektrischen Fliegens eröffnet völlig neue Möglichkeiten, den Flügel mit neuen und vielfältigen Funktionalitäten zu versehen. Neue Konzeptstudien entwerfen und bewerten elektrische Flugzeuge, die leichter und wesentlich emissionsärmer als ihre Vorgänger sind. Sogar das emissionsfreie Fliegen steht im Fokus. Es gibt Konfigurationen, bei denen die Antriebe verteilt sind, das Höhenleitwerk sich vorne und das Seitenleitwerk sich an den Flügelspitzen befindet.

Das Geschäftsfeld Flügel nimmt die Vision einer emissionsfreien Mobilität auf und unterstützt den intelligenten Systemleichtbau für morgen. Es betreibt zahlreiche Forschungsprojekte, die das Potenzial der neuen Flügelgestaltung untersuchen und die den optimalen Flügel für das Flugzeug der Zukunft entwickeln, so z. B. das DLR-grundfinanzierte Forschungsprojekt EXACT (Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies). Dieses Projekt ist eine multidisziplinäre Konzeptstudie zu neuartigen Luftverkehrssystemen unter Berücksichtigung von Lärm, Klimawirkung sowie Produkt- und Energielebenszyklen. Für unser Institut steht dabei der digitale und ganzheitliche Entwurfsprozess der Strukturkomponenten im Fokus. Das Ziel ist ein elektrisches Flugzeug mit 70 Sitzen und einer Reichweite von 2.000 km. DLR-weit forschen etwa 50 DLR-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in dem Projekt EXACT.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms Horizon 2020/Clean Sky 2 hat das Projekt HLFC-WIN (Hybrid Laminar Flow Control on the Wing) die Reduktion des Widerstands zum Ziel. Zukünftige Tragflächen sind voraussichtlich kleiner und smarter. In den Flügel integriert sind Absaugsysteme zur Laminarhaltung und andere aktive Systeme.

In einem Forschungsprojekt des Luftfahrtforschungsprogramms, dem Projekt ELWIS-Alive (Automatisierte Faserlegeprozesse und Infusionsverfahren für die Flügelschalenfertigung), steht die kosten- und ressourceneffiziente Fertigung von Flügelkomponenten im Fokus. Die Erkenntnisse dieses Projekts helfen, die Emissionen vor der Indienstellung der Flugzeuge zu reduzieren.

In dem zukunfts- und anwendungsorientierten Geschäftsfeld Flügel reicht die Themenbreite von Vorentwurfswerkzeugen für die schnelle Auslegung moderner Flügel bis hin zu experimentellen Untersuchungen an einzelnen Komponenten aktueller Flügelstrukturen.

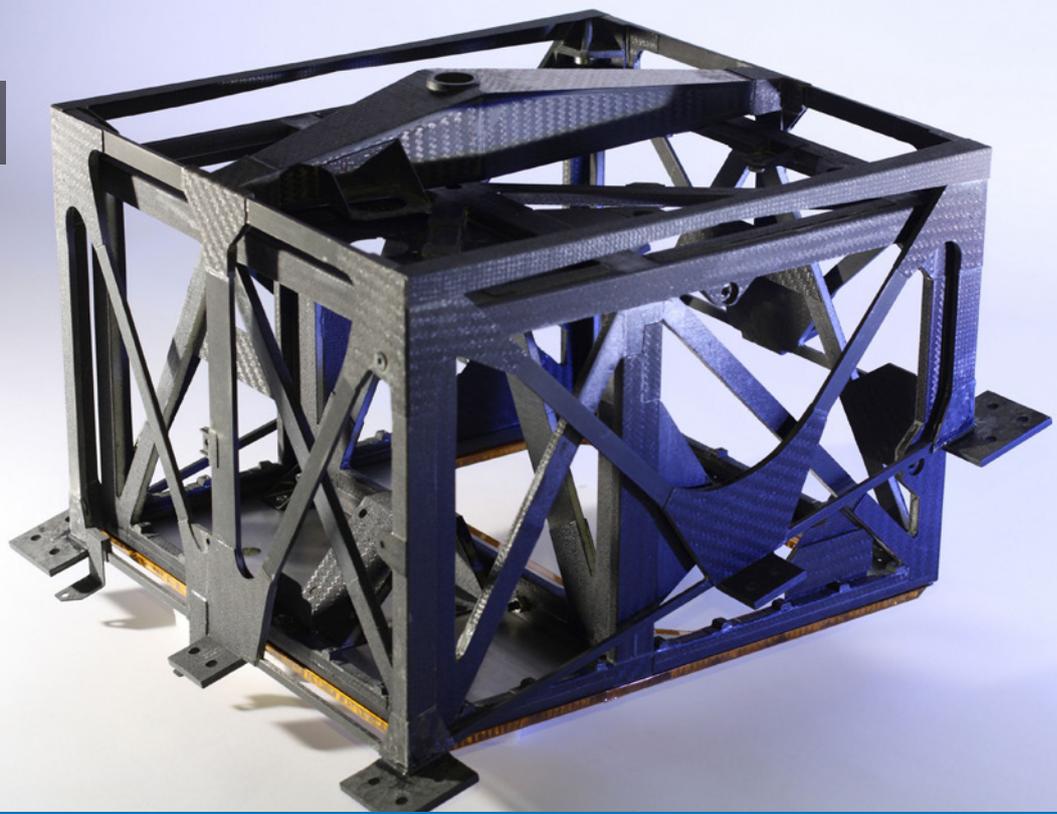
Summary

The vision of electric aviation is accompanied by a variety of novel possibilities to provide the wing with new and diverse functionalities. New concept studies are designing and evaluating electric aircraft that are lighter and significantly lower in emissions than their predecessors. Even emission-free flying is in the focus. There are configurations with distributed propulsion or the horizontal stabilisers located in the front and the vertical tail located at the wing tips.

The business area Wing picks up the vision of emission-free mobility and supports the development of intelligent lightweight systems of tomorrow. It conducts numerous research projects that investigate the potential of the new wing design and develop the optimal wing for the aircraft of the future. The range of topics extends from preliminary design tools for the rapid design of modern wings to experimental investigations on individual components of current wing structures.

Geschäftsfeldleiter:
Dipl.-Ing. Olaf Steffen





Geschäftsfeld Raumfahrt

Business area Space Technologies

Summary

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

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

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

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

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

Geschäftsfeldleiter:
Dipl.-Ing. Olaf Mierheim





Geschäftsfeld Windenergie

Business area Wind Energy



Hier bündelt das Institut seine Expertise im Bereich Windenergie. Dabei stehen in erster Linie die Rotorblätter moderner Windenergieanlagen im Fokus, aber auch Nischenprodukte wie Flugwindanlagen. Die Kompetenz beruht auf jahrzehntelanger Erfahrung mit Faserverbundstrukturen aus der Luft- und Raumfahrt. Eine ausgewogene Mischung aus Projekten im Bereich der Windenergie und anderen Industriebereichen führt zu maßgeschneiderten Innovationen und Lösungen für die Windenergie.

Die Forschungsthemen dieses Geschäftsfeldes reichen von lebensdaueroptimierten oder funktionalisierten Werkstoffen über optimierte Auslegung und neue Bauweisen bis zur qualitätsgeregelten Produktion. Außerdem stehen Systemen zur Lastminderung oder Strukturüberwachung im Fokus. Bei allen Forschungsthemen werden Aspekte des Recyclings in allen Produktlebensphasen berücksichtigt, um die Nachhaltigkeit der Windenergie weiter zu erhöhen. Mit Lebenszyklusanalysen finden sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Bewertungen der Technologien statt.

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



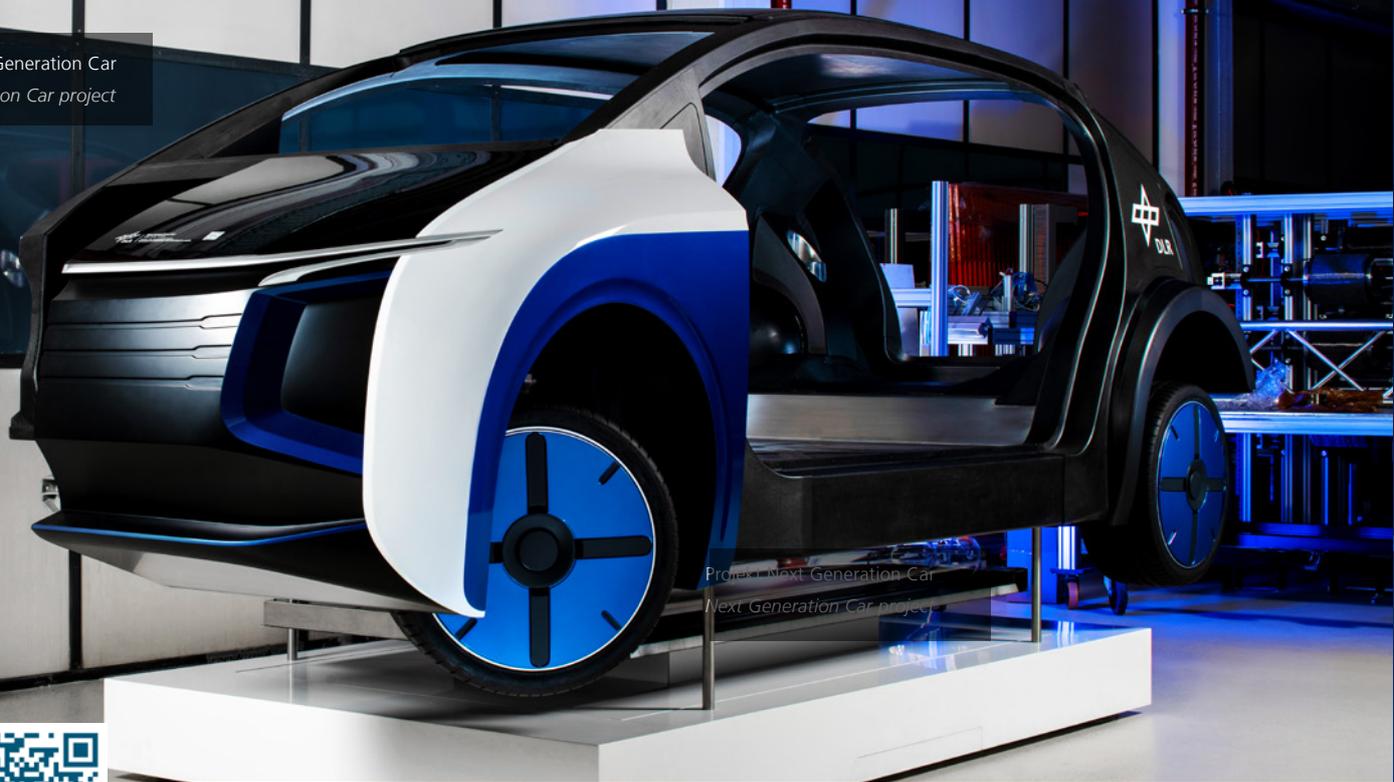
Geschäftsfeldleiter:
[Dr.-Ing. Lutz Beyland](#)

Summary

The business area Wind Energy concentrates the expertise of the institute in this field of renewable energies. The competence is based on a well-balanced mixture of projects in different sectors including wind energy but also aerospace and space. This research activity that covers a variety of industries leads to tailored solutions and innovations for the wind energy sector.

The project topics of the business area range from the investigation of fatigue-optimised and functional materials via design, sizing and quality-controlled production to research on systems for load alleviation or structural monitoring. Aspects like recycling and life cycle analysis complete the portfolio and enable to integrate the results in all phases of the life cycle of composite structures in the wind energy sector. Furthermore, this broad range of research activities allows for the economic and ecologic assessment of composites that are used in this field.

As a part of DLR, the business area has access to a unique infrastructure. The institute operates the Center for Lightweight Production Technology in Stade and can test structures and systems on the research platform for wind energy on real turbines. This enables industry-oriented research on a high technology readiness level for the zero-emission energy generation of tomorrow.



Geschäftsfeld Verkehr

Business area Transport

Summary

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

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

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

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

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

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

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



Geschäftsfeldleiter:
Marcel Andres, M. Sc.



DLR

VERÖFFENTLICHUNGEN 2022/2023

Publications 2022/2023

Ausgewählte Veröffentlichungen

Blech, Christopher (2022)

Wave-resolving modelling and numerical solution of aircraft fuselages. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. doi: 10.2370/9783844087017.

Barth, Tilmann und Wiedemann, Johannes und Roloff, Thomas und Hühne, Christian und Sinapius, Johannes Michael und Rauter, Natalie (2023)

Investigations on Guided Ultrasonic Wave Dispersion Behavior in Fibre Metal Laminates Using Finite Element Eigenvalue Analysis. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. Wiley. doi: 10.1002/pamm.202200149. ISSN 1617-7061.

Cerbe, Ferdinand und Mahlstedt, Dominik und Sinapius, Michael und Hühne, Christian und Böhl, Markus (2023)

Relationship between programming stress and residual strain in FDM 4D printing. *Progress in Additive Manufacturing.* Springer Nature. doi: 10.1007/s40964-023-00477-w. ISSN 2363-9512.

Franke, Florian und Burger, Uli und Hühne, Christian (2023)

A novel reduced order model for drone impacts with aircraft structures. *CEAS Aeronautical Journal.* Springer. doi: 10.1007/s13272-023-00646-1. ISSN 1869-5590.

Franke, Florian Steffen (2022)

Modelle und Methoden zur Bestimmung von Lasten bei Drohnenschlägen auf Luftfahrzeugstrukturen. Dissertation. doi: 10.24355/dbbs.084-202211041154-0.

Kappel, Erik (2023)

Buckling of simply-supported rectangular Double-Double laminates. *Composites Part C: Open Access.* Elsevier. doi: 10.1016/j.jcomc.2023.100364. ISSN 2666-6820.

Meyer, Patrick und Finder, John Martin und Hühne, Christian (2023)

Test Methods for the Mechanical Characterization of Flexure Hinges. *Experimental Mechanics.* Springer. doi: 10.1007/s11340-023-00982-7. ISSN 0014-4851.

Zerbst, David (2022)

Entwicklung einer virtuellen Prozesskette zur rechnergestützten Simulation der Umformung von textilkaschierten Holzoberflächen dekorativer Bauteile im Fahrzeug-Innenraum. Dissertation, Technische Universität Dresden.

Behr, Christian (2023)

Entwurfsmethodik für adaptive Strukturen mit multilateralen Konformitätskriterien. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Volltext nicht frei.

Hartwich, Tobias S. und Panek, Stefan und Wilckens, Dirk und Bock, Matthias und Krause, Dieter (2023)

The influence of the manufacturing process and test boundary conditions on the buckling load of thin-walled cylindrical CFRP shells. *Composite Structures.* Elsevier. doi: 10.1016/j.composit.2023.116674. ISSN 0263-8223.

Pernatii, Anna und Gabbert, Ulrich und Naumenko, Konstantin und Hesse, Jan-Timo und Willberg, Christian (2023)

A Penalty Method for Coupling of Finite-Element and Peridynamic Models. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 22 (1). Wiley. doi: 10.1002/pamm.202200151. ISSN 1617-7061.

Savli, Enes und Lefevre, Jean und Willberg, Christian und Tschöke, Kilian (2023)

Numerical Simulations in Ultrasonic Guided Waves Analysis for the Design of SHM Systems – Benchmark Study based on the Open Guided Waves Online Platform Dataset. *Aerospace*, 5 (10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/aerospace10050430. ISSN 2226-4310.

Willberg, Christian und Hesse, Jan-Timo und Garbade, Marc und Rädels, Martin und Heinecke, Falk und Schuster, Andreas und Pernatii, Anna (2023)

A user material interface for the Peridynamic Peridigm framework. *SoftwareX*, 21. Elsevier. doi: 10.1016/j.softx.2023.101322. ISSN 2352-7110.

Ausgesuchte Konferenzbeiträge

Bogenfeld, Raffael Marius und Freund, Sebastian (2022)

Damage tolerance criteria for composite laminates under tension and compression load. In: 11th European Solid Mechanics Conference (ESMC2022), 11. EuroMech. European Solid Mechanics Conference, 4.-8.7.2022, Galway, Irland.

Algermissen, Stephan und Hesse, Christian und Dewald, Ray Donald (2023)

Automatisierte Modellerstellung zur Berechnung von Innenlärm in Flugzeugen. In: 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA), Seiten 569-572. 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA), 06.-09. März 2023, Hamburg, Deutschland. Volltext nicht frei.

Dewald, Ray Donald und Klimmek, Thomas und Algermissen, Stephan und Hesse, Christian und Winter, Rene (2023)

Angepasste Modellierungsvorschriften für vibroakustische Untersuchungen von Flugzeugrümpfen. 49. Jahrestagung für Akustik (DAGA), 06.-09. März 2023, Hamburg.

Künnecke, Sven Christian und Schäfer, Michael und Goerttler, Andreas und Waldmann, Andreas und Vasista, Srinivas und Riemenschneider, Johannes (2023)

Concept of a morphing shock control bump spoiler with two actuators. 10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, 3.-5. Jul. 2023, Patras, Griechenland. doi: 10.7712/150123.9786.441212.

Misol, Malte und Algermissen, Stephan und Monner, Hans Peter und Dinçer, Ugur (2023) DESIGN OF AN ACTIVE NOISE CONTROL SYSTEM FOR A BUSINESS JET WITH TURBOFAN ENGINES. In: 29th International Congress on Sound and Vibration, Seiten 1-8. IIAV CZECH s.r.o.. 29th International Congress on Sound and Vibration, 09.-13. Jul. 2023, Prag, Tschechien. ISBN 978-80-11-03423-8. ISSN 2329-3675.

Bierig, Andreas und Nikodem, Florian und Niemann, Steffen (2023)

DLR-HAP-Status_SOaRS_2023. Stratospheric Operations & Research Symposium, 21.-22.03.2023, Grand Forks, North Dakota, US.

Hecken, Tobias und Balack, Philip und Petsch, Michael und Zerbst, David (2022)

Conceptual Loads Assessment of Aircraft with Fuselage Integrated Liquid Hydrogen Tank. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022, 27.-29. Okt. 2022, Dresden, Deutschland.

Krüger, Wolf R. und Handoyo, Vega und Pülm, Sven und Geyr von Schweppenburg, Heiko und Kruse, Martin und Lüdeke, Heinrich und Streit, Thomas und Heinrich, Lars und Tönjes, Lennart und Wallace, Christian und Fezans, Nicolas und Süelözgen, Özge und Kier, Thiemo (2023)

Lastabminderung und Strömungskontrolle für Performanceoptimierung eines Langstreckenflugzeugs im Projekt In-Fly-Tec. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023, 19.-21. Nov. 2023, Stuttgart, Deutschland.

Schollerer, Martin und Kreissig, Florian und Gesell, Thomas und Niemann, Steffen und Hühne, Christian (2023)

Steigerung der Robustheit von strukturellen Klebungen mittels Surface Toughening am Beispiel HAP. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2023, 19.-21. Sep. 2023, Stuttgart.

Künnecke, Sven Christian und Schäfer, Michael und Goerttler, Andreas und Waldmann, Andreas und Vasista, Srinivas und Riemenschneider, Johannes (2023)

Concept of a morphing shock control bump spoiler with two actuators. 10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials, 3.-5. Jul. 2023, Patras, Griechenland. doi: 10.7712/150123.9786.441212.

von Monkiewitsch, Monika und Kühn, Alexandra (2023)

Beschreibung von duroplastischen Zustandsänderungen während der Aushärtung mittels frequenzmodulierter DSC für die Prozessoptimierung. Messtechnische Möglichkeiten für eine effiziente Prozessgestaltung von Verbundwerkstoffen, 15.-16.03. Sep. 2023, Dresden, Deutschland.

Liebers, Nico und Trampe, Lars und Lüders, Caroline (2022)

Sensoren zur Herstellungs- und Strukturüberwachung von Wasserstoffdruckspeichern. Werkstoffsymposium 2022, 17.-18. Mai 2022, Wolfsburg.

Neumann, Fabian (2023)

Blow-Moulded Mandrels for the Production of One-Piece Hollow Profiles with Undercuts. Composites UK – "Tooling for Composites", 19.07.2023, Prestwick, Schottland, Großbritannien.

Bogenfeld, Raffael Marius (2023)

Calibration of a Digital Twin for Structural Testing. 11th International Conference on Composite Testing and Model Identification, 31.5.-2.6.2023, Girona, Spanien.

Pernatii, Anna und Gabbert, Ulrich und Willberg, Christian und Hesse, Jan-Timo (2023)

A FEM-PD coupling based on an Arlequin approach to impose boundary conditions in Peridynamics. 93rd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 30. May – 2. June 2023, Dresden, Germany.

Rädel, Martin und Lefevre, Jean und Schuster, Andreas (2023)

Development of a hierarchical data format for modeling, simulation and postprocessing in structural mechanics and its ecosystem. In: NAFEMS World Congress 2023. NAFEMS World Congress 2023, 15.-18. Mai 2023, Tampa, Florida, USA.

Wilken, Jascha und Callsen, Steffen und Daub, Dennis und Fischer, Alexander und Liebisch, Martin und Rauh, Carolin und Reimer, Thomas (2023)

DLR project TRANSIENT: Testing reusable cryogenic insulation and thermal protection systems. Aerospace Europe Conference 2023 – 10 EUCASS – 9 CEAS, 09.-13. Juli 2023, Lausanne, Schweiz. doi: 10.13009/EUCASS2023-611.

Willberg, Christian (2023)

Introduction to Peridigm – Integration of Peridynamic Methods into an HPC Capable Framework. Peridynamic Day, Magdeburg.

Winkelmann, Felix und Hein, Robert und Baid, Harsh und Cantarutti, Andrea (2023)

Process analysis of temperature and eigenstrains in stiffening ribs printed on a multi curved structure with a robot-based extrusion process. Sim-Am 2023, 25. – 28. Juli 2023, München, Deutschland.

PATENTE 2022/2023

Patents 2022/2023

Monner, Hans Peter; Perner, Marcus; Wiedemann, Martin:

Faserlegekopf
DE 102015106517, 06.07.2023

Steffen, Olaf; Ückert, Christian:

Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils
DE 102014114012, 29.12.2022

Gramüller, Benjamin; Hühne, Christian; Köke, Hardy:

Wellenenergiewandler und Verfahren zur Wandlung von Wellenenergie
DE 102016207662, 25.05.2023

Hanke, Michael; Kiep, Dennis; Lipke, Pascal; Nickel, Jörg; Zimmermann, Philip:

Luftfahrzeug in Tailsitter-Konfiguration und dessen Verwendung
DE 102016120671, 09.02.2023

Al-Lami, Ali:

Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen der in einem Fertigungsprozess eingebrachten Energie
DE 102016120555, 04.05.2023

Krombholz, Christian; Meister, Sebastian:

Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Fehlstellen
DE 502018011041.2, 16.11.2022

Buggisch, Manuel; Forßbohm, Tobias; Froese, Sarah:

Fahrzeug und Verfahren zur Herstellung einer Revisionsklappe
FR 3 070 632, 02.09.2022

Haschenburger, Anja; Heim, Clemens; Hesse, Jan Timo; Ucan, Hakan:

Verfahren und Vorrichtung zur Detektion einer Leckage
DE 102017120272, 19.07.2023

Petersen, Jan:

Elektrochemische Speichervorrichtung und als elektrochemische Speichervorrichtung ausgebildetes Faserverbundbauteil sowie Verfahren zu deren Herstellung
DE 102017118310, 27.07.2023

Petersen, Jan:

Elektrochemische Speichervorrichtung und als elektrochemische Speichervorrichtung ausgebildetes Faserverbundbauteil sowie Verfahren zu deren Herstellung
DE 3665730, 26.07.2023

Petersen, Jan:

Elektrochemische Speichervorrichtung und als elektrochemische Speichervorrichtung ausgebildetes Faserverbundbauteil sowie Verfahren zu deren Herstellung
DE 502018012799.4, 26.07.2023

Heilmann, Lennert:

Verfahren zum Applizieren eines Werkstoffes auf ein Faserverbundbauteil
DE 102018111306, 20.10.2022

Odermann, Falk; Rädcl, Martin; Wille, Tobias:

Prüfstand zum Untersuchen einer Probe
DE 102018128984, 29.09.2022

Algermissen, Stephan; Misol, Malte; Nickel, Jörg; Pototzky, Alexander; Wolff, Johannes:

Vorrichtung mit einem Sandwichbauteil
DE 102018113504, 07.06.2023

Kleineberg, Markus; Kolbe, Andreas; Quadt, Markus; Quappen, Gerrit; Quatmann, Michael; Röstermundt, Dirk; Stefaniak, Daniel; Stüve, Jan; Wendt, Christian:

Tank sowie Verfahren
DE 3760911, 11.01.2023

Heilmann, Lennert:

Verfahren zur Herstellung eines Prüfkörpers
DE 102018130330, 09.02.2023

Beerhorst, Matthias:

Transportflugzeug und Verfahren zum Transport einer Rakete
DE 102018132141, 03.11.2022

Hillebrandt, Martin; Straubel, Marco:

Bremseinrichtung sowie Verfahren und Vorrichtung zum Entfalten eines aufgerollten länglichen Hohlkörpers
US 11,731,791, 22.08.2023

Straubel, Marco:

Vorrichtung und Verfahren zum Entfalten eines aufgerollten länglichen Hohlkörpers
DE 102019109810, 19.01.2023

Haase, Thomas; Radestock, Martin:

Sandwichpaneel mit angepasstem Schalldämmmaß und Flugzeug mit einem solchen Sandwichpaneel
DE 102019111088, 20.04.2023

Delisle, Dominik; Kolbe, Andreas:

Fertigungsanlage und Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils
DE 502020003000.1, 19.04.2023

Kleineberg, Markus; Ropte, Sven:

Profilbauteil zur Verstärkung von Bauteilstrukturen, Bauteilstruktur sowie Herstellungsverfahren hierzu
DE 102019111836, 29.06.2023

Büchner, Katrin; Vasista, Srinivas:

Formverändernde Struktur
DE 102019134245, 15.12.2022

Abate, Giada; Haase, Thomas; Kalow, Steffen; Kokott, Alexander; Monner, Hans Peter; Montano, Zhuzhell; Rege, Matteo; Riemenschneider, Johannes; Rose, Michael; Vasista, Srinivas:

Vorrichtung und Verfahren zur Positions- und Formveränderung eines Körpers
DE 102019118324, 16.02.2023

Meister, Sebastian:

Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen der Sensorgüte eines bildgebenden Sensorsystems sowie Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Fehlstellen
DE 102021116868, 29.06.2023

Grohmann, Yannic; Titze, Maik:

Verfahren und Vorrichtung zum Aufspreizen eines Faserbündels
DE 102020124168, 27.07.2023

Neumann, Fabian:

Außenverkleidung für Flugobjekte sowie Verfahren zu dessen Herstellung
DE 102021117594, 17.05.2023

Meister, Sebastian:

Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen der Sensorgüte eines Laserlichtschnittsensors
DE 102021114200, 10.11.2022



Das DLR im Überblick

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

Global wandeln sich Klima, Mobilität und Technologie. Das DLR nutzt das Know-how seiner 54 Institute und Einrichtungen, um Lösungen für die daraus resultierenden Herausforderungen zu entwickeln. Unsere 10.000 Mitarbeitenden haben eine gemeinsame Mission: Wir erforschen Erde und Weltall. Wir entwickeln Technologien für eine nachhaltige Zukunft und tragen durch den Technologietransfer dazu bei, den Wissens- und Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken.

DLR at a glance

DLR is the Federal Republic of Germany's research centre for aeronautics and space. We conduct research and development activities in the fields of aeronautics, space, energy, transport, security and digitalisation. The German Space Agency at DLR plans and implements the national space programme on behalf of the federal government. Two DLR project management agencies oversee funding programmes and support knowledge transfer.

Climate, mobility and technology are changing globally. DLR uses the expertise of its 54 research institutes and facilities to develop solutions to these challenges. Our 10,000 employees share a mission – to explore Earth and space and develop technologies for a sustainable future. By transferring technology, DLR contributes to strengthening Germany's position as a prime location for research and industry.

Impressum | Imprint

Herausgeber | Publisher:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | German Aerospace Center (DLR)
Institut für Systemleichtbau | Institute of Lightweight Systems

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

Anschrift | Address: Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig
Telefon | Phone: + 49 531 295-2301

DLR.de/SY | leichtbau.dlr.de

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

Bilder | Images: DLR Fotomedien, Timm Bourry, Marcel Soppa, Marvin Diegeler,
David Senkic, Lea Adams, Amin Averdung

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

Titelbild | Cover image:

Flügelstruktur High Altitude Platform (HAP) | Wing structure High Altitude Platform (HAP)



Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

Projects supported by:

