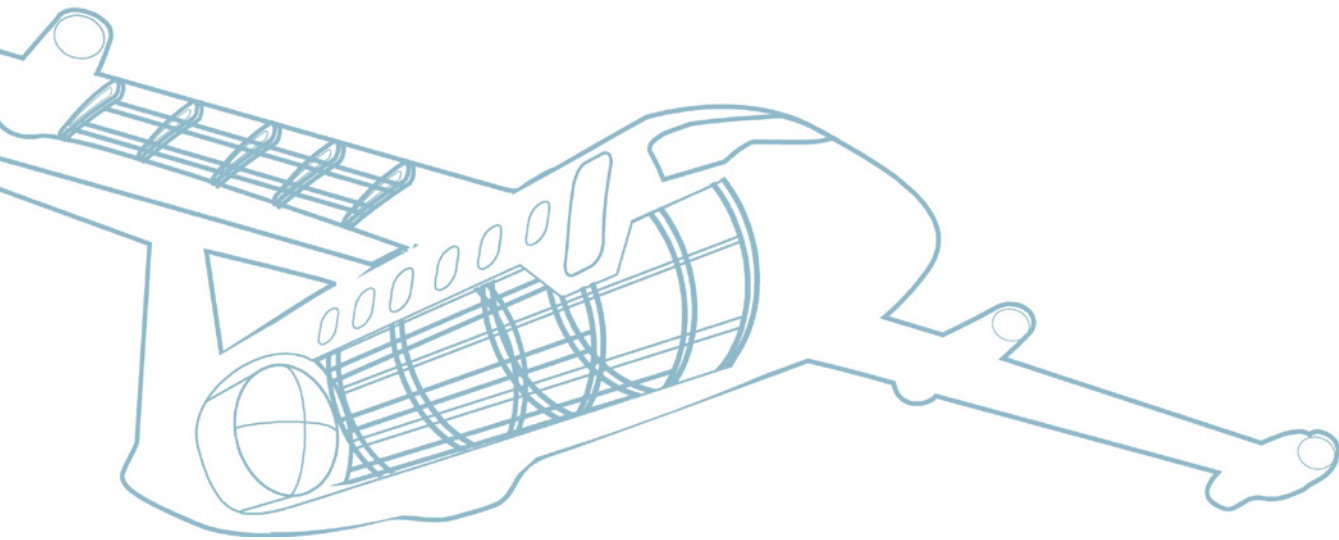


Innovationsbericht 2022

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Innovation Report 2022
Institute of Composite Structures and Adaptive Systems





Intelligent lightweight construction systems for an emission-free tomorrow

Dear readers,

The world is on the move – a fact which is often triggered by crises.

We are on the move, too – however, not emerging from a crisis but from our commitment to actively tackle new challenges in research. Hence, we publish our Innovation Report 2022 under a new institute name: DLR Institute of Lightweight Systems.

The Institute of Composite Structures and Adaptive Systems has systematically extended its research portfolio towards system lightweight construction over the last years. System lightweight construction is the further development of lightweight construction by integrating functions; the structure becomes a system. The examples in this report include the realisation of the “Suction Rib” functional demonstrator (p. 58) or the integration of an SHM system in a wind turbine rotor blade (p. 68). Similarly, system lightweight construction combines various functions in other applications, for instance space structures (p. 40) or hydrogen tanks (p. 16). The institute will bear the name “Lightweight Systems” from 2023 onwards. With this Innovation Report, we herald this change.

What contributions can system lightweight construction make for climate protection and the conservation of resources? There are many contributions and surprisingly different ones – which is also exemplified by this new Innovation Report 2022. Besides weight reduction, efficient use of resources is and always has been the goal of lightweight construction. Climate protection and resource efficiency go hand in hand in lightweight construction. Increasing cost efficiency in the manufacture of lightweight structures means improved resource usage as well.

We have always conducted application-oriented research and systematically increased the maturity level of our methods and technologies towards industrial testing, for instance by establishing the Alliance for Lightweight Production Technology in Stade and Augsburg. However, it is still a (too) long way from research into application. The urgency of developing innovative solutions for our economy and society requires a faster transfer.

From 2023 onwards, our institute will not only bear a new name, but also pool its research on the topic area of resource conservation in a new department named Sustainability Technologies and boost the transfer into application through a new department named Innovation in Lightweight Construction.

It is our goal to support our partners in industry and research in the transformation to a climate-friendly and resource-conserving future by developing innovative solutions in system lightweight construction. We are well-prepared to achieve this goal and are looking forward to future cooperation!

Intelligenter Systemleichtbau für ein emissionsfreies Morgen

Liebe Leserinnen und Leser,

die Welt befindet sich im Umbruch und oft sind Krisen die Auslöser.

Auch wir befinden uns in einem Umbruch, aber nicht aus einer Krise, sondern aus der Überzeugung heraus, dass wir in der Forschung neue Herausforderungen aktiv angehen. So finden Sie unseren Innovationsbericht 2022 unter einem neuen Institutsnamen: [DLR-Institut für Systemleichtbau](#).

Das Institut hat sein Forschungsportfolio in den letzten Jahren konsequent in Richtung Systemleichtbau erweitert. Systemleichtbau ist die Weiterentwicklung des Leichtbaus mit Funktionsintegration; die Struktur wird zum System.

Als Beispiele in diesem Bericht können die [Realisierung des Suction Rib-Funktionsdemonstrators \(S. 58\)](#) oder [die Integration eines SHM-Systems in ein Windkraftrotorblatt \(S. 66\)](#) genannt werden. In ähnlicher Weise vereint der Systemleichtbau auch in anderen Anwendungen, z. B. [in Raumfahrtstrukturen \(S. 40\)](#) oder [Wasserstofftanks \(S. 16\)](#) unterschiedliche Funktionen. Die Bezeichnung Systemleichtbau wird unser Institut ab 2023 tragen. Mit diesem Innovationsbericht läuten wir die Veränderung ein.

Welche Beiträge kann der Systemleichtbau für den Klimaschutz und die Ressourcenschonung leisten?

Sehr viele und überraschend unterschiedliche, wie wir Ihnen auch mit diesem neuen Innovationsbericht 2022 beispielhaft darstellen wollen. Ressourcen effizient zu nutzen, war und ist seit jeher neben der Gewichtseinsparung Ziel des Leichtbaus. Klimaschutz und Ressourceneffizienz gehören im Leichtbau zusammen. Auch die Steigerung der Kosteneffizienz in der Fertigung von Leichtbaustrukturen bedeutet verbesserten Ressourceneinsatz.

Schon immer haben wir anwendungsnahe Forschung betrieben und den Reifegrad unserer Methoden und Technologien systematisch in Richtung industrieller Erprobung erhöht, z. B. mit dem Aufbau der Allianz für Leichtbauproduktionstechnologien in Stade und Augsburg. Aber es ist immer noch ein (zu) langer Weg von der Forschung in die Anwendung. Die Dringlichkeit der Entwicklung neuer Lösungen für unsere Wirtschaft und Gesellschaft macht einen schnelleren Transfer notwendig. Neben dem neuen Namen wird unser Institut darum ab 2023 seine Forschungen zum Themenfeld Ressourcenschonung in einer neuen Abteilung "Nachhaltigkeitstechnologien" bündeln und die Übertragung in die Anwendung durch eine neue Abteilung "Leichtbauinnovationen" verstärken.

Unser Ziel ist es, unsere Partner in Industrie und Forschung mit neuen Lösungen des Systemleichtbaus bei der Transformation zu einer klimafreundlichen und ressourcenschonenden Zukunft zu unterstützen. Dafür haben wir uns aufgestellt und freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit!



A blue ink signature of Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann, written in a cursive style.

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann
Institutsdirektor



A blue ink signature of Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach, written in a cursive style.

Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach
Stellvertretender Institutsdirektor



A blue ink signature of Prof. Dr.-Ing. Jörg Melcher, written in a cursive style.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Melcher
Innovationsmanager



INHALT

Contents

Das Institut im Überblick _____	06
The institute in a nutshell	
Das Institut erhält einen neuen Namen _____	08
The institute receives a new name	
Material _____	10
Material	
Keimfreies Fliegen – Funktionalisierung von Oberflächen mit antimikrobiellen Eigenschaften _____	12
No chance for germs - composite surfaces with antimicrobial properties	
Rohrproben – ein pragmatischer Erkenntnisweg für den LH2-Tank _____	14
Tubular specimens – a pragmatic path of knowledge for manufacturing LH2-tanks	
Thermische Dehnungen im kryogenen Wasserstofftank – Messen und Verstehen _____	16
Thermal strains in the cryogenic hydrogen tank – measurement and understanding	
Kristallklar – Vorhersage der Kristallinität von thermoplastischen Bauteilen in Konsolidierungsprozessen _____	18
Crystal clear – crystallinity prediction of thermoplastic parts in consolidation processes	
Was man nicht im Kopf hat, hinterlässt unnötige Fußabdrücke _____	20
Using the head (Kopf) prevents unnecessary footprints	
Das digitale Labor _____	22
The digital lab	
Methoden _____	24
Methods	
Streuung von Schlagschäden beherrschen mit Probabilistik und KI _____	26
Mastering of impact damage scatter with probabilistics and AI	
Virtuelle Zertifizierung – Mit uns rechnen? Aber sicher! _____	28
Virtual certification – calculate with us? Certainly and safely!	
Verbessertes Design durch thermalen Systemleichtbau _____	30
Enhanced design through thermal lightweight systems	
CFK-Flüssigwasserstofftanks von Größe S bis XXL für ein CO ₂ -freies Fliegen _____	32
CFRP liquid hydrogen tanks from size S to XXL for CO ₂ -free flying	
Ist der Tank noch ganz dicht? _____	34
Is the tank still tight?	
Vom Impedanzmessrohr in den Transmissionsprüfstand – Maßgeschneiderte Akustiklösungen _____	36
From impedance tube to sound transmission loss facility – Tailored acoustic solutions	
Konstruktion _____	38
Construction	
Parabelflug mit aufrollbaren Raumfahrtstrukturen _____	40
Parabolic flight with deployable space structures	
Inserts neu gedacht. Mittels 3D-Druck zum perfekt integrierten Insert! _____	42
Inserts rethought. 3D printing for a perfectly integrated insert!	
Stärker am Wind – ein neues Verbindungskonzept für Windkraftrotorblätter _____	44
A stronger blade root connection for wind turbines	
Flugversuch am Boden – Realitätscheck für den Laminaflügel _____	46
Flight test on the ground – Reality check for the laminar wing	
Geschick eingefädelt – Landeklappenmontage mit einem mobilen Roboter _____	48
Outboard-flap module assembly with autonomous mobile units and lightweight jigs	



Fertigung	50
Production	
Wie bekomme ich mehr aus meinen Daten – Composite Companion	52
How do I get more out of my data – Composite Companion	
Analyseansatz der Nachhaltigkeitsbetrachtung in SAUBER 4.0	54
Ecological flying – analysis approach of the sustainability consideration in SAUBER 4.0	
Ökologische und Ökonomische Analyse der Suction Rib	56
Ecological and economic analysis of the Suction Rib	
Montage des Suction Rib-Funktionsdemonstrators	58
Assembly of the Suction Rib functional demonstrator	
Hochpräzise CNC-Roboter für die additive Fertigung von Faserverbundstrukturen	60
High-precision CNC robots for additive manufacturing of fibre-reinforced structures	
System	62
System	
Aus dem Labor in die Anwendung – Strukturüberwachung im Flugversuch	64
From the laboratory to application – structural monitoring in the flight test	
Aus dem Labor in die Anwendung – Strukturüberwachung für die Windenergie	66
From the lab to application – structural monitoring of wind turbine blades	
Ein Windkanalmodell zur Untersuchung von Morphing-Technologien und natürlicher Laminarität	68
A wind tunnel model to study morphing technologies and natural laminarity	
Gehen mit dem Wind: adaptive Turbofan-Einlässe	70
Bending into the wind: adaptive turbofan inlets	
Wenn sich das Blatt wendet – Formvariable Rotorblätter für Hubschrauber	72
When the blade turns – variable-shape rotor blades for helicopters	
Industrialisierung	74
Industrialisation	
Aus der Raumfahrt ans menschliche Bein – Anwendungsfälle für den faserverstärkten 3D-Druck	76
From space to the human leg – EmpowerAX identifies use cases for fibre-reinforced 3D printing	
Hart, aber fair – Energieintensiven Fertigungsprozessen auf der Spur	78
Tough but fair – on the trail of energy-intensive manufacturing processes	
Infusionsflügel – leicht, aber nicht einfach	80
Infusion wings – light but not simple	
Mit dem LASSO auf Wellenjagd – KI für die Mischungsanalyse	82
Hunting waves with the LASSO – AI for mixture analysis	
Eine virtuelle Zeitreise durch die vernetzte Produktion von morgen	84
A virtual time travel through the networked production of tomorrow	
Das Institut im Detail	86
The institute in detail	
Abteilungen	88
Departments	
Geschäftsfelder	94
Business areas	
Veröffentlichungen 2021/2022	102
Publications 2021/2022	
Patente 2021/2022	104
Patents 2021/2022	

DAS INSTITUT IM ÜBERBLICK



www.dlr.de/fa



www.dlr.de/zlp



Leichtbau.dlr.de

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

Das Institut bildet die Brücke zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung. Mit seinen Fachkompetenzen in Multifunktionswerkstoffen, Strukturmechanik, Funktionsleichtbau, Faserverbundtechnologie, Adaptronik und Verbundprozess-technologie 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 Faserverbundleichtbau und Adaptronik 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 thermomechanische Prüfstände, eine Beulanlage für dynamische Bauteilbelastungen sowie einen Mikrowellenautoklaven. Neben grundlegenden Arbeiten in der Zukunftsforschung fokussiert sich das Institut auf sechs Schwerpunkte in der Anwendungsforschung. Sie dienen der Durchführung von großen praxisorientierten Projekten mit abteilungsübergreifendem und interdisziplinärem Charakter.

Aufseiten der universitären Grundlagenforschung ist das Institut durch 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 die Technologietransferzentren in Hamburg und Bremen auch die Nähe zum industriellen Kunden gewährleistet.

Kontakt / Contact

DLR – Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

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

The institute bridges the gap between fundamental research and industrial application. The expertise of the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems in multifunctional materials, structural mechanics, composite design, composite technology, adaptronics, and composite process technology is orientated along the entire process chain of 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 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 Technology Transfer Centers in Hamburg and Bremen to maintain close ties with clients from industry within its application-based research.

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

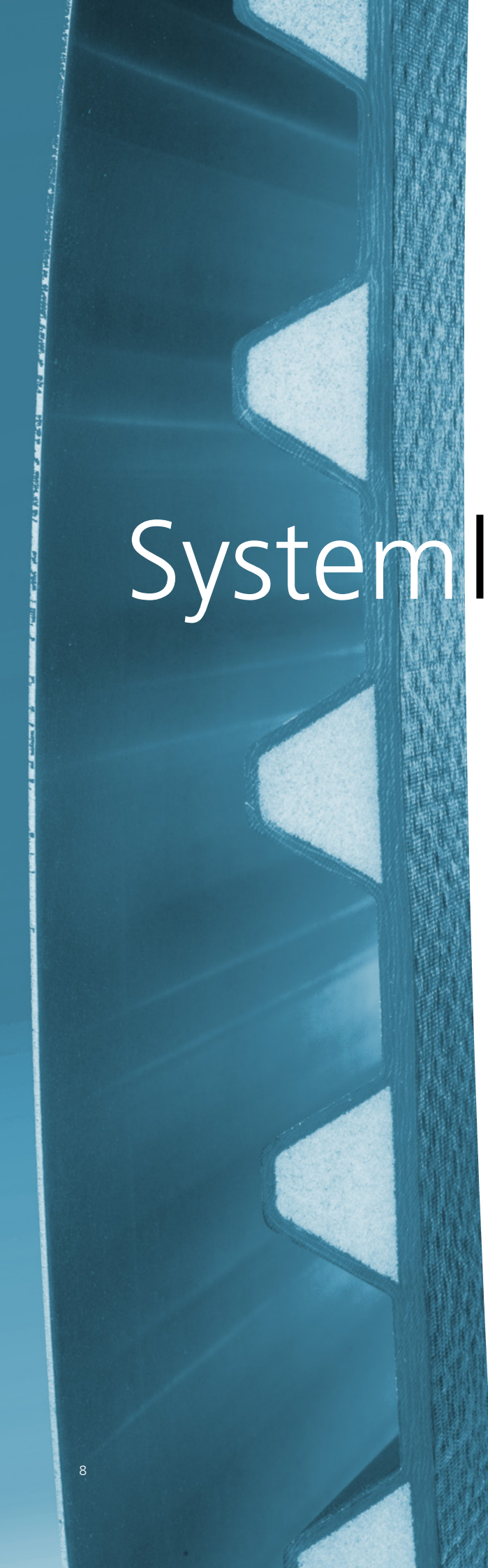
ECOMAT – Heimat des VPH
ECOMAT – home of the VPH

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®

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





Das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und
Adaptronik erhält einen neuen Namen:

DLR-Institut für

Systemleichtbau

Die Vision unseres Instituts aus dem Jahr 2019
hat die Richtung vorgegeben:

**Intelligenter
Systemleichtbau
für ein emissionsfreies
Morgen**

Ressourcen- und Energieeinsparungen sind unerlässlich und Leichtbau ist eine wesentliche Technologie zur Erreichung und Erhaltung der Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft. Wir sind überzeugte Leichtbauer und haben mit der Kombination von Faserverbundleichtbau und Adaptronik bereits vor zwei Jahrzehnten einen neuen eigenen Weg beschritten, um Leichtbau noch konsequenter zu realisieren. Durch die Kombination von Faserverbunden mit den Werkstoffen der Adaptronik können wir neben passiven auch aktive Funktionen in tragende Strukturen integrieren.

Wir sensieren und aktuierten Formveränderungen, dämpfen Schwingungen, reduzieren akustische Emissionen und integrieren Selbstdiagnosefähigkeiten. In vielen Forschungsprojekten haben wir die Potenziale der Kombination von Leichtbau und integrierten Funktionen untersucht und quantifiziert sowie die Machbarkeit mit Prototypen und wirtschaftlich effizienten Produktionstechnologien erprobt.

Funktionsintegration im Leichtbau wurde durch unser Institut mit seinem bisherigen Namen „Faserverbundleichtbau und Adaptronik“ zu einem etablierten Zweiklang in Wissenschaft und Wirtschaft.

Tragende Strukturen sind das Rückgrat von technischen Produkten: Autos, Flugzeuge, Rotorblättern von Windkraftanlagen, Launcher, Satelliten und viele andere mehr bauen auf ihnen auf. Solche Produkte benötigen vielfältige Funktionen, um ihren Betrieb zu gewährleisten. Viele dieser Funktionen werden mit zusätzlichen Massen realisiert: Stellmotoren, Kinematiken und anderen massebehafteten Elementen. „Alles trägt mit“ – unserem Motto entsprechend baut das Prinzip des Systemleichtbaus darauf auf, möglichst viele der massebehafteten Produktfunktionen in die tragende Struktur zu integrieren.

Dadurch wird der Leichtbau auf die nächste Stufe gehoben und Werkstoffressourcen lassen sich effizienter einsetzen. Die Integration von passiven und aktiven Zusatzfunktionen macht die Leichtbaustruktur selbst zu einem System und Leichtbau wird so zum Systemleichtbau.

Unsere langjährige Forschung auf dem Gebiet der Funktionsintegration in Leichtbaustrukturen aus Faserverbund zeigt viele Potenziale. Leichtbau.dlr.de bietet Ihnen eine große Vielzahl an Beispielen. Ebenso wird Ihnen das im Oktober 2022 erscheinende [Springer-Essential „Systemleichtbau in der Luftfahrt“](#) unsere Erkenntnisse aufbereiten.

Mit unserem Anspruch stellen wir uns großen Herausforderungen: Die Vision ist nicht widerspruchsfrei, weil Zusatzfunktionen den Komplexitätsgrad einer Struktur erhöhen können und auch nicht immer notwendigerweise eine Gewichtsreduktion bedeuten. Es ist also einiges zu tun in der Forschung, um zielgerichtet Produktinnovationen zu unterstützen. Themen wie Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft gewinnen immens an Bedeutung, um die Herausforderungen der Zukunft zu meistern. Gerade für den Faserverbund sind neue Wege zu beschreiten, die vom Werkstoff über die Konstruktion und Produktion bis zur Wiederverwertung neue Möglichkeiten ohne Abfälle und Emissionen aufzeigen. Dabei muss es uns gelingen, diese Innovationen auch in die Anwendung zu bringen. Wir haben uns daher entschlossen, diesen Herausforderungen mit der Gründung von zwei neuen Abteilungen zu begegnen, die sich der Nachhaltigkeit und dem Technologietransfer widmen. Auch möchten wir den Systemgedanken bereits im Institutsnamen verankern.

Aus dem DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) wird ab dem Jahr 2023 das DLR-Institut für Systemleichtbau (SY).

Wir freuen uns, Ihnen mit neuem Namen, erweitertem Profil und ergänztem Abteilungsportfolio auch künftig als starker Forschungspartner auf dem Weg in eine emissionsfreie, ressourcenschonende und wirtschaftliche Zukunft zur Verfügung zu stehen!

Autoren:

Institutsleiter

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann

Stellvertretende Institutsleiter

Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach





MATERIAL

Material

Detailaufnahme von Faser-Metall-Laminat (FML) für ein Windkraftrotorblatt
Close-up of fibre-metal laminate (FML) for a wind turbine rotor blade

Keimfreies Fliegen – Funktionalisierung von Oberflächen mit
antimikrobiellen Eigenschaften _____ 12

No chance for germs - composite surfaces with antimicrobial properties

Rohrproben – ein pragmatischer Erkenntnisweg für den LH2-Tank _____ 14

Tubular specimens – a pragmatic path of knowledge for manufacturing LH2-tanks

Thermische Dehnungen im kryogenen Wasserstofftank –
Messen und Verstehen _____ 16

Thermal strains in the cryogenic hydrogen tank – measurement and understanding

Kristallklar – Vorhersage der Kristallinität von
thermoplastischen Bauteilen in Konsolidierungsprozessen _____ 18

Crystal Clear – Crystallinity prediction of thermoplastic parts in consolidation processes

Was man nicht im Kopf hat, hinterlässt unnötige Fußabdrücke _____ 20

Those who can't use their head (Kopf) leaves unnecessary footprints.

Das digitale Labor _____ 22

The digital lab

Gibt Keimen keine Chance - Verbundoberflächen mit antimikrobiellen Eigenschaften

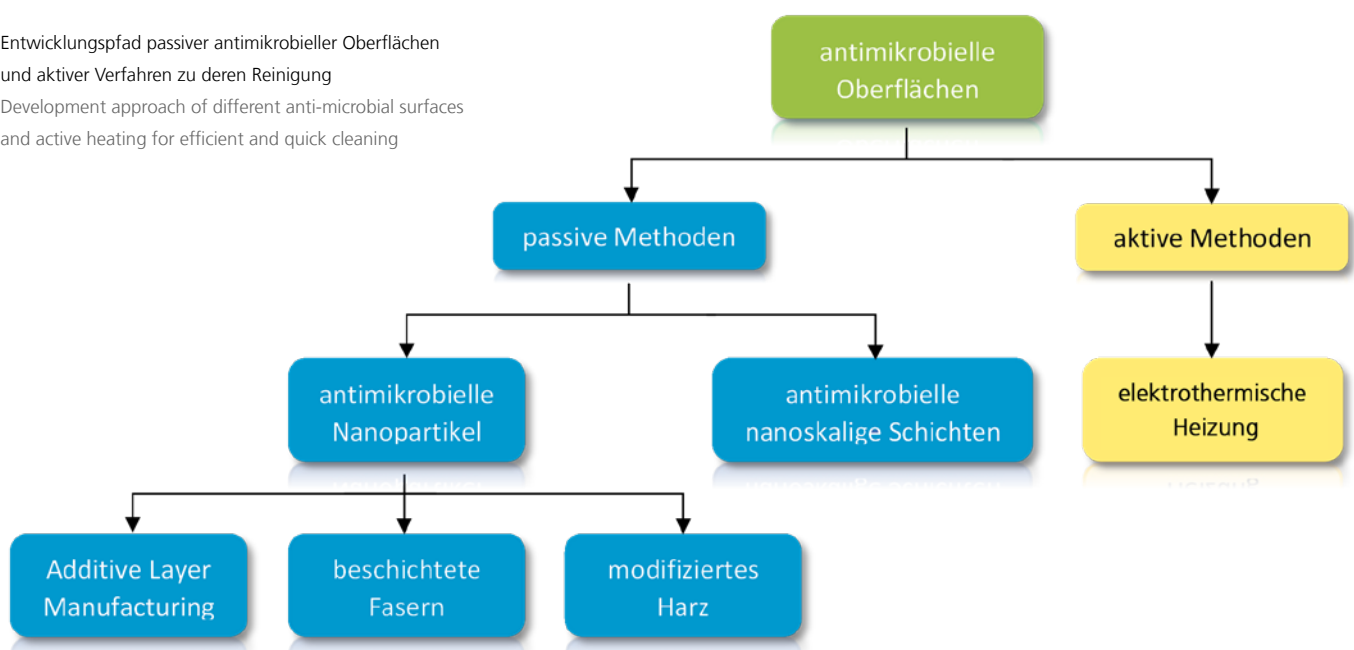
No chance for germs - composite surfaces with antimicrobial properties

Summary

To slow the spread of the Corona virus, German air traffic decreased by 75% in 2020. The projects Keimfreies Fliegen and FIONA focus on the development of germ-free cabin surfaces to avoid the spread of disease via contact transmission. Anti-microbial materials are investigated, which are either incorporated into epoxy resins as part of a laminate or embedded in thermoplastics used for 3D printing. Furthermore, nanoscopic surface coatings and integrated electrothermal heating systems are considered to improve efficiency. To test the anti-microbial effect, qualified biotests will be carried out. Finally, all the information is used to simulate germ contamination within the cabin during flight.

Der globale Flugverkehr ist ein stark expansiver Wirtschaftszweig, der sowohl der Luftfahrtindustrie als auch der Tourismusbranche hohe Umsätze ermöglicht. Die Angst vor der Verbreitung des Corona-Virus hat jedoch seit Beginn 2020 z. B. den innerdeutschen Flugverkehr zeitweise um bis zu 75% zurückgehen lassen. Konzepte zur Reduzierung der Keimlast sind zwingend erforderlich. Tatsächlich finden sich im Flugzeug auf den ausklappbaren Tischen und den Sanitäreinrichtungen die größten Keimbelastungen. Um dieses Risiko auch für zukünftige Pandemien zu reduzieren, beschäftigen sich das DLR-Projekt Keimfreies Fliegen und das Luftfahrtforschungsprogramm-Projekt FIONA (Funktions-Integrierte Optimierte Neuartige Additive Strukturen) mit antimikrobiellen Oberflächen. Neben der aerosolbasierten Übertragung mittels kleinster Tröpfchen in der Atemluft, die erfolgreich mit Masken und Luftfiltern reduziert werden kann, liegt der Fokus bei den hier vorgestellten Projekten auf biologischen Oberflächenfilmen und deren energieeffiziente, schneller und dauerhafter Neutralisierung. Dabei soll einerseits mit Faser-verbundoberflächen gearbeitet werden, in die antimikrobielle Materialien eingebettet wurden und die gleichzeitig auch thermisch aktiviert werden können. Andererseits wird die Herstellung antimikrobieller Oberflächen durch 3D-Druck untersucht. Die große Designfreiheit der additiven Fertigungstechnologie erlaubt eine schnelle Herstellung funktionsintegrierter Multimaterialbauteile, sodass für die Airlines eine wirtschaftliche Nachrüstung mit antimikrobiellen Kabinenbauteilen möglich ist.

Entwicklungspfad passiver antimikrobieller Oberflächen und aktiver Verfahren zu deren Reinigung
Development approach of different anti-microbial surfaces and active heating for efficient and quick cleaning



Autoren:
 Dr.-Ing. Sebastian Geier
 Dr. rer. nat. Thorsten Mahrholz
 Fabian Kühnast, M. Sc.



Eine Keimzelle der Zusammenarbeit

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik stellt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstofforschung kleine Musterproben der Materialsysteme her. Am Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin werden alle Proben gereinigt und anschließend auf Basis unterschiedlicher Flugprofile getestet und mikrobiologisch bewertet. In einer ersten Versuchsserie sind Temperatur und Luftfeuchtigkeit den Bedingungen bei einem Kurzstreckenflug nachempfunden, während die zweite Versuchsserie die Bedingungen eines Langstreckenfluges simuliert. Zur Bewertung der antimikrobiellen Wirksamkeit der Oberflächen wird u. a. die Änderung der Zellenanzahl (cell forming units, CFU) während einer bestimmten Zeit erfasst. Diese Ergebnisse werden in einer Kabinensimulation des Instituts für Systemarchitektur in der Luftfahrt genutzt. Hierbei soll in einer virtuellen Kabine die Keimentwicklung je nach Material, Sitzplatz, Umgebungsbedingungen und Flugdauer simuliert werden, um so Vorhersagen für einen späteren Flugbetrieb und einen sicheren Umgang mit der Keimbelastung ableiten zu können.

Hier keimt die Innovation

Für das Projekt wurden mehrere Strategien der Materialintegration untersucht. Dabei wird grundsätzlich zwischen den laminatbasierten Beschichtungen und den 3D-gedruckten Schichten unterschieden. Der Laminataufbau ermöglicht die Integration von Funktionsschichten wie Metallnetzen oder Heizfolien, die zusätzlich zu den passiven Eigenschaften der Materialien diese aktiv erwärmen und damit Keime abtöten können. Beide Strategien erlauben eine Zumischung von keimabtötenden, nanoskaligen Additiven, wie z. B. kupfer-, zink- oder silberhaltige Partikel, in die Polymermatrix. Da diese Partikel zum großen Teil von der Harzmatrix oder dem Thermoplast umgeben sind, ist ihre Wirksamkeit eingeschränkt. Aus diesem Grund wird als barrierefreies Konzept die Applikation von plasmagestützten nanoskaligen Schichten direkt auf der Kontaktfläche untersucht.

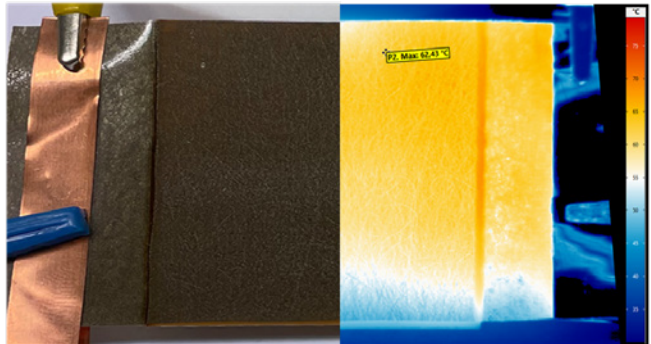
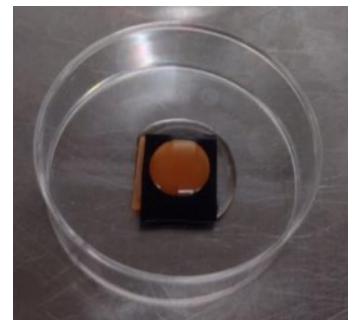


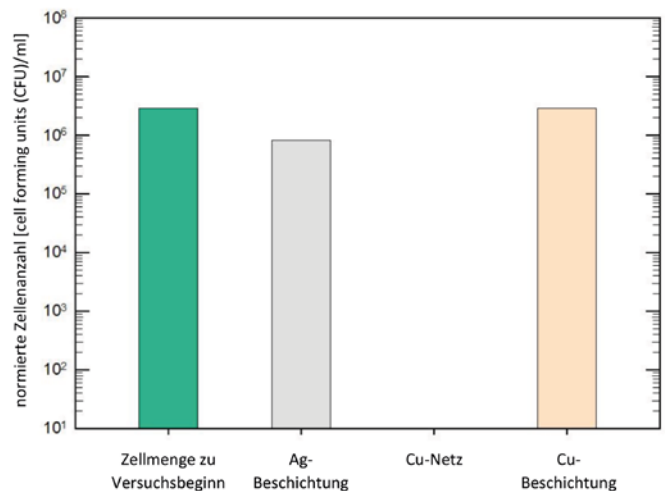
Bild der ungeheizten (links) und Infrarotaufnahme (rechts) der geheizten Probe mit integriertem metallisiertem Vlies

Cold specimen (left) with integrated electrothermal heating (right) using metallised fleece and the infrared image for proof



Probe im Kontakttest mit aufgebrachter biologischer Lösung

Specimen coated with a biological suspension for testing anti-microbial effects



$8,33 \cdot 10^6$ Zellen/ml

Erste Ergebnisse des Kontaktversuchs unterschiedlicher Oberflächen und Materialien
 Preliminary results of the contact test with different surfaces and materials

Rohrproben – ein pragmatischer Erkenntnisweg für den LH2-Tank

Tubular specimens – a pragmatic path of knowledge for manufacturing LH2 tanks

Summary

Hydrogen is a promising fuel option for the next generation of commercial aircraft. It is carried on board in liquid form, i.e. cryogenic, at temperatures close to absolute zero and is referred to as LH2. A large tank is necessary with very good thermal insulation. Tank and insulation increase structural mass. The weight of a liquid hydrogen tank is a matter of materials and optimization. A particular challenge is the tightness: Hydrogen molecules are very small and permeate any tank material more or less quickly. Understanding and being able to measure the permeation behaviour of fibre composite structures in contact with cryogenic hydrogen is therefore of great importance for its safe handling. Based on these findings, the materials, design and production of the tank can be adjusted. A pragmatic approach is followed with the production of tubular samples, which are cyclically cooled to cryogenic temperature and then examined under the microscope for leaks and crack formation. In this way, basic knowledge can be obtained quickly.

Wasserstoff ist eine vielversprechende Treibstoffoption für die kommende Generation von Verkehrsflugzeugen. An Bord wird er in flüssiger Form, d.h. kryogen, bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt mitgeführt und als LH2 bezeichnet. Ein großer Tank ist notwendig mit sehr guter thermischer Isolation. Tank und Isolation erhöhen die strukturelle Masse. Das Gewicht eines Flüssigwasserstofftanks ist eine Material- und eine Optimierungsfrage. Eine besondere Herausforderung ist die Dichtigkeit: Wasserstoffmoleküle sind sehr klein und durchdringen (Permeation) jedes Tankmaterial mehr oder weniger schnell. Das Permeationsverhalten von Faserverbundstrukturen im Kontakt mit kryogenem Wasserstoff zu verstehen und messen zu können, ist daher für dessen sichere Handhabung von großer Bedeutung. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Materialien, Design und Fertigung des Tanks angepasst. Ein pragmatischer Ansatz wird mit der Fertigung von Rohrproben verfolgt, die zyklisch auf kryogene Temperatur abgekühlt und anschließend auf Dichtigkeit und auf Rissbildungen unter dem Mikroskop untersucht werden. So sind schnell grundlegende Erkenntnisse zu erlangen.

Wasserstoff als Energieträger ist eine vielversprechende Option bei der Dekarbonisierung der Luftfahrt. Um Wasserstoff als Treibstoff einsetzen zu können, müssen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im Betrieb sichergestellt sein.

Wie dicht wird ein CFK-Tank?

Die Nutzung von Wasserstoff als Flugzeugtreibstoff wird aufgrund der geringen gravimetrischen Energiedichte in flüssiger Form angestrebt. Flüssiger Wasserstoff liegt bei Temperaturen unter -253 °C vor. Die tiefe Temperatur, gepaart mit der geringen Moleküldichte von H_2 stellt die Tankstruktur vor die zentrale Herausforderung: die Gasdichtigkeit. Bereits kleinste Risse im Material können zur Erhöhung der Permeationsrate führen und reduzieren die Dichtigkeit des Tanks. Da der Tank bei gleichem Energieinhalt volumetrisch größer als bisherige Kerosintanks und mit aufwendigerer Isolation auch keinesfalls leichter wird, das Gewicht aber wieder den Treibstoffverbrauch im Flug erhöht, ist eine möglichst leichte Tankstruktur zu wählen. Hier bietet der kohlenstofffaserverstärkte Verbund (CFK) Vorteile gegenüber metallischen Ausführungen. Die Aufgabe ist also: die Permeationsrate eines kryogenen CFK-Tanks in Auslegung und Betrieb zu minimieren.

Um die CFK-Strukturen bei einem Innendruck von 5–10 bar und einer Temperatur von -253 °C für die kleinsten Moleküle hinreichend gasdicht zu machen, müssen jegliche adhäsive Versagensmuster zwischen Faser und Matrix wie auch kohäsive Risse innerhalb der Matrix ausgeschlossen werden. Ein detailliertes Verständnis ist erforderlich, wie Mikrorisse unter kryogener Temperatur entstehen, sich ausbreiten und wie sie gestoppt oder ganz vermieden werden können. Dabei spielen neben den Werkstoffen auch die Fertigungsprozesse in der Tankherstellung eine entscheidende Rolle.

Autoren:

Philipp Sämann, M. Sc.
Dr.-Ing. Arne Hindersmann



Wie wird der kryogene CFK-Tank fertigbar?

Metallische, rotationssymmetrische Formwerkzeuge dehnen sich, abhängig von Legierung und Temperatur, bei der Aushärtung im Autoklav aus. Der Autoklavdruck wirkt in entgegengesetzter Richtung. Das Laminat härtet folglich in einer Lage aus, die sich von der Lage während der Faserablage unterscheidet. Die von außen wirkenden Kräfte könnten dabei im Laminat zu lokal veränderten Faservolumengehalten führen. Die höhere Steifigkeit der Faser im Vergleich zur Matrix könnte zu einem Verpressen des Harzes führen. Umgekehrt stellt sich die Frage, wie weit das ausgehärtete Laminat beim Abkühlen der formgebenden Kontur des schrumpfenden Formwerkzeugs folgt. Die Verhältnisse zwischen Wandstärke des Werkzeugs, Laminatdicke und Umfanglänge unterscheiden sich zwar bei den Rohrproben deutlich von denen beim späteren Tank. Effekte wie bspw. lokale Faservolumengehalte, auftretende Welligkeiten und Schrumpfung dürften – wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung – dennoch in allen Maßstäben auftreten. Für den Fertigungsprozess des Tanks gilt es folglich ein Verständnis aufzubauen, wie die Zähigkeit der Matrix, die Anordnung der Fasern und die Prozessparameter auszulegen sind. Für die gefertigte Tankstruktur in vollem Maßstab wird eine Zielvorgabe sein, Zwischenfaserbrüche infolge thermisch und mechanisch induzierter Spannungen der Struktur im Betrieb zu vermeiden. Ein tiefgreifendes Verständnis der Zusammenhänge wird dabei über die Fertigbarkeit entscheiden.

Dafür werden u. a. rohrförmige metallische Formwerkzeuge mit einem Außendurchmesser von $D = 350$ mm benutzt. Auf diesen lassen sich rohrförmige Proben zügig manuell oder mit AFP (Automated-Fiber-Placement)-Legeköpfen fertigen. Die rohrähnliche Probenform erlaubt es, ohne große Formwerkzeuge in entsprechend aufwendigen Fertigungsdurchläufen schon erste Geometrieeffekte durch die geschlossene Krümmung der Struktur abzubilden. Mit ausgetrennten und im kryogenen Temperaturbereich vorkonditionierten Ausschnitten werden anschließend Schlifffbilder erzeugt und in weiteren bildgebenden Untersuchungsverfahren geprüft. Bewertbar wird damit ein mögliches Risswachstum einer einfach gekrümmten, geschlossenen Struktur ohne Randeinflüsse. Die Grenze der Aussagefähigkeit der Rohrproben liegt zum einen in ihrer geometrisch bedingt einfachen Krümmung. Dombereiche des Tanks sind doppelt gekrümmt und lassen sich damit nicht abbilden. Zum anderen erlauben die Flächenverhältnisse aufgrund der Skalierung nur eine qualitative Aussage über die auftretenden Effekte. Die tatsächliche Ausprägung wird später aus den Bauteilen in vollem Maßstab ersichtlich. Dennoch haben die pragmatischen Vorversuche mit handlichen Rohrproben das Potenzial, die Iterationen bei der Entwicklung der Tankfertigung signifikant zu beschleunigen und Kosten zu vermeiden. Gleichzeitig steigt die Aussagekraft verglichen mit ebenen Couponproben im Entwicklungsprozess von ebenen Coupons über Rohrproben, Halbtank- und Bottletests bis hin zum Fullscale-Tank.



Nach der Entformung: eine geschlossene, einfach gekrümmte Rohrprobe

After demoulding: a closed, single-curved tubular sample



Ausgehärtet auf dem Formwerkzeug: ein manuell gefertigtes CFK-Laminat mit Innendurchmesser $d = 350$ mm

Cured on the mould: a manually manufactured CFRP-laminate with an inner diameter of $d = 350$ mm

Thermische Dehnungen im kryogenen Wasserstofftank – Messen und Verstehen

Thermal strains in the cryogenic hydrogen tank – measurement and understanding

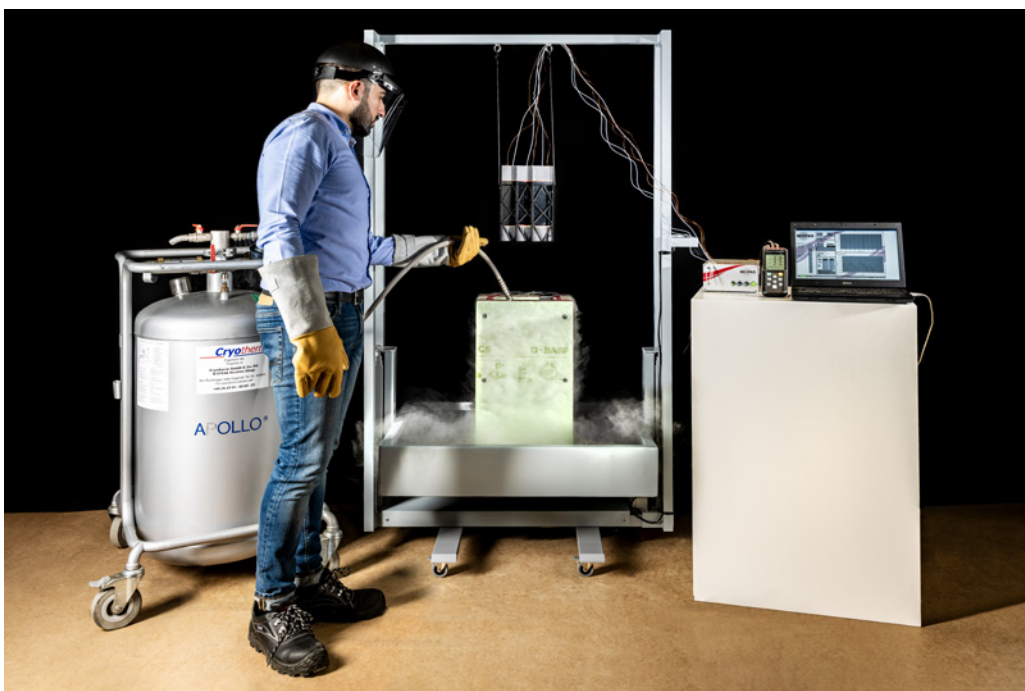
Summary

Hydrogen-powered aircraft hold great hopes for emission-free aviation, with storage of liquid hydrogen (LH2) being the most efficient solution for flight operations. Storage of LH2 at cryogenic temperatures results in large thermal and mechanical loads. Special measurement technology is required to investigate the tank behaviour. Therefore, the use of structurally integrated fibre optical sensors, so-called FBG sensors, is extended to cryogenic conditions. Successful integration and calibration of FBG sensors enables the evaluation of design, material and manufacturing parameters. In this way, the FBG technology can make a valuable contribution to the development of a cryogenic hydrogen tank.

Der Klimawandel stellt auch die Luftfahrt vor große Herausforderungen. Fliegen muss nachhaltiger werden. Hier eröffnet insbesondere Wasserstoff neue Perspektiven für eine emissionsfreie Luftfahrt. Für den Flugbetrieb stellt die Nutzung von flüssigem Wasserstoff (Liquid Hydrogen, LH2) eine hocheffiziente klimafreundliche Lösung dar. Die Speicherung erfolgt bei kryogenen Temperaturen, bei etwa -253 °C. Neben den mechanischen Lasten muss der LH2-Tank also auch große thermische Belastungen sicher ertragen. Diese speziellen Belastungen zu messen, erfordert eine besondere Messtechnik: strukturintegrierte faseroptische Sensoren, sog. Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensoren, unter kryogenen Bedingungen. So lassen sich wertvolle Erkenntnisse für die Auslegung und Strukturbewertung solcher Tanks gewinnen.

Sensorintegration während der Bauteilherstellung

Mit einem Durchmesser von 0,15 mm lassen sich FBG-Sensoren während der Herstellung in das noch unausgehärtete CFK-Laminat direkt einbetten. Der Messaufbau kann dadurch Informationen aus dem Inneren der Struktur liefern. Eine nachträgliche Applikation der Sensorik, wie z. B. im Fall von Dehnungsmessstreifen, entfällt. Voraussetzung für die Nutzung der Sensordaten ist eine intakte sowie störungsfreie Anbindung an die Struktur – auch in Gegenwart hoher thermischer Lasten. Die Integration erfolgt daher innerhalb einer CFK-Lage gleicher Faserausrichtung. So lässt sich eine möglichst homogene Grenzschicht erzeugen. Eine Polyimidbeschichtung um den Sensor schützt zusätzlich vor ungewollten Schädigungen. Die Qualität der Einbettung lässt sich anhand von Schliiffbildern der zuvor in flüssigem Stickstoff zyklisierten Proben mit integrierten FBG-Sensoren prüfen und nachweisen.



