

Innovationsbericht 2020

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Innovation Report 2020

Institute of Composite Structures and Adaptive Systems



Preface

Dear readers,

Last year, the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems has pooled its long-standing research and experiences in digitalisation in a new strategic field: "FA Digital". Digitalisation is an essential element for composite structures. Sensor-based automation technology makes an important contribution to reduce production costs of composite structures without compromising quality. In combination with adaptive systems, adaptive lightweight construction has been a system ever since and needs digital images of the real structure for active adaptation just as our structural-mechanical simulation models. Meanwhile, it is obvious that digitalisation encompasses much more than simulation, control, and automation: we have agreed upon an internal API guideline enabling us to interlink our production facilities, testing machines and databases. We have decided to implement an open source policy for our software and we increasingly use digital media for communicating our scientific results.

In the future, we will publish the articles of this innovation report and further news from our research on our DLR Lightweight Construction Blog www.leichtbau.dlr.de in regular intervals. We have initiated this development long before Covid-19, but now the importance of digital communications is steadily growing, even though we always prefer a personal conversation.

Solution-oriented and creative: that is how we see ourselves. On the onset of the pandemic - while there was still a lack of protective equipment - we started production with 3D printers and provided the hospital in Wolfsburg with face shields.

Whether batteries or hydrogen: future structures using these energy sources as well as the structures needed to store the energy sources must become more lightweight to be able to compete with classical fuels. To meet this challenge, we concern ourselves with the reduction of the gravimetric storage density of hydrogen, supporting energy storage, and questions of electric and thermal energy distribution in the structure. It becomes more and more obvious that future structures must be capable of more than just transferring loads. Lightweight constructions of the future are subsystems of complex overall systems.

In lightweight construction, we must put a stronger focus on the entire life cycle. This is the objective of this year's Science Days under the motto: Closed-loop Economy in Composite Structures. Due to the current situation, this year we will welcome you on our new online platform. The advantage: during the Science Days, we will publish articles which you can individually access and comment on. you can participate at any time by watching the videos on our homepage. Discussion with you is important to us – let's keep our lines of communication open.

VORWORT

Liebe Leserinnen und Leser,

das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat seine langjährigen Forschungsarbeiten und Erfahrungen in der Digitalisierung letztes Jahr in einem neuen Strategiefeld gebündelt: „FA Digital“. Die Digitalisierung ist für den Faserverbundleichtbau ein zentrales Element. Sensorgestützte Automatisierungstechnologie trägt entscheidend dazu bei, die Produktionskosten von Faserverbundstrukturen ohne Qualitätseinbußen zu senken. In der Kombination mit der Adaptronik ist der adaptive Leichtbau immer schon ein System gewesen und benötigt für seine aktive Anpassung digitale Abbilder der realen Struktur, ebenso wie unsere strukturmechanischen Simulationsmodelle. Natürlich umfasst Digitalisierung inzwischen weit mehr als Simulation, Regelung und Automatisierung: Wir haben eine interne API-Richtlinie vereinbart, die es uns ermöglicht, unsere Fertigungsanlagen, Prüfmaschinen und Datenbanken zu vernetzen. Wir haben eine Open Source Policy für unsere Software beschlossen und wir nutzen zunehmend digitale Medien für die Kommunikation unserer wissenschaftlichen Ergebnisse.

So werden wir künftig auch die Beiträge dieses Innovationsberichts und weitere Nachrichten aus unserer Forschung in regelmäßiger Folge auf unserem DLR Leichtbau-Blog www.leichtbau.dlr.de veröffentlichen. Diese Entwicklung haben wir schon lange vor Covid-19 begonnen, aber nun bekommt die digitale Kommunikation eine weiter wachsende Bedeutung, auch wenn uns das persönliche Gespräch immer das Liebste bleibt.

Lösungsorientiert und kreativ; so verstehen wir uns und so haben wir zu Beginn der Pandemie – als an Schutzausrüstungen noch Mangel war – eine Fertigung mit 3D-Druckern aufgebaut und das Klinikum Wolfsburg mit Gesichtsschilden beliefert.

Ob Batterien oder Wasserstoff: Künftige Strukturen, die diese Energieträger nutzen, und auch die Strukturen, die zur Speicherung der Energieträger erforderlich sind, müssen leichter werden, um mit klassischen Brennstoffen konkurrieren zu können. Deswegen kümmern wir uns um die Reduktion der gravimetrischen Speicherdichte für Wasserstoff, um mittragende Energiespeicher und um Fragen der elektrischen und thermischen Energieverteilung in der Struktur. Immer deutlicher wird, dass künftige Strukturen mehr leisten müssen als Last abzutragen. Leichtbaustrukturen der Zukunft sind Subsysteme komplexer Gesamtsysteme.

Wir müssen im Leichtbau noch mehr den ganzen Lebenszyklus in den Blick nehmen. Diesem Ziel dienen die diesjährigen Wissenschaftstage unter dem Motto: Kreislaufwirtschaft im Faserverbundleichtbau. Aufgrund der aktuellen Situation begrüßen wir Sie in diesem Jahr auf unserer neuen Plattform im Netz. Der Vorteil: Während der Wissenschaftstage veröffentlichen wir Beiträge, die Sie individuell abrufen und kommentieren können. Die Diskussion mit Ihnen ist uns wichtig – lassen Sie uns im Gespräch bleiben!



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Martin Wiedemann'.

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann
Institutsdirektor



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Peter Wierach'.

Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach
Stellvertretender Institutsdirektor



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Melcher'.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Melcher
Innovationsmanager

INHALT

Contents

6

DAS INSTITUT IM ÜBERBLICK

The institute in a nutshell

8

MATERIAL

Material

- 10 Die Mischung macht's – Mischungsanalyse von Zwei-Komponenten-Harzsystemen
It's all in the mix – Mixture analysis of two-component resin systems
- 12 Rotiert, nicht geschüttelt – Wie Eiswürfel helfen, eisabweisende Oberflächen zu charakterisieren
Rotated, not shaken – How ice cubes help to characterise ice-phobic surfaces
- 14 Fused Bonding – Zuverlässiges Kleben durch reaktionsfähige Oberflächen
Fused Bonding – Reliable bonding with reactive joining surfaces
- 16 Berechnung eines vielschichtigen Phänomens: Ermüdung von Faserverbunden unter thermischer Last
Modelling a multi-faceted phenomenon: Fatigue of fibre composites under thermal loading

18

METHODEN

Methods

- 20 Ein innovatives Konzept zur Bewertung von Schlagschäden und Welligkeiten
An innovative approach for the evaluation of impact damages and wavinesses
- 22 Numerische Vorhersage vereinfacht die Zulassung von Klebverbindungen in Faserverbundstrukturen
Numerical prediction simplifies the certification of bonded joints in fibre composite structures
- 24 Was macht einen Windpark aus?
What makes a wind farm?
- 26 Der Auslegungsprozess im Virtual Product House (VPH)
The VPH sizing process
- 28 Struktur, wie geht es dir? – Lastmonitoring für eine zustandsorientierte Wartung
Structure, how are you? – Load monitoring for condition-based maintenance

30

KONSTRUKTION

Construction

- 32 Alles drin – Multifunktionalität in Raumfahrtstrukturen
All in – Multifunctionality in space structures
- 34 Hochleistungsleichtbau für ein innovatives Rettungssystem am Silent Air Taxi
High-performance lightweight construction for an innovative rescue system of the Silent Air Taxi
- 36 Leichtbau im Grenzbereich
At the limits of lightweight construction
- 38 Flugwindanlagen leicht gemacht – Effiziente Energieerzeugung mit seilgebundenen Flugkörpern
Airborne wind energy light and easy – Efficient energy harvesting with tethered wing
- 40 Auf leisen Schwingen – Spaltabdeckungen am Flügel zur Reduktion von Start- und Landelärm
Quieter wings – Gap covers at the wing for reduction of takeoff and landing noise

42

FERTIGUNG

Production

- 44 3D-gedruckte CFK-Bauteile – Eine neue Imprägniertechnologie senkt die Kosten
3D-printed CFRP components – A new impregnation technology reduces costs
- 46 Smart-Work-Station – Der digitale Berater fürs Handwerk
Smart-Work-Station – The digital consultant for craftsmen
- 48 DIGICOMP: Wissen verknüpfen und für nachhaltiges Design nutzen
DIGICOMP: Linking knowledge and using it for sustainable design

- 50 3D-gedruckte Aktuatoren und Sensoren per Knopfdruck
3D-printed actuators and sensors via push of a button
- 52 Faser-Metall-Laminat: Die richtige Entspannungstechnik für Alleskönner
Fiber-metal-laminates: The ideal relaxation technique for all-rounders
- 54 Laminat-Orthotropie – Ein Toleranzproblem?
Orthotropic laminates – A tolerance issue?

56

SYSTEM

System

- 58 Auf dem Weg zu fühlenden Faserverbundstrukturen
Towards sensing fibre composite structures
- 60 Fasern unter Spannung – Elektrische Energieübertragung mittels multifunktionaler Faserverbundwerkstoffe
Hot fibres – Electric energy transfer by means of multifunctional fibre composites
- 62 Lastminderung an Windenergieanlagen: Experimentelle Vermessung einer flexiblen Hinterkante
Load alleviation at wind energy turbines: Experimental investigation of a flexible trailing edge
- 64 Adaptive Schaufeln – Effizient fliegen mit dem Strom
Adaptive blades – Flying efficiently with the flow
- 66 Smart Tooling – Intelligente Werkzeuge für die vernetzte Produktion der Zukunft
Smart Tooling – Intelligent tools for the networked production of the future

68

INDUSTRIALISIERUNG

Industrialisation

- 70 Endmontagelinie mit künstlicher Intelligenz
Final assembly line with artificial intelligence
- 72 Heiß begehrt – Konsolidierungsprozess von thermoplastischen Großbauteilen für die Serienfertigung
In high demand - Consolidation process of large thermoplastic components for series production
- 74 Von der Theorie zur Praxis und zurück: Eine Forschungsanlage wird zum Wissenstransporter
Scientific approaches on industrial challenges - Automated wing-rib production
- 76 Neuartige Fertigungsautomatisierung durch selbstregulierte Multi-Roboter-Systeme
Modern manufacturing automation concepts through self-regulated multi-robot systems
- 78 „Geteiltes Blatt = halbiertes Leid beim Blatttransport“ – Das Projekt SegBlaTe
“Segmented rotor blade = half the effort of rotor blade transport” – The SegBlaTe project

80

DAS INSTITUT IM DETAIL

The institute in detail

- 82 Abteilungen
Departments
- 88 Geschäftsfelder
Business areas
- 96 Strategiefelder
Strategic fields
- 100 Veröffentlichungen 2019/2020
Publications
- 102 Patente 2019/2020
Patents

DAS INSTITUT IM ÜBERBLICK

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

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

Hochleistungsleichtbau:

anpassungsfähig – effizient – tolerant

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

Aufseiten der universitären Grundlagenforschung ist das Institut durch 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.



www.dlr.de/fa



www.dlr.de/zlp



Leichtbau.dlr.de

Kontakt / Contact

DLR - Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

Telefon: +49 531 295-2301

Telefax: +49 531 295-2875

E-Mail: leichtbau@dlr.de

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
Research autoclave

ECOMAT – Heimat des VPH
ECOMAT – Home of the VPH

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

Forschungsautoklav BALU®
Research autoclave BALU®

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





MATERIAL

Material

Erwärmtes Harz in der Infusionsanlage
Heated resin in the infusion system

10

Die Mischung macht's – Mischungsanalyse von Zwei-Komponenten-Harzsystemen
It's all in the mix – Mixture analysis of two-component resin systems

12

Rotiert, nicht geschüttelt – Wie Eiswürfel helfen, eisabweisende Oberflächen zu charakterisieren
Rotated, not shaken – How ice cubes help to characterise ice-phobic surfaces

14

Fused Bonding – Zuverlässiges Kleben durch reaktionsfähige Oberflächen
Fused Bonding – Reliable bonding with reactive joining surfaces

16

Berechnung eines vielschichtigen Phänomens: Ermüdung von Faserverbunden unter thermischer Last
Modelling a multi-faceted phenomenon: Fatigue of fibre composites under thermal loading

Die Mischung macht's – Mischungsanalyse von Zwei-Komponenten-Harzesystemen

It's all in the mix – Mixture analysis of two-component resin systems

Summary

The mixture analysis of two-component resin systems for injection enables the use of material systems with longer shelf lives that can be stored at low cost and lower energy consumption. The short-term mixing of the resin systems directly before processing allows for consistent material quality and plannable processing procedures. The prerequisites are that the mixing quality is guaranteed at all times in the process and that suitable analysis methods constantly monitor this characteristic value. This study investigates promising analytical methods whose measured values can be correlated with the mixing ratio, and the possibility of introducing them into the production process.

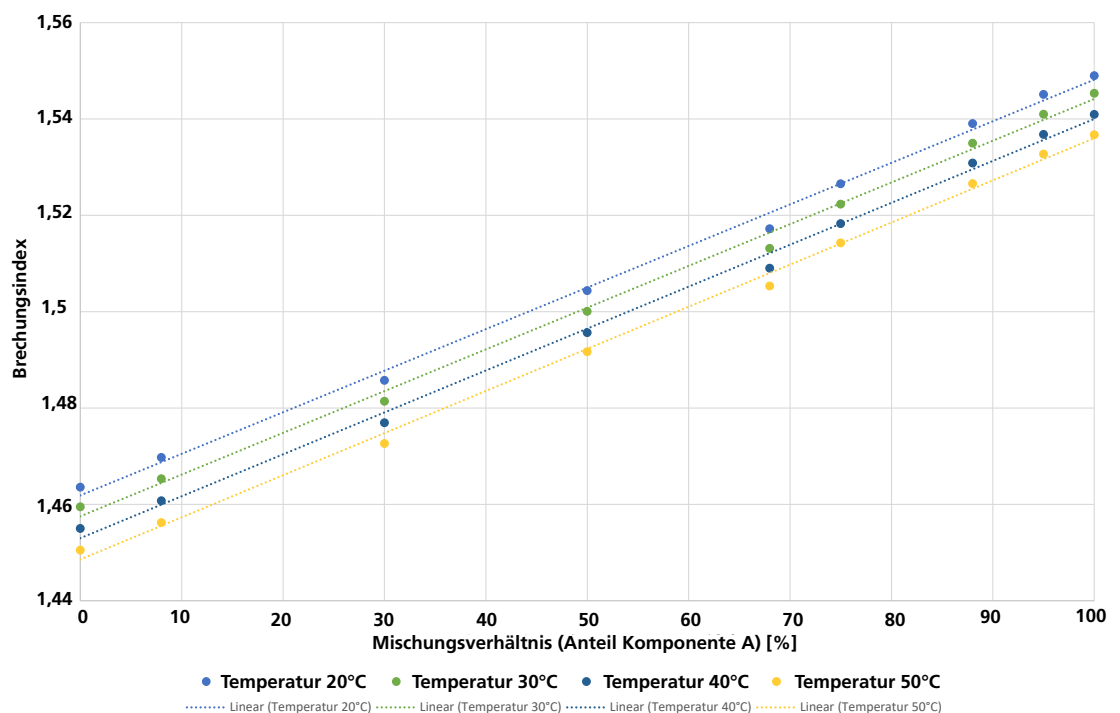
Die Mischungsanalyse von Injektionsharzen ermöglicht den Einsatz von kostengünstigen und lagerfähigen Mehrkomponentenmatrixsystemen in einer qualitätsgesicherten Fertigung. Die Voraussetzungen sind, dass die Mischungsgüte zu jeder Zeit im Prozess gewährleistet ist und dass geeignete Analysemethoden diesen Kennwert ständig überwachen. Neue Prozessmesstechnik stellt vielversprechende Analysemethoden bereit, die sich mit dem Mischungsverhältnis korrelieren lassen und in den Fertigungsprozess eingebracht werden.

Neuer Bedarf

In Luftfahrtanwendungen reicht eine einmalige Bestimmung des Mischungsverhältnisses vor dem Prozess nicht aus. Eine kontinuierliche Mischungsgüte von mindestens $\pm 3\%$ ist erforderlich. Dies schränkt den Einsatz von Mehrkomponentensystemen stark ein und erfordert neue Analysemöglichkeiten des Mischungsverhältnisses. Zur Online-Messung eignen sich insbesondere die dielektrischen Eigenschaften und der Brechungsindex, die sich mit dem Mischungsverhältnis ändern und somit korrelieren lassen. Daraus lässt sich eine Funktion ableiten, die die ermittelten Kenngrößen in Abhängigkeit von der Temperatur in Zusammenhang mit dem Mischungsverhältnis setzt. Dielektrische Sensoren sind für die Ermittlung des Aushärtetrags im Faserverbundprozess bereits etabliert. Prozessrefraktometer dienen zur Bestimmung des Brechungsindex. Sie stehen bereits Anwendungen in der petrochemischen und Lebensmittelindustrie zur Verfügung. Auf dieser Grundlage muss eine Übertragung des Funktionsprinzips auf den Harzinjektions-Prozess erfolgen.

Der Brechungsindex zeigt beim verwendeten Harz eine lineare Abhängigkeit von Temperatur und Mischungsverhältnis (dargestellt als Anteil von Komponente A in der Mischung)

For the resin used, the refractive index shows a linear dependence of temperature and mixing ratio (represented as the proportion of component A in the mixture)



AutorInnen:

Dr.-Ing. Alexandra Kühn
Dipl.-Ing.(FH) Sven Torstrick-von der Lieth



Das Prozessrefraktometer misst das Mischungsverhältnis mit der harzspezifischen Kalibrierfunktion direkt bei der Herstellung des Bauteils und wird mit einem speziellen Angussadapter in die Evo-Anlage integriert

The process refractometer measures the mixing ratio with the resin-specific calibration function directly during the production of the component and can be integrated into the Evo plant using a special flange adapter

Mischungsanalyse

Im erfolgreich abgeschlossenen Projekt iFeZ entstanden durch kontrollierte Mengenzugabe der Einzelkomponenten des Harzsystems definierte Mischungen. Es erfolgte eine Analyse der dielektrischen Eigenschaften und des Brechungsindex aller Mischungen bei verschiedenen Temperaturen. Anschließend ermittelt eine Software den Zusammenhang zwischen dem gewünschten Funktionswert, dem Mischungsverhältnis und den Eingabeparametern, Temperatur und dielektrische Impedanz bzw. Brechungsindex. Beide Messmethoden führen hierbei erfolgreich zu einem eindeutigen Funktionszusammenhang, der gut mit den Messwerten übereinstimmt.

Während sich diese Funktion für die dielektrische Analytik als komplex darstellt, ergibt sie für das Refraktometer einen einfachen linearen Zusammenhang zwischen Brechungsindex, Temperatur und Mischungsverhältnis. Dies eröffnet sogar die Möglichkeit, dass nur die Einzelkomponenten und deren Abhängigkeit von der Temperatur zu charakterisieren sind, um eine entsprechende Funktion zu ermitteln. Dies verhindert den Einfluss von Mischungsfehlern bei der Kalibrierung von neuen Harzsystemen. Mit der ermittelten Funktion kann ein Skript jederzeit im Prozess anhand der Messwerte beider Analysemethoden und der Temperatur das aktuelle Mischungsverhältnis berechnen und ausgeben. Die Umsetzung in eine seriennahe Produktionslinie erfolgt mit werkzeugintegrierten dielektrischen Sensoren und einem Prozessrefraktometer mit speziell entworfenem Flansch. Die simultane Messung im laufenden Prozess genügt den Qualitätssicherungs-Anforderungen der Luftfahrt und ermöglicht die dortige Nutzung des Potenzials von Mehrkomponentensystemen.

Rotiert, nicht geschüttelt – Wie Eiswürfel helfen, eisabweisende Oberflächen zu charakterisieren

Rotated, not shaken – How ice cubes help to characterise ice-phobic surfaces

Summary

Ice adhesion tests are an important method for the qualification of efficient ice-phobic coatings which are interesting for wind turbine rotor blades. DLR develops a centrifuge test rig consisting of a commercial self-cooling high-speed centrifuge equipped with an instrumented rotor for both quantifying ice adhesion forces and monitoring testing conditions simultaneously. Furthermore, the centrifuge unit is completed by a preparation and manufacturing area. The test stand is developed in the project OptAn-Ice to become a fast, reliable and inexpensive test method. Samples with different ice-phobic coatings are tested to detect adhesion forces using frozen standardised ice cubes. These results are compared with tests on coated profiles carried out in an icing wind tunnel. Here, the mass of the ice accretion and the time until the profile is completely frozen are recorded. These characteristic values can be traced back to the passive ice-phobic coatings. This way, promising trends can be identified and considered very early for successful ongoing coating developments.



Gekühlte Zentrifuge mit aufgesetztem Vorbereitungs- und Kühlraum

Self-cooling centrifuge, equipped with a preparation and cooling chamber

Windkraftanlagen sind heute in den verschiedensten Klimazonen zu finden. Hierbei muss die Auslegung der Anlagen die örtlichen klimatischen Gegebenheiten berücksichtigen. Gegenwärtig rücken zunehmend auch Standorte in den Vordergrund, die wegen ihres Eis- und Schneeaufkommens bisher nicht genutzt werden konnten. Ursächlich hierfür ist vor allem die Gefahr der Rotorblattvereisung. Diese reduziert die energetische Effizienz signifikant und kann bis zur Abschaltung der Anlage führen. Um dieses Szenario zu vermeiden, müssen Rotorblätter aktiv enteist werden, z. B. indem warme Luft in ihr Inneres geblasen wird. Diese aktiven Enteisungsverfahren gehen aber zu Lasten der Energiebilanz der Windkraftanlagen. Einen zukunftsweisenden Lösungsansatz bieten eisabweisende Oberflächen, die passiv wirken. Um solche Oberflächen reproduzierbar und untereinander vergleichbar zu testen, wird ein Teststandard benötigt, den es bisher nicht gibt. Diese Methode, die innerhalb des BMWi-Projekts OptAn-Ice erprobt wird, nutzt eine Zentrifuge, um die Eishaftkräfte mit hoher Zuverlässigkeit zu quantifizieren. Ziel ist die Entwicklung und Etablierung eines genormten Prüfverfahrens unter standardisierten Bedingungen.

Warum lassen wir Eiswürfel rotieren?

Eis ist ein sehr temperaturempfindliches, fraktales und sprödes Testmaterial. Daher müssen Temperaturveränderungen während einer Prüfphase vermieden werden. Darüber hinaus muss die Lasteinleitung zur Eisablösung so erfolgen, dass das Eis nicht vorgeschädigt und damit das Testergebnis verfälscht wird. Als vielsprechend hat sich die Aufbringung von Fliehkräften in einer Zentrifuge herausgestellt. Mit dieser Methode werden die Kräfte sehr homogen auf den Prüfkörper übertragen. Ziel dieser Herangehensweise ist die einfache und gut reproduzierbare Bestimmung von Eishaftkräften für verschiedene Oberflächenbeschichtungen. Damit können in kurzer Zeit und kostengünstig eisabweisende Oberflächen qualifiziert und weiterentwickelt werden. Die kompakte Bauweise erlaubt die Realisierung konstanter Prüfbedingungen, die die Voraussetzung für die Generierung von zuverlässigen Kennwerten sind. Vereisungsversuche im Windkanal sind für umfangreiche Oberflächen-screening-Programme aufgrund der komplexen und teuren Anlagentechnik eher ungeeignet.

Versuchsvorgehen

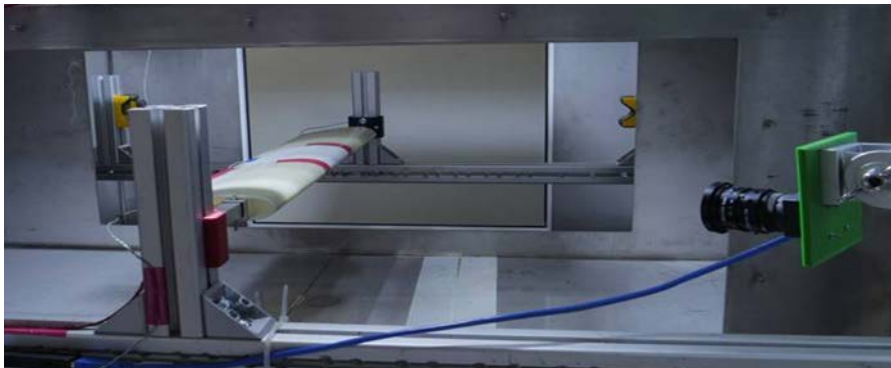
Für die Untersuchung der Eishaftkräfte wird eine Highspeed-Zentrifuge der Firma Herolab eingesetzt. Deren Trommelrotor ist so entworfen, dass ein vereister Probekörper für die beiden in der Praxis relevanten Lastfälle (Zug- und Scherkraft) untersucht werden kann. Vereisung bedeutet hier, dass ein Eiswürfel aus Klareis mit einer standardisierten Geometrie aufgefroren wird. Die Geometrie ist durch eine Silikonform definiert, in der deionisiertes Wasser auf einen Probekörper unter Einsatz eines Peltierelements auffriert. Dieser Vorgang findet im angrenzenden, ebenfalls gekühlten Präparationsraum statt. Die vereisten Proben werden danach sofort getestet. Der Zentrifugenrotor besteht aus einer Trommel, die mit einem Deckel verschlossen wird. Auf diese Weise werden aerodynamische Wechselwirkungen während des Experimentes effizient reduziert. Die Masse und das selbststabilisierende Design des Rotors wirken auf Schwingungen zusätzlich dämpfend.

Autoren:

Dr.-Ing. Sebastian Geier
Dr.rer.nat. Thorsten Mahrholz



Die Eisablösung wird mittels eines akustischen Sensors (Mikrofon), optischer Sensoren (IR-LED) und eines Beschleunigungssensors detektiert. Diese drei Methoden sollen auf ihre Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Praxistauglichkeit für die zukünftige Zentrifugenentwicklung untersucht werden. Außerdem wird die Temperatur mittels eines Thermoelements im Zentrifugenrotor als mögliche Störgröße kontinuierlich erfasst. Aus den bekannten Abmessungen des Eiswürfels und der Umdrehungszahl während des Ablösungszeitpunkts ergibt sich die Haftkraft. Die ermittelten Haftungseigenschaften erlauben Rückschlüsse auf die eisabweisenden Oberflächengüten der Beschichtungen.

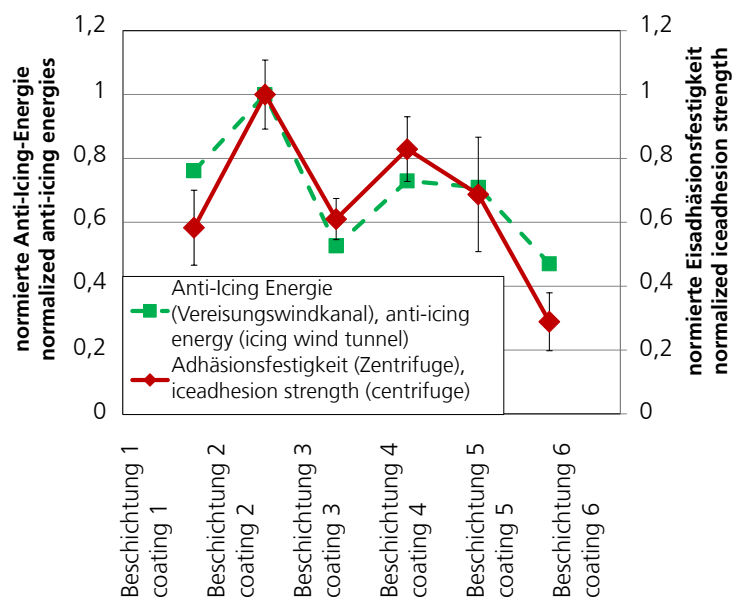


Messstrecke des Vereisungswindkanals an der Technischen Universität Braunschweig mit einem beschichteten Profil und Kameras zu dessen Untersuchung
Test section of the icing wind tunnel at the Technical University Braunschweig, equipped with a coated test profile and two cameras for monitoring

Übertragbarkeit der Messergebnisse

Die Testergebnisse der Zentrifuge wurden mit Messungen unter realistischen Laborbedingungen in Versuchen am Vereisungswindkanal des Instituts für Adaptronik und Funktionsintegration (IAF) der Technischen Universität Braunschweig korreliert. Bei diesen Versuchen wurden mit den zuvor in der Zentrifuge getesteten Oberflächen beschichtete Profile bei ca. 28m/s angeströmt, mit destilliertem Wasser bei -5°C besprüht und vereist. Als Kenngröße wird hierbei die Energie gemessen, mit der das Profil mittels einer elektrothermischen Heizung eisfrei gehalten werden kann. Die normierten Ergebnisse des Zentrifugentests (blau) und der Anti-Icing-Energie (rot) sind dazu gegenübergestellt. Für die hier untersuchten Oberflächenbeschichtungen zeigen beide Methoden vergleichbare Trends, die zu folgenden Aussagen führen:

1. Der Zentrifugenteststand stellt eine zuverlässige und einfache Methodik für Oberflächenscreening-Programme dar, um aufwändige Anti-Icing-Tests im Eiswindkanal zu reduzieren.
2. Die mit Partnern entwickelten Oberflächenbeschichtungen können für sich einen Eisansatz nicht vollständig vermeiden.
3. Es kann aber gezeigt werden, dass durch die Variation der chemischen Zusammensetzung der Oberflächenbeschichtung ein Eisansatz signifikant reduziert und somit Enteisungsenergie eingespart werden kann. In diesem Zusammenhang stellt die Optimierung der Oberflächenchemie zur Erzeugung von vollständig eisfreien Beschichtungssystemen den nächsten Entwicklungsschritt dar.



Testergebnisse der Zentrifugen- und Enteisungstests im Vereisungswindkanaltests
Test results of centrifuge and icing wind tunnel tests

Fused Bonding – Zuverlässiges Kleben durch reaktionsfähige Oberflächen

Fused Bonding – Reliable bonding with reactive joining surfaces

Summary

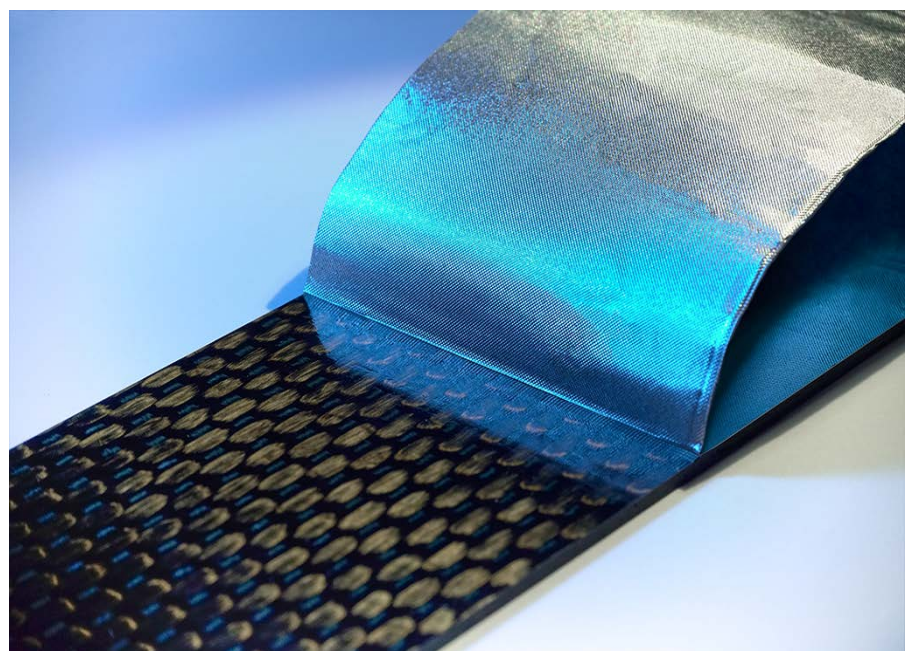
The formation of strong and durable adhesion is one of the main challenges in adhesive bonding. The Fused Bonding process developed by DLR produces reactive joining surfaces on pre-cured fire-reinforced plastics that cross-link with the applied adhesive. By means of the patent pending process, seamless joints are produced that feature optimum properties.

The core element of the Fused Bonding process is a special activation foil, which is laminated onto the preform as the outermost layer. The surface of this foil is covered with a metal oxide layer that has a high surface energy. During the curing reaction, the oxide adsorbs reactive chemical groups of the liquid polymer resin. This way, the polymer chains that are in contact with the foil remain reactive. Peeling off the activation foil after the curing process exposes a reactive surface that is able to form covalent bonds with an adhesive or matrix resin applied. In addition to maximum joining quality, the Fused Bonding process offers significant cost savings in production, reduced development time and simplified certification of bonded structures.

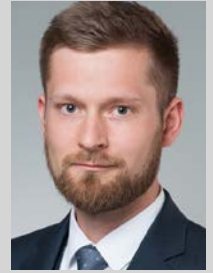
Die Fertigung komplexer Leichtbaustrukturen aus Faserverbundkunststoffen ist ohne das Kleben kaum noch denkbar. Die Herstellung einer festen und dauerhaften Verbindung ist dabei eine grundsätzliche Herausforderung für konventionelle Klebprozesse. Durch das am DLR entwickelte Fused Bonding-Verfahren werden mit Hilfe reaktiver Fügeoberflächen zuverlässige Verbindungen hergestellt; das Resultat sind geklebte Bauteile wie aus einem Guss. Neben höchster Verbindungsqualität verspricht das Fused Bonding Verfahren signifikante Kosteneinsparungen in der Fertigung sowie verkürzte Entwicklungszeiten und eine einfachere Zulassung geklebter Strukturen aus Faserverbundkunststoffen.

Simpel und äußerst leistungsfähig

Das Kernstück des neuen Fügeverfahrens ist eine spezielle Aktivierungsfolie. Diese wird bei der Herstellung von Faserverbundkunststoffen als äußerste Schicht auf die Preform aufgebracht. Nach der Härtung verbleibt sie auf der Struktur und schützt die Fügefläche vor Verunreinigungen und Feuchteaufnahme. Erst unmittelbar vor der Durchführung des Fügeprozesses erfolgt die Vorbehandlung durch das Abschälen der Folie. Im Gegensatz zu anderen Verfahren wird dabei auf besonders einfache Weise eine saubere und reaktionsfähige Oberfläche freigelegt. Bei Kontakt mit flüssigem Klebstoff oder Matrixharz findet eine chemische Vernetzungsreaktion an der Grenzfläche statt, bei der sich ein kontinuierliches Polymernetzwerk zwischen dem Bauteil und dem Klebstoff ausbildet. Das Resultat ist eine feste und dauerhafte Verbindung mit Eigenschaften des polymeren Grundwerkstoffs.



Detailansicht des Schälvorgangs der Aktivierungsfolie
Detailed view of the peeling of the activation foil



Autor:

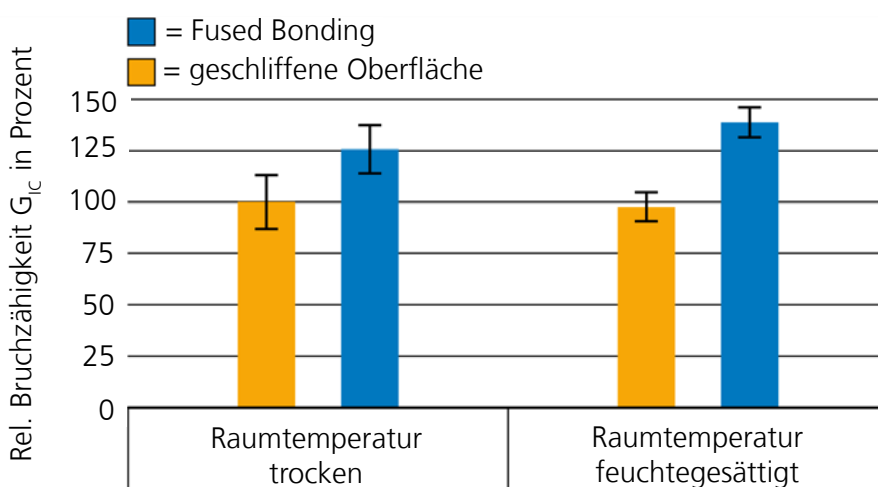
Dipl.-