Versuchsaufbau für die thermische Zyklisierung von Prüfkörpern mit integrierten Sensoren in Flüssigstickstoff (-196 °C)

Test setup for thermal cycling of specimens with integrated sensors in liquid nitrogen (-196 °C)

Autoren:

Josef Koord, M. Sc.
Dipl.-Ing. Robert Prussak

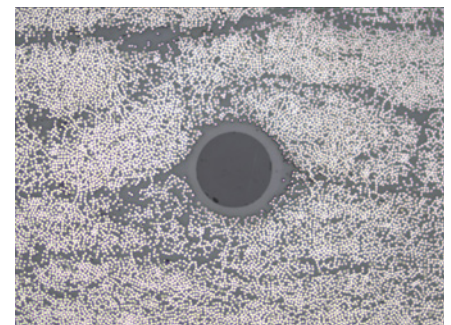


Dehnungen unter kryogenen Bedingungen

Die Prüfkörper sind mit jeweils einem FBG- und einem Temperatursensor ausgerüstet. Das Prinzip der Dehnungsmessung basiert auf der Auswertung von Lichtwellenspektren, welche ein sogenanntes „Bragg-Gitter“ im Kern der Sensorfaser reflektiert. Thermische und mechanische Beanspruchungen führen zur Veränderung des Gitters und somit zur Verschiebung der reflektierten Wellenlänge. Für die Ermittlung einer Dehnung unter kryogenen Bedingungen ist daher die Bestimmung der Sensorparameter zur Kompensation von Störeinflüssen zwingend erforderlich. Die Voraussetzung dafür bildet die Entwicklung einer Vorrichtung zur reproduzierbaren zyklischen Belastung in einem Flüssigstickstoffbad. Die darin untersuchten Proben mit bekanntem thermischem Verhalten und integrierten FBG-Sensoren ermöglichen die Ableitung von Kalibrierkurven der jeweiligen Sensoren für zukünftige Dehnungsmessungen in beliebigen Laminaten.

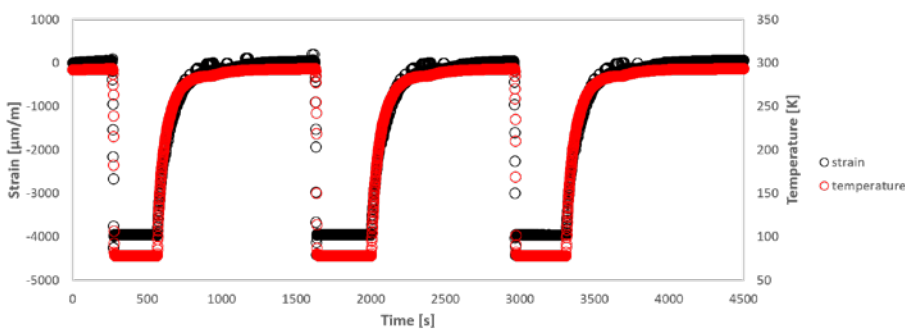
Anwendung der Messmethode

Die entwickelte Messmethode ermöglicht Aussagen zum Dehnungsverhalten über den gesamten Temperaturbereich während der Aushärtung (180 °C) bis hin zur Befüllung mit Flüssigwasserstoff (-253 °C). Erste Versuche an Couponproben während der Zyklisierung in Flüssigstickstoff zeigen bereits vielversprechende Ergebnisse. Bei der Vermessung von unidirektional verstärkten Proben stellen sich exakte, reproduzierbare und konstante Dehnungsniveaus entlang der verschiedenen Zyklen ein. In multiaxial verstärkten Laminaten hingegen können während der Zyklisierung Degradationseffekte (z. B. Zwischenfaserbrüche) auftreten, die wiederum die Dehnungsniveaus beeinflussen. Die Dehnungsmessung hat daher das Potenzial, eine mögliche Korrelation zwischen Degradationseffekten und thermischer Dehnung zu ermitteln. Die Integration von FBG-Sensoren ermöglicht somit nicht nur die Bewertung von Auslegungs-, Material- und Fertigungsparametern, sondern kann durch die Quantifizierung des Degradationszustands unter anderem Aussagen über die Dichtigkeit der Struktur treffen. Auf diese Weise kann die FBG-Technologie einen wertvollen Beitrag für die Entwicklung kryogener Wasserstofftanks liefern.



Mikroskop-Aufnahme eines kryogen zyklerten CFK-Laminats mit eingebettetem FBG-Sensor in Faserrichtung

Microscan of a cryogenically cycled CFRP laminate with integrated FBG sensor in fibre direction



Zeitliche Verläufe von Temperatur- und Dehnungsdaten in einer CFK-Probe während des Zyklierens in Flüssigstickstoff

Temperature and strains over time during cycling in liquid nitrogen in a CFRP specimen

Kristallklar – Vorhersage der Kristallinität von thermoplastischen Bauteilen in Konsolidierungsprozessen

Crystal clear – crystallinity prediction of thermoplastic parts in consolidation processes

Summary

"Once upon a time, in a galaxy far, far away..." could be the first sentence of this article. But that would probably be a bit too epic start for the topic of virtual process simulations addressed here. Using digital twins to predict system events, these have become indispensable in production research and development. For example, they play an important role in the development of manufacturing technologies for thermoplastic fibre composite structures in connection with the reduction of manufacturing energy. In this way, energy-intensive consolidation processes can be analysed and optimised in advance using thermoplastic material models. The digital twin of the research autoclave in CFK-NORD in Stade represents a platform for virtual process simulations. Not only can energy be saved here, but also a lot of time in the production process.

"Es war einmal vor langer, langer Zeit in einer weit entfernten Galaxis..." könnte der erste Satz dieses Artikels heißen. Aber das wäre wohl ein etwas zu epischer Start für das hier adressierte Thema virtueller Prozesssimulationen. Diese sind, unter Einsatz von digitalen Zwillingen zur Vorhersage von Systemereignissen, aus der Produktionsforschung und -entwicklung nicht mehr wegzudenken. Sie spielen z. B. bei der Entwicklung von Fertigungstechnologien für thermoplastische Faserverbundstrukturen in Verbindung mit der Reduktion der Fertigungsenergie eine wesentliche Rolle. So können energieintensive Konsolidierungsprozesse mit Hilfe von thermoplastischen Materialmodellen analysiert und vorab optimiert werden. Eine Plattform für virtuelle Prozesssimulationen stellt der digitale Zwilling des Forschungsautoklavs im CFK-NORD in Stade dar. Hier kann nicht nur Energie, sondern auch eine Menge Zeit im Fertigungsprozess gespart werden.

Thermoplastische Großbauteile unter Druck

Um eine gleichmäßige Qualität von thermoplastischen Strukturbauteilen zu erzielen, wird während der Konsolidierung Druck benötigt. Dieser kann durch einen Vakuumaufbau, eine Presse oder einen Autoklav aufgebracht werden. Insbesondere bei großen Bauteilen, wie den Rumpfschalen eines Flugzeugs, ist der Autoklav die effizienteste Anlagentechnologie für den Druckaufbau. Um die Autoklavaushärtung von duroplastischen Bauteilen zu optimieren und energieeffizienter zu gestalten, wurde 2009 im ZLP-Aufbauprojekt OnQA (Online-Qualitätssicherung im Autoklav) begonnen, den Virtuellen Autoklav zu entwickeln. Mit Hilfe von vorausgehenden, sehr detaillierten CFD-Simulationen und entwickelten Materialmodellen kann der Temperatur- und Aushärteverlauf für beliebige Zyklusvariationen und verschiedene Bauteilgeometrien schnell simuliert werden. Im Rahmen der Projekte AutoGlare (BMW/LuFo V-2, 2015 bis 2018) und ProTec NSR (DLR-Grundfinanzierung, 2016 bis 2019) konnte der Virtuelle Autoklav bereits erfolgreich eingesetzt und die Funktionalität bei duromeren Bauteilen demonstriert werden. Eine Übertragung der virtuellen Prozesssimulation auf die Konsolidierung thermoplastischer Bauteile war aufgrund des höheren benötigten Energiebedarfs für diesen Prozess naheliegend. Zugleich bedarf es hier einer Vorhersage der Kristallinität auf Grundlage der eingestellten Prozessparameter Temperatur und Druck. Da es sich bei der Vernetzung und Kristallisation um chemisch unterschiedliche Vorgänge handelt, sind unterschiedliche mathematische Modelle zur Beschreibung der Teilprozesse notwendig. Zur Beschreibung wurde im ersten Schritt ein Materialmodell aus der Literatur übernommen. Dieses hilft, die Kristallisationsvorgänge bei der Konsolidierung im Autoklav zu beschreiben.

Autor(inn)en:

Dipl.-Ing. Hakan Ucan
Anja Haschenburger, M. A.
Dr.-Ing. Robert Hein
Felix Winkelmann, M. Sc.



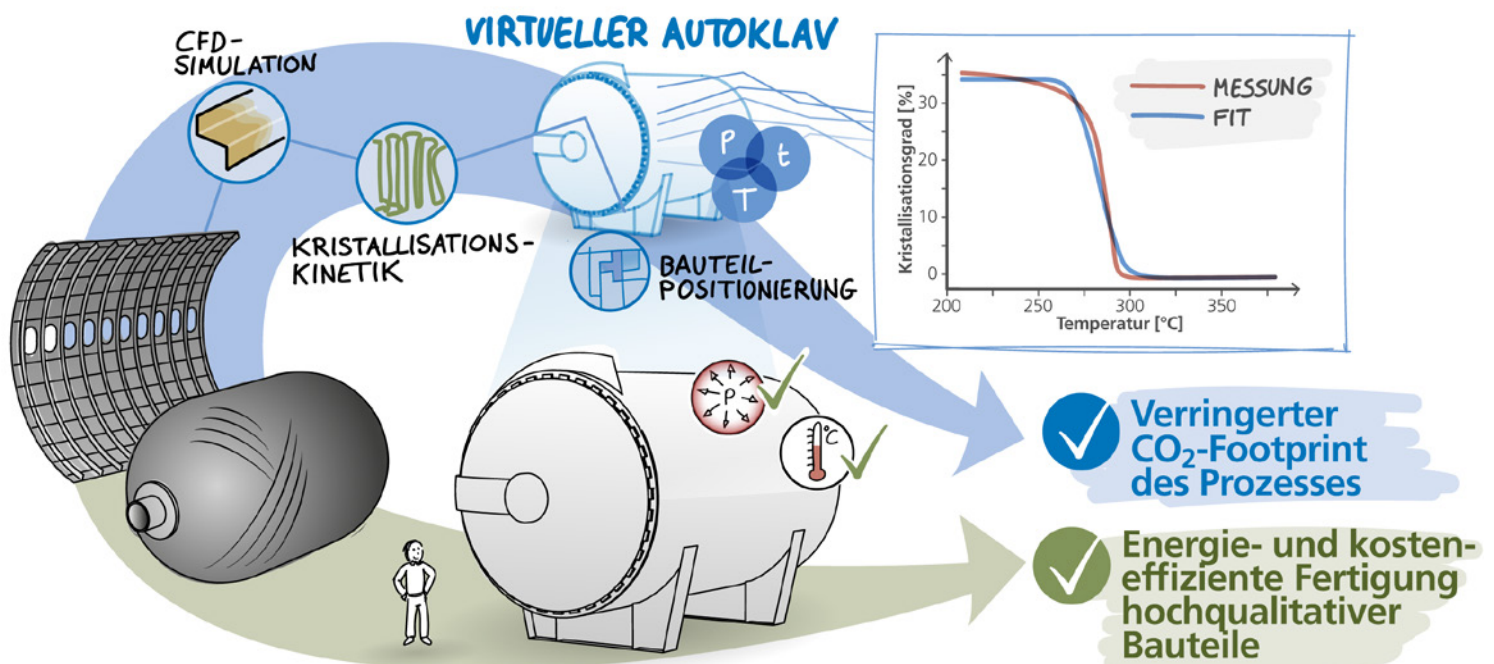
Thermoplaste im Wandel – Kristallisationskinetik

Die Kristallisation von thermoplastischen Polymeren hat einen großen Einfluss auf deren mechanische, optische und thermische Eigenschaften. Die Kenntnis des Kristallisationsgrades, also des Anteils kristalliner Bereiche, ist daher wichtig für die Vorhersage und Analyse der Eigenschaften teilkristalliner Thermoplaste. Das verwendete Kristallisationskinetik-Modell erlaubt es, den Kristallisationsgrad auf Basis der vorherrschenden Abkühlbedingungen zu berechnen. Neben Zeit und Temperatur sind dreizehn Modellparameter zur Berechnung erforderlich. Diese werden über die Anpassung von Kristallisationsmessungen (DSC-Kurven) bestimmt. So wird das Modell auf ein spezifisches Thermoplastpolymer angepasst. Um einen möglichst großen Temperaturbereich zu erfassen, werden Kristallisationsmessungen mit variierenden Abkühlraten gefittet. Das Modell berechnet für jeden Simulationsschritt die Änderung des Kristallisationsgrades und berücksichtigt dabei steigende und sinkende Temperaturen, wie sie in der Autoklavkonsolidierung von thermoplastischen Bauteilen vorzufinden sind. Somit konnte die Implementierung von thermoplastischen Materialmodellen erfolgreich im Virtuellen Autoklav umgesetzt werden. Weitere Forschungsarbeiten dienen der Optimierung der Modelle, um die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern und spezifische Bedingungen des Autoklavprozesses besser zu berücksichtigen.

Die Voroptimierung von thermoplastischen Konsolidierungsprozessen unter Einsatz des Virtuellen Autoklavs reduziert zeit- und energieintensive Vorversuche. Nach einer ersten Abschätzung können durch eine solche Voroptimierung der Halte- und Abkühlphase 10 – 15 % Prozesszeit – und somit Energie – eingespart werden.

Prozessablaufplan: vom Bauteil zur Vorhersage des temperaturabhängigen Kristallisationsgrades – Fit des Modells am Beispiel einer DSC-Kurve mit einer Abkühlrate von 20 K/min

Process flow chart: from the component to predict the temperature-dependent degree of crystallization – Fit of the model using the example of a DSC curve with a cooling rate of 20 K/min



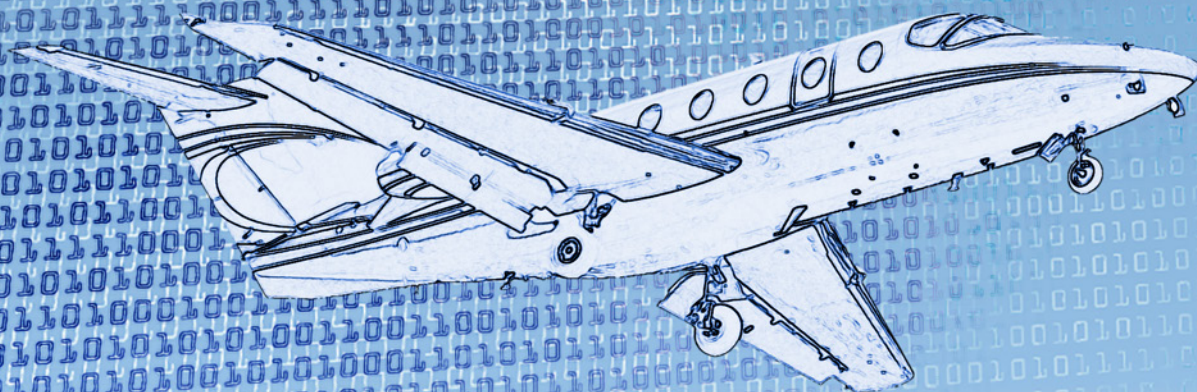
Was man nicht im Kopf hat, hinterlässt unnötige Fußabdrücke

Using the head (KoPF) prevents large foot prints

Summary

The DLR brought together the competencies of several of its institutes as well as other partners in the "Innovation Center for Small Aircraft Technologies (INK)" in Aachen. One of six initial projects is "Kennwertdatenbank und optimierte Produktionstechnik für Kleinflugzeuge (KoPf)", which initiates the transition from post-production quality assurance of a static production environment to a data-based quality optimisation in a dynamic production environment. The approach offers the possibility to efficiently use the certification margins created by EASA's "Amendment 5" without compromising the aircraft safety. Furthermore, it enables the use of plant-based composites for CS-23 aircraft.

Im Innovationszentrum für Kleinflugzeug-Technologien (INK) werden durch die DLR-Einrichtung Technologien für Kleinflugzeuge die Kompetenzen mehrerer DLR-Institute in der Städteregion Aachen räumlich zusammengeführt. 2021 starteten die ersten sechs Projekte unter Beteiligung von insgesamt 14 DLR-Instituten und -Einrichtungen sowie einigen externen Partnern, mit dem Ziel, den Luftverkehr der Zukunft zu erforschen, klimaverträgliche Technologien zu entwickeln und das emissions- und lärmreduzierte Fliegen zu ermöglichen. Eines dieser Projekte ist KoPf: „Kennwertdatenbank und optimierte Produktionstechnik für Kleinflugzeuge“. Darin wird der Übergang von der nachgeschalteten Qualitätssicherung einer statischen Produktionsumgebung zu einer „Ist-Daten“-basierten Qualitätsoptimierung in einem dynamischen Produktionsumfeld eingeleitet.



Autoren:

Dominic Bertling, M. Eng.
Dr.-Ing. Nico Liebers



Leichter durch mehr Durchblick

Die Digitalisierung von Herstellungsprozessen bietet Möglichkeiten, die durch das „Amendment 5“ der EASA erweiterten Zulassungsregeln effizient zu nutzen, ohne Kompromisse hinsichtlich der Sicherheit von Luftfahrzeugen einzugehen: Durch die lückenlose Überwachung und Dokumentation von Fertigungsprozessen werden Unsicherheiten in der Fertigung und daraus resultierende Abminderungsfaktoren auf Kennwerte abgebaut, der Ausschuss reduziert und das Leichtbaupotenzial moderner Bauweisen besser ausgenutzt. Die Digitalisierung hat damit einen direkten Einfluss auf die Ressourcenschonung in der Produktion und die Verbesserung der Klimabilanz in der operationellen Lebensphase von Fluggeräten.

Die Fertigung von kostengünstigen, hochpräzisen und leistungsfähigen Strukturbauteilen erfordert allerdings eine Infrastruktur der nächsten Generation mit automatischen Qualitätssicherungsmethoden und Möglichkeiten der adaptiven Prozessanpassung. Der Wandel von festgelegten Abminderungsfaktoren hin zur fertigungsdatenbasierten Auslegung kann auch für Bauteile aus komplexen Werkstoffen wie Faserverbunde gelingen. Die dafür notwendige Voraussetzung ist eine vollständig digitalisierte und akkreditierte Fertigungsumgebung, in der hochwertige Prüfkörper qualitätsgesichert hergestellt und zertifiziert getestet werden. Diese Umgebung bietet die Grundlage dafür, real erreichte Bauteilkennwerte mit gemessenen Fertigungsparametern in Korrelation zu bringen. Sind diese Zusammenhänge nachgewiesen und quantifiziert, können prozessabhängige Kennwerte für die Bewertung und Zulassung von gefertigten Bauteilen genutzt werden.

Prall gefüllter Datenschatz

Wir verfolgen im Projekt "KoPf" mit der umfassenden Digitalisierung der DLR-eigenen Fertigungs- und Testinfrastrukturen das Ziel, eine Korrelation zwischen den Charakteristika der Leichtbau-Halbzeuge, den bei der Bauteilherstellung verwendeten Fertigungsparametern und den resultierenden Bauteilkennwerten herzustellen. Dabei untersuchen wir die Eigenschaften der individuell prozessierten und anschließend getesteten Faserverbundbauteile durch eine Vielzahl von Versuchen einschließlich statistischer Analysen. Die gewonnenen Daten und Erkenntnisse münden in einer prozessdatenbasierten, in der ersten Ausbaustufe DLR-weit verfügbaren Materialdatenbank mit Metainformationen. Die Daten werden dabei überprüfbar, nachvollziehbar und vertrauensvoll teilbar sein und die Grundlage für anschließende digitale Prozesse (Auslegung, Wartungsplanung, Reparatur, IoT, Big Data etc.) bilden.

Die erreichbare Genauigkeit der Materialkennwerte bildet die Grundlage für eine akzeptable Vorhersagegenauigkeit in der Zertifizierung. Die hierdurch gewonnene Aussagegüte ermöglicht bei einer simulationsbasierten Zertifizierung eine Verringerung der Abminderungsfaktoren. Weiterhin beschleunigt und vereinfacht der Ansatz die Zulassung neuer, emissionsarmer Flugzeugkonfigurationen. Nicht zuletzt können nachhaltige Bio-Halbzeuge durch das Abfangen ihrer charakteristischen Streuungen größere Anwendung finden.

Das digitale Labor

The digital lab

Summary

Digital services are evolving rapidly in our lives and are speeding up even more since the corona crisis. It is possible to virtually participate in lectures, seminars or doing meetings online. Looking at materials science, digital services are at a lower level. To simplify data analysis, identify hidden relationships in data or to work more collaborative, digitalisation needs to grow in the laboratory field. Nowadays, the Department of Multifunctional Materials has a test platform for digital assisted research, called the EnergyLab. In here, data like measurements, analyses, pictures, samples history or material data is made available for a group of researchers to work with this data around the globe. An automated analysis and a downstream visualisation helps the researchers to evaluate the tendency of their development in real time and makes it possible to see results in a greater context.

Der reale Raum des digitalen Labors
The real room of the digital lab

Digitale Dienste entwickeln sich mit rasanter Geschwindigkeit und sind aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Die Corona-Pandemie hat diese Entwicklung weiter beschleunigt. Schulen bieten digitalen Unterricht an, Seminare und Meetings werden online besucht. Auch im Bereich der Materialforschung ist diese Entwicklung angekommen, mit dem Ziel, das Forschungsumfeld sowie dessen Labore stärker zu vernetzen. Hierdurch können Datenauswertungen beschleunigt, verborgene Zusammenhänge aufgezeigt oder kollaboratives Arbeiten erleichtert werden.

Die Chancen der Digitalisierung – Versuchsfeld EnergyLab

Zurzeit baut das Institut in seinem EnergyLab eine digital unterstützte Forschungs-umgebung exemplarisch auf. In dem Labor wird unter anderem die Integration elektrischer **Energiespeicher** erforscht, um beispielsweise das Gesamtgewicht eines Fahrzeugs zu reduzieren oder mit Hilfe dezentraler Energieversorgung elektrische Energie dort bereitzustellen, wo sie wirklich benötigt wird. So kann durch eine dezentrale Energieversorgung beispielsweise das Gewicht der Verkabelung reduziert werden, indem der Stromaustausch direkt zwischen dem integrierten Energiespeicher und dem Verbraucher stattfindet. Somit entfallen gerade im Hochstrombereich Kabel mit großem Querschnitt und somit hoher Masse. Jedoch erhöht eben diese Integration der Energiespeicherung die Variationsmöglichkeiten bei der Herstellung von Faserverbundmaterialien und somit deren Komplexität. Um dieser Herausforderung gerecht zu werden, arbeitet das Institut am Aufbau eines digitalen Labors. Dort wird der gesamte Herstellungsprozess, von der Grundlagenforschung bis hin zum fertigen Bauteil, mit Hilfe digitaler Werkzeuge unterstützt. So ist es Forschenden möglich, nicht nur vor Ort zu arbeiten, sondern Prozesse aus der Ferne zu überwachen und gegebenenfalls einzugreifen.



Autor:

Dipl.-Ing. Jan Petersen



Ein Ansatz mit weitreichenden Möglichkeiten

Digitalisierung hört jedoch nicht bei der Prozesskontrolle aus der Ferne auf. Gesammelte Daten bieten ein großes Potenzial zur automatischen Datenanalyse und reduzieren somit den **Forschungsaufwand**. Trends lassen sich mit statistischen Verfahren und KI-Methoden in Echtzeit ableiten, um frühzeitig auf Parametervariationen zu reagieren. Auch die Kollaborationsmöglichkeiten zwischen Forschenden wird ausgebaut und ermöglichen eine ortsunabhängige Zusammenarbeit. Damit schafft das digitale Labor eine neue Form von Transparenz, die es auch ermöglicht, Laborführungen in Zukunft nicht nur vor Ort, sondern auch im digitalen Raum öffentlichkeitswirksam anzubieten.

Der Weg in eine vernetzte Zukunft

Das **EnergyLab** dient bereits heute als Testraum für digital unterstützte Forschung. Über eine Datenbank stehen den Forschenden sämtliche Daten wie beispielsweise Messungen, Auswertungen, Bilddaten, ein Probentagebuch oder Materialkennwerte zur Verfügung. Sie können diese bequem von überall auf der Welt einsehen und mit den erhobenen Daten arbeiten. Eine automatisierte Auswertung und Visualisierung der Messdaten gibt Aufschluss über Entwicklungstrends und hilft dabei, die eigenen Ergebnisse in einen größeren Kontext einzuordnen. Der nächste Schritt ist die Integration sämtlicher Laborgeräte in die bestehende Datenbank. Um weitere Einflussparameter zu erfassen und zu bewerten, werden zukünftig Technologien eingesetzt, die das automatische Lokalisieren von Proben ermöglichen. Dies erlaubt es beispielsweise, Daten aus Geräten wie Klimaloggern mit Standortdaten zu verknüpfen, um daraus Rückschlüsse auf mögliche Klimaeinflüsse zu ziehen. Zuletzt bietet diese Technologie der Gesellschaft die Möglichkeit, direkten Zugang zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn zu erhalten.



Versuchsaufbau im DLR-Rotorturm
Experimental setup in the DLR rotor tower

METHODEN

Methods

Streuung von Schlagschäden beherrschen mit Probabilistik und KI _____ 26

Mastering of impact damage scatter with probabilistics and AI

Virtuelle Zertifizierung – Mit uns rechnen? Aber sicher! _____ 28

Virtual certification – calculate with us? Certainly & safe!

Verbessertes Design durch thermalen Systemleichtbau _____ 30

Enhanced design through thermal lightweight systems

CFK-Flüssigwasserstofftanks von Größe S bis XXL für ein CO₂-freies Fliegen _ 32

CFRP liquid hydrogen tanks from size S to XXL for CO₂-free flying

Ist der Tank noch ganz dicht? _____ 34

Is the tank still tight?

Vom Impedanzmessrohr in den Transmissionsprüfstand –

Maßgeschneiderte Akustiklösungen _____ 36

From impedance tube to sound transmission loss facility – Tailored acoustic solutions

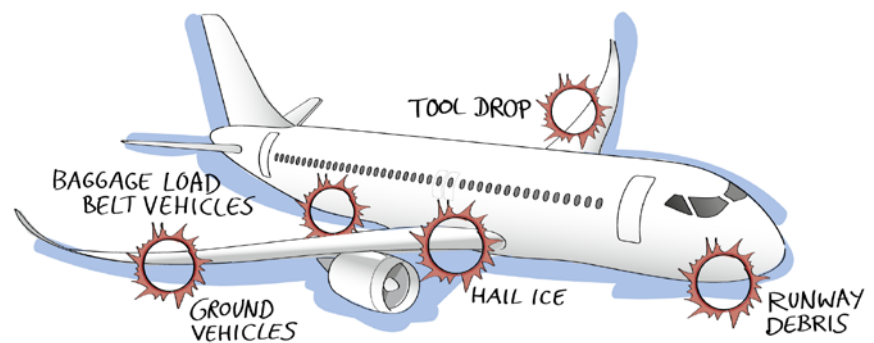
Streuung von Schlagschäden beherrschen mit Probabilistik und KI

Mastering of impact damage scatter with probabilistics and AI

Summary

A detailed analysis and evaluation of impact damage in fibre-reinforced composites is essential for a damage-tolerant design of aircraft structures. While current simulation-based damage assessments work well, they employ some conservative assumptions. So far, deterministic calculation methods have been used to numerically calculate impact damage allowables on, which conservative knockdown factors are applied in order to cover possible scatter due to uncertainties. A new stochastic AI simulation approach offers the possibility of calculating scattered damage as a result of manufacturing imperfections and thus getting a better grip on uncertainties. In this way, it is possible to reduce conservative knockdown factors in the design and to utilise previously unused light-weight potentials.

Schlagschäden durch
Fremdkörper
Impact damage due to
foreign objects



Eine detaillierte Analyse und Bewertung von Schlagschäden in Faserverbunden ist elementar für eine schadenstolerante Auslegung von Luftfahrtstrukturen. Derzeitige simulationsbasierte Bewertungen eignen sich zwar gut, bedienen sich jedoch konservativer Annahmen. Bisher verwendet man deterministische Berechnungsmethoden, um Impactschäden numerisch zu berechnen. Konservative Sicherheitsfaktoren decken dabei mögliche Streuungen infolge von Unsicherheiten ab. Ein neuer stochastischer, KI-basierter Simulationsansatz bietet die Möglichkeit, Streuschäden infolge von Fertigungsimperfectionen zu berechnen und somit Unsicherheiten besser in den Griff zu bekommen. Damit lassen sich konservative Sicherheitsfaktoren in der Auslegung zukünftig reduzieren und bisher ungenutzte Leichtbaupotenziale erschließen.

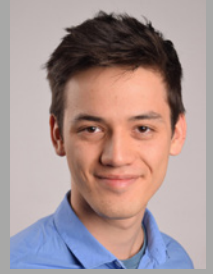
Schlagbeanspruchungen mit einer hohen Masse und geringer Geschwindigkeit (sog. low-velocity impacts) können kaum sichtbare Schäden in einer Faserverbundstruktur verursachen. Solche Schäden sind besonders kritisch, da sie unbemerkt in der Struktur wachsen und zum vorzeitigen Versagen der Struktur führen können. Aus diesem Grund sind eine Analyse und eine simulationsbasierte Bewertung dieser Schlagschäden unerlässlich.

Ein Impact – viele mögliche Schadensresultate

Eine Herausforderung bei der Simulation von Schlagschäden ist der komplexe Schädigungsprozess, der auf einer Verkettung und Interaktion unterschiedlicher Schadensmodi wie Delaminationen, Faserbrüchen und Matrixbrüchen beruht. Kleine Material- und Fertigungsimperfectionen beeinflussen den stark nichtlinearen Schädigungsprozess sensitiv. Im Endergebnis kann dies zu qualitativ und quantitativ unterschiedlichen Schadensresultaten führen. Trotz gleicher Versuchsbedingungen und Entnahme der Versuchsproben aus gleichen Fertigungschargen lassen sich die Streuschäden in diversen Impactversuchsreihen beobachten. Ein Vergleich der Versuchsproben zeigt Delaminationen unterschiedlicher Form und Größe sowie unterschiedlich stark ausgeprägte Faser- und Matrixbrüche. Auch in den residualen Materialeigenschaften, wie den Zug- und Druckrestfestigkeiten sowie dem Schadenswachstumsverhalten, lassen sich Unterschiede feststellen.

Autor:

Christopher Gorsky, M. Sc.

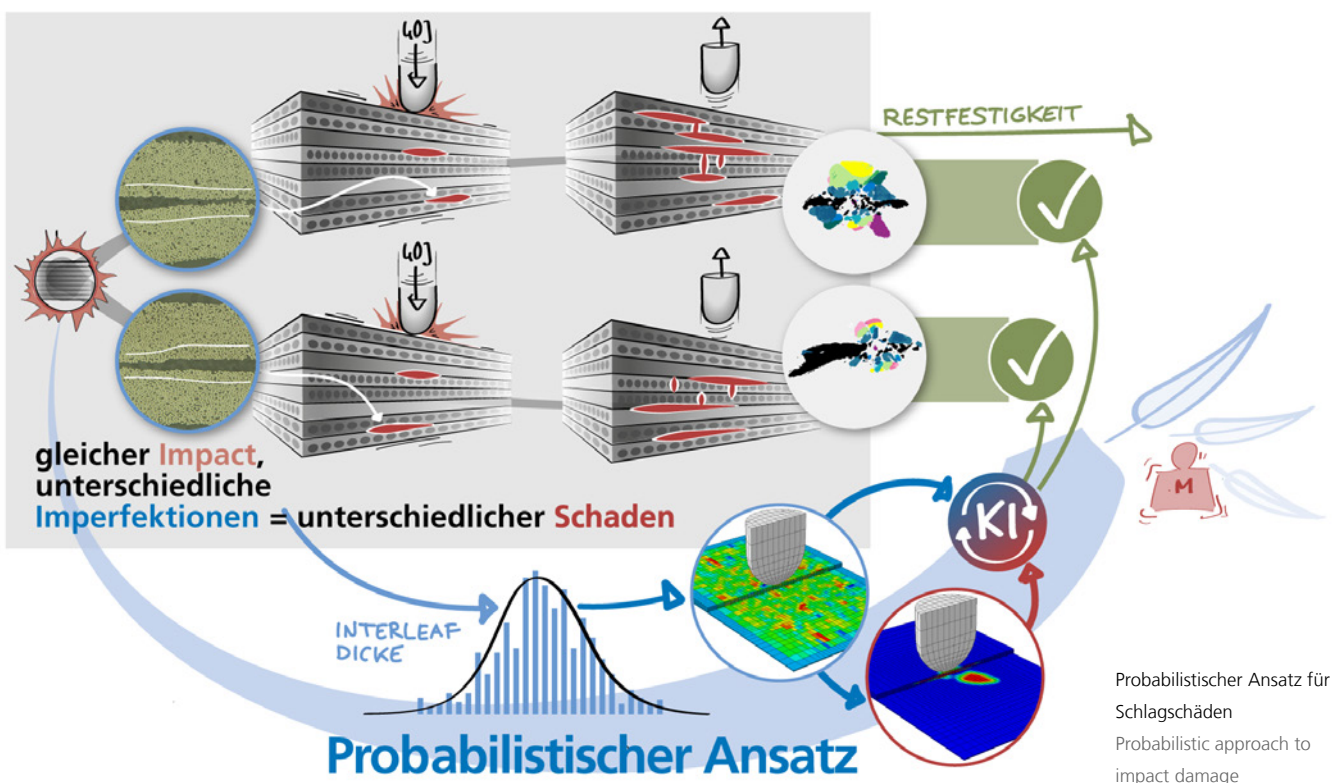


Deterministisch, chaotisch oder doch stochastisch?

Man könnte meinen, dass der nichtlineare, sensitive Schädigungsprozess aufgrund der zufallsverteilten Imperfektionen einem chaotischen System gleicht; wie bei einem Anstoß im Billard bewirken kleinste Unterschiede der Anfangsbedingungen unterschiedliche Endresultate. Ein so extremer Einfluss kleiner Imperfektionen erscheint jedoch unplausibel, da die Schädigung bruchmechanischen Grundsätzen und Gleichungen unterliegt und damit durch gewisse Leitplanken eingeschränkt ist. Zum einen erfolgt die Schadensinitiierung an bestimmten Stellen im Laminat, zum anderen kann auch die Schadensausbreitung nicht beliebig verlaufen. Der Schädigungsprozess lässt sich daher gedanklich mit einem Fallbrett vergleichen, bei dem eine Scheibe von oben eingeworfen wird und Endresultate unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit möglich sind. Je nachdem, wie die Hindernisse im Fallbrett – also zufallsverteilten Imperfektionen – im Material verteilt sind, ergeben sich Pfade – also Schäden unterschiedlicher Auftretswahrscheinlichkeit.

Die neue Methode

Der Grundgedanke des neuen Ansatzes ist es, weg von der deterministischen Berechnung mit konservativen Auslegungsfaktoren hin zu einer präziseren, probabilistischen Simulation zu gelangen. Bisher werden einzelne Impactschäden berechnet und Unsicherheiten durch Sicherheitsfaktoren berücksichtigt. Dieser Ansatz ist zwar praktikabel, jedoch bleiben Leichtbaupotenziale dabei ungenutzt. Genau hier setzt der neue stochastische Ansatz an. Durch geeignete probabilistische Materialparameterstreuung werden Unsicherheiten infolge von Fertigungsimperfektionen berücksichtigt. Das einfache stochastische Streukonzept und die Verwendung von KI-Methoden sorgen für eine gute Anwendbarkeit und Performance der Berechnungsmethode.



Virtuelle Zertifizierung – mit uns rechnen? Aber sicher!

Virtual certification – calculate with us? Certainly & safely!

Summary

The application of a calculation method for the certification of aerospace structures poses new challenges for method development and implementation in software. Employees of the institute have been developing assessment methods and experiments for their validation for many years. Since 2019, DLR's Virtual Product House (VPH) has been using some of these approaches for virtual design, simulation-based manufacturing and virtual testing of aerospace structures. Initial use cases include multi-functional aircraft control surfaces and hydrogen tanks. The goal of the VPH is to increasingly use these approaches for the virtual certification of components. The researchers are asking themselves the question: What requirements must numerical evaluations and the generated data fulfil in order to be recognised by the authorities as an acceptable means of compliance?

Die Anwendung einer Berechnungsmethode für die Zertifizierung von Luftfahrtstrukturen birgt neue Herausforderungen für die Methodenentwicklung und die Umsetzung in Software. Mitarbeitende des Instituts entwickeln seit vielen Jahren Bewertungsmethoden und Versuche zu deren Validierung. Das Virtuelle Produkthaus (VPH) des DLR nutzt seit 2019 einen Teil dieser Ansätze für die virtuelle Auslegung, die simulationsbasierte Fertigung und den virtuellen Test von Luftfahrtstrukturen. Erste Anwendungsfälle sind multifunktionale Flugzeugsteuerflächen und Wasserstofftanks. Ziel des VPH ist es, die verwendeten Ansätze zunehmend für eine virtuelle Zertifizierung einzusetzen. Die Forschenden stellen sich die Frage: Welche Anforderungen müssen numerische Bewertungen und die damit erzeugten Daten erfüllen, um gegenüber Zertifizierungsanforderungen als zugelassenes Nachweismittel anerkannt zu werden?

Anforderungen definieren

Diese Frage schließt den kompletten Weg von der Übersetzung und Abstraktion einer physikalischen Problemstellung bis zur Implementierung und Anwendung in Software ein. Dafür entwickeln Mitarbeitende mathematische Formulierungen und deren Implementierungen, verifizieren diese und führen Validierungen durch. Zusammen mit den VPH-Partnern und der Zulassungsbehörde EASA ist es darüber hinaus das Ziel, einen Qualitätssicherungsrahmen für Bewertungsmethoden im Sinne der Zulassung zu schaffen.

Know-how anwenden

Mitarbeitende des Instituts wirken aktiv in internationalen Fachgruppen zu Fragen der virtuellen Zertifizierung in der Strukturberechnung mit. Darin gewonnene Erkenntnisse kombiniert das Team mit neuesten Entwicklungen des [effizienten Software-Engineerings](#) im DLR. Im VPH erfolgt die Integration der Methoden in automatisierte Bewertungsprozesse. Letztere verlangen zusätzliche Implementierungen zur Überprüfung der Gültigkeit von Lösungen. Hierfür entwickelt das Team automatisierte Auswertungen der Berechnungsergebnisse.

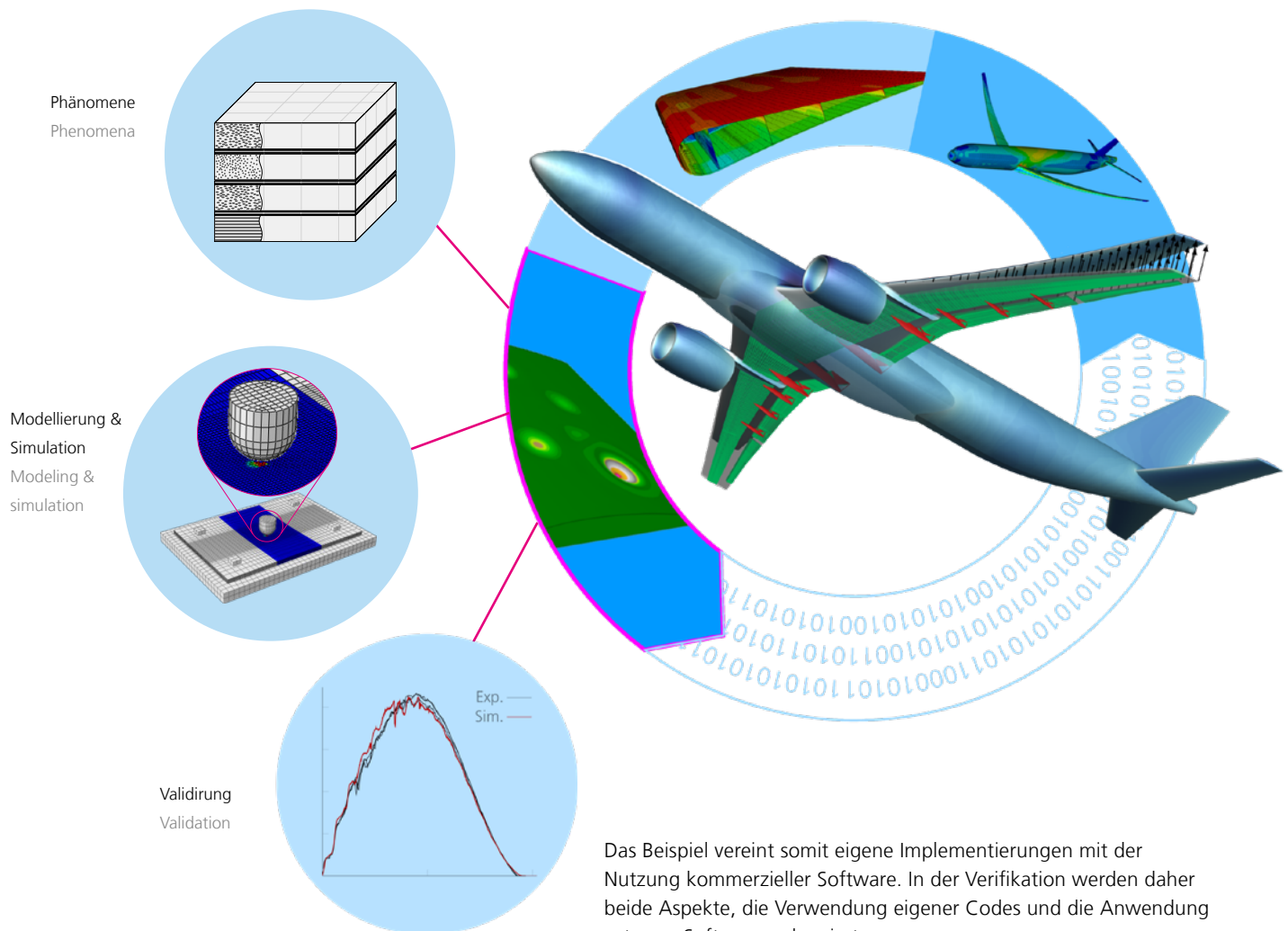
Am Beispiel lernen

Im VPH erarbeitet das Projektteam den Qualitätssicherungsrahmen beispielhaft für die Berechnung des Verhaltens der Faserverbundbeplankung einer Steuerfläche unter Schlagbelastung und die daraus resultierenden Schäden.

Zunächst erlaubt das [Verständnis der auftretenden Phänomene die Auswahl der notwendigen Modellierung](#) im virtuellen Versuch. So stellen die Entwickler im Rahmen der Methodenentwicklung eine realistische Bewertung sicher. Relevante Ergebnisse sind bspw. Schadensgröße und permanente Eindringtiefe nach dem Impact. Die automatisierte Modellierung des Problems stellt die erste Softwarekomponente im Bewertungsprozess dar. Die anschließende Simulation erfolgt im Programm ABAQUS, welches um eigene Routinen aus der institutseigenen Software MCODEAC erweitert ist.

Autoren:

Dr.-Ing. Martin Rädels
Dr.-Ing. Raffael Bogenfeld



Das Beispiel vereint somit eigene Implementierungen mit der Nutzung kommerzieller Software. In der Verifikation werden daher beide Aspekte, die Verwendung eigener Codes und die Anwendung externer Software, adressiert.

Innerhalb der Validierung stellt der Umgang mit Unsicherheiten, hier geometrisch und physikalisch, einen wesentlichen Aspekt der Arbeiten dar. Aus vorangegangenen Forschungsprojekten, bspw. [SCHACH](#) und einer Kooperation mit Airbus stehen dafür sowohl Implementierung als auch Versuchsdaten zur Verfügung. Diese umfassen neben der Schädigungsuntersuchung an der Zielstruktur auch Proben zur Bestimmung der verwendeten Materialparameter im Rahmen der Unsicherheitsanalyse.

Die Überprüfung der Gültigkeit der Rechnung erfolgt bspw. durch Auswertung der Energiebilanz des Impactvorgangs. Darüber hinaus müssen Anwendungsgrenzen und die Übertragbarkeit auf abweichende Problemstellungen bedacht werden, um eine sichere Nutzung zu gewährleisten und Fehlbedienung vorzubeugen. Hierbei untersuchen die Forschenden bspw. die Gültigkeit der Modellierungsannahmen für neue Materialsysteme, die nicht Teil des Validierungsprozesses sind.

Eine Verallgemeinerung der entwickelten Ansätze findet in weiteren Arbeiten statt. Im Ergebnis stehen dem Anwender sichere Methoden für die Nutzung in komplexen Einsatzszenarien im VPH zur Verfügung.

Verbessertes Design durch thermalen Systemleichtbau

Enhanced design through thermal lightweight systems

Summary

Reliable design of lightweight structures exposed to thermal loads is an eminent challenge. Engine structures and surrounding parts, spacecraft structures designed for re-entry or battery and fuel cell environments have to withstand a fatal combination of temperature and mechanical load: On the one hand, thermal strain causes additional load and deformation, on the other hand, softening of the matrix at elevated temperature leads to the reduction of the load carrying capacity. Additionally, in most cases it is not clear in which spatial distribution thermal loads are impinging and which scatter they are subjected to. Because of this complexity, common designs apply simplifications and conservatism. However, structural testing did obtain existing load-carrying capacity beyond typical service temperatures. To exploit such potentials, we have developed a novel analysis methodology to consider spatial temperature distributions. Furthermore, functional approaches actually lead to analytical predictions that finally allow for weight reduction.

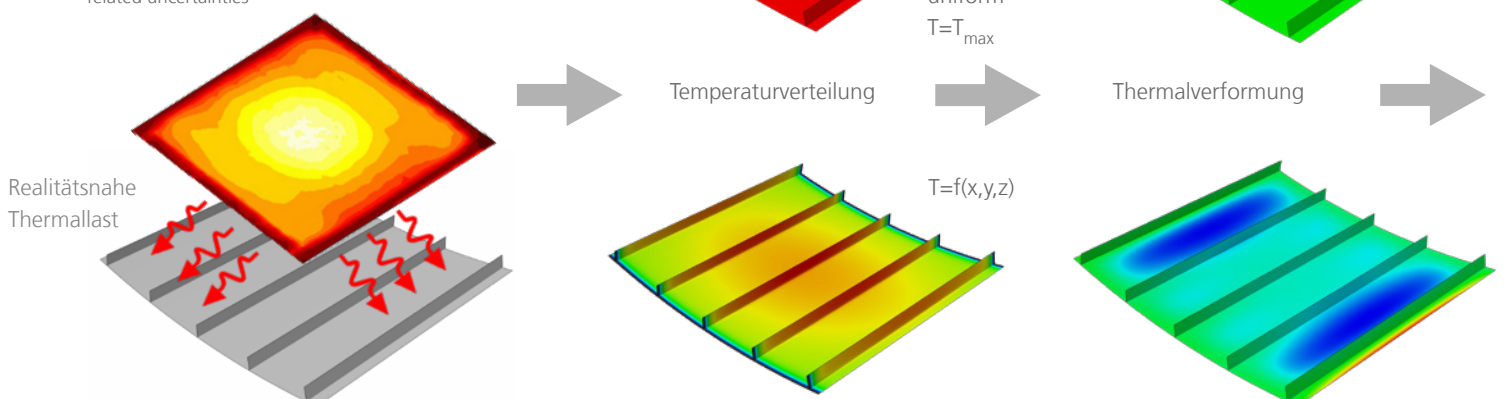
Die betriebssichere Auslegung von thermisch belasteten Leichtbaustrukturen ist eine besondere Herausforderung. Strukturen in und um Triebwerksbereiche, wiederkehrende Raumfahrtstrukturen und strukturelle Umgebungen von Batterie- und Brennstoffzellen müssen einer folgenreichen Kombination von Temperatur und mechanischer Belastung widerstehen: Zum einen wirken die Wärmedehnungen als zusätzliche Lasten, zum anderen erweicht die Matrix bei hohen Temperaturen. Beides führt fatalerweise zu einer Traglastreduktion. Zudem ist meist unsicher, wie die Thermallasten im Bauteil auftreten und welchen Schwankungen sie unterliegen. Aufgrund dieser Komplexität verwendet die bisherige Auslegung Vereinfachungen und konservative Annahmen. Strukturversuche zeigen jedoch, dass auch oberhalb typischer Einsatztemperaturen mechanische Tragreserven existieren. Um diese Potenziale zu nutzen, haben wir eine neue Berechnungsmethodik entwickelt, die räumliche Temperaturverteilungen berücksichtigt. Funktionale Zusammenhänge erlauben nun sogar analytische Vorhersagen, welche Leichtbaupotenziale freigesetzt werden können.

Temperaturabhängigkeit und räumliche Verteilung

Die heutigen konservativen Annahmen leiten sich aus „Worst-case“-Szenarien ab. Dabei erfolgt die Festlegung der Designtemperatur mit einer größtmöglichen Risikobetrachtung durch eine gleich verteilte Worst-case-Temperatur. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme bei der Strukturauslegung ist die Annahme von last- und temperaturabhängigen Abminderungsfaktoren. In der Realität treten Thermallasten nur sehr selten gleichmäßig verteilt auf, sondern meist in Form lokaler Hotspots. Eine Berücksichtigung dieser räumlichen Temperaturverteilung erhöht in der Analyse zwar den Detailgrad, aber sie erlaubt die Nutzung potenzieller Lastreserven aus resultierenden Lastumlagerungen. Möglich macht dies ein phänomenologischer Modellansatz,

Durch wiederholte Analyse realistischer Thermallasten lassen sich ihre Unsicherheiten berücksichtigen
Repeated analysis with varying realistic thermal loads allows to consider related uncertainties

Vereinfachte konservative Thermallast

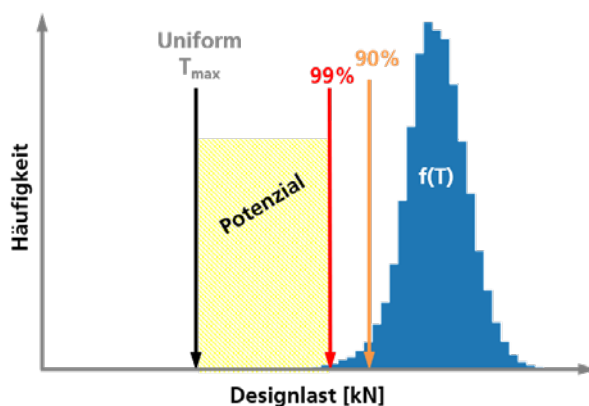




Autor:

Dipl.-Ing. Martin Liebisch

bei dem die Materialeigenschaften fortan als Funktion der Temperatur zu betrachten sind. Als Basis dieser Modellbildung dienen die mit herkömmlichen Methoden charakterisierten Materialeigenschaften bei verschiedenen diskreten Temperaturen. Dieser neue Modellansatz erlaubt nun die Berechnung der räumlichen Temperaturverteilungen, der thermisch induzierten Verformungen und schließlich auch analytische Bewertungen der Tragfähigkeit.



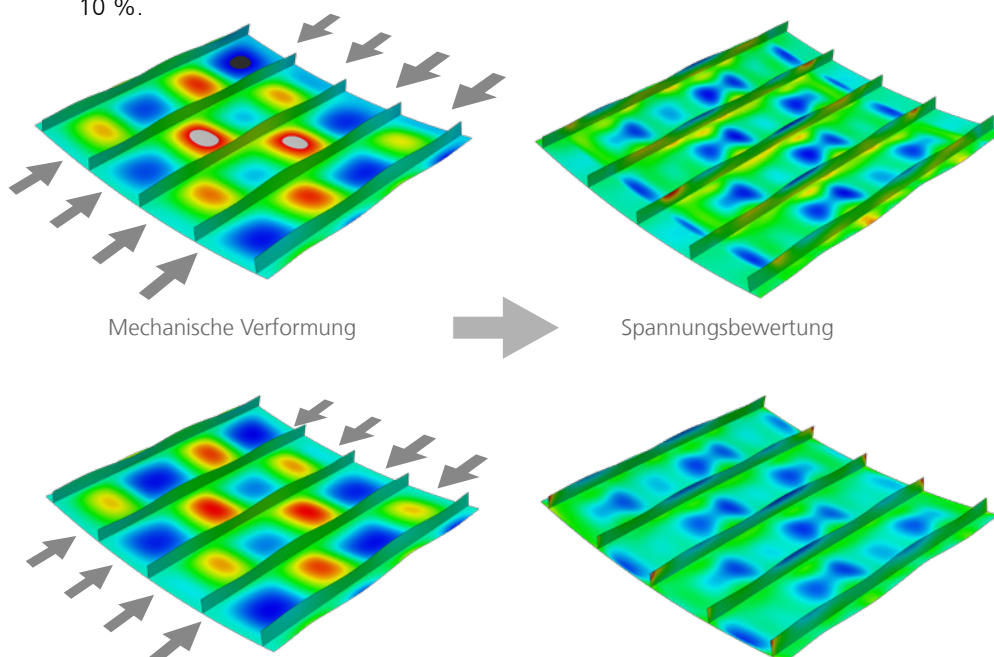
Das erzielte Potenzial ermöglicht Gewichtsreduktion und Erhöhung der Einsatztemperatur
The resulting potential leads to weight reduction and elevated service temperature

Nach vielen Unsicherheiten nun zur Sicherheit

Welche Temperaturverteilung sich in einem Bauteil konkret einstellt, unterliegt diversen Unsicherheiten, wie z. B. den nicht vorher-sagbaren Umgebungsbedingungen. Hier hilft nun ein statistischer Ansatz mit einem Parameterraum, der die etwaige Form und Größenordnung der Temperaturverteilung beschreibt. Er definiert den Rahmen für wiederholte Strukturanalysen mit verschiedenen Parameterkombinationen. Die Berechnung der Temperaturverteilung funktioniert sogar automatisiert: Das wiederholte Durchführen

der thermomechanischen Analyse generiert bei unterschiedlichen Temperaturverteilungen entsprechend abweichende Designlasten. Diese Ergebnisse führen zu einem probabilistischen Modell, aus dem die maximale Designlast als Funktion der Temperaturverteilung ablesbar ist.

Fazit: Mit Hilfe einer detaillierten Modellierung, die thermische Größenabhängigkeiten berücksichtigt, lassen sich ursprüngliche Annahmen, die aus Unsicherheiten herrühren, in praxisorientierte Vorgaben mit einer mindestens gleichermaßen sicherheitsbetonten Risikobewertung überführen. Je nach Anwendung entstehen dadurch neue Leichtbaupotenziale im Design von etwa 2 bis 10 %.



Ausblick

Erfreulicherweise erlaubt die neue Berechnungsmethodik weitere verbesserte Analysemöglichkeiten, wie z. B. die Bewertung von thermomechanischen Strukturversuchen oder auch eine In-situ-Strukturbewertung, und das alles unter Beachtung gemessener Temperaturwerte. Sie kann somit zu einer realistischeren Bewertung sowohl des aktuellen Strukturzustands als auch des Lebenszyklus beitragen.

CFK-Flüssigwasserstofftanks von Größe S bis XXL für ein CO₂-freies Fliegen

CFRP liquid hydrogen tanks from size S to XXL for CO₂-free flying

Summary

Future CO₂-free hydrogen-powered aircraft will require new technologies and systems for fuel storage. The used liquid hydrogen is much lighter than kerosene, but takes up more volume and dedicated space for the required pressure vessels. Perhaps aircraft will carry the large tanks as nacelles under the wings or in the rear fuselage? We use the commercial wind simulation tool μ Wind (MeFeX) and extended it with our open source software tankoh2 to perform a fully automated tank analysis and optimisation. For a use case with a volume of 22 m³, the CFRP tank requires 1/3 of the mass of an aluminium tank. In the future, the presented method will be extended by thermo-mechanical and inertial load assumptions, consideration of permeability as well as a multidisciplinary assessment of insulation and structures.

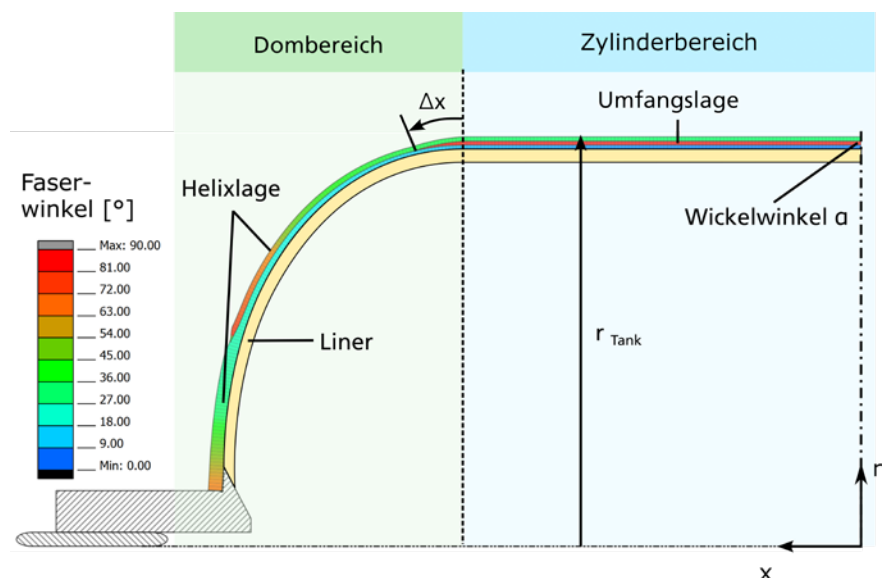
Zukünftige CO₂-freie Wasserstoffantriebe erfordern effiziente Technologien und Systeme zur Treibstoffspeicherung. Für Verkehrsflugzeuge ist die Wasserstoffspeicherung in kryogener Form die interessanteste Variante. Wasserstoff ist zwar deutlich leichter als Kerosin, beansprucht jedoch mehr Volumen und einen dedizierten Platz für die benötigten Druckbehälter. Sind große Tanks als Gondel unter den Flügeln oder im Rumpheck die Lösung für zukünftige Flugzeuge?

Anforderungen an automatische Methoden zur Druckbehälterauslegung

Für die Behälterauslegung sind Berechnungsmethoden der auf Innendruck belasteten Faserverbundtanks nötig, die Tanks der relevanten Flugzeuggrößen von Regional- bis Großraumflugzeug abdecken. Die Auslegungsverfahren müssen zwei Ergebnisse liefern: einerseits eine automatisierte, schnelle und verlässliche Massenbestimmung für den Flugzeugvorentwurf mit seinen vielen Designvariationen und andererseits konkrete Tankstrukturen mit diskreten Lagenwinkeln für die Fertigung. Diese Methoden müssen die Lagenreihenfolge festlegen und dabei zwischen den kompletten Tank bedeckenden Helixlagen und den Umfangslagen entscheiden. Letztere bedecken den zylindrischen Bereich und nur Randbereiche der Domkappen. Durch Kombination der beiden Ergebnisse kann die Wechselwirkung des Tanks vom Flugzeugentwurf bis zur Fertigung abgebildet werden.



Tankoh2 – DLR open source software



Schematischer Tankquerschnitt mit optimierten Helix- und Umfangslagen
Schematic cross section of a tank with optimised helical and hoop layers

Autor:

Dr.-Ing. Sebastian Freund

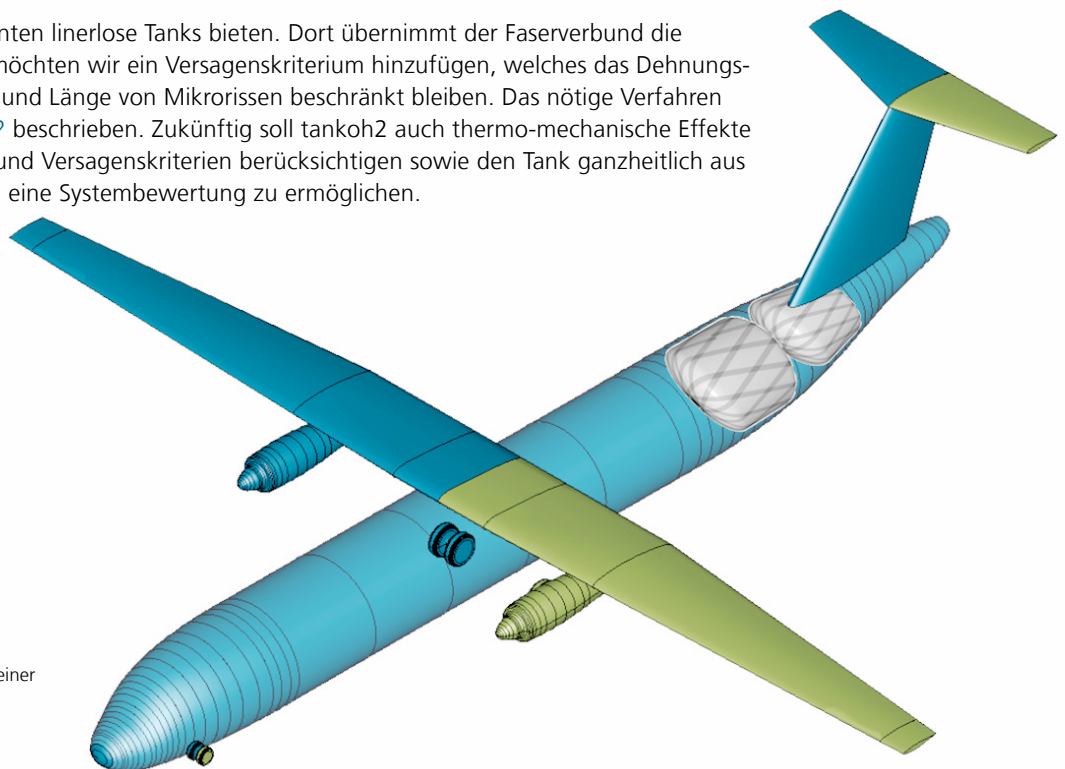


Optimierung von Lagenwinkeln in der Wickelsimulation

Für die beschriebenen Anforderungen setzen wir die kommerzielle Wickelsimulation [µWind MeFeX](#) ein und erweitern sie um eine automatische, lagenweise Optimierung der Faserverbundwinkel in unserer Open-source-Software [tankoh2](#). In [tankoh2](#) unterscheiden wir regelbasiert, ob schichtweise eine Umfangs- oder Helixlage gewickelt werden soll. Befindet sich die höchste Materialanstregung im Dombereich, fügen wir eine zusätzliche Helixlage hinzu und optimieren deren Lagenwinkel mit einem globalen Optimierer, der die Minimierung der Materialanstregung zum Ziel hat. Für den zylindrischen Bereich wickeln wir Umfangslagen und minimieren dabei das Auslaufen der Lagen im Dombereich. Hierdurch verteilen wir den Steifigkeitssprung zwischen zylindrischem Bereich und Dombereich auf eine größere Länge. Durch dieses Anpassen der Lagenanzahl und deren Orientierungen an den Belastungen lässt sich das Leichtbaupotenzial von Faserverbunden ausnutzen. Mit [tankoh2](#) ist das automatische Bewerten von Tanks in verschiedenen Größen und Geometrien möglich. In Zusammenarbeit mit den Entwicklern des Flugzeugentwurfs ermitteln wir unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren, wie Struktur, Masse und Aerodynamik, jeweils das Optimum einer Flugzeugklasse multidisziplinär. Für einen Vergleich des Potenzials von CFK- und Aluminiumtanks sind Methoden zur Druckbehälterauslegung für metallische Werkstoffe vorhanden. Diese ermitteln die Wanddicke auf Basis von ISO 20421 inklusive einer Ermüdungsbetrachtung. Es zeigt sich, dass die Masse des Innentanks in einem Anwendungsbeispiel mit einem Volumen von 22 m³ aus Faserverbund inklusive Liner ungefähr ein Drittel der Masse eines Aluminiumtanks beträgt und damit Faserverbunde ein hohes Einsparpotenzial aufweisen.

Linerlose Tanks: Ermittlung des Belastungsniveaus für eine hohe Gasdichtigkeit

Eine weitere Masseneinsparung könnten linerlose Tanks bieten. Dort übernimmt der Faserverbund die Funktion der Gasdichtigkeit. Dafür möchten wir ein Versagenskriterium hinzufügen, welches das Dehnungsniveau so begrenzt, dass die Anzahl und Länge von Mikrorissen beschränkt bleiben. Das nötige Verfahren wird in [Ist der Tank noch ganz dicht?](#) beschrieben. Zukünftig soll [tankoh2](#) auch thermo-mechanische Effekte und Inertiallasten in Lastannahmen und Versagenskriterien berücksichtigen sowie den Tank ganzheitlich aus Struktur und Isolation auffassen, um eine Systembewertung zu ermöglichen.



Gewickelte Wasserstofftanks im Flugzeugheck einer 250-sitzigen Konfiguration
Hydrogen tanks in the aircraft tail of a 250-seat configuration

Ist der Tank noch ganz dicht?

Is the tank still tight?

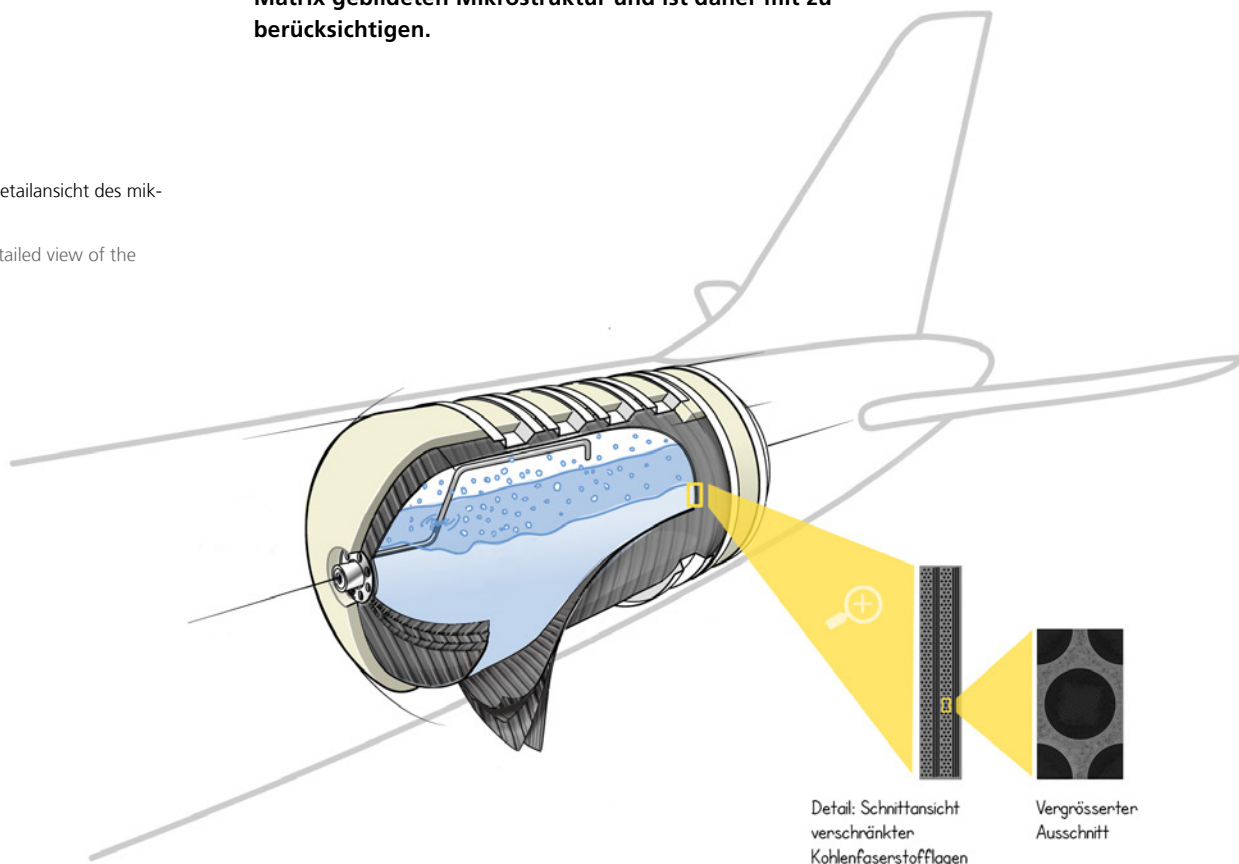
Summary

To enable pressurised hydrogen storage in a liner-less vessel made from composite material, the composite has to provide a sufficient mechanical strength as well as leak tightness. Particularly the leak tightness assessment of an inhomogeneous composite laminate is a challenge in the design of such a pressure vessel. An analytical analysis results in bound values, providing a possible permeability range depending on the fibre volume content. The calculation through a numerical reference volume element results in a single value between these bounds. As micro-cracking severely reduces leak tightness of the laminate, it has to be considered during the analysis. Through the combination of damaged and pristine material phases, the analytical calculation can also capture the crack influence.

Wasserstoffdrucktanks sind als Energiespeicher ein Grundbaustein für zukünftige Antriebstechnologien. Entsprechende Druckbehälter stellen zweierlei Grundanforderungen an das Material für die Tankhülle. Es muss die mechanische Belastung durch den Innendruck aushalten und die Dichtheit gegen Gasaustritt gewährleisten. Konventionell gebaute Wasserstoffdrucktanks bestehen aus einer zweischichtigen Struktur: einer innenliegenden isotropen Isolierschicht (Liner), um den Austritt von Wasserstoff zu verhindern, und einer lasttragenden Außenschicht aus Faserverbundmaterial, um die hohen Innendrucke auszuhalten. Eine gute Möglichkeit bisher ungenutzte Leichtbaupotenziale zu erschließen, stellt dabei die Fusion beider Aufgaben in einer Schicht dar. Durch neue Faserverbund-Tankkonzepte ohne Liner soll das lasttragende Laminat zusätzlich die Funktion der Abdichtung gewährleisten. Hieraus resultiert für die Auslegung die besondere Herausforderung, den Gasaustritt durch die Diffusion von Wasserstoff durch das Faserverbundmaterial berechnen zu können. Kohlenstofffasern weisen beispielsweise einen deutlich höheren Permeationswiderstand auf als Epoxidharz. Um die Permeation des Gases berechnen zu können, ist diese Heterogenität des Verbunds mit angepassten Methoden zu berücksichtigen. Die resultierende Permeabilität für das zweiphasige Verbundmaterial liegt dabei zwischen den theoretischen Ober- und Untergrenzen, die durch die jeweiligen Einzelmaterialien gegeben sind. Der Faservolumengehalt ist der bestimmende Parameter, welcher die Permeabilität des Faserverbunds definiert. Aufgrund der heterogenen Zusammensetzung einer Laminatschicht ist die Diffusion zusätzlich abhängig von der aus Fasern und Matrix gebildeten Mikrostruktur und ist daher mit zu berücksichtigen.

Integrierter H₂-Tank und Detailansicht des mikromechanischen Aufbaus

Integrated H₂ tank and detailed view of the micromechanical assembly



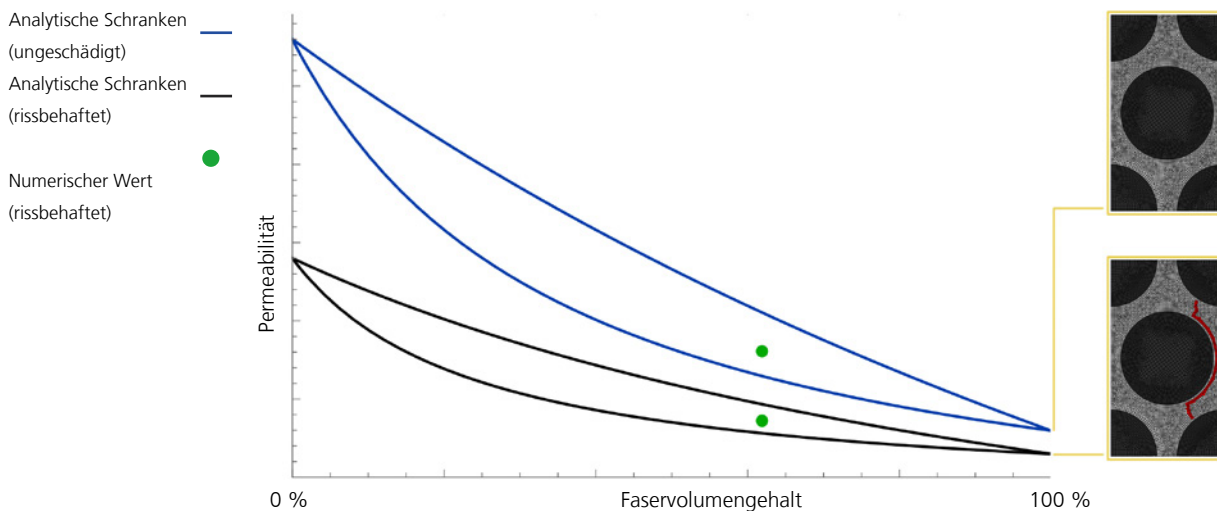
Autoren:

Dr.-Ing. Raffael Bogenfeld
Dr.-Ing. Janko Kreikemeier



Verzicht auf Sicherheitsfaktoren durch analytische Schranken

Diese Mikrostruktur lässt sich durch analytische Homogenisierungsverfahren mathematisch erfassen, wodurch die Berechnung von Durchlässigkeiten durch die Tankhülle ermöglicht wird. Eine einfache Näherung gelingt bereits durch Betrachtung der beiden geometrischen Extremfälle serieller oder paralleler Schichtungen von Faser- und Matrixmaterial. Die Kenntnis der Mikrostruktur sowie die Anwendung der Variationsrechnung erlauben eine genauere Berechnung. Die analytische Betrachtungsweise liefert als Ergebnis für die Durchlässigkeit des Laminats einen Vertrauensbereich mit einer Ober- und einer Unterschranke, zwischen denen sich der reale Wert der Durchlässigkeit befindet. Die Validierung dieses Vertrauensbereichs wird durch eine numerische Diffusionsanalyse für einen bestimmten Faservolumen-gehalt sichergestellt. Ein mit finiten Elementen modelliertes repräsentatives Volumenelement stellt dabei Faser- und Matrixmaterial dar. Die Lage des numerisch ermittelten Diffusionswertes zwischen den analytischen Schranken zeigt dabei die Güte des Ansatzes. Während das diskrete numerische Ergebnis für genau eine geometrische Konfiguration gilt, liefert das analytische Modell parametrische Ergebnisse ohne zusätzlichen Berechnungsaufwand. Zudem erlaubt es den Verzicht auf zusätzliche Sicherheitsfaktoren!



Berechnete Permeabilität eines Faserverbundlaminats mit und ohne Riss
Calculated permeability of a fibre composite laminate with and without crack

Nur rissfreie Schichten sind eine Barriere

Über die Laminatzusammensetzung hinaus existiert jedoch ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die Dichtheit eines realen Faserverbunds. Mikrorisse, welche bereits bei geringen Lasten unter Ermüdungsbeanspruchung entstehen können, erhöhen die Permeabilität in erheblichem Maße. Aus diesem Grund muss eine Permeationsanalyse eines Laminats immer unter Berücksichtigung möglicher Schäden erfolgen. Rechnerisch lässt sich ein rissbehaftetes Laminat als Kombination von ungeschädigter Materialphase und über den Querschnitt verteilten geöffneten Rissen betrachten. Auch diese Kombination ist mathematisch erfassbar und erlaubt die parametrische Ermittlung der Abhängigkeiten von geometrischen Rissparametern. Da der bestimmende Parameter für diese Permeabilitätserhöhung der rissbehaftete Anteil der Laminatdicke ist, gilt es, diesen so gering wie möglich zu halten. Da das Auftreten von Ermüdungsrissen bei bestimmten Belastungen an die Faserorientierung gekoppelt ist, besteht hier die Möglichkeit, den Lagenaufbau gezielt zu wählen, um den Anteil der rissbehafteten Lagen zu beschränken und so die Dichtheit zu erhalten. [Um den sicheren Betrieb einer Tankstruktur sicherzustellen, ist zukünftig ein entsprechendes Überwachungsverfahren direkt im Laminat denkbar.](#)

Vom Impedanzmessrohr in den Transmissionsprüfstand – Maßgeschneiderte Akustiklösungen

From impedance tube to sound transmission loss facility – Tailored acoustic solutions

Summary

The impedance tube is an established tool that can be used to investigate materials acoustically. Novel ultralight materials such as aerogels can be tested quickly and reliably with it and compared with conventional sound-insulating materials such as foams or mineral wool. Promising materials are then subjected to further tests in the institute's sound transmission test facility. These are carried out on a larger scale and under more realistic boundary conditions. In this way, innovative sound insulation solutions are created that combine high sound attenuation with low weight and volume.

Warum „klingt“ ein Schlafzimmer anders als ein Bad und warum kann man sich in manchen Räumen so schlecht unterhalten? Die Antwort ist: Es hängt von den Dämpfungseigenschaften der Materialien in diesen Räumen ab. Die akustische Untersuchung neuer Materialien und die Entwicklung von Konzepten zur Schalldämpfung erfordern viel Technik und Know-how. Dies gilt insbesondere für Leichtbaustrukturen und -systeme, weil deren Masse und Volumen auf ein Minimum reduziert werden müssen. Das unten dargestellte Impedanzmessrohr ist ein etabliertes Hilfsmittel, mit dem sich Materialien akustisch untersuchen lassen. Neue ultraleichte Materialien wie Aerogele können damit schnell und zuverlässig geprüft und mit herkömmlichen Dämmstoffen wie Schäumen oder Mineralwolle verglichen werden. Vielversprechende neue Materialien werden anschließend im Schalltransmissionsprüfstand des Instituts weiteren Tests unterzogen. Diese erfolgen in einem größeren Maßstab und unter realistischeren Randbedingungen. Auf diese Weise entstehen innovative Schallschutzlösungen, die eine hohe Schalldämpfung mit niedrigem Gewicht und Volumen in sich vereinen.

Leicht und schallschluckend heißt die Devise

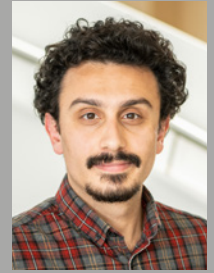
Leichte Materialien mit einer hohen Schalldämpfung sind in der Luftfahrt heiß begehrt, weil dort jedes Gramm zählt. Außerdem sind neue energieeffiziente Triebwerke mit offenen Rotoren sehr laut, was zu unangenehmen Tönen in der Kabine führen kann. Im Rahmen des Projekts InDiCaD (Innovative Digital Cabin Design) untersuchen wir zusammen mit dem DLR-Institut für Werkstoffforschung ultraleichte Materialien auf Basis von Aerogelen, welche als Isolierung zwischen Rumpf und Kabine dienen könnten. Ob ein Material schallschluckend ist und bei welchen Frequenzen dieser Effekt auftritt, zeigt der sogenannte Schallabsorptionskoeffizient. Dieser nimmt abhängig von der Frequenz Werte zwischen null und eins an, wobei null für keine und eins für vollständige Absorption des Schalls steht. Wie im Diagramm rechts zu sehen, ist die Schallabsorption von konventionellen Dämmstoffen (Schaumstoff und Glaswolle) bei tiefen Frequenzen unter 500 Hz sehr gering, sodass die tiefen Töne eines Triebwerks nahezu ungehindert in die Kabine gelangen können. Mit Aerogelen können tiefe Frequenzen jedoch deutlich stärker absorbiert werden.

Glasswolle im Probenhalter des Impedanzmessrohrs
Glass wool in the sample holder of the impedance tube



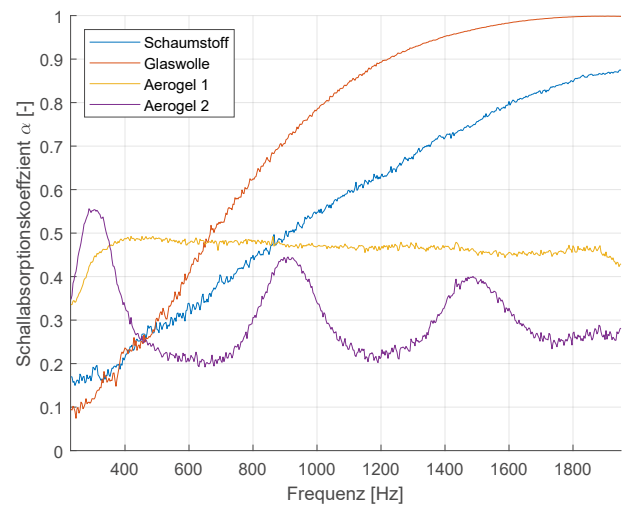
Autoren:

Dr.-Ing. Malte Misol
Ugur Dinçer, M.Sc.



Maßgeschneiderte Akustiklösungen für den Leichtbau

Der Frequenzverlauf der Absorption für eine senkrecht einfallende ebene Schallwelle wird in einem Impedanzmessrohr ermittelt. Dazu wird eine zylindrische Probe in den Probenhalter des Rohrs eingebaut und mit einem sich an einem Ende des Rohrs befindlichen Lautsprechers beschallt. Aus den Signalen der Mikrofone des Impedanzmessrohrs kann anschließend der Absorptionskoeffizient eines Materials ermittelt werden. Geeignete Materialien werden anschließend in größerem Maßstab im akustischen Transmissionsprüfstand des Instituts eingehend geprüft. Mit seinem voll ausgestatteten Transmissionsprüfstand kann das Institut maßgeschneiderte Akustiklösungen entwickeln und unter realitätsnahen Bedingungen testen. Eine Besonderheit dieses Labors ist die Möglichkeit zur Erzeugung nahezu beliebiger Schallfelder mit Hilfe eines Lautsprecherfelds mit 112 einzeln ansteuerbaren Schallquellen. Somit können die im Impedanzmessrohr ermittelten Dämpfungseigenschaften unter realistischen Schalldruckverteilungen verifiziert werden. Neben der Entwicklung maßgeschneiderter Akustiklösungen für den Systemleichtbau werden auch existierende Materialien und Systeme analysiert und akustisch optimiert. So kann das Schwingungsverhalten oder die Schallabstrahlung in einer späten Phase der Produktentstehung, aber auch nach der Markteinführung optimiert werden.



Mit dem Impedanzmessrohr ermittelte Schallabsorptionskoeffizienten unterschiedlicher Materialien

Sound absorption coefficient measured with the impedance tube

Impedanzmessrohr mit Probenhalter und unterschiedlichen Proben

Impedance tube with sample holder and different samples



KONSTRUKTION

Construction

Austauschbarer Handschuh (mikroperforierte Titanhaut)
Replaceable glove (micro-perforated titanium skin)

Parabelflug mit aufrollbaren Raumfahrtstrukturen _____ 40

Parabolic flight with deployable space structures

Inserts neu gedacht. Mittels 3D-Druck zum perfekt integrierten Insert! __ 42

Inserts rethought. 3D printing for the perfectly integrated insert!

Stärker am Wind – ein neues Verbindungskonzept für Windkraftrotorblätter 44

A stronger blade root connection for wind turbines

Flugversuch am Boden – Realitätscheck für den Laminarflügel _____ 46

Flight test on the ground – reality check for the laminar wing

Geschickt eingefädelt – Landeklappenmontage mit
einem mobilen Roboter _____ 48

Outboard-flap module assembly with autonomous mobile units and lightweight jigs

Parabelflug mit aufrollbaren Raumfahrtstrukturen

Parabolic flight with deployable space structures

Summary

When transporting satellites into space, the limited payload volume on board the rocket is the biggest hurdle. Everything that is to fly into orbit must pass through this eye of a needle. Some components such as solar generators or antennas have to span large areas in space to fulfil their function. Hence, they are often realised as deployable structures.

These structures are designed according to the loads in space. If they are deployed on Earth, they collapse under their own weight. To overcome the resulting deficit in realistic tests, DLR – partly in cooperation with NASA – conducted five tests in July 2021 on the deployment of large structures on board a special aircraft under artificial microgravity.

Beim Transport von Satelliten ins All ist der begrenzte Platz an Bord der Rakete die größte Hürde. Durch dieses Nadelöhr muss alles hindurch, was in den Weltraum fliegen soll. Einige Komponenten, wie Solargeneratoren oder Antennen, müssen im All jedoch große Flächen aufspannen, um ihre Funktion zu erfüllen. Daher sind faltbare und aufrollbare Strukturen ein sehr wichtiger Entwicklungszweig in der Raumfahrt.

Sollen diese Strukturen besonders leicht und kompakt sein, ergeben sich zwangsläufig Konzepte, die nur in der Schwerelosigkeit des Alls funktionieren. Entfalten sich diese Strukturen auf der Erde, brechen sie unter ihrem eigenen Gewicht zusammen. Zur Überwindung des daraus resultierenden Defizits an realistischen Tests und somit zur Erbringung des Funktionsnachweises führte das DLR – teils in Kooperation mit der NASA – im Juli 2021 fünf erfolgreiche Versuche zur Entfaltung großer Strukturen an Bord eines Spezialflugzeugs unter künstlicher Schwerelosigkeit durch.

Aufrollbare Masten für eine Vielzahl von Anwendungen

Seit Langem entwickelt das DLR aufrollbare Masten aus Faserverbundmaterial. Die Fertigungs- und Testmethoden für die Masten stellen eine ausgereifte Technologie dar, die weltweit als Referenz gilt. Vier konkrete Anwendungen der aufrollbaren Technik unterzogen sich in einem Parabelflug diversen Tests: Kameramasten, Solarmodule, entfaltbare Bremssegel und Sonnensegel.

Ein grundlegendes Experiment bestand in Aus- und Einfahrversuchen an einem sogenannten Instrumentenmast. Diese Masten ermöglichen es Satelliten und Raumsonden, störungsempfindliche Instrumente außerhalb des Satelliten sicher zu befestigen. Beispielsweise können so Magnetfeldsensoren, die einen Planeten erforschen, ihre Daten aufnehmen, ohne Verfälschungen der Ergebnisse durch das Magnetfeld des Satelliten zu riskieren. Alternativ können diese Masten mit Kameras ausgestattet sein, die auf den Trägersatelliten zurückschauen, um beispielsweise die Dokumentation von Dockingmanövern oder anderen Entfaltungsvorgängen zu unterstützen.

Wesentlich komplexer gestaltet sich das Experiment an einem aufrollbaren Solarmodul. Hierbei rollen zwei Masten gleichzeitig und um 180° versetzt ab. Im Flugexperiment sind die Trägermembranen noch unbestückt. Später tragen sie hier aufgebrachte Solarzellen, um die Energieversorgung der Satelliten sicherzustellen.



Entfaltungs- und Aus-schwingtest der Entfal-tungsmechanismen
Deployment and decay test of the deployment mecha-nisms

Voll entfaltetes Solar-modul während des Parabelflugs
Fully deployed solar array during parabolic flight



Autoren:

Dr.-Ing. Marco Straubel
Dr.-Ing. Martin Hillebrandt
Dr.-Ing. Martin Zander



Mit Sonnensegeln treibstofflos durchs All fliegen – um dies zukünftigen Raumfahrzeugen zu ermöglichen, werden vier Masten der NASA getestet, ergänzt durch den Entfaltungsmechanismus des DLR. Diese Masten spannen normalerweise ein Segel von 23 m x 23 m mit einem Gewicht von 30 kg auf und konnten am Boden mit Hilfe von Stützwagen getestet werden. Aufgrund der Größe des Segels ist es jedoch möglich, einen einzelnen Mast im Flugzeug zu testen. Für den Versuch belasteten spezielle Kraftaufbringvorrichtungen den Mast. Die aufgebrauchten Kräfte simulieren die realen Belastungen bei der Segelentfaltung und der gewünschten Segelspannung.

Mit den Parabellflugexperimenten erfolgte der Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität der aufrollbaren Masten und die gelungene Demonstration des eigenständigen Wiedereinfahrens des Instrumentenmasts und der Solarmodule.

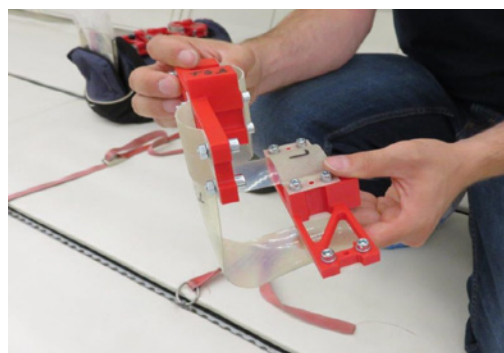
Inspiziert von der Natur – vom Insektenflügel zum Satellitenbauteil

Ein von Ohrenkneiferflügeln inspiriertes Konzept stellt ein weiteres Experiment aus der Grundlagenforschung der entfaltbaren Strukturen dar. Die selbstentfaltbare Trägermembran mit 3D-gedruckten Versteifungselementen ist ein Anbauteil für CubeSats (würfelförmige Kleinsatelliten). Die Tests des Prototypen konnten aufgrund der kleinen Abmessungen sogar im Freiflug stattfinden. Das Konzept dient künftig auch für Bremssegel oder Sonnenschilde. Gemeinsam mit der NASA, die eine Variante der Versteifungselemente erstellt hatte, führt das DLR die Ergebnisse zusammen.

Festkörpergelenke für Klappsyste

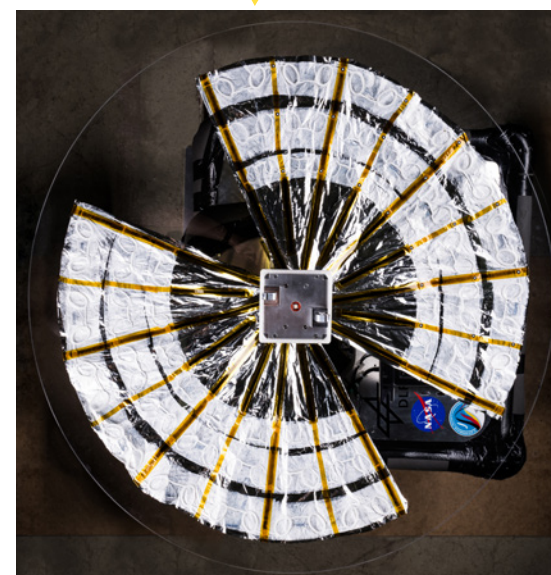
Auch klassische abklappbare Solarmodule lassen sich mit deformierbaren Faserverbundstrukturen verbessern. Die dabei genutzten scharnierartigen Gelenke verbinden viele verschiedene Funktionen, wie Abklappen, Halten und Verriegeln. Alternativ orientieren sich die Gelenke des DLR an aufrollbaren Metallmaßbändern. Die hier verwendeten einseitig gekrümmten Faserverbundbänder sind allerdings hinsichtlich der erzeugten Aktuierungsmomente optimiert und ergeben ein effektives integriertes Gelenk, das alle oben genannten Funktionen vereint.

Alle Versuche haben die Erwartungen erfüllt und teilweise sogar übertroffen.



Integriertes Festkörpergelenk für Solarmodule aus festen Paneelen
Integrated living hinge for solid solar array panels

Selbständige Entfaltung der bionisch inspirierten Membranen im Freiflugbereich des Parabellflugzeugs
Deployment of the bionically inspired membranes within a free-floating area of the Zero-G-aircraft



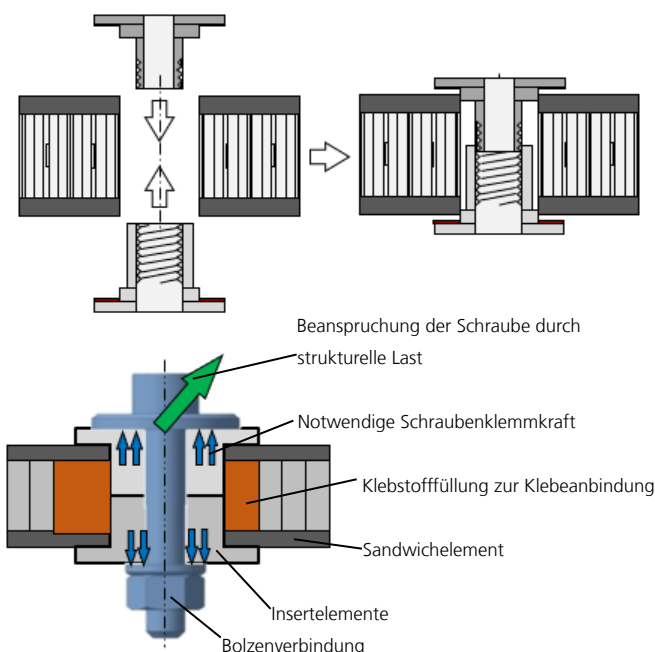
Inserts neu gedacht. Mittels 3D-Druck zum perfekt integrierten Insert!

Inserts rethought. 3D printing for a perfectly integrated insert!

Summary

Inserts are ideally suited as load introduction elements in sandwich structures. In practice, however, their integration is often associated with challenges. Typical problems are insufficient quantities of adhesive or trapped air bubbles between the insert and the surrounding material. Due to the often complex honeycomb structures, these strength-reducing defects are difficult and costly to detect even with elaborate, non-destructive testing methods. Using an intelligent adhesive distribution system and 3D printing processes, our institute has developed, manufactured and tested insert concepts that enables a safe and defect-free integration into sandwich structures.

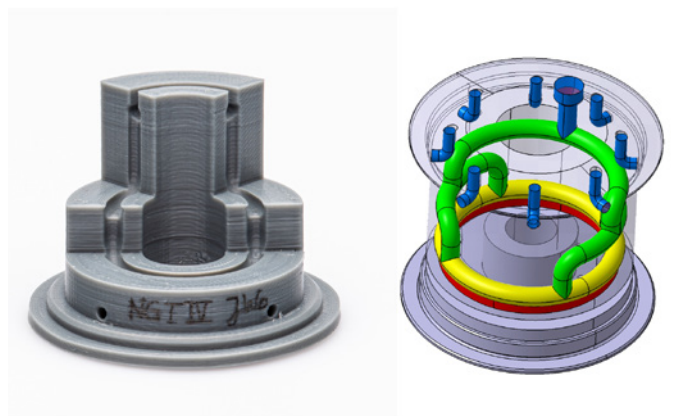
Montage und Komponenten einer Insert-Lasteinleitung in einem Sandwichelement
 Assembly and components of an insert load application into a sandwich element



Aus dem Leichtbau sind Sandwichstrukturen nicht mehr wegzudenken. Die Gründe dafür liegen in ihrer hohen gewichtsbezogenen Biegesteifigkeit und Beulstabilität. Üblicherweise bestehen Sandwichelemente aus zwei dünnen zug- und druckfesten Deckschichten und einem dazwischen liegenden leichten und druckfesten Kern. Diese Kombination sorgt für die hervorragenden Leichtbaueigenschaften. Das gilt besonders, wenn die Deckschichten aus dünnen Kohlenstofffaser (CFK)- oder Glasfaserkunststoffverbunden (GFK) bestehen. Als Kernmaterialien kommen Waben oder Schäume aus Kunststoff oder Metall sowie auch leichte Hölzer (z. B. Balsa) zur Anwendung. Eine große Herausforderung bei der Sandwichbauweise sind jedoch die ansonsten vielfach bewährten Schraubverbindungen. Denn bei Durchgangsverschraubungen besteht die Gefahr, den Kern zusammenzudrücken. Die am Institut entwickelten Inserts lösen dieses Problem, indem sie die Kräfte gleichmäßig einleiten, verteilen und eine Komprimierung des Kerns sicher verhindern.

Nutzen und Notwendigkeit von Insertelementen

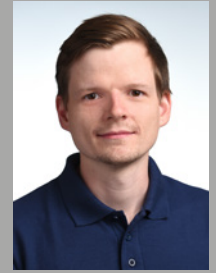
In der Praxis sind Sandwichstrukturen mit vielfältigen Anforderungen konfrontiert. Zur Montage, Wartung, Reparatur und Verwertung/Nachhaltigkeit sind häufig lösbar Schraubverbindungen notwendig. Eine direkte Verschraubung von Sandwichelementen ist zwar technisch realisierbar, allerdings mit der Gefahr verbunden, das weiche Kernmaterial zusammenzudrücken und die Tragfähigkeit des Sandwichelements erheblich zu verringern. Mit Hilfe von sogenannten Insertelementen lässt sich dieses Problem umgehen. Insertelemente werden zwischen der Schraube und dem Kernmaterial eingesetzt und entlasten somit den Kern. Über die großflächige Kräfteinleitung lassen sich weitaus höhere Kräfte übertragen als bei einer direkten Verschraubung ohne Inserts. Dieses Prinzip ist aktuell Stand der Technik.



3D-gedrucktes Insert mit integriertem Kanalsystem zur Klebstoffverteilung
 3D-printed insert with integrated channel system for adhesive distribution

Autoren:

Marcel Andres, M. Sc.
Dipl.-Ing. Johannes Wolff

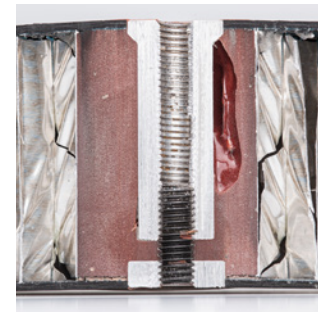


Herausforderungen bei der Insertmontage

Zur Anbindung eines Inserts an das umliegende Kernmaterial sowie zur Fixierung dient Klebstoff. Auf Grund der komplexen Kernmaterialstruktur (häufig Wabenelemente) und der schlechten Einsehbarkeit ist dieser Montageschritt besonders fehleranfällig. Unzureichende Klebstoffmengen oder Lufteinschlüsse zwischen Insert und Kernmaterial führen zu typischen Fehlern, welche die Insert-Performance reduzieren. Selbst mittels komplexer und nicht zerstörender Testmethoden, wie z. B. der Computertomographie, lassen sich diese Fehlstellen kaum identifizieren. Aufgrund der erheblichen Kosten finden diese Testmethoden in der Praxis nur selten Anwendung. Eine bewusste Überdimensionierung der Kräfteinleitungselemente ist daher die Realität.

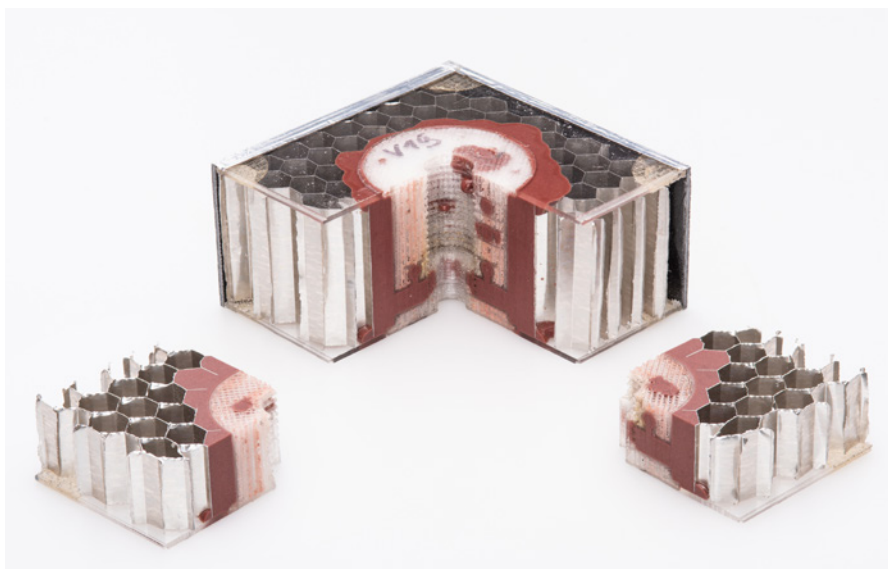
Mittels 3D-Druck und Klebstoffverteilungssystemen zum Erfolg

Um die Nachhaltigkeit und das Leichtbaupotenzial deutlich zu verbessern, hat sich unser Institut dieser Herausforderung gestellt und das klassische Insert neu gedacht. Mittels moderner Fertigungsverfahren des 3D-Drucks, wie dem Fused Deposition Moulding oder dem Stereolithografieverfahren, entstehen Inserts, die durch ein integriertes Klebstoffverteilungssystem eine sichere, reproduzierbare und fehlerfreie Montage und Platzierung der Inserts ermöglichen. Umfangreiche Untersuchungen zum 3D-Druck selbst und die Optimierung der Kanalgeometrien haben zu Inserts geführt, die sich perfekt in die Sandwichstrukturen einbetten lassen. Verschiedene Konzepte wurden inzwischen überprüft, gefertigt sowie an Sandwichelementen mit einer Dicke von bis zu 40 mm erfolgreich getestet. Je nach Anforderungsprofil des Inserts ist eine Materialanpassung möglich. Zur Auswahl stehen neben etablierten 3D-Druck-Materialien außerdem Hochleistungs-Thermoplaste, z. B. PEEK (Polyetheretherketon), wie unsere Labortests bewiesen haben.



Typischer Lufteinschluss im Klebstoff einer konventionellen Insert-Lasteinleitung

Trapped air bubble in a conventional insert load introduction



Fehlerfreie Integration des Inserts in ein Sandwichelement

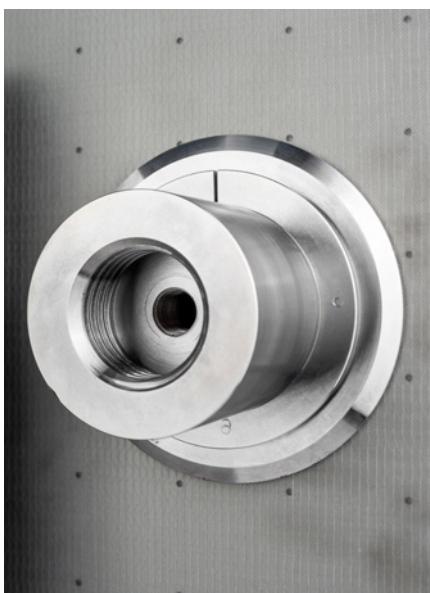
Defect-free integration of an insert into a sandwich element

Stärker am Wind – ein neues Verbindungskonzept für Windkraftrotorblätter

A stronger root connection for wind turbine blades

Summary

As onshore rotor blades keep growing in size to minimise the cost of wind energy, conventional blade root connections are reaching their limits. Road transport is impossible for a blade root diameter of more than 4 m, since the clearance under bridges is limited to about 4.5 m. Our institute is developing a novel blade root connection using radially and axially pretensioned bolts (RAX) and fibre metal laminates (FML). With RAX and FML, the strength of the blade root connection can significantly be increased, thus enabling rotor blades with 150 m in length but only 4 m blade root diameter. Large-scale bearing tests have proven the superior strength of the RAX-FML connection.



Faser-Metall-Laminat (FML) mit RAX-Verbindung.

Das Lochmuster in den Metallblechen ermöglicht die Infusion des FML.

Fibre Metal Laminate (FML) with RAX connection. The hole pattern in the metal sheets enables infusion of the FML.

Mehr regenerative Energie, insbesondere mehr Windenergie, heißt das Gebot der Stunde. Das geht vor allem mit immer größeren Windenergieanlagen (WEA). Damit sollen die Kosten der Stromgewinnung und der Platzbedarf für Windparks weiter sinken. Ohne Innovationen können die WEA aber nicht beliebig weiterwachsen. Unser Institut entwickelt daher neuartige Technologien zur Vermeidung eines absehbaren Nadelöhrs: den Blattanschluss, also der Verschraubung von Rotorblatt und Nabe.

Es wird eng

Die Hersteller von WEA liefern sich ein Wettrennen um immer größere Anlagen. Im Jahr 2021 haben Rotorblätter für WEA an Land (onshore) eine Länge von 80 Metern übertraffen; auf dem Meer (offshore) sind es bereits über 100 Meter. Rotorblätter größer zu skalieren ist nicht trivial. Aktuell limitiert der Blattanschluss die Entwicklung noch längerer Onshore-Rotorblätter. Übliche Blattanschlussverbindungen stoßen ab einer Blattlänge von etwa 100 Metern an ihre Grenzen. Ein solches Rotorblatt erfordert einen Durchmesser am Blattanschluss von etwa 4 Metern. Hier liegt die Grenze für den Straßentransport, denn die Durchfahrthöhe unter Brücken ist oft auf 4,5 Meter begrenzt. Für Offshore-Rotorblätter ist das kein Problem. Sie lassen sich üblicherweise in Hafennähe produzieren und direkt auf ein Schiff verladen. Es gibt aber nur wenige Onshore-Rotorblätter, die auf ihrem Weg von der Fabrik zur WEA keine einzige Brücke unterqueren müssen.

Starke Konzepte

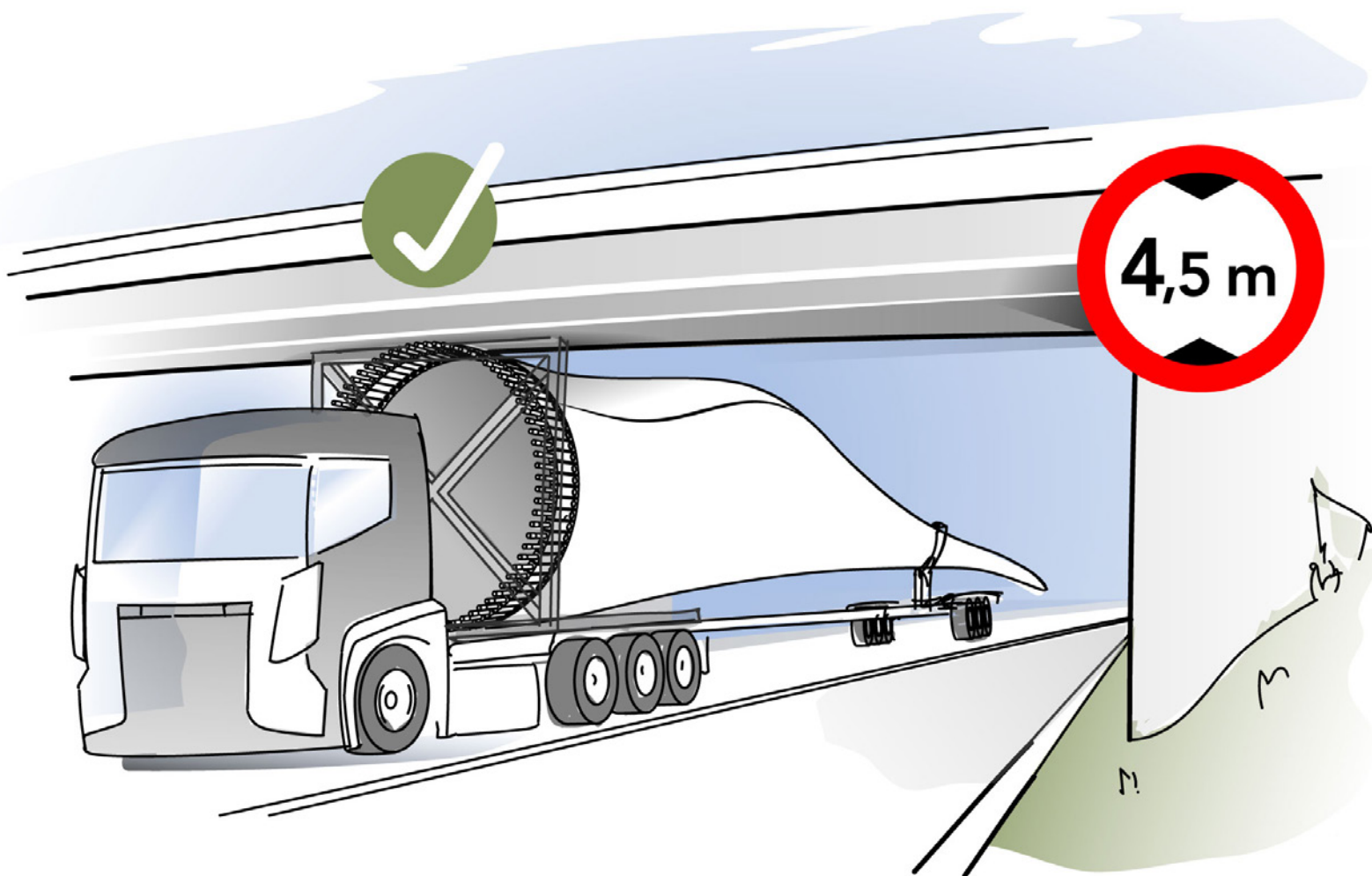
Um diesen Engpass zu überwinden, entwickelt unser Institut zwei neue Technologien: RAX und FML. Eine neuartige Bolzenverbindung mit **radial und axial vorgespannten Bolzen (RAX)** und **Faser-Metall-Laminaten (FML)** ist um ein Vielfaches belastbarer als übliche Blattanschlussverbindungen. Die Berechnungen zeigen, dass damit die mögliche Blattlänge für Onshore-Rotorblätter von 100 Meter auf 150 Meter anwachsen kann, denn aufgrund der überragenden Festigkeit benötigt eine Verbindung mit RAX und FML für ein 150-Meter-Blatt nur 4 Meter Wurzeldurchmesser. Somit ermöglicht der RAX-FML-Anschluss noch deutlich größere Onshore-Turbinen und damit letztendlich geringere Strompreise.

Neue Grenzen

Rechnerisch sieht es also vielversprechend aus, aber halten die Annahmen einer Überprüfung stand? Dafür zieht eine Prüfmaschine in sogenannten Lochleibungstests mit bis zu 10 Mega-Newton – das entspricht 1.000 Tonnen – an einem RAX-Bolzen, bis auch das stärkste FML nachgibt. Zusätzlich simulieren Ermüdungsversuche mit wechselnden Lasten die Beanspruchungen in 20 Jahren Betrieb. Im Vergleich zu konventionellen Verbindungen ergibt sich eine mehr als doppelt so hohe Lochleibungsfestigkeit sowohl unter statischer als auch zyklischer Beanspruchung. Insgesamt bestätigen die Versuche alle Annahmen aus der Berechnung.

Autor:

Lutz Beyland, M. Sc.



Eine besondere Herausforderung ist die Fertigung dickwandiger FML, zumal in der Rotorblattfertigung aus Kostengründen typischerweise das Vakuuminfusionsverfahren eingesetzt wird. Die Metalllagen lassen nun einmal kein Harz durch. Damit eine Tränkung in Dickenrichtung dennoch funktioniert, sind in die Metalllagen kleine Löcher eingebracht, durch die das Harz fließen kann. Vorab helfen Fließsimulationen, die Lochabstände und -durchmesser so zu optimieren, dass eine schnelle, gleichmäßige und vollständige Durchtränkung des Bauteils ermöglicht wird. Bei der Auswahl des favorisierten Lochmusters ist zu berücksichtigen, dass die perforierten Metallfolien nicht an Festigkeit verlieren dürfen. Bisher haben Infusionsversuche an Bauteilen aus FML mit bis zu 20 mm Dicke die Simulationsergebnisse bestätigt. In den nächsten Monaten gilt es, zu zeigen, dass auch Bauteildicken von 35 mm möglich sind.

Dabei sind auch die Kosten stets im Blick. Die Metallbleche benötigen nicht nur eine Perforation, sondern auch eine Oberflächenvorbehandlung, um sich optimal mit dem Harz zu verbinden. Externe Partner können entsprechende Bleche mit passender Oberflächenvorbehandlung und Perforation auch in großem Umfang liefern. So ist die neue Verbindungstechnik nicht nur technisch überlegen, sondern auch wirtschaftlich absolut konkurrenzfähig zu den etablierten Lösungen.

Brücken limitieren den maximalen Durchmesser des Blattanschlusses von Rotorblättern

Bridges limit the maximum blade root diameter

Flugversuch am Boden – Realitätscheck für den Laminarflügel

Flight test on the ground – reality check for the laminar wing

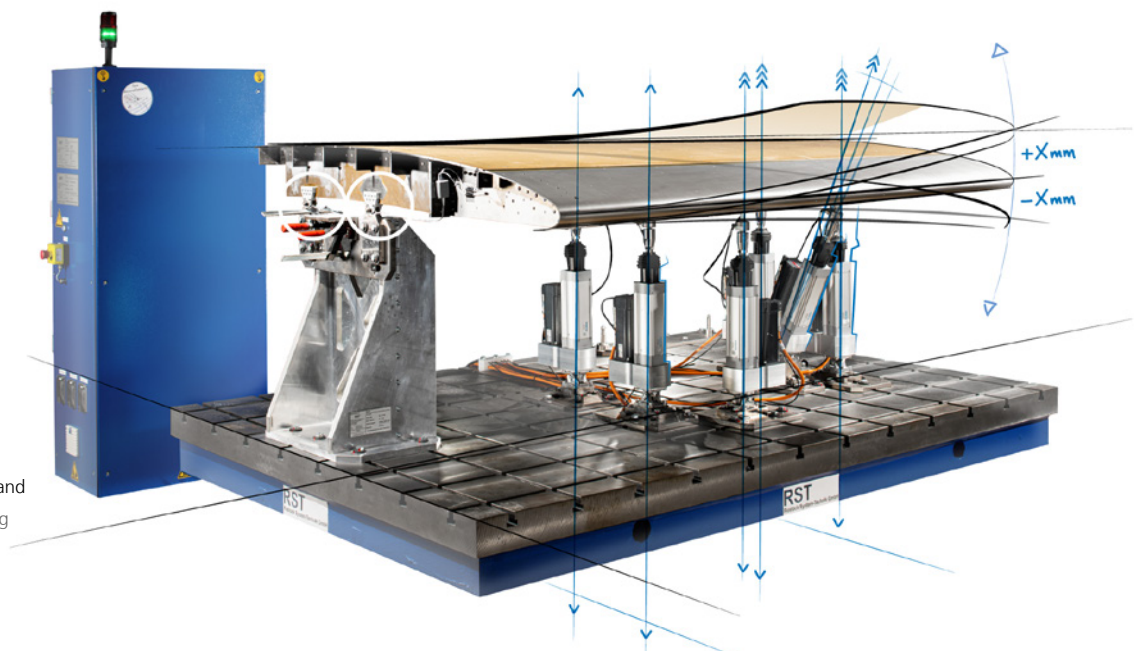
Summary

In order to address the topic of operational interchangeability for a wing leading edge in the challenging natural laminar flow environment, a novel leading edge design has been developed. The concept has been validated in a test rig. For demonstrating compliance with laminar flow requirements under cruise flight conditions and interchangeability under real ground conditions, the test rig allows the deformation of a physical demonstrator. Installation and interchange tests made with two leading edges show a high degree of repeatability of the installation process for the individual leading edge and the ability to replace the leading edge within a single night shift.

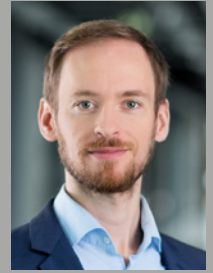
Widerstandsarme Tragflügelumströmungen ermöglichen signifikante Treibstoffeinsparungen und eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes von bis zu 8 %. Die Laminarflügeltechnologie rückt daher immer mehr in den Fokus der Verkehrsflugzeugentwicklung. Die strukturellen Herausforderungen sind groß: Neben den Anforderungen, die auch für einen konventionellen Tragflügel gelten, müssen Laminarflügel höchsten Ansprüchen hinsichtlich der Oberflächengüte genügen. So führen bereits kleinste Stufen, Welligkeiten oder hervorstehende Nietköpfe zum Umschlag der laminaren Grenzschicht in eine turbulente. Eine eigens entwickelte Flügelvorderkante ermöglicht nun den Erhalt der laminaren Strömung und ein angepasstes Anbindungskonzept die schnelle Austauschbarkeit.

Betriebsaspekte im Blick

Erstmals in der Entwicklung der Laminarflügeltechnologie setzt sich unser Institut mit besonderem Schwerpunkt mit den Betriebsaspekten einer solchen Vorderkante auseinander. Um den hohen Anforderungen einer laminaren Strömung gerecht zu werden, nutzt die entwickelte Flügelvorderkante ein Anbindungskonzept, dessen umströmte Oberfläche frei von unnötigen Störungen ist. Die Fügestelle zwischen Vorderkante und Flügelschale weist durch geschickte Auswahl der Fertigungsprozesse nur eine minimale Stufe auf, die wenige Zehntel Millimeter nicht überschreitet. Dabei ist die mechanische Nietverbindung auf die Innenseite der Struktur verlegt. So bleibt die Strömungsoberfläche störungsfrei. Die Vorderkante bleibt austauschbar – nicht nur unter den Bedingungen der Erstmontage in einer klimatisierten Werkhalle, sondern auch bei Reparaturen weltweit, wenn das Flugzeug am Boden steht und der Flügel unter seiner eigenen Masse durchgebogen ist. Der Austausch erfolgt schnell und ohne jegliche Anpassungen, wie das sonst beispielsweise bei der Übertragung von Bohrlochmustern der Fall ist. Die innovative Vorderkante ist als austauschbares Modul zu betrachten. Ihre Struktur wurde auf diesen Anwendungszweck hin optimiert.



Der GBD integriert im Teststand
GBD integrated in the test rig



Autor:

Olaf Steffen, M. Sc.

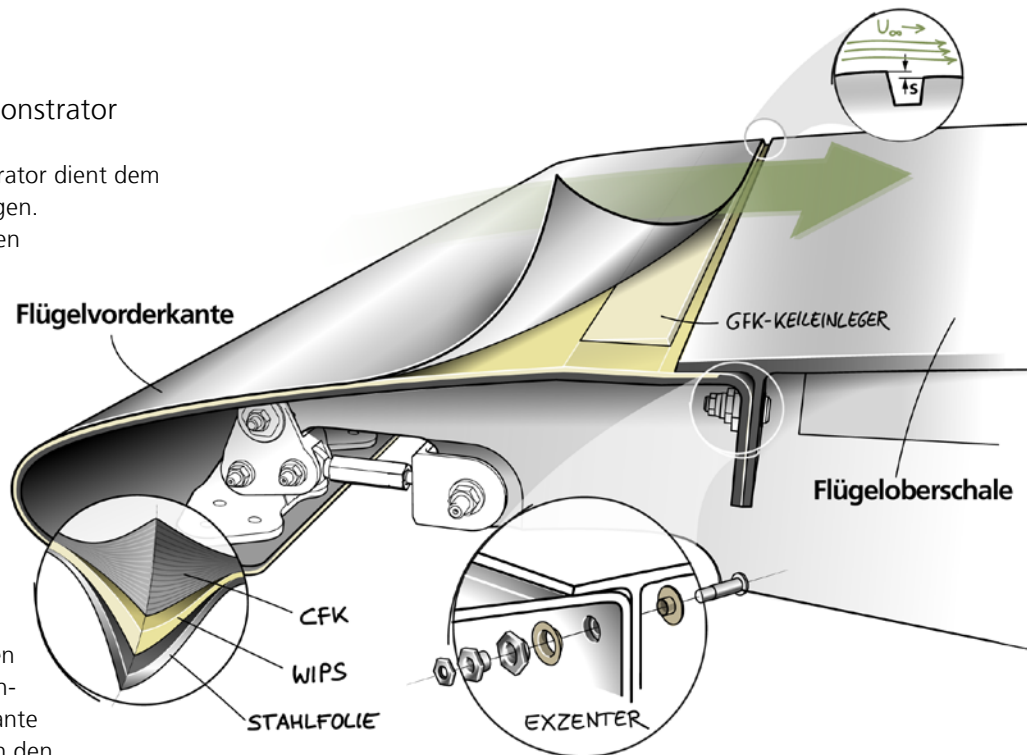
Nachweis mit Ground Based Demonstrator

Ein sogenannter Ground Based Demonstrator dient dem Nachweis der oben genannten Forderungen. Die Vorderkante ist an einem 2,3 m langen Flügelausschnitt montiert. Ein eigens entwickelter Prüfstand ermöglicht Verformungen des Demonstrators, die für eine repräsentative Durchbiegung einer Flügeloberfläche erforderlich sind – sowohl für den Reiseflug als auch für den Flügel am Boden.

In einer Serie von Montageversuchen mit zwei baugleichen Vorderkanten ist der Nachweis für einen erfolgreichen Vorderkantenaustausch ohne Anpassungen im Rahmen üblicher Bauteiltoleranzen gelungen. Dafür montieren die Forscherinnen und Forscher zunächst eine Vorderkante in der Neutrallage ohne Durchbiegung an den Flügelausschnitt und vermessen diese. Eine Wiederholung dieses Vorgangs mit derselben Vorderkante dient dazu, die Reproduzierbarkeit der Montage zu überprüfen. Anschließend erfolgt der Austausch der ersten Vorderkante gegen die zweite – zur Vergleichbarkeit zunächst ebenfalls in der Neutrallage.

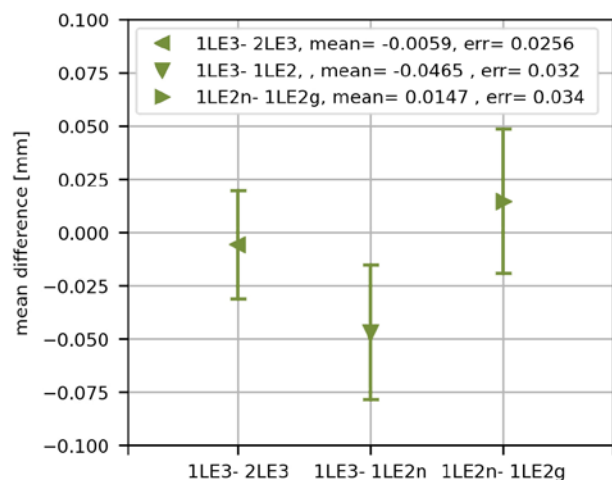
Die letzte Installation umfasst die Montage der zweiten Vorderkante im Verformungszustand des unter der Eigenmasse durchgebogenen Flügels. Die Ergebnisse dieser Austausch- und Montageversuche fasst die Abbildung zusammen: Die mittlere Differenz der erzielten Stufenhöhen zwischen den beiden Montagen der ersten Vorderkante liegt nahe null – die Wiederholgenauigkeit des Anbindungskonzeptes ist damit als sehr hoch anzusehen. Der Vergleich zwischen den Vorderkanten zeigt eine etwas größere mittlere Differenz. Die Demontage einer Vorderkante und Re-Installation im Verformungszustand des unter der Eigenmasse durchgebogenen Flügels gelingt bereits durch nur zwei Personen innerhalb von lediglich 3:43 Stunden.

Der erfolgreiche Abschluss der Austausch- und Montageversuche zeigt, dass Betriebsanforderungen, wie die schnelle Austauschbarkeit, dem Einsatz von Laminarflügeltechnologien in der Praxis nicht entgegenstehen.



Design der Multimaterial-, multi-funktionalen Vorderkante mit enger Einstellung der Stufenhöhe und schneller Austauschbarkeit durch Einsatz von Exzenterbuchsen an der Verbindungsstelle

Design of the multi-material, multi-functional leading edge with tight control of the step height and fast interchangeability through eccentric bushings at the joint



Mittlere Differenzen der Stufenhöhen zwischen den verschiedenen Installationen der Vorderkanten, gemessen in Neutrallage

Mean differences of step heights between different installations of the leading edges, measured in the neutral state

Geschickt eingefädelt – Landeklappenmontage mit einem mobilen Roboter

Outboard-flap module assembly with autonomous mobile units and lightweight jigs

Summary

Flying needs to become greener. There is no doubt - aircraft emissions are related to the in-service flight operation. However, resources and costs can be saved in aircraft assembly as well. Automation is the key and mobile units can play a key role in future high-rate scenarios. Light and flexible jigs with integrated tolerance compensation need to be realised, as today's rigid and heavy tools cannot be handled by mobile units. An assembly concept, developed with TU Braunschweig, demonstrates such an approach. It features an integrated hexapod to compensate gravity effects and for precise positioning. The setup has been used for demonstrating a module-assembly process for next-generation aircraft.

CAD-Modell des mobilen Roboters mit Montagevorrichtung und aufgenommenem Landeklappenmodul

CAD model of the mobile manipulator with lightweight assembly jig and picked-up flap module

Fliegen muss grüner werden – da sind sich alle einig. Für den Löwenanteil an Emissionen und Ressourcenverbrauch in einem Flugzeugleben ist ohne Frage der Flugbetrieb verantwortlich. Doch auch bei Flugzeugproduktion und -montage lassen sich Ressourcen, Zeit und Kosten einsparen. Ein wichtiger Schlüssel dazu heißt Automatisierung. Mobile Roboter spielen in zukünftigen Modulmontage-Szenarien eine wichtige Rolle, um die steigenden Fertigungs- und Montageraten zu erreichen. Die Tragfähigkeit der Roboter ist jedoch begrenzt. Heutige schwere, massive Montagewerkzeuge sind mit mobilen Robotern nicht nutzbar. Stattdessen sind Leichtbau-Montagewerkzeuge mit der Fähigkeit, Toleranzen aktiv zu kompensieren, gefragt. Ein zusammen mit der TU Braunschweig entwickeltes Montagekonzept kombiniert eine besonders leichte Vorrichtung mit einem integriertem Hexapod zur Kompensation von Fertigungsabweichungen und gravitationsbedingten Verformungen und ermöglicht so die exakte Positionierung. Mobile Roboter lassen sich nun für die Handhabung einsetzen und garantieren größtmögliche Flexibilität des Produktions- und Montageprozesses.

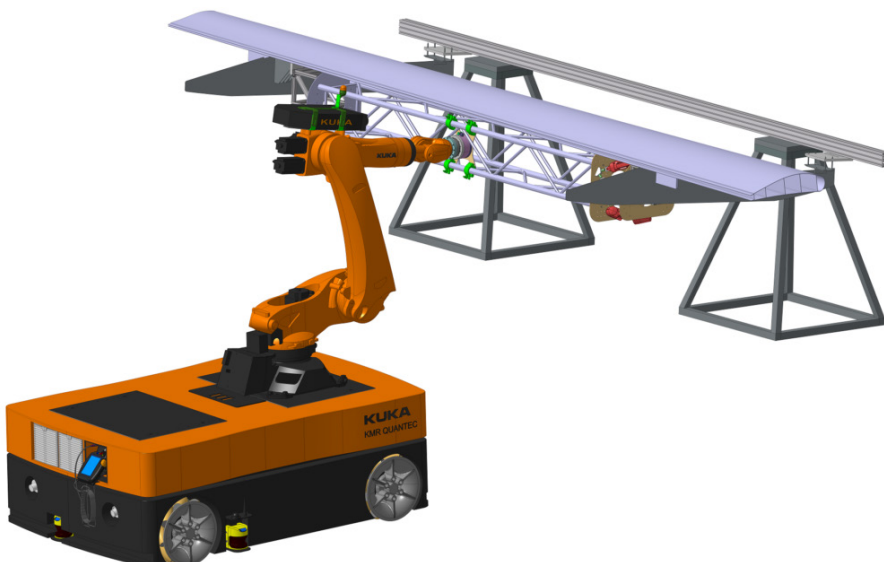
Herausforderung Landeklappenmontage

In modernen Flugzeugen bestehen die Steuerflächen aus Faserkunststoffverbunden. Sie sind dünnwandig und ihre schlanke, langgestreckte Form bedingt eine hohe Nachgiebigkeit. Ungestützt verformen sich die Bauteile bereits durch ihr Eigengewicht, was die Montagevorrichtung ausgleichen muss.

Das Institut für Mechanik und Adaptronik der TU Braunschweig und unser Institut haben in einer Pilotstudie nach leichten, flexibleren Lösungen für die Montage von Landeklappenmodulen gesucht. Das Steuerflächenmodul besteht aus dem Steuerflächenkörper und zwei sogenannten Aero-Flap-Support-Baugruppen, welche die Steuerflächenkinematik enthalten und die Anbindung des Moduls an den Flügel darstellen.

Balance zwischen Nachgiebigkeit und Präzision finden und nutzen

Die Vorrichtung enthält Aktoren, die mit fein gesteuerten Bewegungen die Fügestellen des Moduls präzise positionieren und dabei gravitationsbedingte Verformungen kompensieren. Diese Fähigkeit des aktiven Einstellens ist essenziell, wenn auf hochpräzise und meist schwere Vorrichtungen verzichtet werden soll.



Autor:

Dr.-Ing. Erik Kappel



Automatisiertes Montagekonzept für Steuerflächenmodule

Die Pilotstudie untersucht die hochratenfähige Montage eines Landeklappenmoduls eines Mittelstrecken-Flugzeugs mit einem mobilen Roboter sowie einer aktiven Montagevorrichtung. Die Studie umfasst die Konzepterarbeitung, die Auslegung und die Umsetzung der Montagevorrichtung, den Zusammenbau des 7,5 m langen Steuerflächenmodul-Repräsentanten sowie die Erprobung der Montageaufgabe. Ein aus sechs Aktoren bestehender Hexapod bildet das Kernstück der Leichtbau-Montagevorrichtung. Es gleicht Gravitationseffekte und Fertigungstoleranzen aus. Der Roboterarm montiert das Modul am Flügel und koppelt die Montagevorrichtung ab. Im Anschluss kann die mobile Einheit die nächste Montageaufgabe übernehmen oder auch eine andere Tätigkeit im industriellen System ausführen.



Mobiler Roboter mit Montagevorrichtung und eingespannter Landeklappe in Montageposition
Mobile robot with lightweight assembly jig and picked-up flap module in assembly position

Credit: Markus Hörster,
TU Braunschweig

Zukunftsperspektive: KI-gestützter Prozess

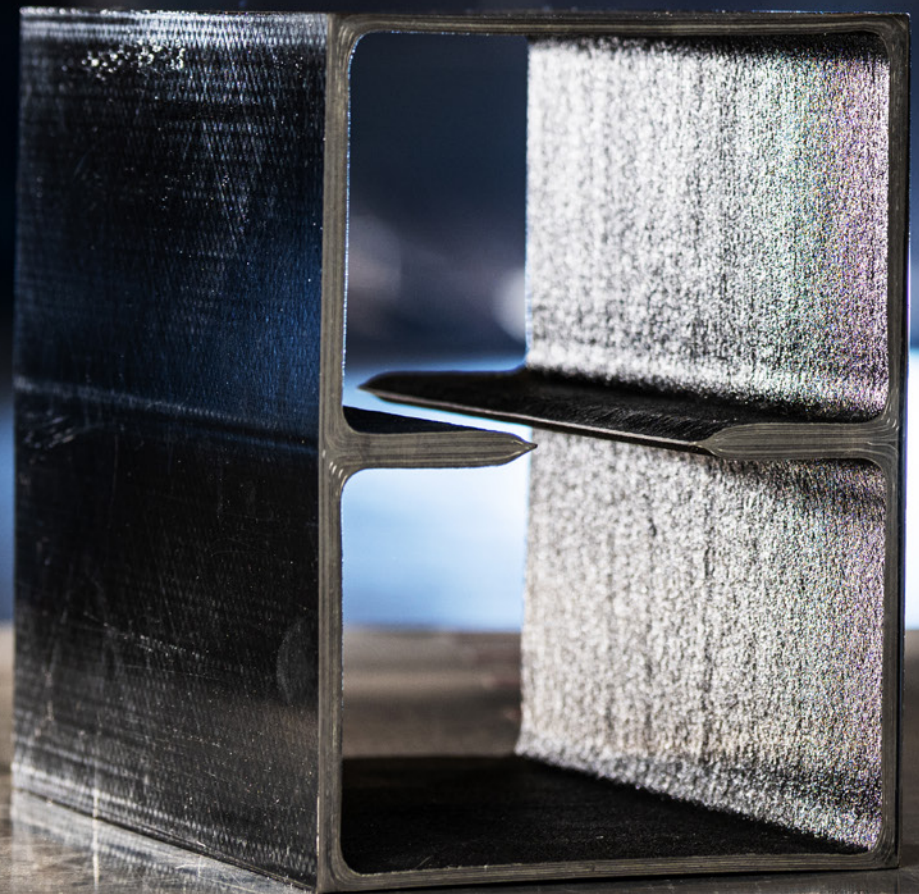
Die Ergebnisse bilden die Grundlage für zukünftige echtzeitfähige Robotersteuerungen mittels neuronaler Netzwerke. So soll es gelingen, die Nachgiebigkeiten und Positionierungstoleranzen der Leichtbau-Montagevorrichtung der mobilen Robotereinheit effizient auszugleichen. Diese Funktionalität ist essenziell, um Toleranzanforderungen für Vorrichtungen zu senken und Kosten zu sparen.

Ein auf Machine Learning basierender Algorithmus gibt Auskunft über die Montierbarkeit und schlägt optimale Einstellparameter für die Fügeelemente vor. Standardisierte Vermessungsstrategien auf Bauteil- und Baugruppenlevel sind essenziell, um die Eingangsinformationen verwertbar zu konditionieren.

Zusammen versprechen diese Technologien effiziente Prozesse, welche die Montage sicherstellen und bereits Aufgaben des Trimmings erfüllen. Dies verkürzt Montagezeiten in der final assembly line, spart Kosten und leistet einen Beitrag zum angestrebten Plug&Fly-Montageszenario einer Hochratenproduktion.

FERTIGUNG

Production



Wie bekomme ich mehr aus meinen Daten – Composite Companion _52

How do I get more out of my data – Composite Companion

Ökologischer Fliegen –

Analyseansatz der Nachhaltigkeitsbetrachtung in SAUBER 4.0 _____ 54

Ecological flying – analysis approach of the sustainability consideration in SAUBER 4.0

Ökologische und ökonomische Analyse der Suction Rib _____ 56

Ecological and economic analysis of the Suction Rib

Montage des Suction Rib-Funktionsdemonstrators _____ 58

Assembly of the Suction Rib functional demonstrator

Hochpräzise CNC-Roboter für die additive Fertigung von

Faserverbundstrukturen _____ 60

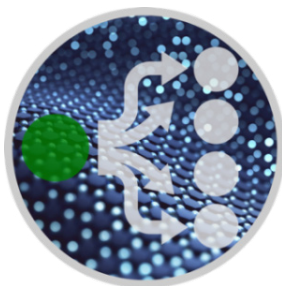
High-precision CNC robots for additive manufacturing of fibre-reinforced structures

Wie bekomme ich mehr aus meinen Daten – Composite Companion

How do I get more out of my data – Composite Companion

Summary

Sustainably manufactured structures and production processes are essential to ensure environmental protection. A reduction in resource requirements in the manufacturing of lightweight structures made of fibre composites can be achieved in various ways; for example, by increasing the service life or avoiding defects. To achieve these goals, a good understanding of the manufacturing process used and the material properties is important. In lightweight fibre composite construction, the material properties of the resulting laminate are created during manufacturing and are therefore significantly influenced by the manufacturing process. The figure shows an example of an automated manufacturing process and schematically the scatter of characteristic values in the component due to the process. If these characteristic value scatterings, or the resulting interactions, are not known, this can lead to scrap. The full potential of the structure cannot be exploited. Measurements during the manufacturing process, as shown in the figure, and the interpretation of the data can close this information gap.

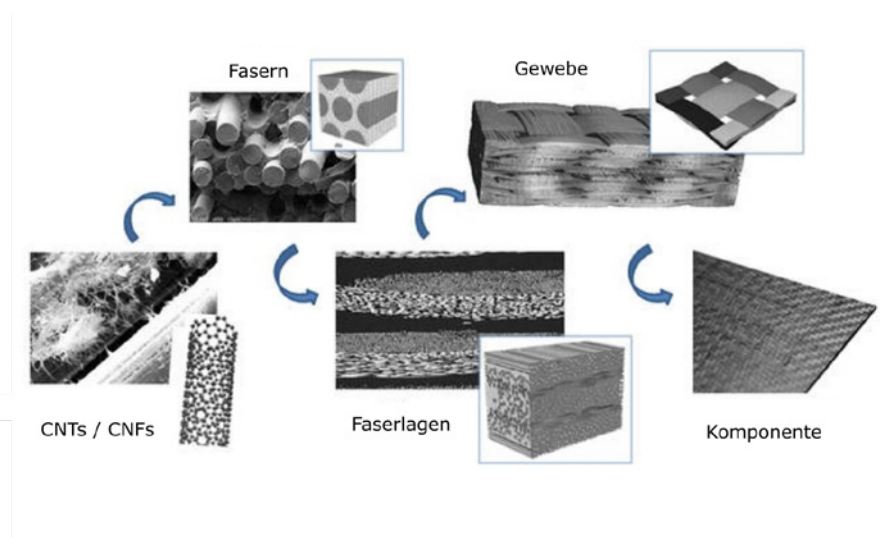


Logo Composite Companion
Logo Composite Companion

Der Composite Companion erlaubt durch eine wohldurchdachte Strukturierung der Daten die einfache Einbindung von experimentell und numerisch ermittelten Kennwerten. Er legt die Grundlage für effiziente Datenanalyse von Material- und Prozesskennwerten von Faserverbunden. Der Composite Companion ermöglicht es, verschiedene Prozesse, Skalen und zeitliche Auflösungen zu berücksichtigen. Durch die Realisierung als SaaS (Software-as-a-Service) ist die Integration in verschiedenste Anwendungen einfacher möglich.

Ziel: Optimierung von Prozessen und Verständnis von Materialien über Daten

Nachhaltig gefertigte Strukturen und Herstellungsprozesse sind unabdingbar, um den Schutz der Umwelt sicherzustellen. Durch eine Erhöhung der Lebensdauer oder durch die Vermeidung von Ausschuss ist eine Reduktion des Ressourcenbedarfs bei der Herstellung von Leichtbaustrukturen aus Faserverbunden erreichbar. Um diese Ziele zu erreichen, ist ein gutes Verständnis des verwendeten Fertigungsprozesses und der Materialeigenschaften wichtig. Im Faserverbundleichtbau entstehen die Materialeigenschaften des resultierenden Laminats während der Herstellung und werden daher durch den Herstellungsprozess maßgeblich beeinflusst. Beispielhaft ist ein automatisierter Fertigungsprozess und schematisch die Streuungen der Kennwerte im Bauteil aufgrund des Prozesses und der variierenden Faserablage dargestellt. Sind diese Kennwertstreuungen oder die daraus resultierenden Wechselwirkungen nicht bekannt, kann dies zu Ausschuss führen. Messungen während des Fertigungsprozesses, wie sie im Bild dargestellt sind, und die Interpretation der Daten können diese Informationslücke schließen.



Darstellung verschiedener Kompositarten und Skalen der Analyse
Illustration of different types of composites and scales of analysis

Autoren:

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



Herausforderung: geringe Datenmengen - verschiedene Datenformate, keine Standards - viel Variabilität

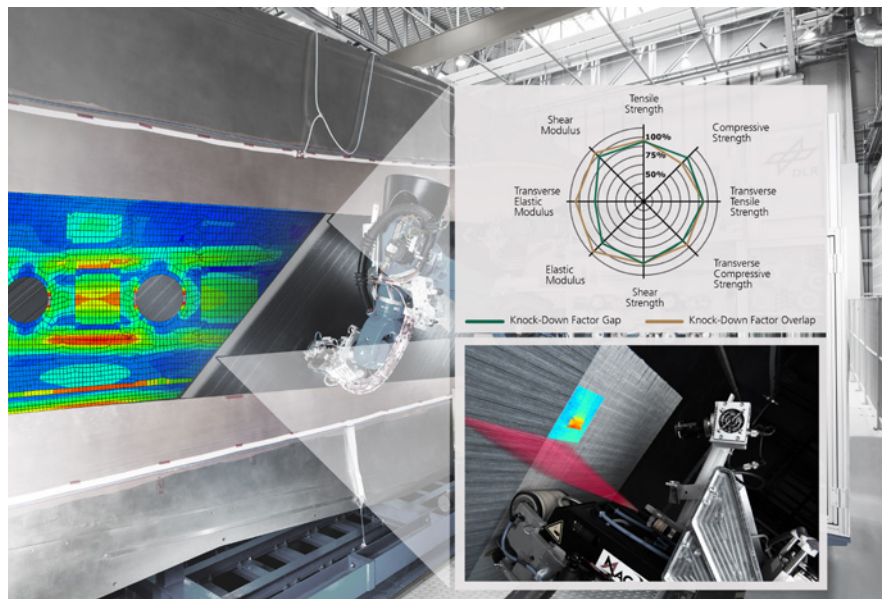
Heutzutage stehen verschiedenste Verfahren wie Data Analytics, Data Science, Machine Learning, KI, etc. zur Verfügung, um aus Daten Informationen zu extrahieren. Dabei ist es eine weit verbreitete Annahme, dass die Datenmenge nur groß genug sein muss, damit ein Ergebnis gefunden werden kann und es keinerlei Vorwissens hierfür bedarf. Als Belege werden Erfolge bei der Bilderkennung, Übersetzungsalgorithmen oder schachspielende Computer angeführt. Allerdings zeichnen sich gerade diese Bereiche zwar durch große Datenmengen, aber auch durch klar definierte Regeln aus. Für den Faserverbundleichtbau gibt es diese Bedingungen typischerweise nicht. Die Stückzahlen sind tendenziell klein und es gibt keine oder schwer formalisierbare Regeln. Für die Datenerhebung und Speicherung fehlen oft Standards und die Variabilität in den Daten ist groß. Um die Komplexität zu verdeutlichen: Es gibt verschiedene Faserverbunde (Gewebe, unidirektionale Lagen) und verschiedene Skalen (Mikroskala, Laminat, Struktur), welche jeweils spezifische Kennwerte haben.

Lösungsansatz: Composite Companion

Bei einem so hohen Maß an Komplexität helfen strukturierte Daten. Bei diesen findet eine Vorinterpretation der Daten durch eine geeignete Strukturierung statt. Die anschließende Analyse erfolgt mit bereits interpretierten Daten und nicht mit den reinen Rohdaten. Da Material- und Prozesskennwerte bereits durch Modelle definiert sind, müssen die Machine-Learning-Algorithmen diese nicht erst erkennen. Dies reduziert die Menge der notwendigen Daten und macht die Interpretation der Ergebnisse einfacher, nachvollziehbar und überprüfbar. Eine solche Strukturierung von Daten ist nicht trivial und erfordert viel Erfahrung. Im Rahmen der [Digitalisierungsstrategie des Instituts](#) wurde eine solche Strukturierung für Faserverbundmaterialien vorgenommen. Der Vorteil liegt auf der Hand. Die wohl-durchdachte Strukturierung der Daten erlaubt die einfache Einbindung von experimentell und numerisch ermittelten Kennwerten und gestaltet sie vergleichbar. Die Datenstruktur ist in einer Datenbank abgebildet und versucht, ein breites Spektrum von Applikationen zu adressieren. Sie berücksichtigt verschiedene Prozesse, Skalen und zeitliche Auflösungen. Die Softwareumsetzung ermöglicht eine einfache Anbindung an verschiedenste Software-Services, dargestellt in der Abbildung.

Was ist der Vorteil?

Durch die entwickelte Datenstruktur und das dazugehörige Expertenwissen ist eine Analyse von Messdaten zu verschiedenen Zeitpunkten im Lebenszyklus, über längere Zeiträume oder aus verschiedenen Chargen möglich. Dies beinhaltet Streuungen, statistische Untersuchungen und weitere Formen der Datenanalyse, die im Ergebnis die Identifikation von „Schwächen“ in Fertigungsprozessen ermöglichen. Durch die vorangegangene Strukturierung der Daten sind gezielte Prozessoptimierungen oder -verbesserungen realisierbar. Denn im Gegensatz zu einem unstrukturierten Ansatz haben die genutzten vorinterpretierten Daten eine klare Bedeutung. Mit dem Composite Companion als Datenmodell zur strukturierten Ablage vorinterpretierter Daten machen wir den Weg frei für solche Analysen und wollen in Zukunft Daten fachgerecht aufbereitet der Allgemeinheit zur Verfügung stellen.



Automatisierter Fertigungsprozess mit schematisch dargestellten Streuungen der Kennwerte im Bauteil
Automated manufacturing process with schematically displayed scattering of characteristic values in the component

Ökologisches Fliegen – Analyseansatz der Nachhaltigkeitsbetrachtung in SAUBER 4.0

Ecological flying – analysis approach of the sustainability consideration in SAUBER 4.0

Summary

In order to improve the sustainability of future aircraft, it is important to evaluate existing and new production technologies in terms of eco-efficiency. A fair comparison facilitates the construction and technology decision-making in the early aircraft design phase. Nowadays, production lines can be flexibly adapted to different products by integrating different technologies. For selected scenarios, the Eco-Efficiency Assessment Model (EEAM) is used in SAUBER 4.0 as a decision support system to assess the carbon footprint, material and energy flows, and direct costs to provide a detailed description of their drivers at unit process and category level. The aim is not only to choose the right technology, but also to improve these technologies by identifying the bottlenecks in terms of their eco-efficiency.

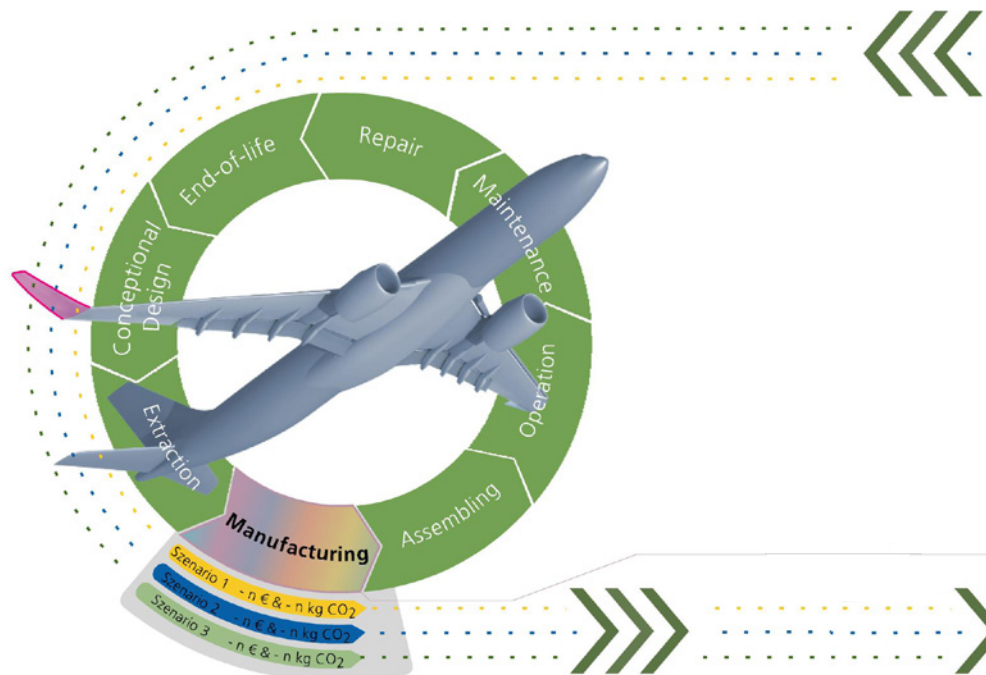
Das EEAM muss für dieses Ziel einige Voraussetzungen erfüllen:

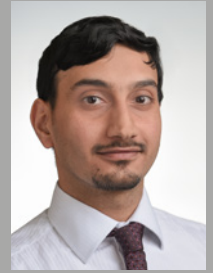
- einheitlicher Modellierungsansatz,
- transparente Datenaustauschformate mit intuitiven Visualisierungsansätzen der Elementarflüsse,
- flexible und transparente Datenbank der Einflussfaktoren,
- konsequente Erfassung der Datenquellen und Bewertung der Datenqualität,
- geeignete Ergebnis-Darstellungsformen für Entscheider für einen fairen und nachvollziehbaren Vergleich zwischen den technologischen Lösungen.

Viele technische Lösungen stehen bereit und viele weitere müssen noch entwickelt werden, um Fliegen umweltfreundlich und nachhaltig zu machen. Auf diesem Weg stellen sich immer wieder die Fragen: Wie weit sind wir und welche Lösung bringt uns weiter? Diese Fragen sind durch den Aufbau von Analysefähigkeiten zu beantworten. Grundsätzliche Ansätze für die Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten für einzelne Branchen existieren. Für die Luftfahrt benötigen die beteiligten Disziplinen in jeder Lebenszyklusphase, auf jeder Entscheidungsebene aber weitergehende, spezifische Ansätze. Im Projekt Smart & Sustainable RTM 4.0 (SAUBER 4.0) entwickeln wir gemeinsam mit Industriepartnern ein Unterstützungssystem für die Entscheidungsfindung bezüglich Verbesserung der Nachhaltigkeit, basierend auf dem am Institut aufgebauten Eco-Efficiency Assessment Model (EEAM). Durch die Erweiterung des EEAM werden Technologien und Produktionsszenarien für den Flugzeugbau hinsichtlich ihrer Wirkung auf Umwelt und Nachhaltigkeit, also hinsichtlich ihrer Ökoeffizienz, bewertbar.

Entscheidungshilfen für Technologieauswahl

Die Erweiterung des EEAM dient zur Bewertungsfähigkeit unterschiedlicher Fertigungstechnologien und Produktionsszenarien für den Bau von Flugzeugprimärstrukturen mit dem Ziel, bereits in der Produktherstellung Ressourcen- und Energieflüsse (Elementarflüsse) zu minimieren.





Autor:

Dr.-Ing. Ali Al-Lami

Was wurde, was wird und was soll zukünftig noch erreicht werden?

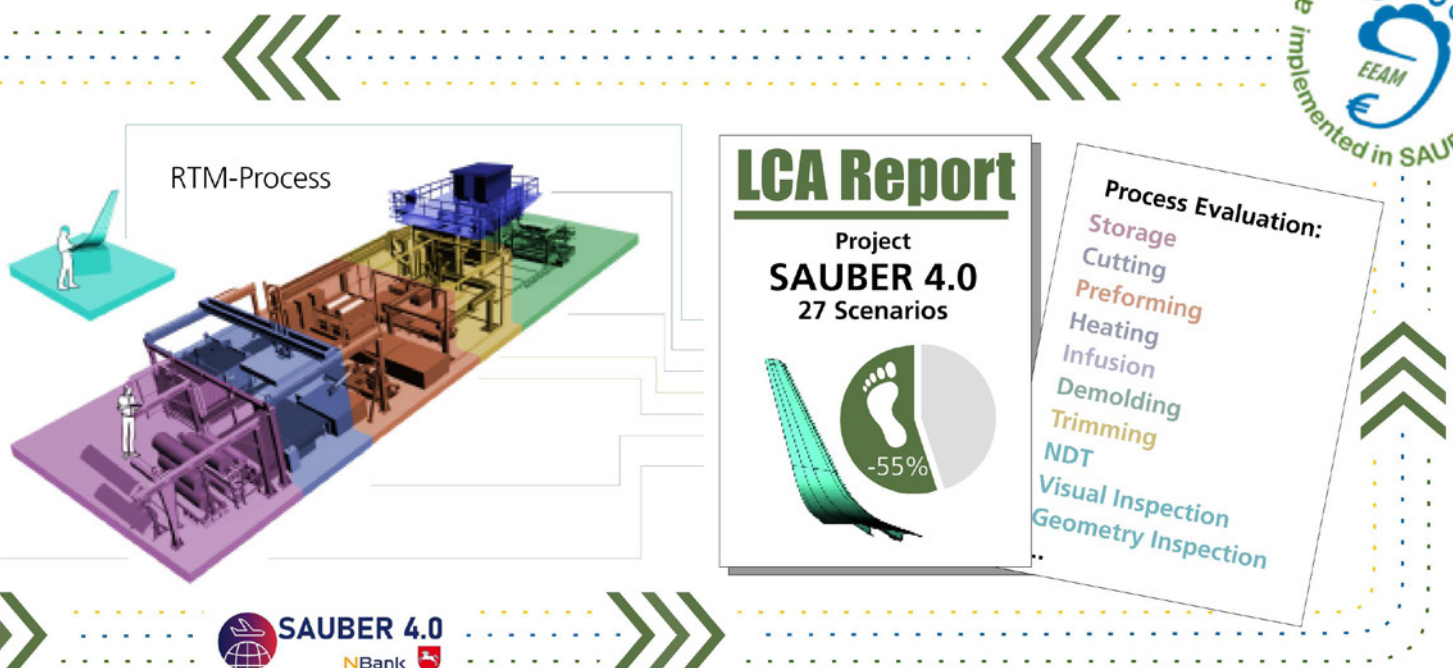
Für ausgewählte Szenarien einer RTM-Technologie mit definierten Systemgrenzen wurde durch das EEAM bereits eine Ökoeffizienz-Bewertung vorgenommen. Emissionsverursacher, Kostentreiber und kritische Teilprozesse wurden identifiziert. Dadurch sind Voraussetzungen geschaffen worden für eine Technologiebewertung und geeignete Weiterentwicklung.

Im Projekt SAUBER 4.0 erarbeitet das DLR mit seinen Partnern Vergleichsmöglichkeiten der Ökoeffizienz Bewertung in der Produktion von Faserverbundbauteilen. Die im Projekt generierten Daten stehen dann im EEAM Entscheidungsträgern zur Verfügung. Das Konsortium definiert gemeinsam Systemgrenzen, Produktionsszenarien und geeignete Bewertungsindikatoren für den Vergleich von Technologien hinsichtlich ihrer Öko-Effizienz.

Die detaillierten Bewertungen ausgewählter Technologien innerhalb definierter Produktionsszenarien im Projekt SAUBER 4.0 bilden die Grundlage, um Technologien auszuwählen, zu kombinieren und/oder weiterzuentwickeln. Darüber hinaus leitet sich aus der Bewertungsfähigkeit die Möglichkeit von Prognosen für künftige Produktionsszenarien ab. Bereits in frühen Entwicklungsphasen von Produkten und Prozessen kann durch diese Erweiterung des EEAM eine Einschätzung der Öko-Effizienz der Produktion erfolgen. In Zukunft soll diese Bewertung der Produktion als Teil einer Cradle-to-grave- bzw. Cradle-to-cradle-LCA auch in neuen Projekten mit dem EEAM durchgeführt werden, um die Datenbasis zu vergrößern und die Datenqualität für eine Bewertungsfähigkeit zu erhöhen.

Auf Cradle-to-gate-Daten basierendes LCA durch EEAM im Projekt SAUBER 4.0: ein Meilenstein zum Cradle-to-cradle-LCA

LCA based on cradle-to-gate data by EEAM in SAUBER 4.0: a milestone towards cradle-to-cradle LCA



Ökologische und ökonomische Analyse der Suction Rib

Ecological and economic analysis of the Suction Rib

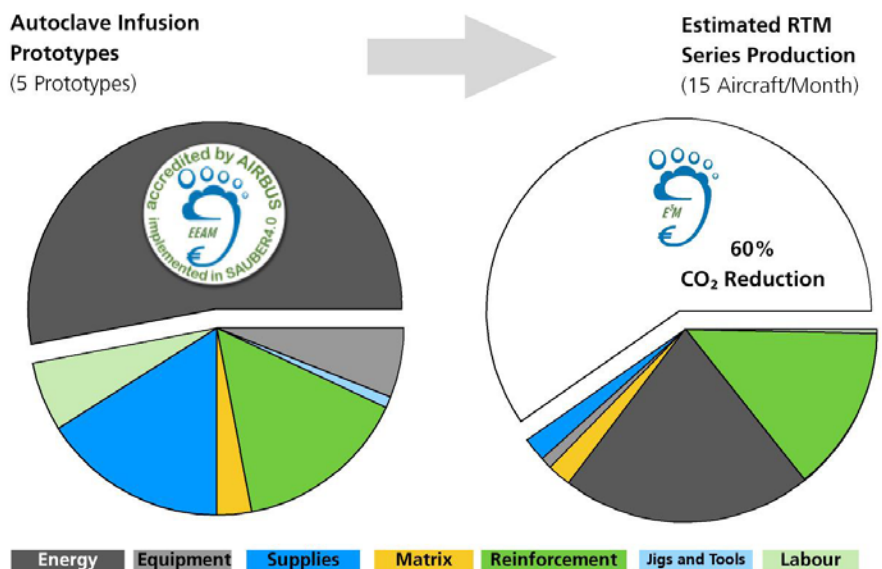
Summary

The adopted bottom-up approach in the Eco-Efficiency Assessment Model (EEAM) has major advantages and disadvantages. On the one hand, the generated results can be presented differently to fulfil the demands of multi-disciplinary decision-makers on different management levels. In addition, this bottom-up data-based eco-efficiency assessment of "as-is" laboratory prototypes production allows the establishment of a detailed technical-based estimation of the "as-if" industrial production. On the other hand, the main disadvantage is the high data collection and parametrisation efforts in such a bottom-up approach. Still, integrating default estimation scenarios as well as algorithms based on predefined design parameters in EEAM enables deriving the Eco-Efficiency Estimation Model (E³M) in the same bottom-up approach.

Eine der wirksamsten Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen eines Flugzeugs ist die Erhöhung seiner aerodynamischen Leistungseffizienz, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Mit diesem Ziel entwickelte das Team im Projekt HLFC-WIN im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms Clean Sky 2 (CS2) ein neues Konzept für einen Flügel mit aktiver Grenzschichtabsaugung zur Verlängerung der Laminarströmung während des Flugs.

Der Treibstoffverbrauch und damit der Schadstoffausstoß des Flugzeugs wird durch den laminaren Flügel in der Betriebsphase deutlich reduziert, aber die konstruktiven Änderungen haben in der Flügelfertigung ebenfalls ökologische Auswirkungen. Im Vergleich zur Betriebsphase sind diese zwar relativ gering, müssen aber auch bewertet werden, um unter verschiedenen Alternativen auch für die Fertigung die ökologisch und ökonomisch bestmögliche Lösung identifizieren zu können.

Die Berücksichtigung der vielfältigen Anforderungen an einen aktiv absaugenden Laminarflügel führte im betrachteten Fall zu einer relativ komplexen Struktur. Die Realisierung bedingt aufwendigere Fertigungsverfahren, deren ökonomische und ökologische Auswirkungen zu untersuchen und zu bewerten sind. Bewertungswerkzeuge, wie das Eco-Efficiency Assessment Model (EEAM), können Entwickler und Entscheidungsträger bei der Suche nach der optimalen Lösung unterstützen. Durch eine Erweiterung des EEAMs kann es nicht nur unterschiedliche vorgeschlagene „As-is“-Technologien bewerten, sondern auch die industriellen „As-if“-Szenarien in dem Bottom-up-Ansatz des neuen Eco-Efficiency Estimation Models (E³M) perspektivisch abschätzen.



Datenbasierende Bewertung der Elementarflüsse des "As-is"-Szenario im EEAM
Data-based elementary flows assessment of "as-is" laboratory scenario in the EEAM

Autoren:

Dr.-Ing. Ali Al-Lami
Dipl.-Ing. Andreas Schröder



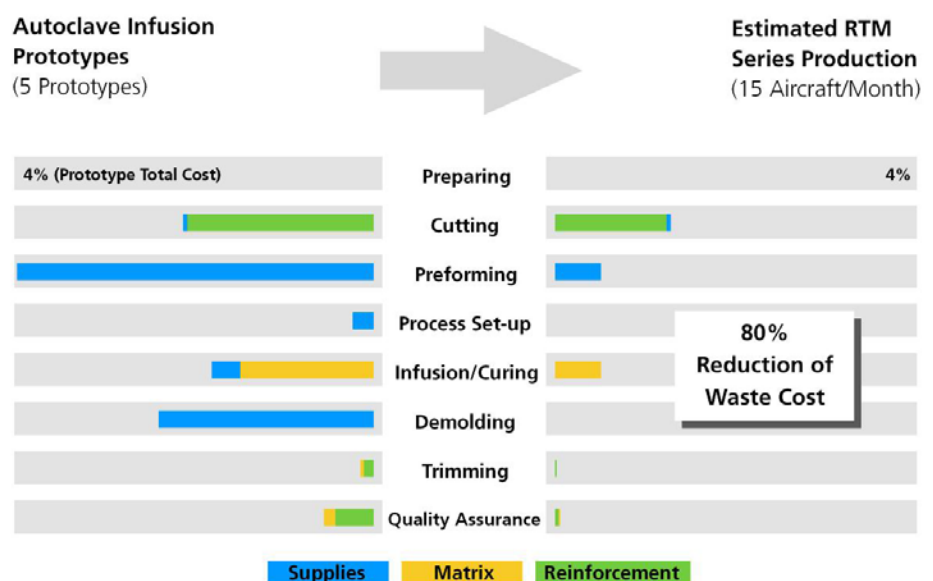
Wer will was wissen?

Da EEAM ein Produktionsbewertungstool ist, kann es die Verantwortlichen bei ökologischen und ökonomischen Entscheidungen hinsichtlich der Produktion von komplexen Strukturen unterstützen. Um eine effektive und effiziente Entscheidungshilfe zu gewährleisten, ist es essenziell, dass das Werkzeug EEAM den Anforderungen der Entscheidungsträger/-innen genügt. Für die Vielzahl der Entscheidungen auf unterschiedlichen Managementebenen, die in den Lebenszyklusphasen einer funktionalen Einheit in Bezug auf Ökoeffizienz getroffen werden müssen, gibt es kein Universaltool. Es ist wichtig, bestimmte Schlüsselindikatoren in festgelegten Systemgrenzen für die berücksichtigten Lebenszyklusphasen in definierter Qualität im jeweils passenden Tool zu betrachten. Darüber hinaus unterstützen die Ergebnisse des EEAM die Entwickler/-innen jeder Technologie in der Produktion dabei, ihre [Prozesse hinsichtlich Ökoeffizienz](#) weiterzuentwickeln. Auf der Produktentwicklungsebene stellt EEAM Daten aus der Produktion für eine globale Ökoeffizienz-Bewertung zur Verfügung.

In dem Projekt HLFC-WIN sowie in weiteren Projekten wurde deutlich, dass EEAM nicht nur die Kosten und den CO₂-Fußabdruck bewerten können sollte, sondern auch weitere Aspekte, z. B. Materialabfälle und Hilfsstoffverbrauch, berücksichtigen muss. Dabei dient die Betrachtung weiterer Indikatoren zur Identifikation erweiterter Einflussmöglichkeiten auf eine zukünftige Öko-Effizienz-optimierung der Produktion gemäß den Anforderungen.

Vom Labormaßstab in die Zukunft!

Datenverfügbarkeit und -transparenz ist ein kritisches Thema in der Ökoeffizienz-Bewertung. In der frühen Entwicklungsphase eines Produktes wie der „Suction Rib“ ermöglichen die Prototyp-Produktionsdaten eine transparente Beschreibung der möglichen Serienproduktion. Allerdings entsprechen die Ergebnisse der Laborproduktion nicht ganz denen einer zukünftigen Serienproduktion. Zwischen beiden Szenarien weichen nicht nur die Werte der elementaren Material- und Energieflüsse aufgrund von Aspekten wie Lernkurve und erhöhte Prozesseffizienz ab, sondern auch die Charakterisierungsfaktoren dieser Elementarflüsse. Mit der Fähigkeit, aus den Ergebnissen einer „As-is“-Bewertung eine „As-if“-Abschätzung in einem Bottom-up-Ansatz ableiten zu können, entwickelt das DLR gerade das E³M, wie die Ergebnisse zeigen.



Bewertungsbasierende Abschätzung der Elementarflüsse des "As-If"-Szenarios im E³M
Assessment-based elementary flows estimation of the "as-if" industrial scenario in E³M

Realisierung des Suction Rib-Funktionsdemonstrators

Realisation of the Suction Rib functional demonstrator

Summary

Efficient flight operations, e. g. achieved through laminarisation, are just as important for ecological air transport as the use of sustainable fuel. Laminarisation can be achieved by using a suction system at the wing leading edge, this technology is especially effective for long-range aircraft. As an important milestone in ongoing investigations, a demonstrator, representing a leading edge section of the outer wing is manufactured and equipped with a suction system. Showing the feasibility of the technology in terms of function and integration and evaluating a future series application are the main objectives. Main components are the microperforated titanium skin and the multi-functional CFRP suction rib.

Ein unter anderem durch Laminarisierung erzielter, effizienter Flugbetrieb ist für den ökologischen Lufttransport ebenso wichtig wie der Einsatz von regenerativen Energien. Ein besonders hohes und von der Theorie her gut erschlossenes Potenzial zur Reduktion des Luftwiderstands durch Laminarisierung bietet der Tragflügel. Das Institut arbeitet in einem Konsortium aus europäischen Unternehmen und Forschungspartnern an einer speziellen Form der Laminarisierung, die insbesondere für Langstreckenflugzeuge geeignet ist. Eine mikroperforierte, luftdurchlässige Außenfläche wird dabei zur aktiven Absaugung an der Flügelnause genutzt. Ziel des Projekts ist eine anwendungsnahe Demonstration an einem repräsentativen Teilstück des Flügels bis zum Jahr 2023.

Ein wichtiger Meilenstein ist die Fertigung eines Demonstrators, der die geometrischen Randbedingungen einer Flügelvorderkante im Außenbereich des Flügels repräsentiert. Die Integration eines mikroperforierten Titanblechs als aerodynamische Außenhaut, die multifunktionale Suction Rib mit dem integrierten Kompressor für die Absaugung und ein berührungsloses, auf induktiver Erwärmung basierendes Enteisungssystem bilden zusammen den Kern des technologischen Ansatzes.

Wie es funktioniert

Die Teillaminarisierung des Flügels erfolgt über eine Stabilisierung der Grenzschicht mittels Absaugung. Durch die Absaugung werden Störungen in der Grenzschicht weitgehend unwirksam gemacht, was zur Folge hat, dass der Umschlag der reibungsarmen laminaren Strömung in die stärker widerstandsbehaftete turbulente Strömung sehr viel später erfolgt.

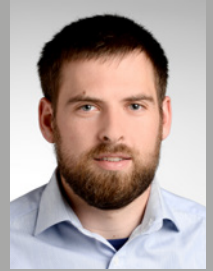
Abgesaugt wird durch eine mikroperforierte Titanhaut hindurch, welche über ein darunter liegendes Kammersystem mit der Suction Rib verbunden ist. Die als Hohlstruktur ausgeführte Suction Rib ist eine multifunktionale Struktur, die Lasten aus der Flügelnause aufnehmen kann und gleichzeitig die Integration eines Kompressors ermöglicht. Der Kompressor erzeugt den Unterdruck für das Kammersystem.



Suction Rib-Funktionsdemonstrator
Suction Rib functional demonstrator

Autor:

Dipl.-Ing. Bram van de Kamp



Fertigung

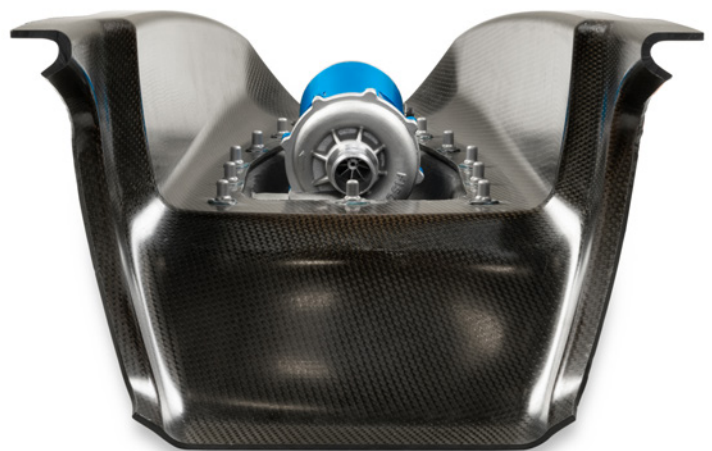
Alle strukturellen Komponenten des Demonstrators wurden als gewichtsoptimierte CFK-Bauteile ausgeführt. Die besondere Herausforderung bei der Fertigung der Suction Rib ist die sich aus der Multifunktionalität und dem begrenzten Bauraum ergebende komplexe Geometrie. Für die Bauteilfertigung kamen verschiedene Technologien, Open- und Closed-Mould-Infusions-Verfahren, zum Einsatz. Im Hinblick auf eine spätere industrielle Fertigung sind vor allem die Closed-Mould-Verfahren interessant, da sie eine hohe Produktionsrate, eine hohe Wiederholgenauigkeit und ein allseitig durch das Formwerkzeug definiertes Bauteil ermöglichen. Umgesetzt wurde dies an einer Suction Rib im geometrisch kritischen Bereich der Flügelnahe und bei den Faserverbund-Spacern (Abstandshaltern zwischen Titanhaut und CFK-Unterstruktur). Eine detaillierte Bilanzierung der Kosten, der verbrauchten Energie und eine Ausweisung des CO₂-Äquivalentes waren Bestandteil der Analyse. Die Bewertung der angefallenen Produktionsabfälle hat sich ebenfalls als wichtiges Kriterium für die Bewertung der Zukunftsfähigkeit des Prozesses herausgestellt und eine klare Empfehlung zugunsten von Closed-Mould-Prozessen ergeben.

Austauschbarer Handschuh (mikroperforierte Titanhaut)
Replaceable glove (micro-perforated titanium skin)

Montage

Schon beim Design des Suction Rib-Demonstrators spielte die Montage- und Wartungsfreundlichkeit eine entscheidende Rolle. Die Suction Rib ist über eine Verklebung zu allen umliegenden Bauteilen abgedichtet. Zusätzlich werden besondere Dichtungen und spezielle druckdichte Verschraubungselemente verwendet. Durch den Zugang zur Suction Rib über die untere Wartungsklappe kann der Kompressor jederzeit gewartet und die empfindliche mikroperforierte Titanhaut getauscht werden. Dies ist wichtig, um im Beschädigungsfall oder beim Erreichen der Verschleißgrenze schnell und günstig die Einsetzbarkeit des Flugzeugs wiederherzustellen.

Im nachfolgenden Abschnitt des Projektes werden Funktionsprüfungen durchgeführt, mit deren Hilfe das Absaugsystem und die Wartungsfreundlichkeit auch im späteren Flugbetrieb bewertet werden.



Suction Rib mit integriertem Kompressor
Suction Rib with integrated compressor

Hochpräzise CNC-Roboter für die additive Fertigung von Faserverbundstrukturen

High-precision CNC robots for additive manufacturing of fibre-reinforced structures

Summary

Increasing sustainability and productivity is one of the great challenges of our time. Therefore, in industry, there is a great need for high-precision and flexible systems for additive manufacturing. At our institute, specially designed CNC robot kinematics with a high absolute positioning accuracy allow for precisely controlled path movements in a three-dimensional space. In combination with specifically developed tools for the deposition of short or continuous fibre-reinforced materials, this creates an agile and flexible process for the additive manufacturing of thermoplastic fibre composite structures.

Die Steigerung von Nachhaltigkeit und Produktivität zählt zu den großen Aufgaben dieser Zeit. In der Industrie besteht daher Bedarf an präzisen und flexiblen Anlagen für die additive Fertigung. An unserem Institut kommen hierfür speziell konzipierte CNC-Roboterkinematiken zum Einsatz. In Kombination mit gezielt entwickelten Werkzeugen zur Ablage kurz- und endlosfaserverstärkter Materialien entsteht ein agiler und flexibler Prozess zur additiven Fertigung thermoplastischer Faserverbundstrukturen.

CNC-Roboterkinematiken als Technologieträger in der Forschung

CNC-gesteuerte 6-Achs-Knickarmroboter finden zunehmend Anwendung als Werkzeugmaschinen. Hierfür werden Werkzeuge am Roboterflansch montiert und in Abhängigkeit von der Bahnbewegung des Roboters präzise angesteuert, sodass verschiedenste industrielle Prozesse umsetzbar sind. An unserem Institut kommen derartige robotische Systeme unter anderem in der additiven Fertigung zum Einsatz. Hierbei wird entlang der programmierten Bahn mit einem Druckkopf kontinuierlich Material ausgetragen, um ein Bauteil zu erzeugen. Dabei gilt es, zahllose Werkzeugpfade präzise zu befahren und die richtige Materialmenge am richtigen Ort abzulegen. So werden hochgenaue Bauteile ohne Fehlstellen hergestellt. Die Genauigkeit, mit der konventionelle Industrieroboter ein Werkzeug im Raum führen, genügt hierfür häufig nicht.

In Zusammenarbeit mit Industriepartnern wurde an unserem Institut erfolgreich ein hochgenauer CNC-Roboter für die additive Fertigung in Betrieb genommen. Die hohe Präzision resultiert aus den Einflüssen auf die Roboterkinematik sowie Sekundärencodern, die an den Getriebeausgängen die Achspositionen erfassen. Dadurch sind absolute Positioniergenauigkeiten des Roboters von 110 µm innerhalb der gesamten Reichweite von rund 2,2 m realisierbar, was ein einzigartiges Umfeld für die Entwicklung additiver Fertigungsprozesse schafft. Um eine Skalierung entwickelter Prozesse zu ermöglichen, ist ein CNC-



Agile Fertigungszelle für den robotischen 3D-Druck
Agile production environment for robotic 3D printing

Autoren:

Maik Titze, M. Sc.
Erik Johannsen, M. Sc.
Fabian Wolf, Staatl. gepr. Techniker –
Fachrichtung Elektrotechnik
Dipl.-Ing. Chinh Duy Nguyen



Roboter der Anlage an unserem Standort in Stade kompatibel eingerichtet worden. Dieser erreicht eine absolute Positioniergenauigkeit von 250 µm in einem Bauraum von 18 m x Ø 5,5 m. Die CNC-Roboterzellen werden als Technologieträger für die Erforschung, Entwicklung und Kombination von 3D-Druckverfahren und Faserverbundfertigungsprozessen genutzt.

Leistungsfähige Werkzeuge für die additive Fertigung

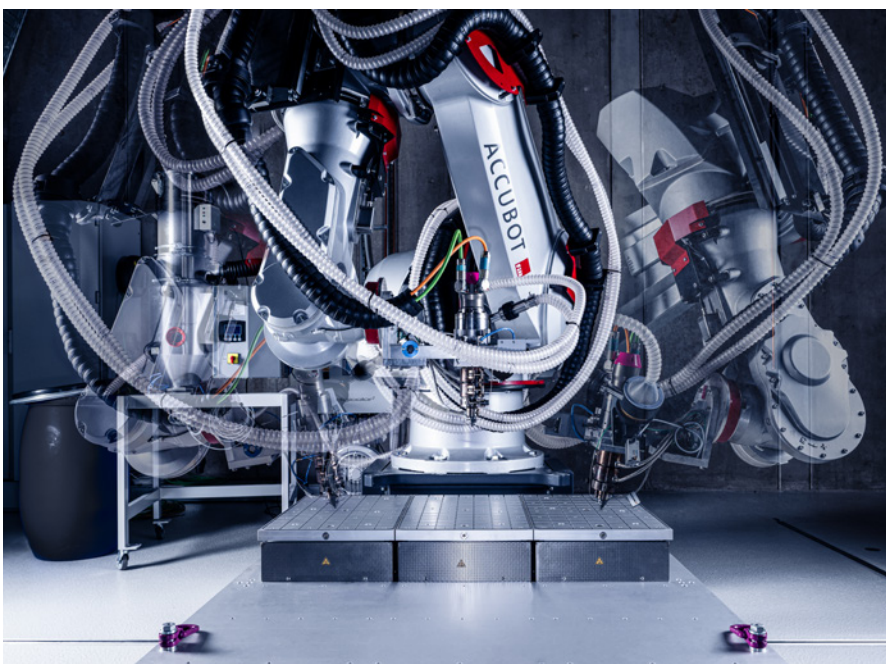
Durch die Kopplung von CNC-Roboterkinematik und Druckkopf entsteht ein agiler und leistungsfähiger Prozess für die additive Fertigung. Unser Institut entwickelt hierfür gemeinsam mit Industriepartnern Werkzeuge für die Ablage kurz- und endlosfaserverstärkter Materialien. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf deren Ansteuerung in Abhängigkeit der Bahnbewegung. Darüber hinaus erlaubt eine neue Technologie zur Faserimprägnierung die kosteneffiziente Herstellung endlosfaserverstärkter Halbzeuge für die Verarbeitung im additiven Fertigungsprozess.

Die Zukunft der additiven Fertigung von Faserverbundstrukturen

CNC-Roboter ermöglichen als Technologieträger die technische Ausreifung der entwickelten Werkzeuge für den kurz- und endlosfaserverstärkten 3D-Druck im industriellen Umfeld. Für eine ganzheitliche Prozessoptimierung finden zudem weiterführende Forschungsarbeiten in den Bereichen der Materialentwicklung sowie der Qualitätssicherung statt. Zukünftig wird die Möglichkeit einer Prozesskombination bestehen, sodass kurz- und endlosfaserverstärktes Material auf mehrfach gekrümmte Strukturen aufgedruckt werden kann. Dadurch ist eine flexible und effiziente Fertigung von Faserverbundstrukturen möglich.



Miniaturrextruder (oben) für den detailgetreuen Austrag kurzfaserverstärkter Kunststoffe
Minaturised extruder (top) for an accurate deposition of short fibre-reinforced polymers



Hochpräzise CNC-Kinematik (links) für eine zuverlässige Werkzeugführung
High-precision CNC kinematics (left) for reliable tool guidance



A microfluidic chip with a complex network of channels. The chip is primarily yellow with brown sections. It is connected to a white tube at the top and a clear tube at the bottom. The chip is mounted on a green textured surface.

SYSTEM

System

Sensorik zur Mischanalyse
Sensor technology for mixture analysis

Vom Labor in die Anwendung –

Strukturüberwachung im Flugversuch _____ 64

From the laboratory to the application – structural monitoring in the flight test

Vom Labor in die Anwendung –

Strukturüberwachung für die Windenergie _____ 66

From the laboratory to the application – structure monitoring of wind turbine blades

Ein Windkanalmodell zur Untersuchung von Morphing-Technologien und

natürlicher Laminarität _____ 68

A wind tunnel model to study morphing technologies and natural laminarity

Gehen mit dem Wind: adaptive Turbofan-Einlässe _____ 70

Bending into the wind: adaptive turbofan inlets

Wenn sich das Blatt wendet –

formvariable Rotorblätter für Hubschrauber _____ 72

When the tide turns – variable-shape rotor blades for helicopters

Vom Labor in die Anwendung – Strukturüberwachung im Flugversuch

From the laboratory to the application – structural monitoring in the flight test

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.

The key question in operating an SHM system in an aircraft is whether signal interference generated by flight operations negatively impacts the damage detection. Therefore, a complete SHM system was installed into the DLR research aircraft ISTAR. Within different flight conditions and manoeuvre, it was investigated whether signal interference occurs and how this affects a reliable damage detection.

Mit Systemen zur Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring – SHM) lassen sich Flugzeugstrukturen kontinuierlich im Betrieb auf Schädigungsereignisse und -fortschritt überprüfen. Dadurch können unerwartete Schadensereignisse bewertet und angepasste Wartungs- und Reparaturmaßnahmen abgeleitet werden, sodass die Verfügbarkeit von Luftfahrzeugen erhöht sowie die Wartungskosten reduziert werden können. Perspektivisch besteht auch die Möglichkeit, durch die Reduktion von Sicherheitsfaktoren Luftfahrzeugstrukturen leichter zu bauen und damit den Ausstoß von Emissionen zu reduzieren.

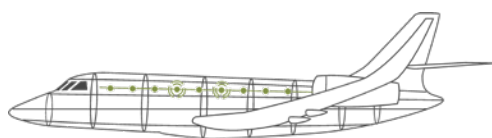


DLR-Forschungsflugzeug Dassault Falcon 2000LX ISTAR (In-flight Systems & Technology Airborne Research)
DLR's research aircraft Dassault Falcon 2000LX ISTAR (In-flight Systems & Technology Airborne Research)

SHM-Systeme

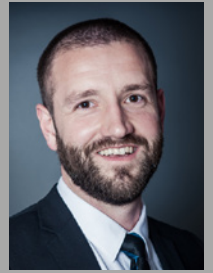
Ein SHM-System besteht aus einem Netzwerk von permanent applizierter Sensorik, Aktuatorik sowie aus Hard- und Softwarekomponenten zur Signalanregung, -verarbeitung und -analyse. Mit Hilfe des SHM-Systems werden geführte Ultraschallwellen, (Lambwellen) in der Struktur angeregt. Die Wellen breiten sich großflächig in der Struktur aus und interagieren mit Schäden. Anhand verschiedener Interaktionsmechanismen lassen sich Rückschlüsse auf Schadensort, -art und -größe ziehen.

Die zentrale Fragestellung beim Betrieb eines SHM-Systems ist, inwieweit sich durch den Flugbetrieb erzeugte Signalstörungen negativ auf die Schadensdetektion auswirken. Beispielsweise durch Grenzschichtströmung oder Triebwerksschwingungen werden Störungen generiert, die die Sensorsignale der Ultraschallwellen überlagern und eine zuverlässige Schadensdetektion erschweren können. Es muss somit untersucht werden, ob geeignete Maßnahmen zur Signalverarbeitung oder Flugzustände ausgewählt werden können, um die Signalstörungen auf ein Minimum zu begrenzen bzw. zu eliminieren. Darüber hinaus müssen die Algorithmen zur Schadensdetektion so robust gestaltet werden, dass sie mit solchen Einflüssen umgehen können.



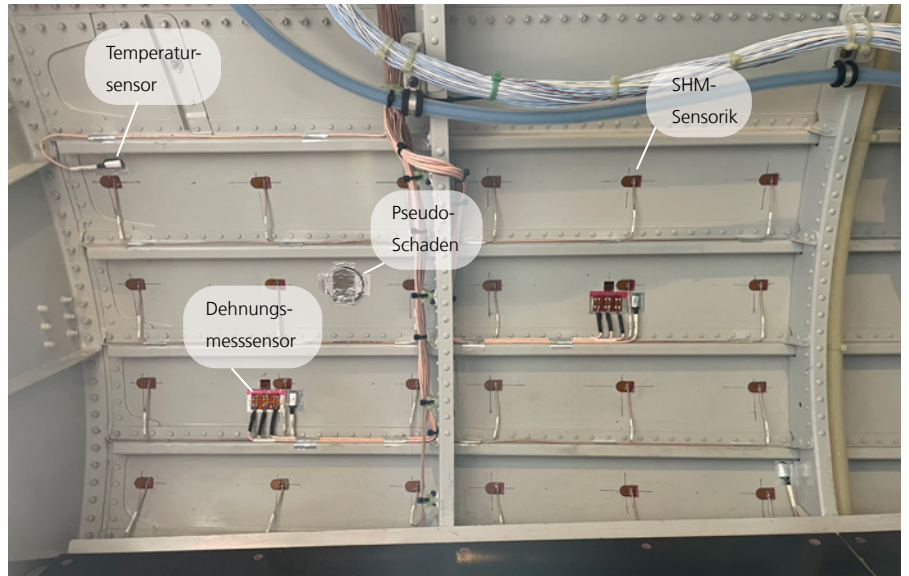
Autor:

Dr.-Ing. Daniel Schmidt



Messungen im Flug

Um diese Untersuchungen durchführen zu können, wurde ein SHM-System in dem [DLR-Forschungsflugzeug Dassault Falcon 2000LX ISTAR](#) (In-flight Systems & Technology Airborne Research) installiert. In enger Zusammenarbeit mit der [DLR-Einrichtung für Flugexperimente](#) und dem [DLR-Institut für Flugsystemtechnik](#) wurde das SHM-System qualifiziert und in den ISTAR eingebaut. Dazu wurde ein Hautfeld im hinteren Bereich des Flugzeugrumpfes mit 24 piezoelektrischen Sensoren ausgestattet. Weiterhin wurden Temperatursensoren und Dehnungsmessensorik installiert, um thermische und mechanische Belastungen in verschiedenen Flugzuständen messen zu können. Ein in der Kabine installiertes Rack mit SHM-Hardware ermöglicht einem Operator die Überwachung der SHM-Messungen im Flug. Da in die Flugzeugstruktur keine realen Schäden eingebracht werden können, wurden Pseudo-Schäden verwendet, die vergleichbare Welleninteraktionen wie reale Schäden hervorrufen und somit von den Schadensalgorithmen detektiert werden können. Die Pseudo-Schäden haben unterschiedliche Größen und können flexibel an unterschiedlichen Stellen innerhalb des SHM-Sensornetzwerks an der Struktur angebracht werden.



SHM-Sensornetzwerk, installiert am Flugzeugrumpf
SHM sensor network, installed on the fuselage



SHM-Messsystem,
installiert in der Flug-
zeugkabine
SHM hardware installed
in the cabin

Ein wertvoller Datenschatz

Im Rahmen der Flugversuche wurden SHM-Messungen in unterschiedlichen Flugzuständen und -manövern durchgeführt. Dies beinhaltete Geradeausflüge, Schiebeflüge und Kurvenflüge von 45° bis 60° Neigung in Höhen von 12.000 und 20.000 Fuß bei jeweils 180 und 300 Knoten.

Die SHM-Messungen wurden während der verschiedenen Flugkampagnen erfolgreich durchgeführt. Damit steht jetzt ein einzigartiger Datenschatz zur Verfügung, der über viele Jahre als Basis für die Entwicklung und Erprobung von SHM-Algorithmen genutzt werden kann.

Vom Labor in die Anwendung – Strukturüberwachung für die Windenergie

From the laboratory to the application – structure monitoring of wind turbine blades

Summary

Over a period of four weeks, more than 15 scientists equipped six rotorblades for two 4.2 MW wind turbines with hundreds of sensors each. The sensors were installed already during production of the blades at the ENERCON manufacturing site in Portugal. Only extensive planning and training enabled the staff to install this large number of sensors and the related cabling within less than 24h and under the pressure of the series production without any fault. The instrumentation is designed to deliver high-quality information on deformation states, loads and possible damages over the whole lifetime of the blades. This data and the knowledge gained from its analysis are of enormous value for the development of future rotor blade generations. The blades mounted on the turbines of the research wind farm WiValdi (Wind Validation) in Krummendeich establish a unique platform to investigate structural monitoring technologies under field conditions and in full scale.

Über einen Zeitraum von vier Wochen haben mehr als 15 Mitarbeitende des Instituts sechs Rotorblätter für zwei 4,2 MW-Anlagen der Fa. ENERCON mit Sensoren ausgerüstet. Die installierte Sensorik ermöglicht es, umfassende Informationen über Verformungszustände, Belastungen und Schadensereignisse im Betrieb zu erfassen. Erkenntnisse, die für die Entwicklung zukünftiger Generationen von Rotorblättern enorm wertvoll sind. Zukünftig steht dem DLR mit den hochinstrumentierten Rotorblättern im [Forschungspark Windenergie WiValdi \(Wind Validation\)](#) in Krummendeich eine einzigartige Plattform zur Verfügung, um Technologien zur Strukturüberwachung unter realen Bedingungen im Originalmaßstab zu erforschen.

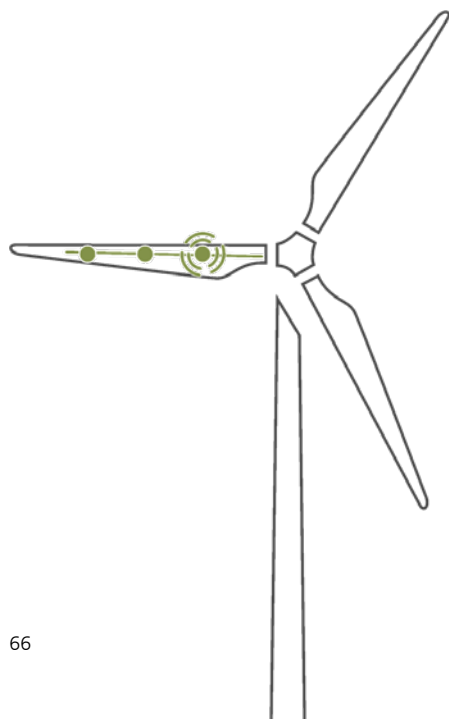
Instrumentierung im Serientakt

Gemeinsam mit dem [DLR-Institut für Aeroelastik](#) und der zum [Zentrum für Windenergieforschung](#) gehörenden Leibniz Universität Hannover fand die Installation der Sensorik im portugiesischen Werk des Industriepartners ENERCON im laufenden Produktionsbetrieb statt. Zeit und Effizienz beim Einbau der Sensorik spielten dabei eine entscheidende Rolle. Für jedes Rotorblatt mussten Hunderte von Sensoren innerhalb von 24 Stunden fehlerfrei installiert und angeschlossen werden. Viele der Sensoren sind nach der Produktion nicht mehr zugänglich. Um den zuverlässigen Betrieb über 20 Jahre Anlagenlaufzeit gewährleisten zu können, musste trotz des Zeitdrucks der Serienproduktion mit höchster Sorgfalt gearbeitet werden. Ohne eine einjährige Vorbereitung mit detaillierter Planung und Trainingsphasen, um die Montage der Sensoren vorab zu üben und das beste Vorgehen zu identifizieren, wäre das nicht möglich gewesen. Dass sich diese Mühe gelohnt hat, zeigt ein erster großer Erfolg. Nach der Ankunft der Blätter in Deutschland waren alle Sensoren funktionsfähig und lieferten die gewünschten Daten.

Einzigartige Sensorik zur Strukturüberwachung

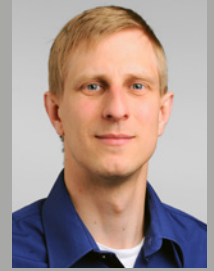
Der Fokus des Instituts liegt auf verschiedenen Sensorsystemen zur Überwachung struktureller Eigenschaften der Rotorblätter. Faseroptische Dehnungssensoren ermöglichen es, eine große Anzahl von Messpunkten zu realisieren, da entlang einer Faser viele Messgitter eingebracht werden können. In Summe wurden in den sechs Rotorblättern 6 km Glasfasern mit insgesamt 696 Messgittern verlegt. Dabei wurden wesentliche Strukturkomponenten wie Schalen, Stege und Gurte berücksichtigt. Mit dieser hohen Sensordichte sind detaillierte Aussagen über lokale Dehnungen, globale Verformungen und Schnittlasten möglich, die u. a. zur Validierung von Simulationsmodellen herangezogen werden können.

Verladung der Blätter auf das Schiff für den
Transport nach Deutschland
Loading the blades on the ship for the transport
to Germany



Autoren:

Lars Trampe, M. Sc.
Dr.-Ing. Steffen Opitz

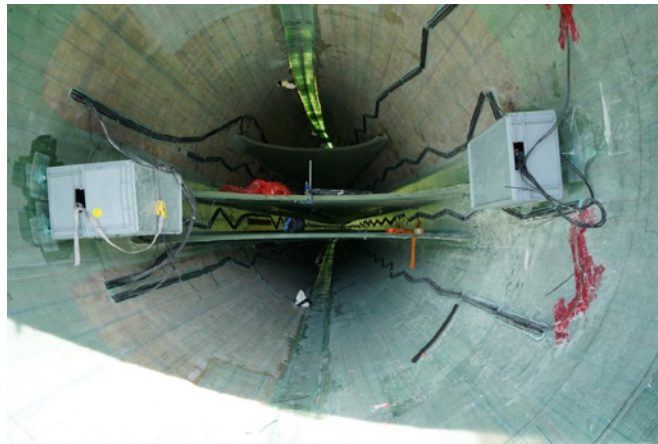


Zusätzlich wurden in die Rotorblätter Netzwerke mit piezoelektrischen Wandlern integriert. Diese Wandler senden und empfangen Ultraschallsignale, erkennen entstehende Schäden und erlauben eine kontinuierliche Überwachung des Schadensfortschritts. Zur Reduktion des Verkabelungsaufwands wurden die insgesamt 64 Einzelsensoren in neun Netzwerken zusammengefasst, die jeweils mit speziell entwickelter Multiplexer-Elektronik ausgestattet sind, um über eine Leitung mehrere Sensoren ansteuern und auslesen zu können. Eine Herausforderung bei der Interpretation der Ultraschallsignale stellen sich verändernde Umweltbedingungen dar, wie sie im Betrieb einer Windenergieanlage auftreten (z. B. Temperatur, Lasten). Mit den hochinstrumentierten Rotorblättern steht nun eine Forschungsplattform zur Verfügung, mit der solche Effekte untersucht und darauf basierend neue robuste Algorithmen zur Schadenserkenkung entwickelt werden können. Ein notwendiger Schritt, um diese Technologie vom Labor in die Anwendung zu bringen.



Instrumentierung der offenen Rotorblattschale in der Fertigung

Integration of sensors into the open shell of the rotor blade during production



Alle Kabel gut verpackt – Blick in ein instrumentiertes Rotorblatt unmittelbar vor dem Transport

All cables well packed – view into an instrumented rotor blade immediately before transport



Ein Windkanalmodell zur Untersuchung von Morphing-Technologien und natürlicher Laminarität

A wind tunnel model to study morphing technologies and natural laminarity

Summary

The development of energy-efficient airplanes is a focus of European aeronautical research. In the framework of H2020 a wing for short- and mid-range aircraft was developed with integration of natural laminar flow and morphing devices. In order to bring this wing to fruition, the GRETEL project set out to develop and test a 1:3 downscaled model of this wing with the additional requirement of achieving aeroelastically and elastically similar behaviour compared to the full-scale wing. After design, manufacturing and integration of sensors and morphing technology, the model was successfully tested on the ground at DLR and will be delivered for wind tunnel testing in December 2022.

Die Entwicklung energieeffizienter Flugzeuge ist ein Schwerpunkt der europäischen Luftfahrtforschung. Für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge, die üblicherweise 30 bis 100 Passagiere befördern, wurde im Rahmen des EU-Programms IADP Regional Aircraft ein Flügel entworfen, der zur Erreichung höherer Effizienz verschiedene Technologien integriert:

- **hohe Oberflächengüte zur Erzeugung der natürlichen Laminarität (Natural Laminar Flow – NLF),**
- **elastisch verformbare, morphende Vorflügel, die eine spaltfreie Hochauftriebskonfiguration ermöglichen,**
- **morphende Klappen, um Belastungen des Flügels aerodynamisch zu beeinflussen,**
- **ein Winglet und ein Wingtip mit integrierten Klappen zur Lastbeeinflussung.**

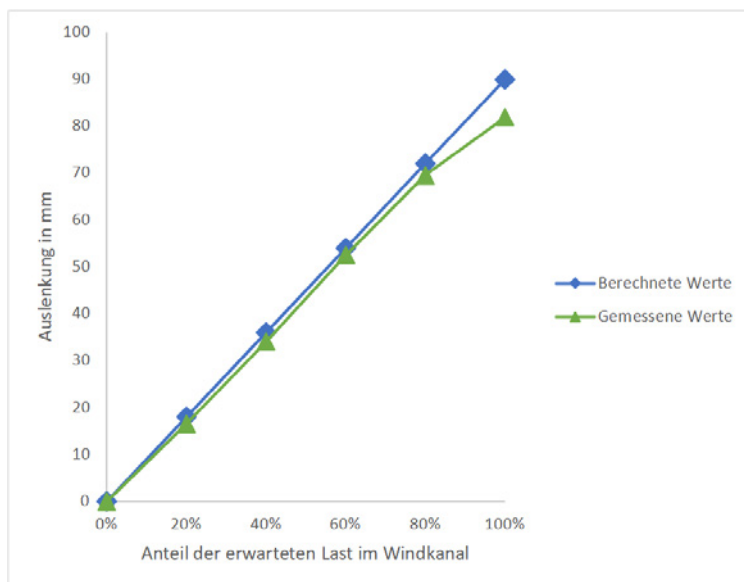
Zur Demonstration wurde im EU-Projekt GRETEL (Green Turboprop Experimental Laminar Flow Windtunnel Testing) der Flügel mit diesen Technologien in ein 1:3-skaliertes Windkanalmodell übertragen und für Windkanaltests vorbereitet.

Das resultierende Windkanalmodell musste mit seinen ca. 5 m Spannweite einige Anforderungen erfüllen. Neben den oben genannten Morphing-Technologien, die zentraler Bestandteil der Untersuchungen waren, musste das Modell mit Sensorik zur Messung der Druckverteilung an mehreren Profilschnitten versehen werden, um aerodynamische Daten zu erhalten sowie Sensoren zur Lastmessung enthalten.

Üblicherweise werden Windkanalmodelle als massive Stahlbauteile ausgeführt, um die hohen aerodynamischen Lasten, die während der Versuche auftreten, sicher auszuhalten. Ein Versagen der Struktur oder abbrechende Teile würden zu Schäden am Windkanal führen, was unbedingt vermieden werden muss. Bei dem GRETEL-Modell kam jedoch die Forderung dazu, dass sich das Modell unter den aerodynamischen Lasten ähnlich elastisch verformt wie der Originalflügel. Auch die Aeroelastik, d. h. die Rückkopplung von elastischer Verformung zur Windströmung, muss der des Originals entsprechen. Daher wurde das Modell aus Kohlefaserverbunden gefertigt, da diese es durch den

Vergleich der gerechneten Auslenkung an der Flügelspitze mit der gemessenen Auslenkung unter Last

Comparison of calculated displacement and measured displacement at the wingtip under load



Autor:

Dipl.-Ing. Ralf Keimer



Lagenaufbau ermöglichen, Steifigkeiten und Schwingungseigenschaften des Flügels in den Bauteilen gezielt einzustellen.

Das von der Universität Patras geführte Projektkonsortium umfasste insgesamt vier Forschungspartner. Die Aufgaben des DLR bestanden in der Durchführung von statischen Belastungstests und dynamischen Tests zur Bestimmung des Schwingungsverhaltens des Modellflügels. Ziel der Versuche waren:

- der direkte Nachweis der Festigkeit durch Belastung des Flügels bis zur erwarteten Last im Windkanal ohne sichtbare Schäden und messbare Degradation,
- der Abgleich der Auslegungsrechnung mit den gemessenen statischen und dynamischen Eigenschaften zur Validierung der Strukturmodelle,
- die Kalibrierung der integrierten Sensorik mit bekannten Lasten, um quantitative Messungen im Windkanal durchführen zu können,
- die Erfassung von dynamischen Eigenschaften des Flügels, um die Überwachung von Veränderungen dieser Eigenschaften im Windkanal zu ermöglichen.

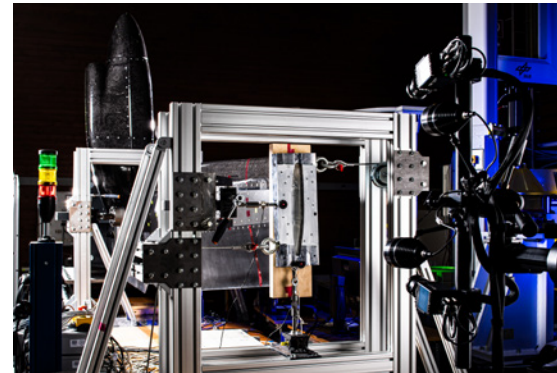
Alle Bodentests wurden im November 2021 erfolgreich abgeschlossen und waren die Voraussetzung für den erfolgreichen Versuch im LLF-Windkanal des DNW im Dezember 2021.

Damit ist ein wichtiger Meilenstein erreicht worden, um die untersuchten Technologien einen weiteren Schritt in Richtung Anwendung zu bringen. Die Versuche haben bereits gezeigt, dass die Anforderungen an die Oberflächengüte für natürliche Laminarität noch enger gefasst werden müssen. Die weitere Auswertung der Ergebnisse findet nun im Detail statt.

Das Projekt GRETEL wurde unterstützt durch das Horizon 2020 Clean Sky 2 Joint Undertaking der EU (Grant agreement 737671).

Projektteilnehmer neben dem DLR waren:

Universität von Patras, Griechenland
Altran Deutschland S.A.S. & Co. KG
Invent GmbH, Deutschland
READM S.r.l., Italien



Krafteinleitung an der Flügelspitze
Force introduction at the wing tip



Windkanalmodell im Bodentest
Wing model in ground test rig

Gehen mit dem Wind: adaptive Turbofan-Einlässe

Bending into the wind: adaptive turbofan inlets

Summary

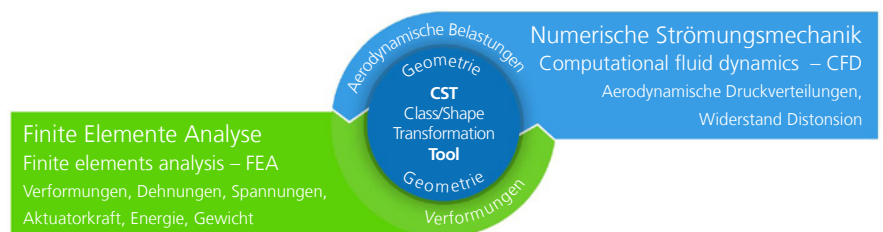
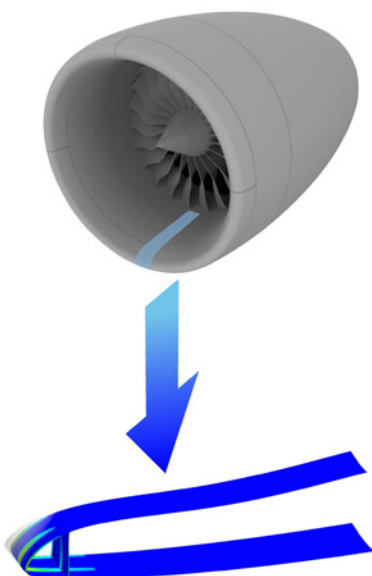
Turbofan engine nacelles with adaptive inlets can improve take-off performance and reduce drag in cruising flight. The concept of adaptive inlets is not new, but the combinations of new composite materials and simulation methods with interdisciplinary connections will help to find the right design towards commercial viability. The DLR is moving in this direction with support from industry partner Rolls-Royce Deutschland. An automated fluid-structure coupling tool in combination with the implementation of new materials such as hybrid elastomeric composites will be the key for the design of adaptive inlets.

Turbofan-Triebwerksgondeln mit formangepassten Einlässen haben das Potenzial, die Startleistung bei Seitenwind zu verbessern und den Widerstand im Reiseflug zu verringern. Gondeln sind, wie fast alle anderen Flugzeugkomponenten, ein konstruktiver Kompromiss für eine Vielzahl von Betriebs- und Randbedingungen. Wie bei anderen aerodynamischen Strukturen bestimmen ihre Formen ihre Funktionen: Dicke, abgerundete Einlässe eignen sich am besten für den Start bei starkem Seitenwind und hohen Anstellwinkeln und leiten die Strömung möglichst gleichmäßig und ablösungs- und verzerrungsfrei in das Triebwerk, was für einen sicheren Triebwerksbetrieb von entscheidender Bedeutung ist. Schlanke, scharfe Einlässe eignen sich am besten für den Reiseflug, da sie den Luftwiderstand verringern. Adaptive Inlets können das Beste aus diesen beiden Welten bieten, indem sie sich je nach Strömungsanforderungen zwischen den geometrischen Zuständen anpassen. Während das Konzept der adaptiven Inlets nicht neu ist, da sie bereits seit Jahrzehnten in Überschalltriebwerken eingesetzt werden, entwickelt das DLR zusammen mit dem Industriepartner Rolls-Royce Deutschland im LuFo-Projekt ModeGo neue Verbundwerkstoffkombinationen und Simulationsmethoden.

Einfach nur die Form zu ändern, ist keine Herausforderung mehr. Seit Jahren werden viele adaptive oder "morphende" Strukturen für Verkehrsflugzeuge vorgeschlagen, gebaut und getestet, einige davon im Flug. Die Suche nach dem richtigen Design, das die Leistung gegenüber dem zusätzlichen Gewicht, der Komplexität und dem Energiebedarf deutlich erhöht, wird jedoch dazu beitragen, den Sweetspot in Richtung Marktpotenzial zu finden. Interdisziplinäres Vorgehen ist der einzige Weg, dieses schwer fassbare Design zu finden.

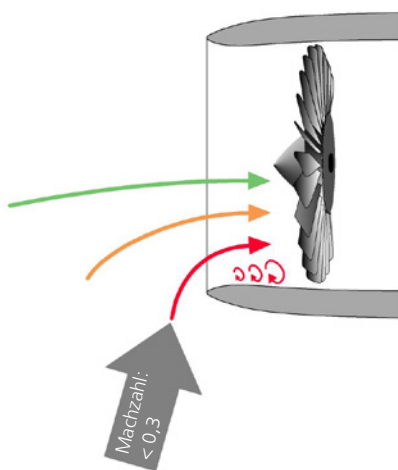
Gekoppelte Simulationen – eine Methodik, die mehr ist als ein Mittel zum Zweck

Wenn die "Form" die "Funktion" bestimmt, dann verändert die Umgestaltung der Form die Funktion. Die Quantifizierung dieser Beziehung zwischen Ursache und Wirkung kann nur durch eine multidisziplinäre Analyse erfolgen. Dieses analytische fluidstrukturgekoppelte Werkzeug ist so konzipiert, dass es von der Geometriestellung bis hin zu Struktur- und Fluidberechnungen automatisiert ist. Die von einer CAD-Software erzeugte Geometrie kann dann in die strukturellen und aerodynamischen

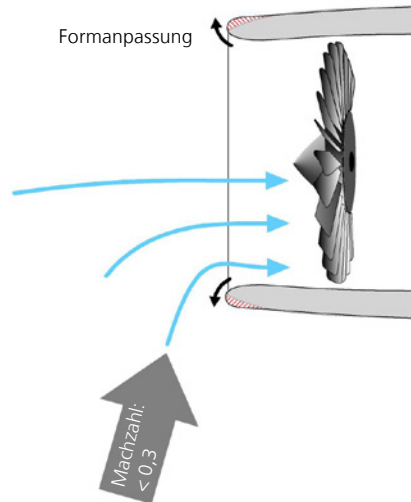


Autor(inn)en:

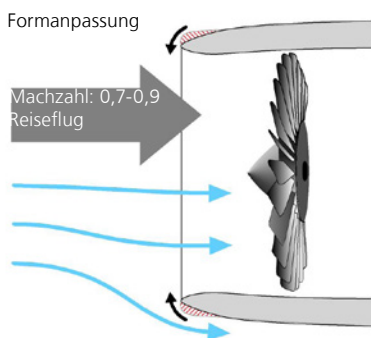
Giada Abate, Ph.D.
Dr.-Ing. Srinivas Vasista



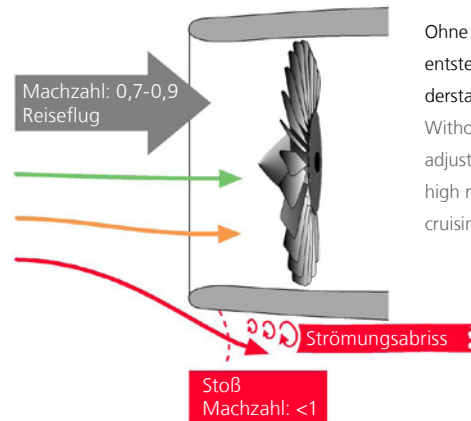
Ohne Formanpassung entstehen Strömungen am Einlassstrom bei hohen Inzidenzwinkeln, z. B. bei Seitenwind und höheren Anstellwinkeln Compressor stall occur at the inlet flow at high incidence angles, e.g. with crosswind and higher angles of attack



Formanpassung des Einlassstroms bei hohen Inzidenzwinkeln, z. B. bei Seitenwind und höheren Anstellwinkeln Shape adjustment of the inlet flow at high incidence angles, e.g. with crosswind and higher angles of attack



Formanpassung für Reiseflug Shape adjustment for cruise flight



Ohne Formanpassung entsteht ein hoher Widerstand beim Reiseflug Without shape adjustment there is a high resistance during cruising flight

schen Analysen übertragen werden. Die Formänderungen aufgrund von Betätigungskräften in der Finite-Elemente-Analyse (FEA) können mit der numerischen Strömungsanalyse (CFD) verknüpft werden, wo die aerodynamischen Lasten berechnet werden können. Anschließend können diese Lasten in die Strukturanalyse zurückgeführt werden und der Prozess wird bis zur Konvergenz wiederholt. Mit einem solchen Werkzeug ist es möglich, nicht durchführbare Entwürfe frühzeitig herauszufiltern, zu überdenken, zu wiederholen und zur nächsten Generation von Entwurfsmöglichkeiten überzugehen. Fail-Fast und frühzeitige Neuentwürfe auf der Grundlage dieses analytischen Rahmens verkürzen den Weg zur Übernahme. Dies bietet sich auch für andere Anwendungen adaptiver Strukturen, einschließlich beweglicher Flügel, an.

Adaptive Konzepte

Im Laufe dieses iterativen Entwurfsprozesses wurde eine Reihe von Konzepten vorgeschlagen, die derzeit untersucht werden. Eines der Hauptmerkmale aller Konzepte ist die Kombination von Materialien, insbesondere die Verwendung von Elastomer-Verbundwerkstoffen. Frühere Projekte zeigten, dass Glasfaserverbundwerkstoffe auf Epoxidbasis chemisch mit Elastomeren verbunden werden können. Ebenso erwies sich der Verbund dieser Elastomere mit metallischen Oberflächen als möglich. Solche hybriden Verbundwerkstoffe lassen mehr Flexibilität, Dehnbarkeit und maßgeschneiderte Steifigkeit um nahtlose, stufenlose, aerodynamisch glatte Oberflächen zu. An der Vorderkante von Gondeln wie auch von Flügeln ist Glätte der Schlüssel zur Vergrößerung des Bereichs laminarer Strömung und damit zur Verringerung des Luftwiderstands.

Wenn sich das Blatt wendet – formvariable Rotorblätter für Hubschrauber

When the tide turns – variable-shape rotor blades for helicopters

Summary

Helicopters are characterised by their ability to master both forward flight and hover. Key for the rotor blades is a blade design that always represents a compromise between the different flight conditions, which enables safe flight in the various flight conditions such as hover and forward flight. In order to operate the rotor blade even more efficiently in all flight conditions, a new morphing concept, the so-called linear variable chord extension, has been developed. This concept allows for a higher chord length in the root region for hover and a slender chord length for forward flight, which increases the efficiency in hover by 7 %.

Hubschrauber zeichnen sich durch ihre Fähigkeit aus, sowohl den Vorwärtsflug als auch den Schwebeflug zu beherrschen. Die Rotorblätter des Hauptrotors spielen dabei eine wichtige Rolle, weil deren Geometrie die benötigte Antriebsleistung und damit die Energieeffizienz des Hubschraubers beeinflusst. Für den Vorwärtsflug sind schlanke, nahezu ebene Blätter optimal, während für den Schwebeflug tordierte Blätter mit größerer Profiltiefe im Wurzelbereich vorteilhaft sind. Das neu entwickelte Konzept des adaptiven Rotors ermöglicht es, die Effizienz des Hubschraubers in beiden Flugzuständen zu maximieren, indem sich die Geometrie der Rotorblätter an die unterschiedlichen Anforderungen im laufenden Betrieb anpassen kann. Die benötigte Antriebsleistung reduziert sich dadurch im Schwebeflug um 7 %.

Was soll erreicht werden? Gewünschte Geometrien optimaler Rotorblätter:

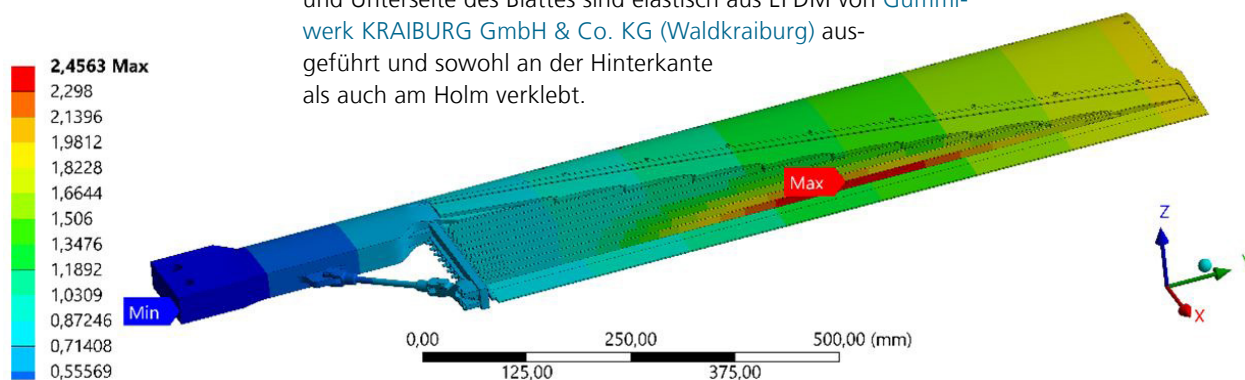
Die ideale Blatttiefe an jeder einzelnen radialen Position lässt sich aus theoretischen Modellen (wie der kombinierten Impuls- und Blattelementtheorie) ableiten. Danach weist ein Blatt des "optimalen Schweberotors" über seine gesamte Länge ein konstantes und optimales Verhältnis von Auftriebs- zu Widerstandskraft auf. Dies wird erreicht mit einer großen Blatttiefe an der Wurzel, welche in Richtung der Blattspitze schnell abnimmt und am Ende einen konstanten Wert annimmt (hyperbolische Verteilung der Blatttiefe). Für den Vorwärtsflug hingegen ist ein Rotorblatt mit rechteckigem Grundriss ein guter Startpunkt. Strukturkonzepte für ein Rotorblatt, das in der Lage ist, zwischen einer konstanten Blatttiefe für den Vorwärtsflug und einer hyperbolischen Blatttiefeverteilung für den Schwebeflug zu wechseln, gibt es bislang nicht. Eine näherungsweise hyperbolische Verteilung der Blatttiefe wird durch die Aufteilung in zwei lineare Bereiche erreicht. Für diese geometrische Annäherung wurde ein adaptives Strukturkonzept abgeleitet, welches eine Verringerung der für den Schwebeflug erforderlichen Antriebsleistung um 7 % bei gleichbleibender Rotorleistung für den Vorwärtsflug ermöglicht.

Wie funktioniert's? Das Strukturkonzept:

Um die Blatttiefe des Rotorblatts im Wurzelbereich zu erhöhen, wird ein Konzept für eine ausfahrbare Hinterkante gewählt. Dabei wird die Hinterkante des inneren Blattabschnitts an ihrer äußeren Kante drehbar gelagert. Die Hinterkante kann geführt von einer Schiene im Wurzelbereich ausschwenken. Die Häute an der Ober- und Unterseite des Blattes sind elastisch aus EPDM von [Gummiwerk KRAIBURG GmbH & Co. KG \(Waldkraiburg\)](#) ausgeführt und sowohl an der Hinterkante als auch am Holm verklebt.

Deformationen durch Rotation und aerodynamische Lasten

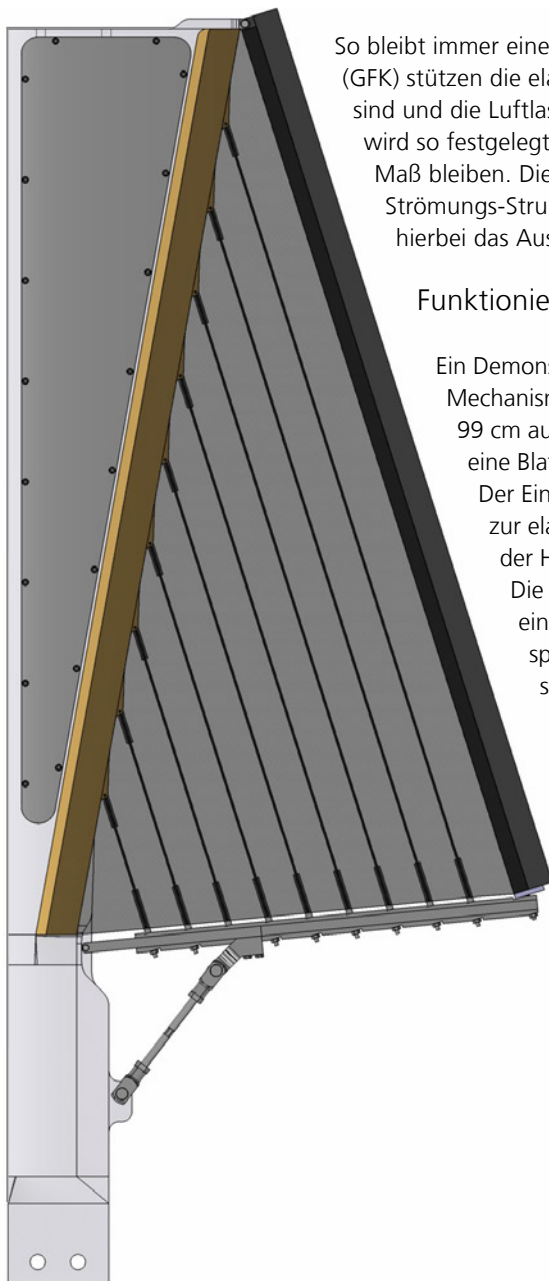
Deformation under centrifugal and aerodynamic loads



Autoren:

Dipl.-Ing. Steffen Kalow

Dr.-Ing. Johannes Riemenschneider



So bleibt immer eine spaltlose Oberfläche des Profils. Stege aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) stützen die elastische Haut, welche ebenfalls am Holm und an der Schiene aufgehängt sind und die Luftlasten, die senkrecht zur Haut auftreten, abfangen. Die Anzahl der Stege wird so festgelegt, dass die Deformationen (Ausbeulungen) der Haut unter einem kritischen Maß bleiben. Diese Dimensionierung findet mittels Finiter Elemente in einer gekoppelten Strömungs-Struktur-Rechnung statt. Die Verdoppelung der Blatttiefe im Wurzelbereich ist hierbei das Auslegungsziel.

Funktioniert's? Test des Strukturkonzeptes:

Ein Demonstratorrotorblatt zeigt die Umsetzbarkeit des Strukturkonzeptes, wobei der Mechanismus zum Ausschwenken der Hinterkante mit einer radialen Länge von 99 cm aufgebaut wird. Das Demonstratorblatt weist im unausgefahrenen Zustand eine Blatttiefe von 270 mm und ein NACA-23012-Profil als Ausgangsgeometrie auf. Der Einfachheit halber wurde der Holm aus Aluminium gefräst. Um den Übergang zur elastischen EPDM-Haut zu ermöglichen, verschraubt man am hinteren Ende der Holme GFK-Elemente, auf die die EPDM-Häute vulkanisiert werden können. Die Herstellung der Stege und der Häute erfolgt in einem Prozessschritt mit Hilfe eines komplexen Werkzeugkonzeptes bei dem vorgefertigte Stege zwischen entsprechenden Aluminium-Werkzeugen in Position gehalten werden, während sich das Rohmaterial für die Haut durch Aufheizen verflüssigt, in der Form konsolidiert und dabei mit Stegen und Holm verbindet. Zur Vermessung von Dehnungen in späteren Tests sind die Stege mit Dehnmessstreifen instrumentiert.

Die Messung der Deformationen des Demonstratorblatts für unterschiedliche Profiltiefen und Drehzahlen erfolgte im Rotationsprüfstand des DLR. Es folgte eine nicht rotierende Untersuchung des Demonstrators im Windkanal der Universität von Bristol (UK), um den Einfluss der Blatttiefenvergrößerung auf die aerodynamischen Beiwerte zu verifizieren.

Damit wurde die Machbarkeit einer strukturellen Umsetzung gezeigt und der Nachweis erbracht, dass die lokale Blatttiefenvergrößerung zur gewünschten Veränderung der aerodynamischen Beiwerte führt.


Rotorblatt: Strukturkonzept für Rotorblatt mit Blatttiefenvergrößerung: Zustand mit Vergrößerter Blatttiefe

Structural concept for morphing rotor blade: left: forward flight configuration, right hover configuration

CNC-Roboter für faserverstärkten 3D-Druck
CNC robot for fibre-reinforced 3D printing

INDUSTRIALISIERUNG

Industrialisation



Aus der Raumfahrt ans menschliche Bein – Anwendungsfälle für den
faserverstärkten 3D-Druck _____ 76

From space to the human leg – EmpowerAX identifies use cases for fibre-reinforced 3D printing

Hart, aber fair – energieintensiven Fertigungsprozessen auf der Spur ____ 78

Tough but fair – On the trail of energy-intensive manufacturing processes

Infusionsflügel – leicht, aber nicht einfach _____ 80

Infusion wings – light but not simple

Mit dem LASSO auf Wellenjagd – KI für die Mischungsanalyse _____ 82

Hunting waves with the LASSO – AI for mixture analysis

Eine virtuelle Zeitreise durch die vernetzte Produktion von morgen _____ 84

A virtual time travel through the networked production of tomorrow



Aus der Raumfahrt ans menschliche Bein – Anwendungsfälle für den faserverstärkten 3D-Druck

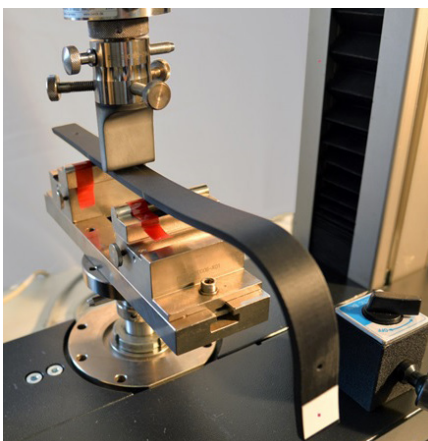
From space to the human leg – EmpowerAX identifies use cases for fibre-reinforced 3D printing

Summary

Lightweight, resilient and individual. These are the requirements placed on components in a wide range of industries, from aerospace to medical technology. But how can components be made lighter, more individual and at the same time more resilient? These questions highlight problems for which the use of Additive Extrusion technologies with continuous fiber-reinforced materials can provide a solution. To answer the question of where the technology can be successfully applied, use cases are needed. The question of whether a potential use case is suitable and how it can be implemented is being explored by the interdisciplinary team of the DLR Innovation Lab EmpowerAX ([link](#)) with their Use Case Challenge instrument.

Durchführung ([links](#)) und Simulation ([rechts](#)) eines 3-Punkt-Biegeversuchs zur Validierung der in der Simulation verwendeten Materialkennwerte (Quelle: DLR / FH Münster).

Execution ([left](#)) and simulation ([right](#)) of a 3-point bending test to validate the material parameters used in the simulation (source: DLR / Münster University of Applied Sciences).



Leicht wie Kunststoff, aber belastbar wie Metall – und dazu noch individuell anpassbar. Dies sind Anforderungen, die an Bauteile in den verschiedensten Branchen, von Raumfahrt bis Medizintechnik, gestellt werden. Aber wie kann das Gewicht einer Satellitenstruktur für das Weltall bei gleichbleibender Belastbarkeit reduziert werden? Und wie kann man hoch belastete Orthesen individuell mit geringem Zeit- und Kostenaufwand herstellen? Diese Fragen zeigen Probleme auf, für die der Einsatz endlosfaserverstärkter Materialien mittels Additiver Extrusion, einer Form des 3D-Drucks, Lösungen bieten kann. Die noch junge Technologie findet ihren idealen Einsatzort dort, wo Bauteile bei hoher Belastbarkeit und hohem Individualisierungsbedarf gleichzeitig ein geringeres Gewicht benötigen. Mit dem faserverstärkten 3D-Druck können diese drei Anforderungen in einem Bauteil vereint werden. Doch bei welchen Anwendungsfällen sind diese Anforderungen in Kombination notwendig und wie kann die Technologie dort industriell eingesetzt werden? Potenzielle Nutzer benötigen an dieser Stelle schnelle Antworten auf die wichtigsten Fragen rund um Einsatzmöglichkeiten, Belastbarkeit und Kosten. Die Antworten darauf erarbeitet das Team hinter EmpowerAX mit einer Mischung aus Neugier, Offenheit und strukturierter Methode in ihren verschiedenen Use Case Challenges.

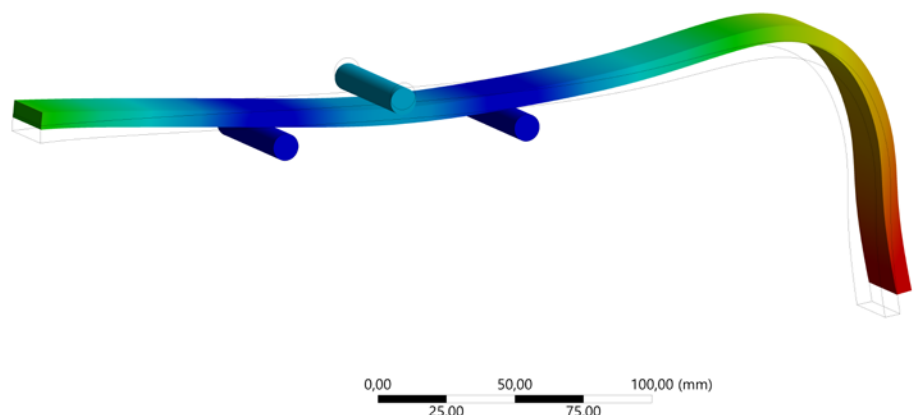
„Und wofür kann man das benutzen?“ – EmpowerAX Use Case Challenges geben Antworten.

Die Use-Case-Challenge ist ein in EmpowerAX entwickeltes Instrument, welches zur Bewertung der Eignung potenzieller Anwendungsfälle für die Fertigung mittels Additiver Extrusionstechnologien mit endlosfaserverstärkten Materialien dient. Ausgangspunkt für eine schnelle Einschätzung der Eignung, sind die vom EmpowerAX-Team entwickelten "drei goldenen Fragen" zur Use Case-Evaluierung.

Ist das Bauteil druckbar?

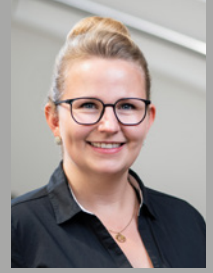
Hält es den erforderlichen Lasten dauerhaft stand?

Ist der Anwendungsfall ökonomisch sinnvoll (Use Case vs. Business-Case)?



Autorin:

Xenia Sophia Stumpf, M. Sc.



Erachtet das Team den Anwendungsfall, ausgehend von den Antworten auf diese drei Fragen, als geeignet, bezieht es im nächsten Schritt die Anbieter Additiver Extrusionstechnologien für den faserverstärkten 3D-Druck aus EmpowerAX ein. Der Use Case und die Anforderungen an das Bauteil werden diesen vorgestellt, im Anschluss erfolgen der Druck des Bauteils durch verschiedene Technologieanbieter sowie dessen Prüfung dieser hinsichtlich geforderter Eigenschaften, wie z. B. der Steifigkeit, in den Prüflaboren des DLR. Die Ergebnisse diskutieren wir im Anschluss offen mit allen involvierten Parteien. Für Probleme, die während dieses Vorgehens entstehen, suchen wir gemeinsam nach schnellen Lösungen. Einige der Probleme lassen sich bereits durch einfache Anpassungen im Bauteildesign lösen.

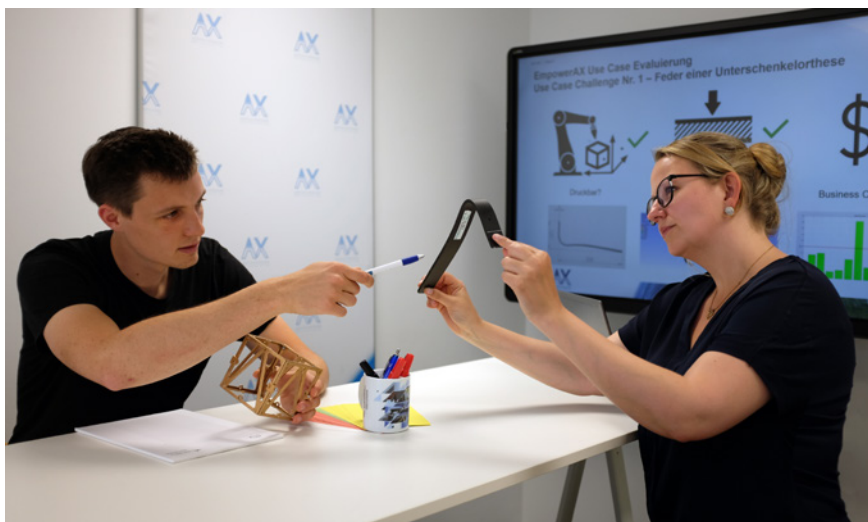
Ein Anwendungsfall aus der Medizintechnik – die Feder einer Unterschenkelorthese

In der Luft- und Raumfahrt sind die Themen Gewichtsreduktion, Belastbarkeit und effiziente Nutzung des zur Verfügung stehenden Raums von Relevanz. Diese Aspekte sind ebenso für externe Hilfsmittel am hochindividuellen menschlichen Körper wichtig. Für Menschen, die in ihrer Mobilität eingeschränkt sind, bietet die Medizintechnik verschiedene Ansätze zur Förderung der Mobilität. Von Exoskeletten über Prothesen bis hin zu Orthesen sind die Anforderungen klar definiert – Funktionsfähigkeit und Tragekomfort für den Träger sowie Anpassbarkeit auf den Träger sind hier von Relevanz. Der konventionelle Herstellungsprozess der Feder durch ein Handlegeverfahren mit vorimprägnierten Faserverbundschichten erfordert einen hohen Kosten- und Zeitaufwand. Der 3D-Druck bietet die Möglichkeit, diesen Umstand zu ändern, doch Funktionselemente rein aus Kunststoff erreichen nicht die gewünschte Steifigkeit. Durch die Verwendung von endlosfaserverstärktem Material besteht das Potenzial, die Materialeigenschaften gezielt anzupassen.

Prof. David Hochmann und Carsten Dilthey (B. Sc.), Forscher aus dem [Labor für Biomechatronik der FH Münster](#), beschäftigen sich im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit dieser Problematik und haben die Verwendung von endlosfaserverstärkten Materialien in Kombination mit dem 3D-Druck zur Fertigung der Feder als Lösungsoption für Zeit-, Kosten- und Steifigkeitsproblematiken ins Auge gefasst. Vor diesem Hintergrund sind sie auf das EmpowerAX-Team zugekommen. Gemeinsam haben wir in einem kollaborativen Prozess aus Erfahrung und Methoden überprüft, ob die Technologie für die Fertigung der Feder geeignet ist und zunächst einen Vergleich konventionell verfügbarer additiver Materialien vorgenommen. Dies war die Geburtsstunde der ersten EmpowerAX Use Case Challenge.

Ausgehend von den Ergebnissen der Use Case Challenge konnten zusätzlich Rückschlüsse für eine Optimierung von Design und

Auslegung der Feder gezogen werden. Neben den Fragen zur Umsetzbarkeit untersuchen das Team von EmpowerAX und die Forscher der FH Münster derzeit ebenfalls Fragestellungen zur simulativen Abbildung eines Orthesenprüfstands. Dieses Vorgehen überträgt das EmpowerAX-Team derzeit auf die Bewertung weiterer potenzieller Anwendungsfälle verschiedenster Branchen und Einsatzgebiete.



Bewertung des potenziellen Anwendungsfalls im EmpowerAX-Team

Evaluation of the potential use case in the EmpowerAX team

Hart, aber fair – energieintensiven Fertigungsprozessen auf der Spur

Tough but fair – on the trail of energy-intensive manufacturing processes

Summary

The efficient use of energy has never been more important than it is these days. A large proportion of industrial energy consumption is taken up by the process heat that industrial plants need to manufacture goods of all kinds. The question "How can we produce more energy-efficiently?" can only be answered once it has been clarified what current processes and the units involved consume in terms of energy. The answer is not easy, especially in the case of complex large-scale plants, such as the research autoclave at the CFK Nord in Stade. Energy monitoring systems provide transparency: they not only make energy consumption visible, but also assign it to individual consumers.

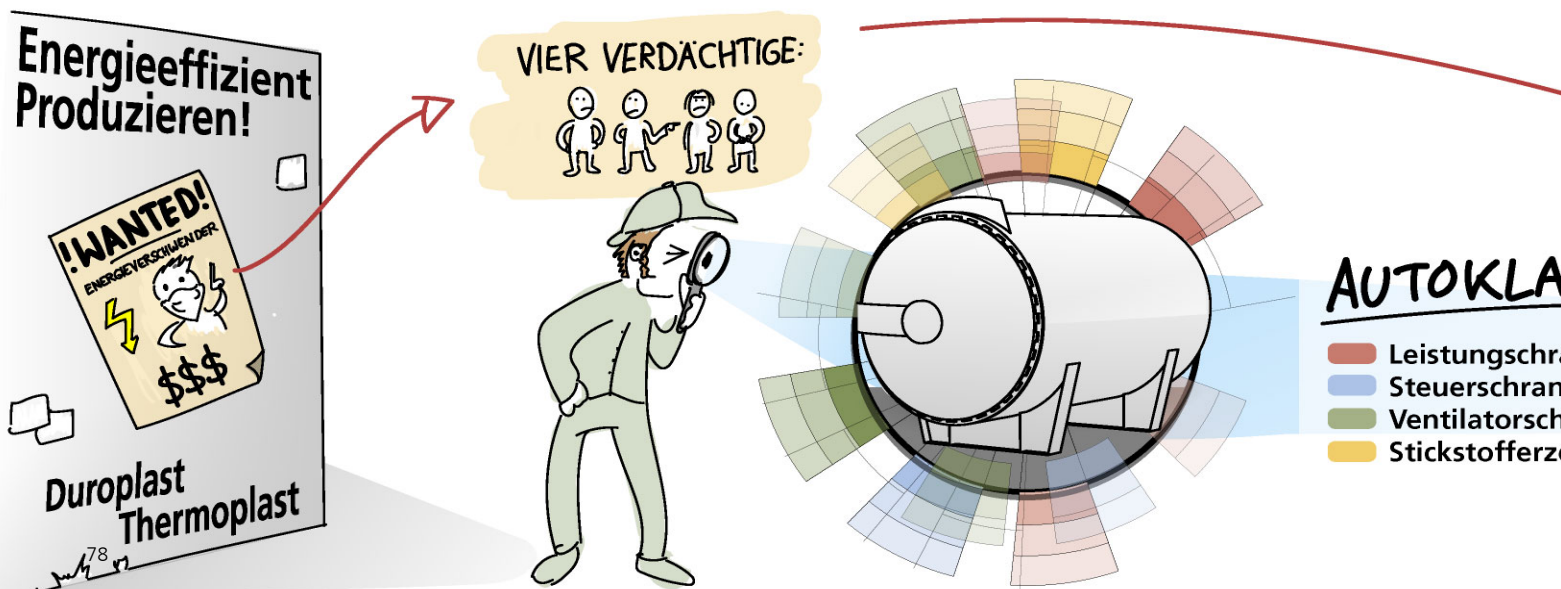
Erfassen von Energiedaten – Identifizieren von energieintensiven Teilprozessen – Ableiten von Verbesserungsvorschlägen, um Verbräuche zu mindern
Collection of energy data – Identification of energy-intensive subprocesses – Deriving suggestions for improvement to reduce consumption

Die effiziente Nutzung von Energie war noch nie so wichtig wie in der heutigen Zeit. In der Industrie nimmt die Prozesswärme einen großen Anteil des Energieverbrauchs ein, den Industrieanlagen benötigen, um Güter aller Art zu fertigen. Die Frage „Wie können wir energieeffizienter produzieren?“ kann aber erst beantwortet werden, wenn geklärt ist, was aktuelle Prozesse und beteiligte Aggregate an Energie verbrauchen. Gerade bei komplexen Großanlagen, wie z. B. dem Forschungsautoklav im CFK Nord in Stade, ist die Antwort nicht einfach. Transparenz schaffen Energiemonitoringsysteme: Sie machen nicht nur Energieverbräuche sichtbar, sondern ordnen diese einzelnen Verbrauchern zu.

Der Tatort – energieintensive Aushärtungs- und Konsolidierungsprozesse im Autoklav

Hochleistungsstrukturbauteile aus duroplastischen und thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen werden unter Druck und Hitze in einem Autoklav hergestellt, um die notwendigen Bauteileigenschaften zu erzielen. Das können relative Drücke bis zu 10 bar und Temperaturen bis zu 180 °C bei Duroplasten bzw. 420 °C bei Thermoplasten sein. Oft wird der Druck mit einem Inertgas, wie z. B. Stickstoff, erzeugt, um keine Brände während der Aufheizung entstehen zu lassen. Die Prozessführung – der Wechsel von Aufheiz-, Haltephase zur gewünschten Zieltemperatur und abschließender Abkühlphase – wird sehr individuell gestaltet. Ist die Abkühltemperatur erreicht, wird der Druck abgebaut und das Inertgas an die Umgebung abgeblasen. Im Autoklavprozess entsteht während der Aushärtung ein konsolidiertes Bauteil mit einem Faservolumengehalt von etwa 60 % und einem sehr geringen Luftporengehalt.

Welche Hauptverbraucher sind für diesen energieintensiven Fertigungsprozess verantwortlich? Verdächtig wird ein Verbraucher, der in vielen thermischen Maschinen und Anlagen auf der Anklagebank sitzt: die elektrische Widerstandsheizung. Ein Einzeltäter? Untersuchungen zeigen, dass das nicht immer der Fall sein muss.



Autor:

Dipl.-Ing. Hakan Ucan



Die Beweisaufnahme – Erfassung verbraucherorientierter Energiedaten

Für die Beweisaufnahme wird das Messsystem eines weltbekannten deutschen Industrieunternehmens mit den Schwerpunkten Automatisierung und Digitalisierung eingesetzt. Die Basis bilden kommunikationsfähige Messmodule. Sie werden in die Schaltschränke der einzelnen Verbraucher eingebaut und können die erfassten Energiewerte in Echtzeit an ein übergeordnetes Monitoringsystem übermitteln. Im Falle des Stader Forschungsautoklavs werden sechs dieser Messmodule in unterschiedlichen Schaltschränken installiert. Sie messen neben der elektrischen Widerstandsheizung (Leistungsschränke, Steuerschrank und Ventilatoren) auch den Energieverbrauch der beiden Ventilatoren, des Steuerschaltschranks und der Inertgas-Erzeugung.

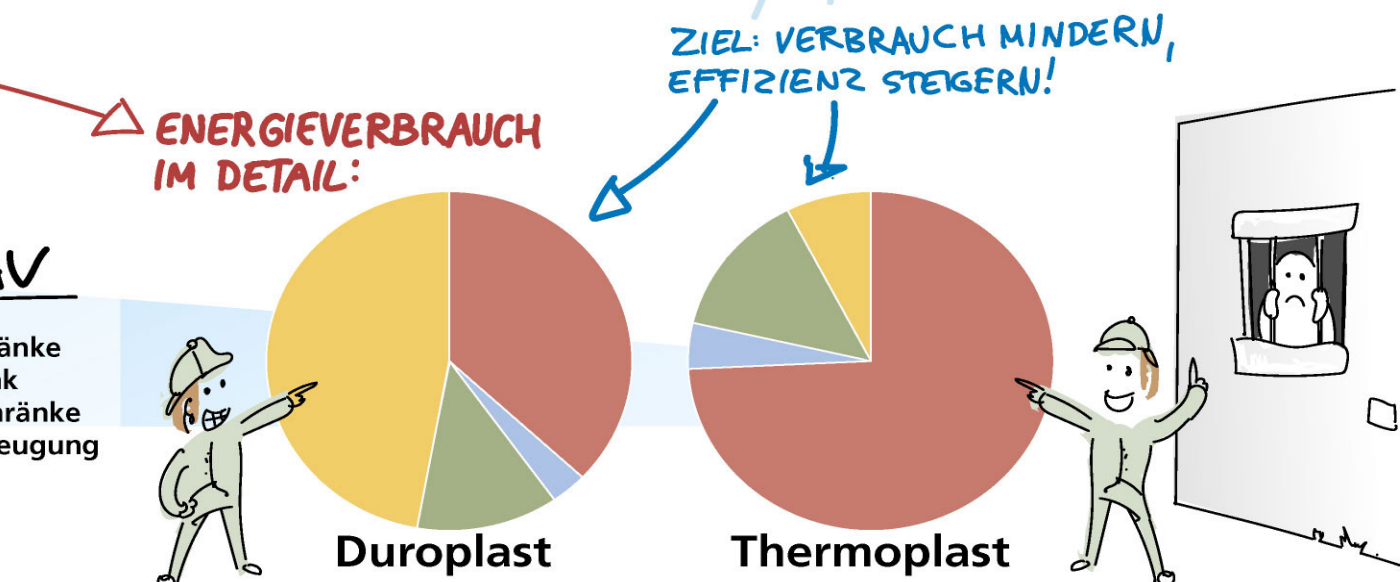
Das Untersuchungsergebnis – Hauptverbraucher identifiziert

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme wird das Energiemonitoringsystem nun im NBank-Projekt LEITWERK (Duroplast-Aushärtung bei 180°C) und in diversen EU-Projekten (Thermoplast-Konsolidierung bei 420°C) eingesetzt. Im Falle des Aushärtungsprozesses für ein Duromerbauteil fällt das Ergebnis überraschend aus: Neben dem Verdächtigen gerät ein weiterer Teilprozess in den Fokus und wird als Hauptverbraucher identifiziert: Es ist die Erzeugung des Inertgases, welches für den Druckaufbau im Autoklav eingesetzt wird. Die Inertgas-Erzeugung weist prozentual einen der elektrischen Widerstandsheizung vergleichbaren Energieverbrauch auf. Die Ventilatoren werden als Nebenverbraucher identifiziert. Der Steuerschrank als Verbraucher ist kaum bemerkbar.

Im Falle des Konsolidierungsprozesses (Thermoplast, 7 bar, 385 °C) ist der Energieverbrauch der elektrischen Widerstandsheizung allerdings dominant; alle anderen Verbraucher sind diesem nachgeordnet. In einer Zahl zusammengefasst sind das 81 % des Gesamtenergieverbrauchs. Diese ersten Ergebnisse zeigen, wo Lösungsansätze für Einsparpotenziale bestehen. Die Energieeffizienz kann gesteigert werden durch Einsatz von beheizbaren Werkzeugen im Autoklav zur Reduzierung des Energieverbrauchs für den Aufheizvorgang von Formwerkzeugen:

- Sensorsysteme zur Verkürzung der Prozesszeit,
- alternative Fluidsysteme mit energieeffizienter Generierung,
- Zwischenspeicher zur Wiederverwendung der Prozesswärme,
- erneuerbare Energien für Nebenverbraucher.

Erste Abschätzungen lassen eine Reduktion des Energieverbrauchs beim Autoklavprozess um 50 % erwarten.



Infusionsflügel – leicht, aber nicht einfach

Infusion wings – light but not simple

Summary

State of the art in glider construction is hand lamination. Dry fibre material is impregnated with liquid resin using brushes and rollers. Replacing this established manufacturing process with a vacuum infusion process is associated with some difficulties. Aspects such as manufacturing waste, resin distribution and resin absorption of foam sandwich laminates have to be investigated. For this purpose, the Institute has produced a test wing with Schempp-Hirth Flugzeugbau GmbH and Alexander Schleicher GmbH & Co. Segelflugzeugbau, which is currently undergoing operational load testing.

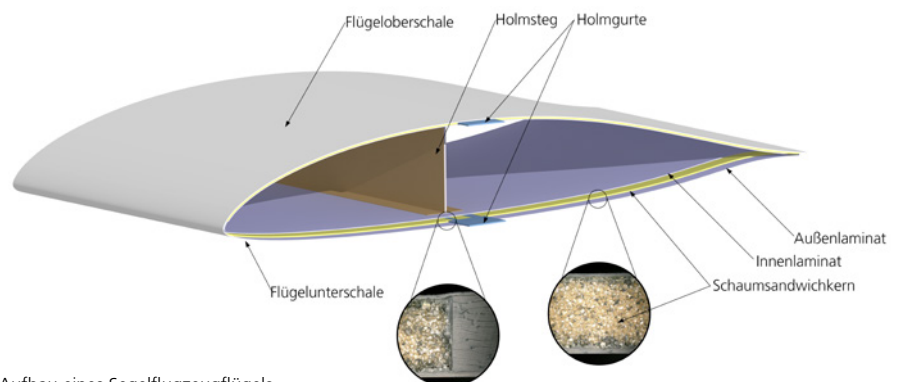
Einen Segelflugzeugflügel im Infusionsverfahren herzustellen, klingt erst einmal gar nicht so schwierig. Wir nehmen uns ein Formwerkzeug, legen einen Lagenaufbau darauf ab, bringen ein paar Hilfsstoffe für die Vakuuminfusion auf, siegeln alles mit einer Vakuumfolie, evakuieren den Aufbau und lassen das Harz fließen. Der Rest geht dann von allein.

Handlaminieren oder VADPI-Verfahren?

Ganz so einfach ist es aber nicht. Der Stand der Technik bei der Fertigung eines Segelflugzeugflügels ist das Handlaminierverfahren. Ein solcher Flügel besteht dabei aus einer oberen und einer unteren Schale. Beide Schalen zusammen ergeben das aerodynamische Profil des Flügels. Eine Flügelschale ist im Wesentlichen ein Schaum sandwich laminat mit inneren und äußeren Decklagen. Mit Pinseln und Rollen erfolgt die Imprägnierung des trockenen Fasermaterials mit flüssigem Harz. Beginnend bei den äußeren Decklagen (Formwerkzeugseite) entsteht der Laminataufbau Schicht für Schicht. Als Trennschicht zwischen äußerer und innerer Decklage dient der Sandwichkern, der gleichzeitig den vorimprägnierten und ausgehärteten Gurt aufnimmt. Durch die Verklebung der beiden Flügelschalen zusammen mit einem Steg entsteht der Flügel.

Um die Anwendung eines Infusionsverfahrens für den Bau von Segelflugzeugflügeln zu etablieren, sind einige Aspekte zu beachten:

- Vermeidung von verfahrensbedingten Abfällen
- Löcher im Sandwichkern zur Harzverteilung
- Harzaufnahme des Sandwichkerns



Aufbau eines Segelflugzeugflügels
Structure of a glider wing

Zur Untersuchung dieser Aspekte hat das Institut mit Unterstützung der Firmen Schempp-Hirth Flugzeugbau GmbH und Alexander Schleicher GmbH & Co. Segelflugzeugbau einen Discus-2C-Innenflügel als Testobjekt im „Vacuum Assisted Differential Pressure Infusion“ (VADPI-)Verfahren hergestellt.

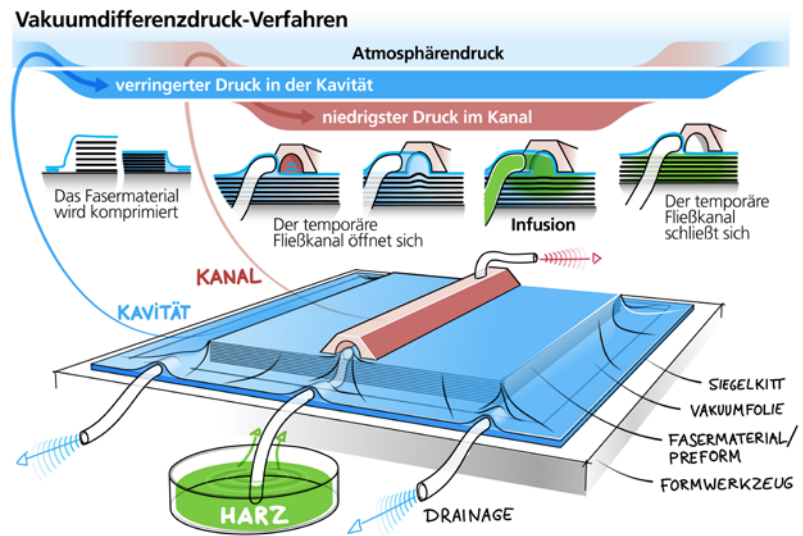
Autor:

Dr.-Ing. Arne Hindersmann



Vor- und Nachteile des VADPI-Verfahrens für den Flügel eines Segelflugzeugs

Sowohl die klassischen Infusionsverfahren als auch das VADPI-Verfahren bieten generell die Vorzüge, den Kontakt des Laminierers mit dem Harz zu minimieren und den Faservolumengehalt leichter auf den Sollwert einzustellen. Allerdings entfällt beim VADPI-Verfahren, anders als bei klassischen Infusionsverfahren, die Fließhilfe als Hilfsstoff. Die Harzverteilung übernehmen wiederverwendbare Kanäle, die sich außerhalb des Vakuumaufbaus auf der Vakuumfolie befinden. Durch Evakuieren des Hohlraums im Kanal bei gleichzeitigem Einstromen des Harzes in den Vakuumaufbau stellt sich ein Differenzdruck ein. Dieser Druck reicht aus, um die Vakuumfolie reversibel zu verformen und das Harz strömt entlang des sich ausbildenden Kanals. Ein Auflösen des Differenzdrucks führt zum Kollabieren der temporären Verteilungskanäle und es bleiben keine Abdrücke auf der Bauteiloberfläche zurück. Eine geschickte Anordnung der Kanäle auf dem Flügel sorgt für eine gute Harzverteilung.



Schematische Darstellung des Vakuumdifferenzdruckverfahrens.

Schematic illustration of the vacuum assisted differential pressure infusion.

Der Schaumsandwichkern stellt für den Harzfluss eine Barriere dar und somit wird eine Verteilung des Harzes über den Laminatquerschnitt verhindert. Als Folge sind die äußeren Decklagen (Werkzeugseite) nur unzureichend imprägniert. Löcher im Kern ermöglichen einen Harzfluss senkrecht zur Laminatenebene und die Harzversorgung muss nur über die inneren Decklagen (Vakuumfolienseite) erfolgen. Die Lochdurchmesser dürfen weder zu klein noch zu groß sein. Zu kleine Löcher führen zu einer unzureichenden Harzversorgung der äußeren Decklagen. Sind die Löcher hingegen zu groß, steigt das Gesamtgewicht durch die Harzaufnahme an und das Laminat fällt mit der Zeit an diesen Stellen ein.

Bei der Vakuuminfusion ist die Harzaufnahme des Schaums deutlich höher als beim Handlaminierverfahren. Das Versiegeln der Kernoberflächen mit einer Spachtelmasse aus Epoxidharz und Microballons reduziert die Aufnahme des Harzes, sodass nur noch ein Mehrgewicht von ca. 200 g/m² resultiert. Allerdings verschlechtert sich auch die Anbindung der Decklagen. Eine Aussage zur notwendigen Anbindungsgüte ist schwer vorherzusagen. Diesen Aspekt und ob die Herstellung von Segelflugzeugflügeln im Infusionsverfahren in Zukunft sinnvoll ist, soll ein Betriebsbelastungsversuch des Flügels zeigen. Der Versuch findet derzeit am Institut für Flugzeugbau und Leichtbau (TU-BS) statt und die Ergebnisse werden mit einem im Handlaminierverfahren hergestellten Flügel aus dem Projekt GeAviBoo verglichen.

Wenn der Belastungsversuch für den VADPI-Flügel bessere Ergebnisse zeigt als der Versuch mit dem handlaminierten Flügel, dann besteht eine realistische Chance, zukünftige Segelflugzeugflügel im VADPI-Verfahren herzustellen.

Infusion einer Segelflugzeugflügel-schale mit dem VADPI-Verfahren
Infusion of a glider wing cover
using the VADPI-method



Mit dem LASSO auf Wellenjagd – KI für die Mischungsanalyse

Hunting waves with the LASSO – AI for mixture analysis

Summary

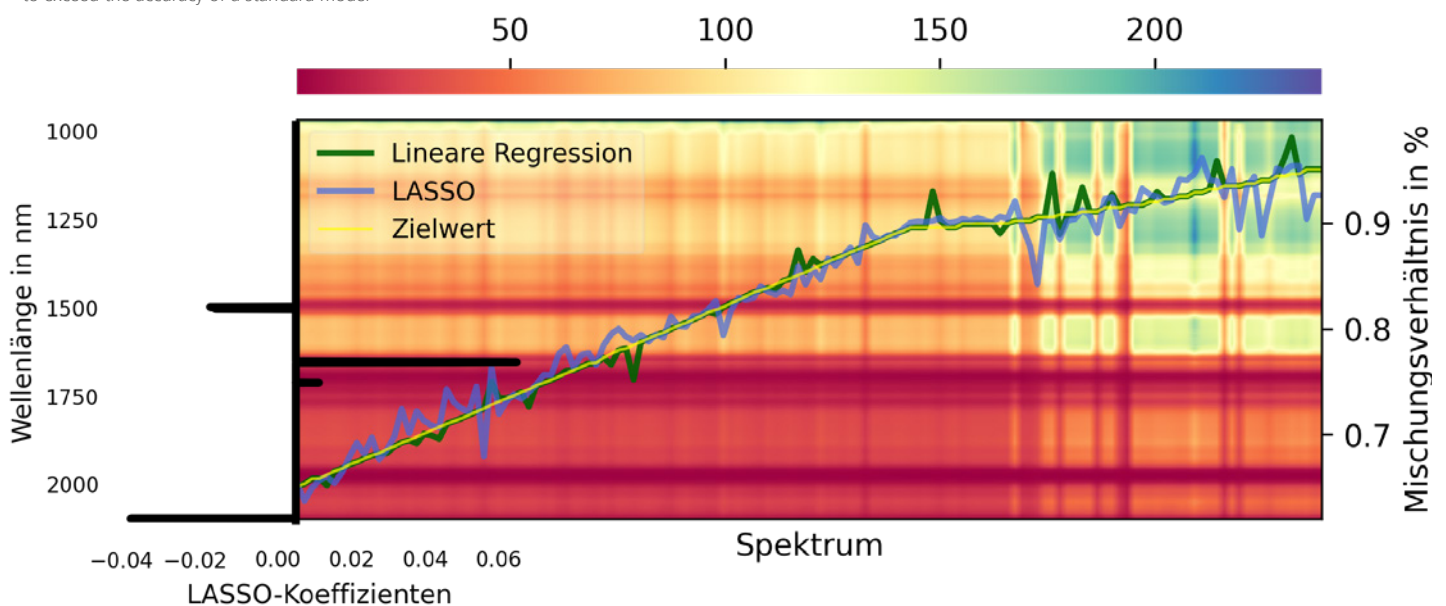
The use of two-component epoxy resin systems for impregnating preforms in isothermal RTM processes (Resin Transfer Moulding) allows for cost-effective and sustainable component production in the aerospace industry. Inline mixture analysis in such systems is an elementary component for quality-assured production. Sensors for indirect measurement of mixing ratios are used. However, the mathematical relationship between measurement and mixing ratio is complex and eludes precise description by classical models. The DLR is therefore using data-based approaches in collaboration with industrial partners to make inline mixing analysis feasible for two-component systems.

Der Einsatz von Zweikomponenten-Epoxidharz-Systemen zur Imprägnierung von Preforms in isothermen RTM-Prozessen (engl. Resin Transfer Moulding) erlaubt eine kostengünstige und nachhaltige Bauteilfertigung in der Luftfahrt. Die Inline-Mischungsanalyse in solchen Systemen ist ein elementarer Baustein für eine qualitätsgesicherte Fertigung. Es kommen spezielle Sensoren zum Einsatz, die eine indirekte Messung von Mischungsverhältnissen ermöglichen. Der mathematische Zusammenhang zwischen Messung und Mischungsverhältnis ist jedoch komplex und entzieht sich einer genauen Beschreibung durch klassische Modelle. Daher nutzt das DLR in Zusammenarbeit mit Industriepartnern datenbasierte Ansätze, um die Inline-Mischungsanalyse für Zweikomponentensysteme realisierbar zu machen.

Sensorik zur Mischungsanalyse

Neben der Refraktometrie, bei der ein linearer Zusammenhang zwischen **Messwert** und **Mischungsverhältnis** in Abhängigkeit von Temperatur besteht, werden dielektrische Sensoren und die Spektroskopie betrachtet. Die dielektrische Analyse (DEA) misst die komplexe elektrische Impedanz. Durch Auftragen des Imaginärteils über dem Realteil ergibt sich im relevanten Frequenzbereich ein Halbkreis, dessen Radius mit dem Mischungsverhältnis korreliert. Während Universalsoftware basierend auf DEA-Daten unplausible Vorhersagen liefert, insbesondere negative Mischungsverhältnisse und hohe Vorhersagefehler, können mit Methoden des Maschinellen Lernens genaue und aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden.

Dem LASSO genügen vier NIR-Teilspektren, um die Genauigkeit eines Standardmodells zu übertreffen
For the LASSO, four partial NIR spectra are sufficient to exceed the accuracy of a standard model



Autor(inn)en:

Dr.-Ing. Alexandra Kühn
Dr. rer. nat. Christoph Brauer



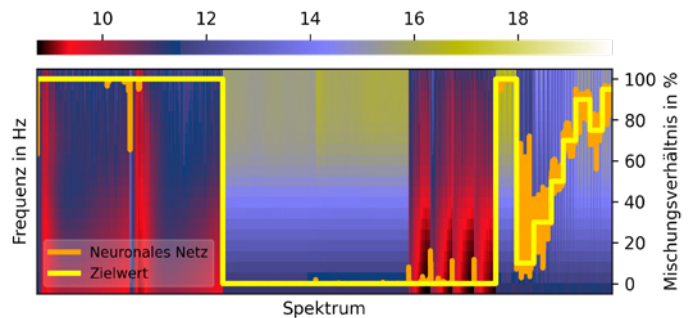
Die Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR) stellt ein vollständiges Spektrum an Messwerten bereit. Bei der Auswertung der Lichtdurchlässigkeit im relevanten Wellenlängenbereich von 900 nm – 2100 nm kennzeichnen mehrere Peaks die molekularen Bestandteile des Harzes, deren Zusammensetzung sich mit dem Mischungsverhältnis ändert. Auch hier sind zur Auswertung prinzipiell verschiedene Ansätze möglich, die beispielsweise Peaks, Integrale oder Ableitungen charakteristischer Wellenlängenbereiche berücksichtigen. Im Projekt SAUBER 4.0 des Verbundführers AIRBUS entwickeln Projektpartner verschiedene Sensorsysteme zur Analyse von Harzmischungen. Neben dem am DLR eingesetzten DEA-Messsystem implementiert unter anderem die Firma APOS ein NIR-Spektrometer an einem durch das CTC entwickelten Teststand. So stellt die Firma APOS für am CTC hergestellte Harzmischungen Messdaten zur Verfügung. Auf deren Basis hat das DLR Vorhersagemodelle zur Mischungsanalyse entwickelt.

LASSO und Maschinelles Lernen

Abhängig von der eingesetzten Sensorik eignen sich unterschiedliche Modellklassen zur Vorhersage von Mischungsverhältnissen. Dabei besteht die Herausforderung, dass nur eine geringe Anzahl von Datensätzen hoher Qualität zur Verfügung steht. Denn eine kontrollierte Herstellung einer repräsentativen Anzahl an Mischungsverhältnissen bei paralleler Aufzeichnung entsprechender Messwerte ist aufwendig. Kombiniert mit hochdimensionalen Messdaten (Größenordnung 103 Wellenlängen bei der NIR) begünstigt der beschriebene Engpass (Größenordnung 102 Datensätze) eine Überanpassung von Modellparametern an Trainingsdaten. Wesentliches Ziel Maschinellen Lernens ist die Generalisierbarkeit trainierter Modelle auf neue und ungesehene Daten.

Um der Überanpassung entgegenzuwirken, kommen verschiedene Techniken in Frage. Der LASSO (engl. Least Absolute Shrinkage and Selection Operator-)Ansatz begründet eine Variante generischer linearer Regression, in der hochdimensionale Eingangsdaten auf wenige (hier: Größenordnung 101) relevante Merkmale reduziert werden. So konnten im Falle der NIR-Spektroskopie vier für die Vorhersage von Mischungsverhältnissen besonders relevante Teilspektren identifiziert werden. Im Falle der niedrigdimensionalen DEA-Daten (Eingangsparameter Temperatur und Radius) lieferten künstliche neuronale Netze gleichfalls vielversprechende Ergebnisse.

So lassen sich mit Ansätzen des Maschinellen Lernens auch sehr komplexe Zusammenhänge zwischen den Messwerten unterschiedlicher Sensorsysteme und dem Mischungsverhältnis von 2K-Epoxydharzen bestimmen und ein verbessertes Verständnis der Einflussfaktoren erzielen.



Bidirektionale rekurrente neuronale Netze bilden DEA-Messdaten auf Mischungsverhältnisse ab

Bidirectional recurrent neural networks map DEA measurement data to mixing ratios



Die mit der DEA gemessene Impedanz korreliert mit dem Mischungsverhältnis von 2K-Epoxydharzen

The impedance measured with dielectric sensors correlates with the mixing ratio of 2K epoxy resins

Eine virtuelle Zeitreise durch die vernetzte Produktion von morgen

A virtual time travel through the networked production of tomorrow

Summary

For humans, it is a natural process: we observe something, associate the impression with something familiar and learn from it. Machines need formalisms to be able to assign new data to existing information. Humans and machines work together in lightweight production and should also use their experience and collected data together to improve processes, become more efficient and increase quality. Ontologies based on the formalised process description form the basis of the digital twins of the research facilities at the Center for Lightweight Production Technology and are being further developed for various use cases.

Monitore im Leitstand weichen einer VR-Brille, um vergangene Prozesse noch einmal räumlich wahrnehmen zu können

Monitors in the control room give way to VR glasses so that past processes can be spatially perceived once again

Produktionsdaten müssen erfasst, verwaltet und in den richtigen Kontext gebracht werden, um Vergangenes rekapitulieren, Aktuelles beobachten und Zukünftiges nachhaltiger auslegen zu können. Die Fertigung soll nicht nur dokumentiert werden, um im Fall von Mängeln deren Ursache zu finden. Vielmehr sollen Maschinen ihre Soll- und Istwerte vernetzen und Abweichungen analysieren. Wissen und Erfahrungen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sollen digital erfasst und weitergegeben werden, um individuelle Abweichungen bei manuellen Prozessen zu vermeiden.

Vollständig rekapitulierbar dank virtuellem Abbild

Die Vision: Eine virtuelle Umgebung stellt Produktionsparameter im richtigen Zusammenhang dar. Sogar die Zeit lässt sich darin zurückdrehen und vergangene Prozesse können aus neuen Perspektiven beobachtet werden. Dieser virtuelle Leitstand wird im Projekt Factory of the Future erarbeitet. Daten von Maschinen und Sensoren müssen zunächst erhoben, ausgelesen, gespeichert und bereitgestellt werden. Am Beispiel der Forschungsplattform EVO wird das aktuell im Projekt DHiiP technisch umgesetzt. Die wissenschaftliche Arbeit im Projekt InDiCaD besteht nunmehr darin, die gewonnenen Daten sinnvoll zu strukturieren und um zusätzliche Beobachtungen und Erkenntnisse des Menschen zu erweitern. Erst der richtige Kontext ermöglicht es, Zusammenhänge zu erkennen und auszuwerten. Semantische Netze bzw. Ontologien helfen dabei, Beziehungen zwischen Datenobjekten herzustellen. Sie bestehen aus Tripeln ("Subjekt – Prädikat – Objekt") und können sich wie Synapsen miteinander vernetzen. So lassen sich auch komplexe Prozesse auf einfache und sich wiederholende Zusammenhänge reduzieren. Um daraus eine einheitliche Datenstruktur zu entwickeln, müssen einzelne Elemente definiert werden.



Autoren:

Dipl.-Ing. Sven Torstrick von der Lieth
Dipl.-Ing. Christian Kromholz

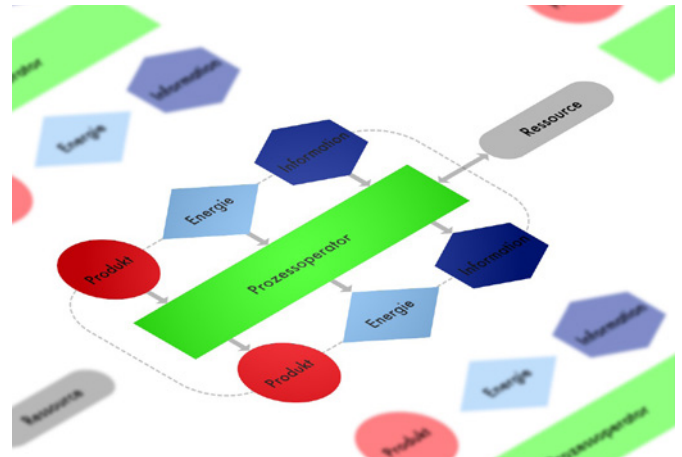


Die Formalisierte Prozessbeschreibung (FPB) nach VDI 3682 macht genau das für Fertigungsprozesse. Sie unterteilt einen Prozess in fünf Klassen. Der Prozessoperator nutzt eine Ressource, um ein Produkt durch Zufuhr von Energie und Information in ein anderes Produkt umzuwandeln. Dabei lassen sich Prozesse auf verschiedenen Detaillierungsebenen beschreiben. Ein Prozessoperator kann beispielsweise die komplette Fertigung umfassen oder auch nur einen einzelnen Teilschritt mit Vorgängern und Nachfolgern. Diesen Klassen können bestimmte Instanzen zugeordnet werden: Ein Aushärteprozess nutzt die Ressource Autoklav und hat als Input eine Preform, elektrische Energie und vordefinierte Sollwerte. Zudem generiert der Aushärteprozess durch die Ressource Autoklav Wärme und Druck, ein ausgehärtetes Bauteil und Sensordaten als Istwerte. Im Projekt ISENGART wurde die Fertigung einer Flügelrippe bereits basierend auf der FPB dokumentiert.

Isolierte Informationen vernetzen und nutzen

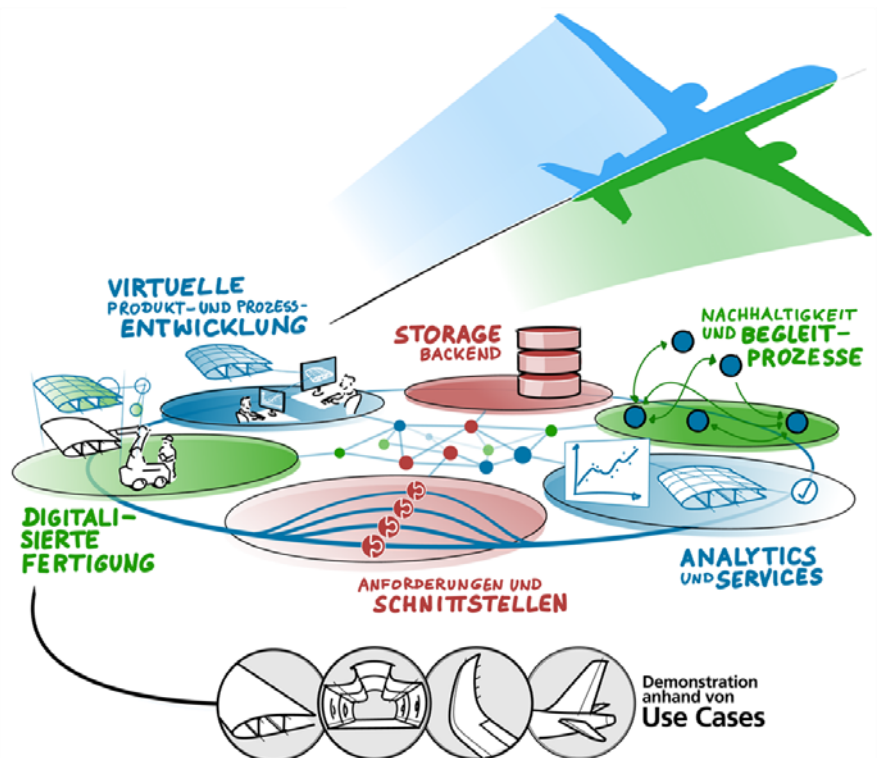
Ist der Fertigungsprozess formalisiert beschrieben, können seine Daten semantisch vernetzt werden. Dadurch können sie aus verschiedenen Perspektiven betrachtet bzw. von unterschiedlichen Rollen abgefragt werden und bedienen somit unterschiedliche Anwendungsfälle. Dabei kann nicht nur rückwärtsgerichtet im Sinne einer Dokumentation gedacht werden. Im Projekt EXACT dienen semantische Netze dazu, zukünftige Prozesse besser auslegen und simulieren zu können. Das Wissen, welche Produkte mit welchen Prozessen gefertigt werden können und mit welchen Ressourcen und welcher Energie, ist in der Ontologie bereits hinterlegt. Alle Rollen blicken dabei auf dieselben Daten, nur betrachten sie diese in einem anderen Kontext und ziehen unterschiedliche Informationen daraus. Im Gegensatz zu in Dokumenten isolierten Informationen kann vorhandenes Wissen gefunden und genutzt werden.

Am ZLP nutzen wir gemeinsam mit Partnern die Möglichkeiten industrienahe Forschungsanlagen, um die Fabrik der Zukunft schon heute zu gestalten.



Elemente der Formalisierten Prozessbeschreibung: Operator, Ressource, Produkt, Energie und Information

Elements of the Formalised Process Description: Operator, resource, product, energy and information



Digitalisierte Produktion für mehr Nachhaltigkeit: im Industriemaßstab demonstriert am ZLP in Stade
Digitalised production for more sustainability: demonstrated on an industrial scale at ZLP in Stade

Flügelstruktur aus dem Projekt HAP
Wing structure from the HAP project

DAS INSTITUT IM DETAIL

The institute in detail

Abteilungen _____ 88

Departments

Geschäftsfelder _____ 94

Business areas

Veröffentlichungen 2021/2022 _____ 102

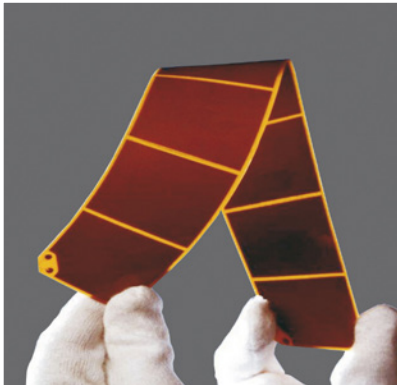
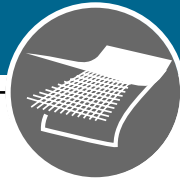
Publications 2021/2022

Patente 2021/2022 _____ 104

Patents 2021/2022

ABTEILUNG MULTIFUNKTIONSWERKSTOFFE

Department Multifunctional Materials



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



ABTEILUNG STRUKTURMECHANIK

Department Structural Mechanics



Vom Phänomen über die Modellbildung zur Simulation

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

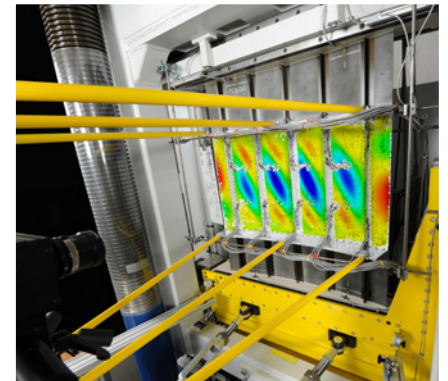
- Effiziente Entwurfsmethoden
- Innovative Prüf- und Messverfahren auf Bauteilebene
- Virtuelle Strukturen und digitaler Zwilling für den ganzen Lebenszyklus

Kompetenzen

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

Leistungsprofil

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



Summary

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

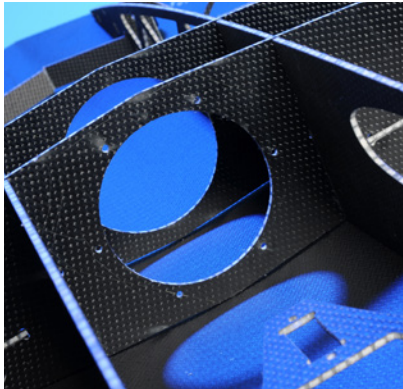


Abteilungsleiter:
Dr.-Ing. Tobias Wille



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



ABTEILUNG FASERVERBUNDTECHNOLOGIE

Department Composite Technology



Digitalisierte Fertigung und Montage

Faserverbundstrukturen sind eine wesentliche Säule zukünftiger Leichtbaustrategien und damit essenziell für energieeffiziente Mobilität. Seit mehr als 30 Jahren erforscht und entwickelt die Abteilung innovative Lösungen für die Fertigung und Montage bis hin zu zertifizierten Luftfahrtstrukturen. Entscheidend für den Erfolg ist die Begleitung des Designprozesses, um die Vorteile der Faserverbundstrukturen voll zur Geltung zu bringen. In der Produktion ist die Digitalisierung immer häufiger der Schlüssel, um trotz der komplexen Prozesse eine gleichbleibend hohe Qualität zu garantieren.

Kompetenzen

Anlagenseitig deckt das Angebot der Abteilung Fertigungsszenarien von der Pressen- und Autoklaventechnologie bis zur Faserwickeltechnik ab. Alle Anlagen verfügen über modernste Steuerungs- und Qualitätssicherungstechnik. Zur Verkürzung der Zykluszeit kommen bei Bedarf selektiv und volumetrisch wirkende Induktions- und Mikrowellentechnik sowie leistungsfähige Kühlkonzepte zum Einsatz. Bewertet werden sowohl Produktionskosten als auch Ressourcen- und Energieeffizienz.

Leistungsprofil

- Nachhaltige Fertigung und Montage durch Digitalisierung
 - o Sensorgeführte Prozessierung und Qualitätssicherung
 - o Vernetzte Prozesstechnik
- Energieeffiziente Mobilität durch multifunktionale Strukturen
 - o Realisierung von Leichtbaustrukturen im Grenzbereich
 - o Integration von Systemtechnik
- Bilanzierung der Ressourceneffizienz
 - o Energiemanagement und CO₂-Footprint im Lebenszyklus
 - o Kreislaufwirtschaft (reduce, reuse, recycle)



Summary

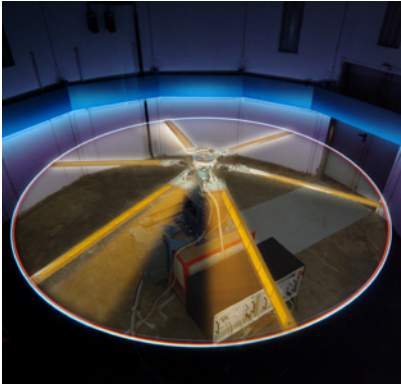
The department of Composite Technology has more than 30 years of experience in the field of advanced composite manufacturing based on press, autoclave and filament winding technologies. The actual focus is on digital methods, process sensors and simulations to further improve both component performance and cost efficiency. The application bandwidth reaches from sophisticated experimental trials up to certified aircraft structures.



Abteilungsleiter:
Dr.-Ing. Markus Kleineberg

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



ABTEILUNG VERBUNDPROZESSTECHNOLOGIEN

Department Composite Process Technologies



Von der Vision zur Produktion – wir machen Leichtbau für alle greifbar

Die Großanlagen des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP®) in Stade bilden die Basis für die Forschung der Abteilung an Produktionsprozessen für Leichtbaustrukturen aus Verbundwerkstoffen. Industrienähe entsteht insbesondere durch die Forschung an Produktionsanlagen im Industriemaßstab, die eine Herstellung anwendungsgerechter Prozess- und Technologiedemonstratoren ermöglichen. Einen Schwerpunkt hierbei bildet die Erlangung von Prozessverständnis, das in Prozessmodelle überführt wird. Mit Hilfe dieser Modelle werden digitale Zwillinge der betrachteten Produktionsanlagen und -prozesse erstellt. Sie können zur virtuellen Produktionsplanung sowie zur intelligenten Prozesssteuerung mit Hilfe von Online-Sensorsystemen genutzt werden. Neben den Hauptkriterien Bauteilqualität, Prozessrobustheit, Fertigungsrate und Ressourceneffizienz werden zunehmend Aspekte für eine umweltfreundliche und emissionsarme Produktion untersucht. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der Forschung, den Anlagenherstellern und den Endanwendern sowie den anderen Abteilungen des Instituts ist Voraussetzung für einen schnellen und erfolgreichen Transfer von Forschungsergebnissen in industrielle Anwendungen.

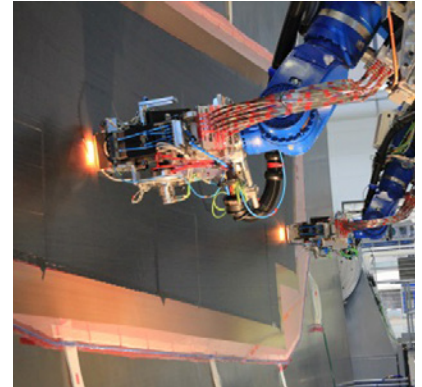
Kompetenzen

Forschungsarbeiten auf den Gebieten der multirobotischen Faserablage, der qualitätsgesicherten Infusions- und Aushärteprozesse sowie der automatisierten RTM-Fertigung. Verantwortung für die folgenden drei Großanlagen des ZLP® in Stade:

- GroFi®: szenarioflexible Forschungsplattform für multi-robotische Fibre-Placement- und Tapelege-Prozesse 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. Bauteilgrundriss bis zu 2 m x 2,5 m.
- BALU®: Forschungsautoklav für simulationsunterstützte und ressourceneffiziente Aushärteprozesse Beschickungsmaße bis zu 20 m x 5,8 m; Temperaturen bis 420 °C

Leistungsprofil:

- Prozessverständnis in der automatisierten FVK-Fertigung
- Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze
- Methoden und Technologien zur Inline-Qualitätssicherung
- Technologieentwicklung und -demonstration
- KI-Ansätze in der Prozesssteuerung
- Steuerung und Überwachung multirobotischer Fertigungsprozesse
- Prozess- und Technologie-Know-how für Faserlegeprozesse, Autoklavprozessierung sowie textile Preforming- und RTM-Prozesse
- Digitales Prozessdaten-Management



Summary

The large-scale plants of the Centre for Lightweight Production-Technology (ZLP®) in Stade form the basis for the department's research on production processes for lightweight structures made of composites. Industrial relevance is especially given by carrying out research activities on production facilities at industrial scale, which enable the fabrication of process and technology demonstrators specified for different applications. Herein, emphasis is put on obtaining process comprehension and on using it for the creation of process models. With the help of these models, digital twins of the respective production facilities and processes are developed.

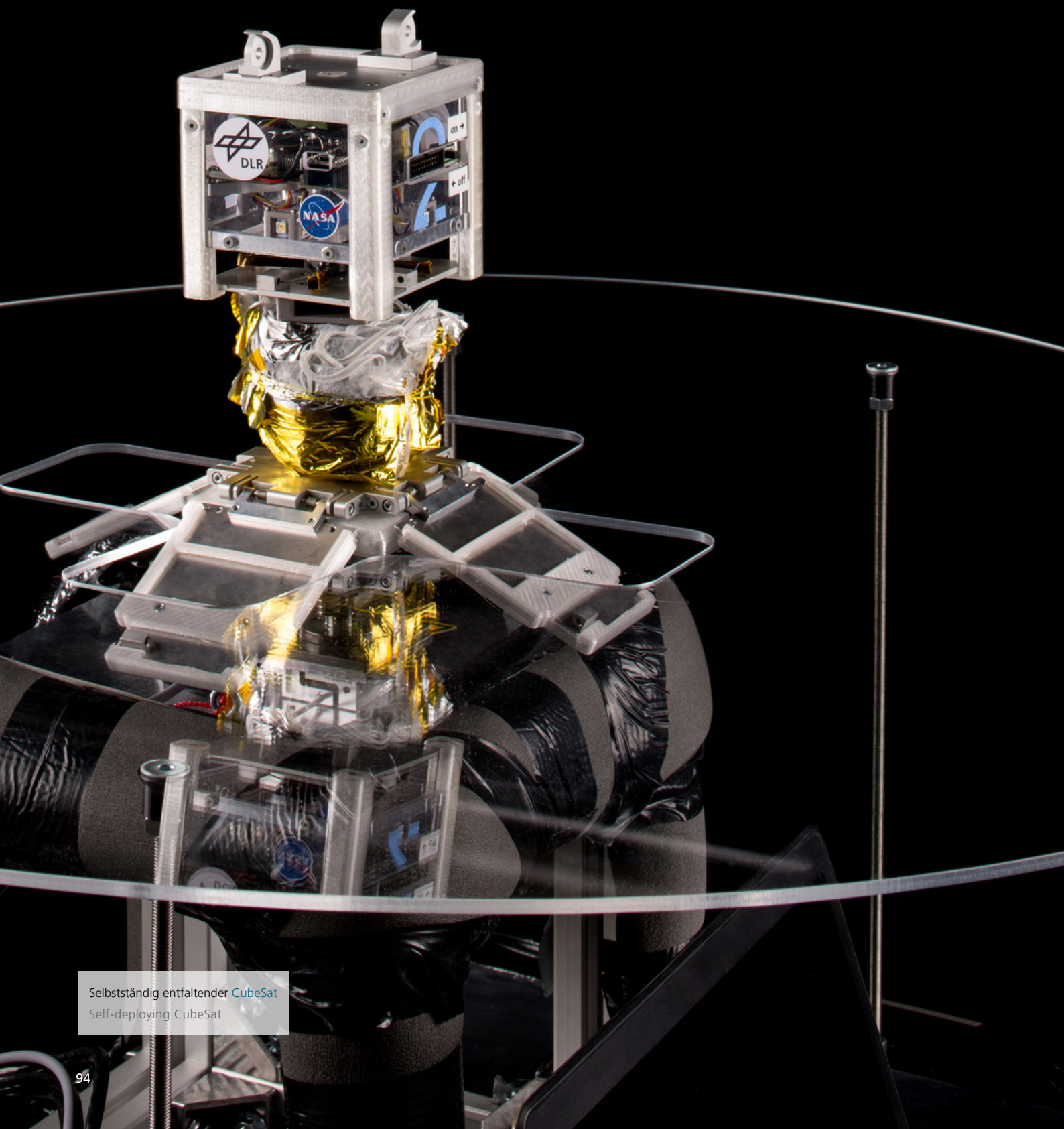


Abteilungsleiter:
Dr.-Ing. Daniel Stefaniak

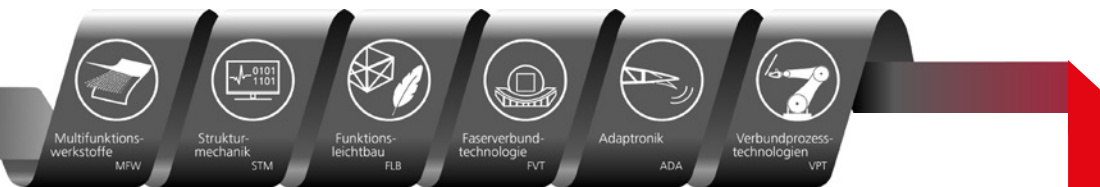


Geschäftsfelder

Business areas



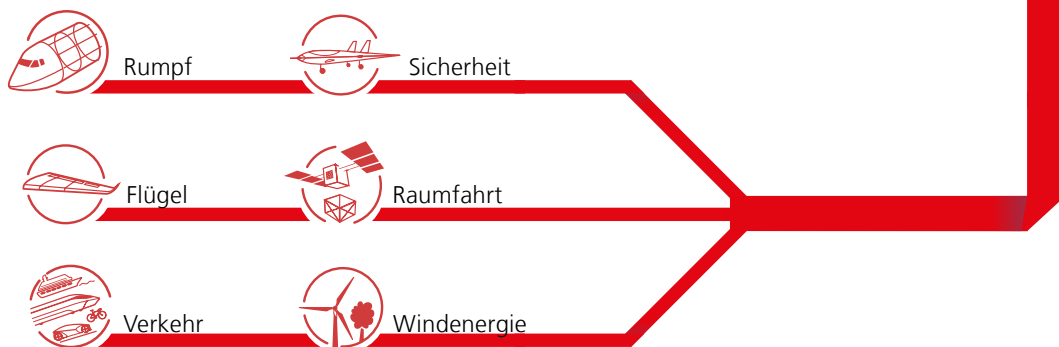
Selbstständig entfaltender CubeSat
Self-deploying CubeSat



Das Institut besitzt sechs Geschäftsfelder, in denen die Projekte der Anwendungsforschung themenorientiert zusammengefasst sind. Die Geschäftsfelder dienen der Durchführung von großen praxisorientierten Projekten mit abteilungsübergreifendem und interdisziplinärem Charakter. Sie reflektieren die programmatischen Schwerpunkte des DLR und dienen der Erprobung und Validierung unserer Forschungsergebnisse sowie der Umsetzung in konkrete Anwendungen.

Die Abteilungen und die Geschäftsfelder unterstützen sich dabei gegenseitig: Die Abteilungen stellen ihre fachliche Kompetenz den Teams der Geschäftsfelder zur Verfügung, während die Geschäftsfelder themenorientiert Gesamtlösungen generieren, an denen die Abteilungen partizipieren. Zur Durchführung der anwendungsorientierten Projekte stehen Großforschungsanlagen zur Verfügung. Die Geschäftsfelder kooperieren mit vielen anderen DLR-Instituten und intensivieren die multidisziplinäre Zusammenarbeit in nationalen und internationalen Beziehungen.

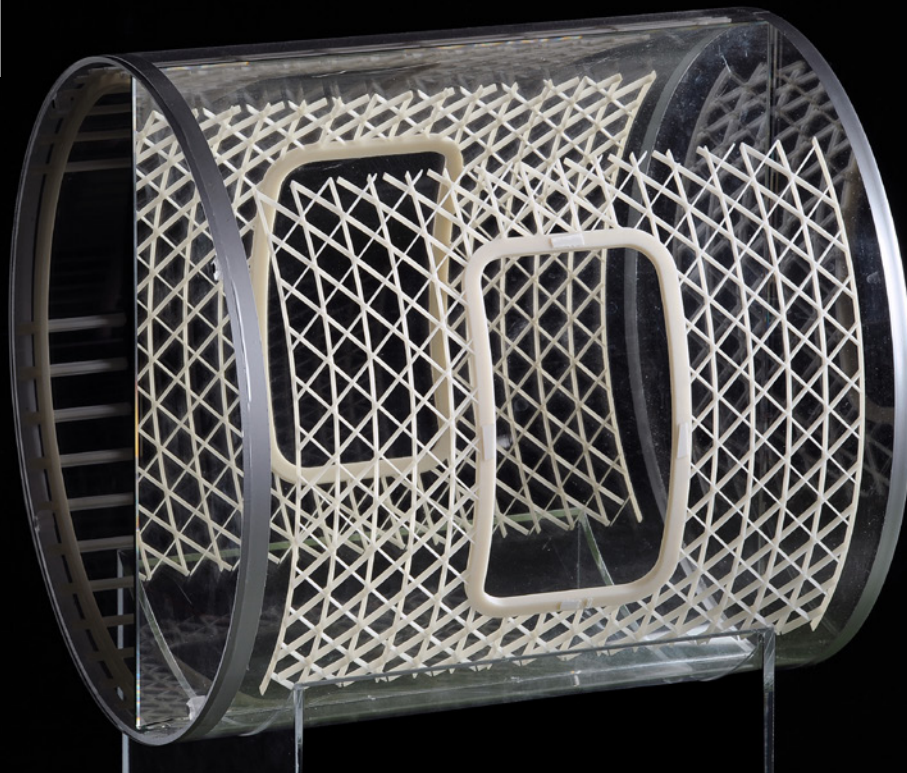
Die Anwendungsthemen der Geschäftsfelder sind:



Die Geschäftsfeldleiter sind erfahrene Wissenschaftler. Sie überblicken die zu ihrem Anwendungsgebiet am Institut bearbeiteten Fragestellungen und bündeln die Kompetenzen des Instituts in ihrem Geschäftsfeld nach innen und nach außen.

Die Geschäftsfeldleiter nehmen die kundenseitigen Bedarfe und Interessen auf. Sie sind daher die idealen Ansprechpartner für die Kunden und Forschungspartner zu den jeweiligen Anwendungsfeldern. Mit industriellen Partnern und Kunden sind die Einrichtung von Patenschaften sowie auch zeitnahe Technologietransfers in neue oder verbesserte Industrieprodukte möglich.

The institute has six business areas in which our application projects are grouped according to promising topics. The business areas are used to carry out large practice-oriented projects with a cross-departmental and interdisciplinary character. Large research facilities are available to carry out the application-oriented projects. The business areas cooperate with many other DLR institutes and intensify multidisciplinary cooperation in national and international relationships.



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.

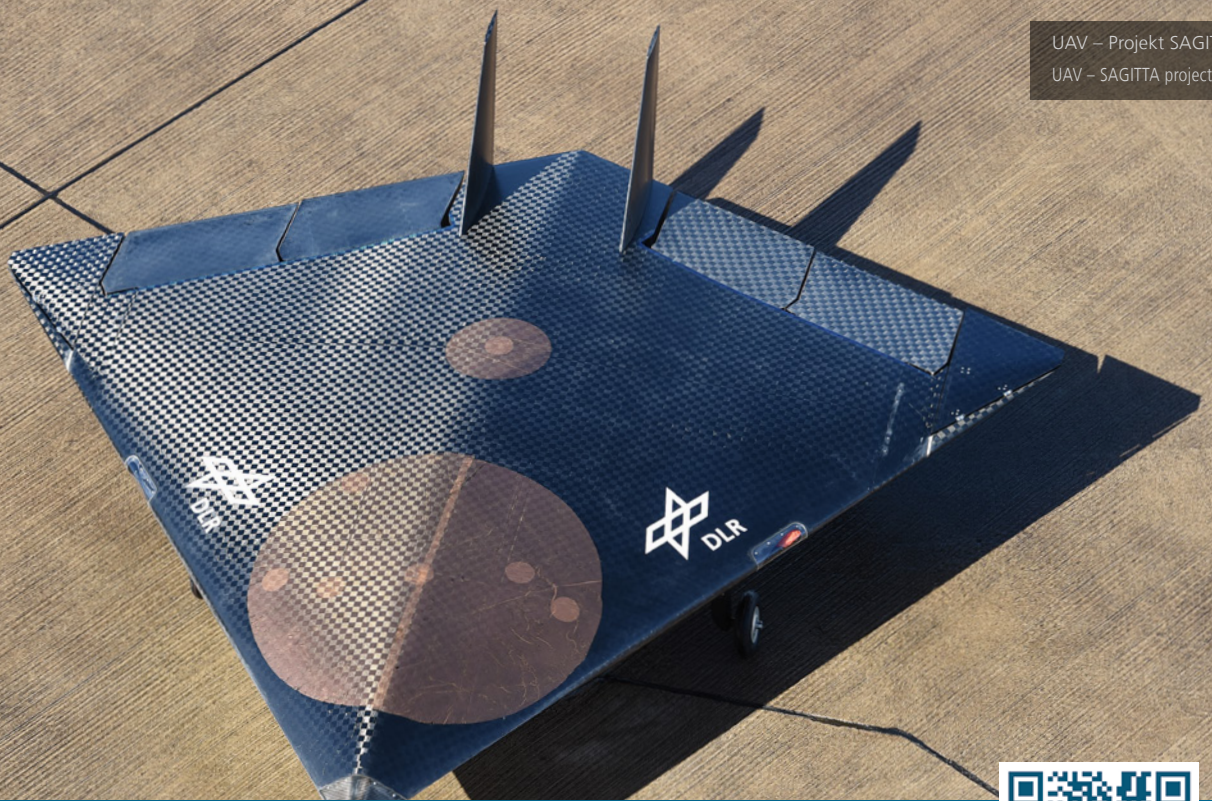
Im Geschäftsfeld Rumpf werden Konzepte für den Flugzeugrumpf der Zukunft entwickelt, unter Verwendung von Leichtbauwerkstoffen wie CFK oder geeigneten Multimaterialkombinationen.

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 Sicherheit

Business area Security

Dem Geschäftsfeld Sicherheit sind sämtliche Luftfahrzeuge und deren Strukturkomponenten zugeordnet, die nicht als klassische Großkomponenten – Flügel und Rumpf – moderner Verkehrsflugzeuge klassifiziert sind.

Dies gilt naturgemäß für militärisches Luftfahrtgerät, aber auch für die gesamte Bandbreite unbemannter Luftfahrzeuge (UAV – Unmanned Aerial Vehicles) sowie für spezielle Strukturkomponenten ziviler Luftfahrzeuge, an die ganz besondere Anforderungen (wie beispielsweise durch elektrische Antriebe und Senkrechtstartfähigkeit oder auch durch multifunktionale Strukturaspekte wie Laminarflügel, Radome, Enteisierung und strukturintegrierte Antennen) gestellt werden.

Die Forschungsarbeiten in diesem Geschäftsfeld zielen gegenwärtig auf kosteneffiziente Herstellungstechnologien, Bauweisen und Werkstoffe zukünftiger Kampfflugzeuge und unbemannter Luftfahrzeuge ab und reichen vom Strukturentwurf bis hin zum Prototypenbau. Besondere elektromagnetische Anforderungen, wie etwa die Einbettung von Antennen in die Verbundstruktur oder niedrige Radarreflexionen, erfordern Technologien, Methoden und Werkstoffe, die ausschließlich in diesem Geschäftsfeld entwickelt werden.



Geschäftsfeldleiter:
Dipl.-Ing. Michael Hanke

Summary

The business area “Security” is assigned to all aircraft and their structural components that are not classified as classic large components – wings and fuselage – of modern airliners. This naturally applies to military aircraft, but also to the entire range of unmanned aerial vehicles (UAVs) as well as special structural components of civil aircraft with special requirements (for example structures for electrically driven vehicles and vertical take-off capability or multifunctional structural aspects such as laminar wings, radomes, de-/anti-icing and structurally integrated antennas). Research in this business area is currently focused on cost-efficient manufacturing technologies, design and materials for future fighter aircraft and unmanned aerial vehicles, and ranges from structural design to prototype construction. Special electromagnetic requirements such as the embedding of antennas in the composite structure or low radar reflections require technologies, methods and materials that are developed exclusively in this business area.



Geschäftsfeld Flügel

Business area Wing

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.

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-Wissenschaftende in dem Projekt EXACT.

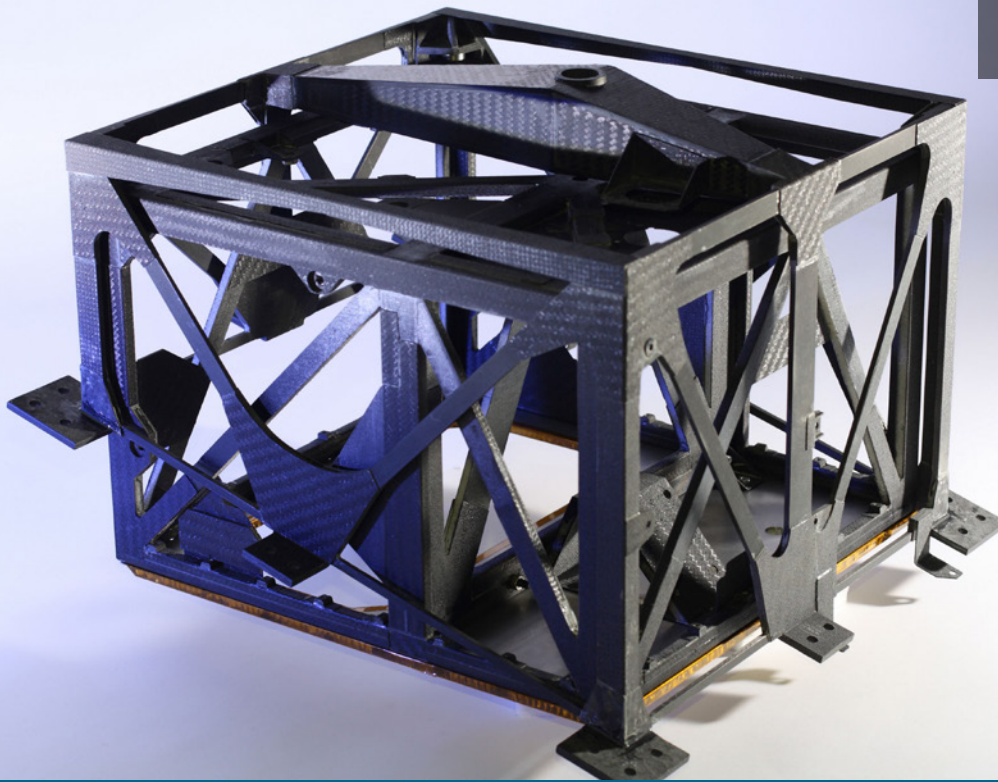
Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms Horizon 2020/Clean Sky 2 hat das Projekt HLFC-WIN (Hybrid Laminar Flow Control on the Wing) die Reduktion des Widerstands zum Ziel. Zukünftige Tragflächen sind voraussichtlich kleiner und smarter. In den Flügeln integriert sind Absaugsysteme zur Laminarhaltung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

In einem Forschungsprojekt des Luftfahrtforschungsprogramms, dem Projekt ELWIS-Alive (Automatisierte Faserlegeprozesse und Infusionsverfahren für die Flügelchalenfertigung), steht die kosten- und ressourceneffiziente Fertigung von Flügelkomponenten im Fokus. Die Erkenntnisse dieses Projektes helfen, die Emissionen vor der Indienststellung 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.



Geschäftsfeldleiter:
Dr.-Ing. Srinivas Vasista



Geschäftsfeld Raumfahrt

Business area Space Technologies

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 der Asteroidenlander MASCOT der Hayabusa2-Mission. Neuartige Designkonzepte und Fertigungstechnologien für die Strukturen von Kompaktsatelliten sowie Instrumentenstrukturen für Satelliten und interplanetare Missionen gehören ebenso zum Portfolio.

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

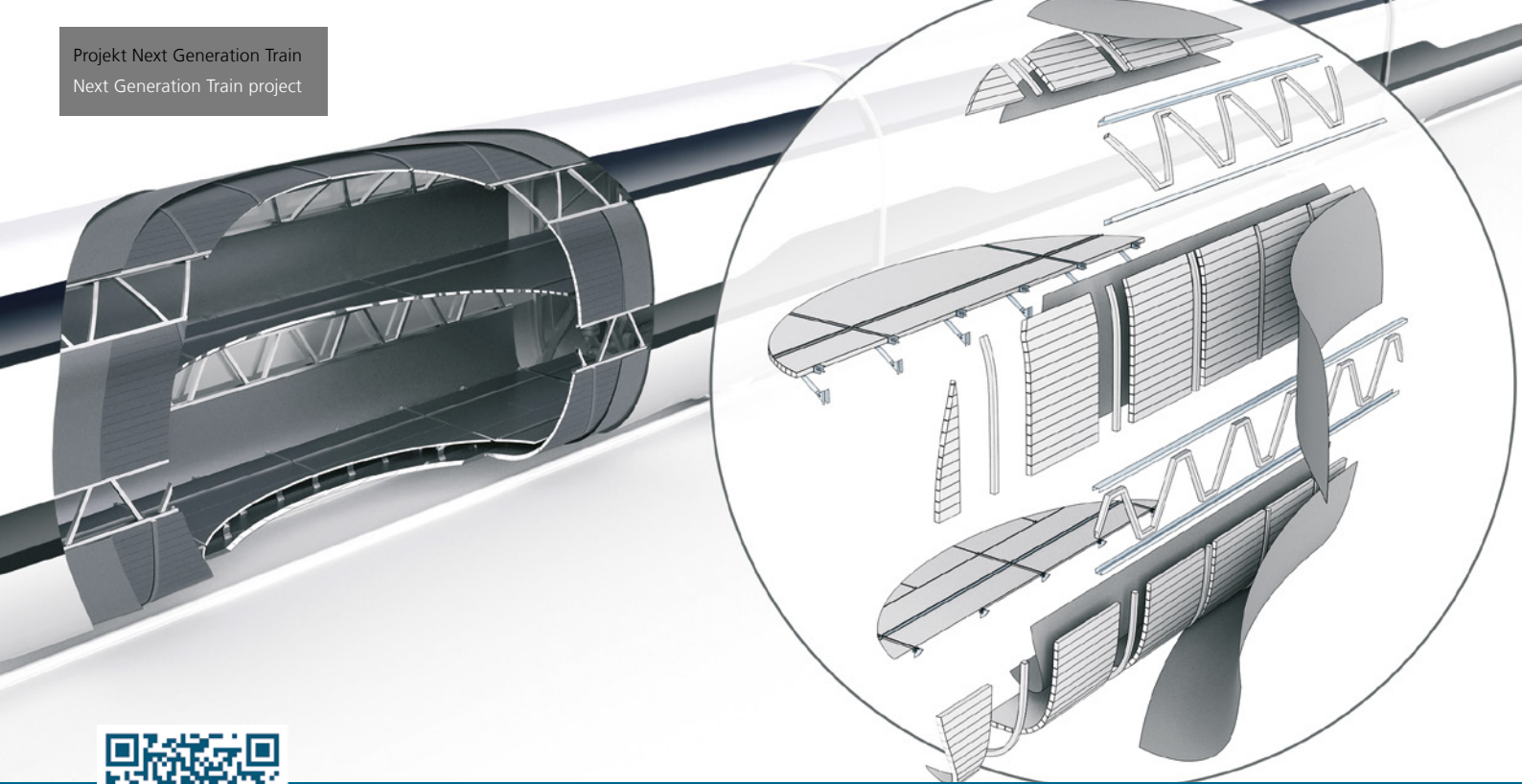
Im Bereich des Raumtransports erforscht das Institut hybride Verbindungselemente sowie hochbelastbare Strukturen für neuartige Startsysteme. Zukünftig sollen die Raumfahrtstrukturen des Instituts zudem smarter werden: „Sensieren“, „Reagieren“ und „Heilen“ sind Schlagworte zu diesem Ansatz. Das Ziel sind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



Geschäftsfeldleiter:
Dipl.-Ing. Olaf Mierheim

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's and DLR's 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. 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.



Geschäftsfeld Verkehr

Business area Transport

Summary

An aerospace institute researches on transport applications? – Yes! Because many questions and technologies can be transferred: In transport applications, too, 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 Schienen. 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.



Geschäftsfeldleiterin:
Dr.-Ing. Caroline Lüders



Geschäftsfeld Windenergie

Business area Wind Energy



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

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

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



Geschäftsfeldleiter:
Lutz Beyland, M. Sc.

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 ecological assessment of composites that are used in this field.

As 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.

VERÖFFENTLICHUNGEN 2021/2022

Publications 2021/2022

Ausgewählte Veröffentlichungen

Hollmann, Rene Walter und Schäfer, Andreas und Bertram, Oliver und Rädels, Martin (2022) *Virtual testing of multifunctional moveable actuation systems*. CEAS Aeronautical Journal. Springer. doi: 10.1007/s13272-022-00602-5 <<https://doi.org/10.1007/s13272-022-00602-5>>. ISSN 1869-5590.

Bogenfeld, Raffael Marius und Gorsky, Christopher und Wille, Tobias (2022) *An experimental damage tolerance investigation of CFRP composites on a substructural level*. Composites Part C: Open Access (8), Seite 100267. Elsevier. doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100267 <<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100267>>. ISSN 2666-6820.

Koord, Josef und Stüven, Jan-Lukas und Völkerink, Oliver und Petersen, Enno und Hühne, Christian (2022) *Investigation of exact analytical solutions for composite laminates under pin-bearing loading*. Composite Structures. Elsevier. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115605 <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115605>>. ISSN 0263-8223.

Ebermann, Michael und Bogenfeld, Raffael Marius und Kreikemeier, Janko und Glüge, Rainer (2022) *Analytical and numerical approach to determine effective diffusion coefficients for composite pressure vessels*. Composite Structures, 291 (115616). Elsevier. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115616 <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115616>>. ISSN 0263-8223.

Wunderlich, Tobias und Dähne, Sascha und Reimer, Lars und Schuster, Andreas (2022) *Global aero-structural design optimization of composite wings with active manoeuvre load alleviation*. CEAS Aeronautical Journal. Springer. doi: 10.1007/s13272-022-00585-3 <<https://doi.org/10.1007/s13272-022-00585-3>>. ISSN 1869-5590.

Neitmann, Maximilian und Rothe, Tom und Kappel, Erik und Hühne, Christian (2022) *Assembly of Compliant Structures with Autonomous Industrial Mobile Manipulators (AIMM) Using an End Effector with Active Deformation Compensation for the Assembly of Flaps*. Machines, Seiten 1-19. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/machines10050291 <<https://doi.org/10.3390/machines10050291>>. ISSN 2075-1702.

Meister, Sebastian (2022) *Automated Defect Analysis using Optical Sensing and Explainable Artificial Intelligence for Fibre Layup Processes in Composite Manufacturing*. Dissertation, Delft University of Technology. doi: 10.4233/uuid:34442378-e3a2-4c99-865f-57be3f13b96f <<https://doi.org/10.4233/uuid:34442378-e3a2-4c99-865f-57be3f13b96f>>.

Kappel, Erik (2022) *Double-Double laminates for aerospace applications – Finding best laminates for given load sets*. Composites Part C: Open Access. Elsevier. doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100244 <<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100244>>. ISSN 2666-6820.

Völkerink, Oliver und Hühne, Christian (2022) *Virtual testing for design and certification of (fusion) bonded longitudinal joints in a fibre composite fuselage: A proposal using FEM-based progressive damage analysis*. Composites Part C: Open Access (7), Seite 100236. Elsevier. doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100236 <<https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100236>>. ISSN 2666-6820.

Montano Rejas, Zhuzhell und Seidler, Marcel und Riemenschneider, Johannes und Friedrichs, Jens (2022) *A Coupling Method for the Design of Shape-Adaptive Compressor Blades*. Applied Mechanics, 3 (1), Seiten 182-209. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/applmech3010014 <<https://doi.org/10.3390/applmech3010014>>. ISSN 2673-3161.

Willberg, Christian und Hesse, Jan-Timo und Heinecke, Falk (2022) *Peridynamic simulation of a mixed-mode fracture experiment in PMMA utilizing an adaptive-time stepping for an explicit solver*. Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling, Seiten 1-24. Springer. doi: 10.1007/s42102-021-00079-6 <<https://doi.org/10.1007/s42102-021-00079-6>>. ISSN 2522-896X.

Tzanakis, Iakovos und Khavari, Mohammad und Titze, Maik und Eskin, Dmitry G. (2022) *Cavitation in thermoplastic melts: New insights into ultrasound-assisted fibre-impregnation*. Composites Part B Engineering, 229. Elsevier. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109480 <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109480>>. ISSN 1359-8368.

Adam, Till Julian und Exner, Wibke und Wierach, Peter (2021) *Taurine-Modified Boehmite Nanoparticles for GFRP Wind Turbine Rotor Blade Fatigue Life Enhancement*. Materials. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/ma14226997 <<https://doi.org/10.3390/ma14226997>>. ISSN 1996-1944.

Bogenfeld, Raffael Marius und Gorsky, Christopher (2021) *An Experimental Study of the Cyclic Compression after Impact Behavior of CFRP Composites*. Journal of Composites Science, 5 (11), Seite 296. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/jcs5110296 <<https://doi.org/10.3390/jcs5110296>>. ISSN 2504-477X.

Wunderlich, T. F. und Dähne, S. und Reimer, L. und Schuster, A. (2021) *Global Aerostructural Design Optimization of More Flexible Wings for Commercial Aircraft*. Journal of Aircraft, 58 (6), Seiten 1254-1271. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). doi: 10.2514/1.C036301 <<https://doi.org/10.2514/1.C036301>>. ISSN 0021-8669.

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.

Abate, Giada und Riemenschneider, Johannes (2022) *Fluid-Structure Interaction Tool For Morphing Blades*. The 8th European Congress of Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS Congress 2022, 5-9 June 2022, Oslo, Norway.

Meyer, Hendrik und Mostert, Christophe und Willberg, Christian und Ferreira, Joel und Zafra-Evers, Franz (2022) *Impact of improved maintenance in the CleanSky II projects AIRMES and DEMETER*. 1st International Conference for CBM in Aerospace, 24.-25. Mai 2022, Delft, Niederlande.

Liebers, Nico und Trampe, Lars und Lüders, Caroline (2022) *Sensoren zur Herstellungs- und Strukturüberwachung von Wasserstoffdruckspeichern*. Werkstoffsymposium 2022, 17.-18. Mai 2022, Wolfsburg.

Radestock, Martin (2022) *Analytische Koinzidenzfrequenzvariation von Sandwichplatten mithilfe geometrischer Wabenkernvariation*. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2022, Seiten 911-914. DAGA 2022 – 48. Jahrestagung für Akustik, 21.-24. Mär. 2022, Stuttgart, Deutschland. ISBN 978-3-939296-20-1.

Jansen, Frank und INPPS team, (2022) *Hybrid INPPS Flagship Status*. XXVII. Erfahrungsaustausch Mühlleiten 2022, 15.-18. Mär. 2022, Mühlleithen/Vogtland.

Straubel, Marco (2022) *CTM Boom Deployment Mechanism with Integrated Boom Root Deployment for Increased Stiffness of the Boom-to-Spacecraft Interface*. ISSS 2019, Aachen.

Künnecke, Sven Christian und Goerttler, Andreas und Vasista, Srinivas und Riemenschneider, Johannes (2022) *Strukturkonzept eines vorgebogenen morphenden Spoilers zur adaptiven transsonischen Stoßkontrolle*. 4SMARTS 2022, 09.-10. Mrz. 2022, Braunschweig, Deutschland.

Franke, Florian und Slowik, Thomas und Burger, Uli und Hühne, Christian (2021) *Numerical Investigation of Drone Strikes with Various Aircraft Targets*. AIAA SCITECH 2022 Forum, January 3-7, 2022, San Diego. doi: 10.2514/6.2022-2603 <<https://doi.org/10.2514/6.2022-2603>>.

Friedrichs, Jens und Elham, Ali und Hühne, Christian und Radespiel, Rolf und Bauknecht, Andre (2021) *Vehicle Technologies towards Sustainable and Energy Efficient Aviation*. AIAA SCITECH 2022 Forum, January 3-7, 2022, San Diego. doi: 10.2514/6.2022-0685 <<https://doi.org/10.2514/6.2022-0685>>.

Freund, Sebastian und Schulz, Simon und Bogenfeld, Raffael Marius (2021) *Operational Loads Monitoring and CFRP Damage Accumulation for Predictive Maintenance*. ECCOMAS Thematic Workshop on Computational Multi-Physics, Multi-Disciplinary and Multi-Data – CM3 Methods and Tools for Aeronautics Design, 22.-24.11.2021, Barcelona.

Liebisch, Martin und Wille, Tobias (2021) *Sucohs Project*. ECCOMAS Thematic Workshop on Computational Multi-Physics, Multi-Disciplinary and Multi-Data – CM3, 22 – 24 November 2021, Barcelona.

Beyland, Lutz und Hindersmann, Arne und Bäns, Constantin und Mahrholz, Thorsten und Kaps, Robert (2021) *Hybrid materials and conical bolts for high-strength bolted joints*. Wind Turbine Blade Manufacture, 15.-17. Nov. 2021, Köln.

Nguyen, Duy Chinh und Kolbe, Andreas und Bäns, Constantin (2021) *Application of Lightning Strike Protection on Thermoplastic Structures by Automated Fiber Placement*. ISCM 2021, 03.-04.11.2021, Stade, Deutschland.

Winkelmann, Felix und Hein, Robert (2021) *Further development of a simulation model for the description of the crystallization kinetics of semi-crystalline thermoplastics*. NAFEMs World Congress 2021, 25.-29. Okt. 2021, Salzburg / Online.

Hein, Robert und Winkelmann, Felix (2021) *Evaluation of the temperature history during extrusion based additive manufacturing*. In: NAFEMs World Congress. Nafems World Congress 2021, 25.-29.10.2021, Salzburg.

Kokott, Alexander und Haase, Thomas (2021) *Feasibility study towards the active vibration control of a wind energy turbine*. ICAST 2021, 05.-08. Okt. 2021, Zürich, Österreich.

Wille, Tobias (2021) *SuCoHS Project – Sustainable Cost-Efficient High-Performance Composite Structures demanding Temperature or Fire Resistance*. SAMPE Europe 2021, 29.-30.09.2021, Baden.

Petersen, Jan und Geier, Sebastian und Wierach, Peter (2021) *Integrated thin film Supercapacitor as multifunctional Sensor System*. In: ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems 2021. SMASIS 2021, 14. – 15. September 2021, Online, USA.

Niemann, Steffen und Gesell, Thomas und Froese, Sarah und Schollerer, Martin und Hanke, Michael und Nickel, Jörg und Bärschneider, Andreas (2021) *DLRK Vortrag 2021 – Klebeverbindungen der Primärstruktur innerhalb des HAP-Projektes*. Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK) 2021, 31. Aug. – 02. Sep. 2021, Bremen und online. doi: 10.5281/zenodo.5535839 <<https://doi.org/10.5281/zenodo.5535839>>.

Opitz, Mark und Bertling, Dominic und Liebers, Nico (2021) *Digital Transformation: More sustainable composite structures through in-situ process qualification*. 70. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2021, 31. Aug. – 02. Sep. 2021, Bremen & online.

PATENTE 2021/2022

Patents 2021/2022

Forßbohm, Tobias; Kleineberg, Markus:
Verfahren zur Überwachung der Funktion eines Grenzschicht-Kontrollsystems eines Luftfahrzeug-Profilkörpers, Computerprogramm, Überwachungssystem und Luftfahrzeug
DE 102017114671, 16.09.2021

Meister, Sebastian:
Verfahren zum Verifizieren eines Qualitätssicherungssystems
DE 102020103067, 16.09.2021

Meister, Sebastian:
Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln einer Applikationseigenschaft
DE 102020102800, 07.10.2021

Pohl, Martin:
Aerodynamischer Profilkörper, Verfahren zur Verminderung der Schallemission sowie Computerprogramm
DE 102016119439, 21.10.2021

Grohmann, Yannic; Zacharias, Fabian:
Greifvorrichtung
DE 102014110464, 11.11.2021

Düring, Denise; Pototzky, Alexander:
Heizsystem zur elektrischen Temperierung und Verfahren zur Herstellung hierzu
GB 2544585, 17.11.2021

Geier, Sebastian; Mahrholz, Thorsten:
Kondensator mit beschichteten Poren
US 10,840,029, 17.11.2021

Meister, Sebastian:
Verfahren zum Kalibrieren sowie Verfahren und Vorrichtung zur Vermessung
DE 102018128990, 18.11.2021

Geier, Sebastian; Mahrholz, Thorsten:
Superkondensatoren mit ausgerichteten Kohlenstoffnanoröhren und Verfahren zu deren Herstellung
DE 102015107982, 09.12.2021

Meister, Sebastian:
Vorrichtung zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems und optisches Detektionssystem hierzu
DE 202021103979, 16.12.2021

Heilmann, Lennert:
Filmklebstoff sowie Verfahren zu dessen Herstellung
CN ZL 201880053253.1, 21.12.2021

Bach, Tobias; Düring, Denise; Hühne, Christian; Kaps, Robert; Kleineberg, Markus; Steffen, Olaf; Ückert, Christian:
Flügelstruktur für Flugobjekte
DE 102015105298, 23.12.2021

Bölke, Jens; Kolbe, Andreas; Krombholz, Christian:
Procédé et installation pour fabriquer automatiquement un assemblage de mise sous vide
FR 1561090, 07.01.2022

Misol, Malte:
Wand mit einer durch rückwärtige Stege in Gitterfelder unterteilten Außenhaut und Flugobjekt
FR 3055306, 14.01.2022

Assing, Heiko; Stranz, Roger:
Verfahren zum klebenden Fügen eines ersten und zweiten Fügepartners
DE 102018109488, 03.02.2022

Meister, Sebastian:
Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln von Fehlstellen von Fasermaterialien
EP 3628473, 09.02.2022
[ES], [BE], [NL], [FR]

Hillebrandt, Martin; Hühne, Christian; Zander, Martin:
Vorrichtung zum Entfalten eines Mastes
DE 102018112690, 17.02.2022

Mendig, Christian:
Verfahren zur Erkennung einer Ausbildung von Eis an einem rotierenden Rotorblatt und Rotorblatteinrichtung
DE 102021102659, 17.02.2022

Kreikemeier, Janko; Schmidt, Daniel; Wiedemann, Martin:
Verfahren und Verbindung zum Fügen zweier Bauelemente
FR 1851467, 25.02.2022

Forßbohm, Tobias:
Verfahren zur Herstellung eines hybridlaminierten Flügelkörpers
FR 1900929, 25.02.2022

Neumann, Fabian; Steffen, Olaf:
Verfahren zur Herstellung einer Außenverkleidung sowie eine Außenverkleidung Anmelder: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
DE 102020134661, 17.03.2022

Odermann, Falk; Rädels, Martin; Wille, Tobias:
Prüfstand zum Untersuchen einer Probe
EP 3667287, 23.03.2022
[DK], [FR]
DE 502019003779.3, 23.03.2022

Bogenfeld, Raffael; Kreikemeier, Janko; Wille, Tobias:
Verfahren und Vorrichtung zum Detektieren eines Schlagereignisses sowie ein Fahrzeug hierzu
FR 1914087, 01.04.2022

Heilmann, Lennert:
Verfahren und Vorrichtung zum Überprüfen einer Fügeoberfläche
JP 7046988, 04.04.2022
CN ZL 201880048323.4, 13.04.2022

Buggisch, Manuel; Forßbohm, Tobias; Froese, Sarah:
Fahrzeug und Verfahren zur Herstellung einer Revisionsklappe
GB2567947, 27.04.2022

Hillebrandt, Martin; Hühne, Christian; Zander, Martin:
Vorrichtung zum Entfalten eines Mastes
FR 3081535, 29.04.2022

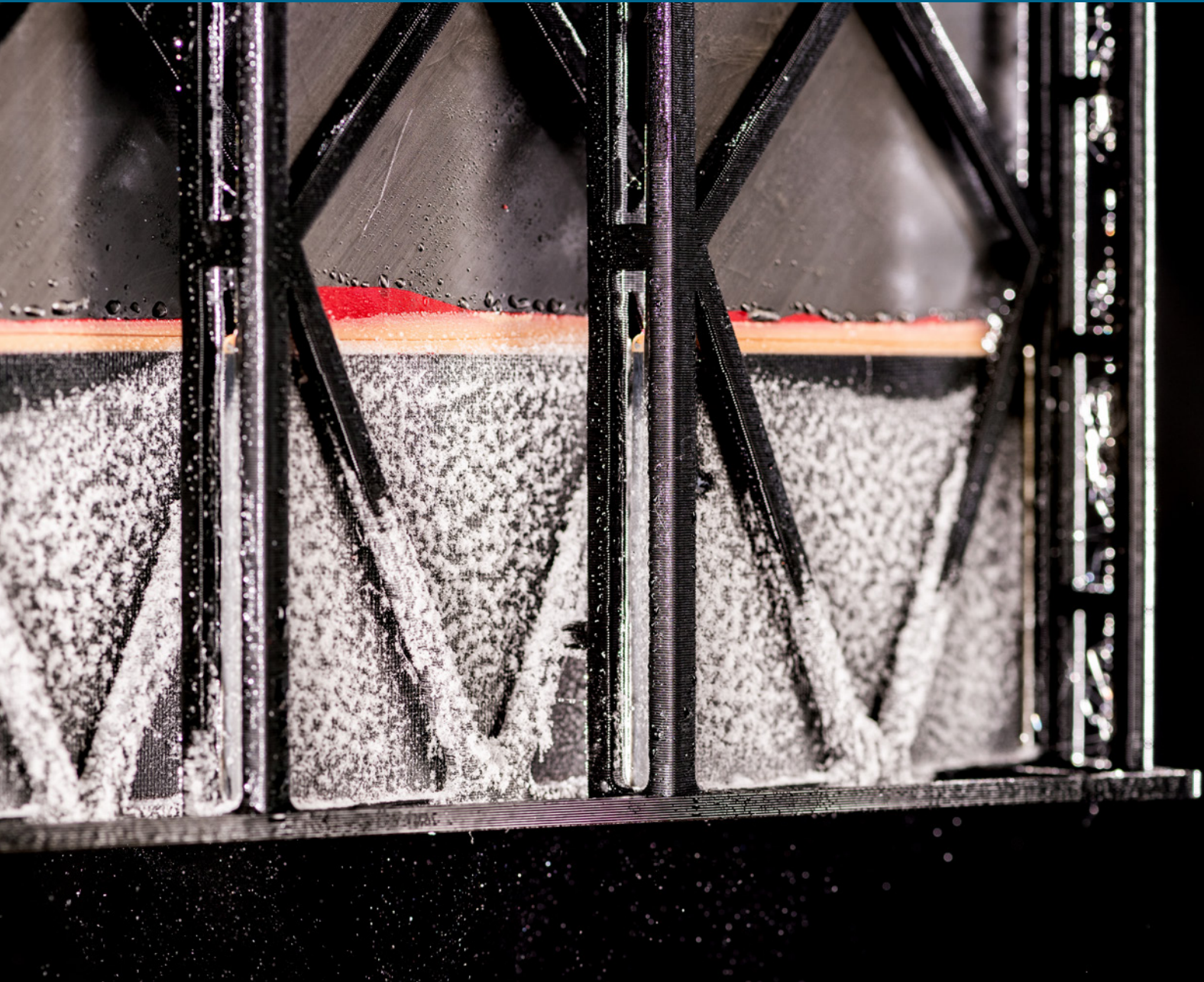
Neumann, Fabian; Steffen, Olaf:
Außenverkleidung für Flugobjekte
DE 102020134638, 05.05.2022

Forßbohm, Tobias:
Verfahren zur Herstellung eines hybridlaminierten Flügelkörpers
DK PR180853, 19.05.2022

Haldar, Ayan; Jansen, Eelco; Pohl, Martin; Riemenschneider, Johannes:
Profilkörper
DE 102018115476, 19.05.2022

Odermann, Falk; Rädels, Martin; Wille, Tobias:
Prüfstand zum Untersuchen einer Probe
DE 102018128984, 20.06.2022

Grohmann, Yannic:
Verfahren und Vorrichtung zum Imprägnieren von Fasermaterial
EP 3666501, 22.06.2022
[DE]



Nahaufnahme von Proben im Kryogenentest
Close-up of samples in the cryogenic test

Heilmann, Lennert:

Verfahren zum Applizieren eines Werkstoffes
auf ein Faserverbundbauteil
[DE 102018111306](#), 11.07.2022

**Feder, Julia; Riemenschneider, Johannes;
Sinapius, Michael:**

Detektionsvorrichtung zum Detektieren einer
Vereisung
[DE 202022102645](#), 14.07.2022

Beerhorst, Matthias:

Transportflugzeug und Verfahren zum
Transport einer Rakete
[DE 102018132141](#), 22.07.2022

Pohl, Martin:

Schwingungstilger, Verwendung eines
Schwingungstilgers und Windenergiean-
lage
[DE 102021121610](#), 17.08.2022

Assing, Heiko; Koord, Josef:

Prüfvorrichtung, Verwendung einer Prüf-
vorrichtung und Verfahren zur Prüfung
[DE 102021117975](#), 18.08.2022

Das DLR im Überblick

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

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

DLR at a glance

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

Climate, mobility and technology are changing globally. DLR uses the expertise of its 55 research institutes and facilities to develop solutions to these challenges. Our 10,000 employees share a mission – to explore Earth and space and develop technologies for a sustainable future. In doing so, DLR contributes to strengthening Germany's position as a prime location for research and industry

Impressum | Imprint

Herausgeber | Publisher:

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

Redaktion | Editorial staff: Prof. Dr. Martin Wiedemann (Direktor), Prof. Dr. Peter Wierach,
 Prof. Dr. Jörg Melcher, Jessica Treptow (Redaktionsleitung),
 Dr. Matthias Lossau, Jörg Nickel, Dr.-Ing. Malte Misol,
 Jens Bachmann, Dr.-Ing. Christian Bülow,
 Dr.-Ing. Christian Willberg, Katrin Stevens

Anschrift | Address: Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

Telefon | Phone: + 49 531 295-2301

DLR.de/FA | leichtbau.dlr.de

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

Bilder | Images: DLR Fotomedien, Timm Bourry, Marcel Soppa, Lea Adams, Amin Averdung

| Copyright: DLR (CC-BY 3.0),

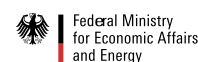
soweit nicht anders angegeben | unless otherwise stated

Titelbild | Cover image:

Stickstoffversuche für einen kryogenen Wasserstofftank – Seite 16

Nitrogen tests for a cryogenic hydrogen tank – page 16

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

Projects supported by:

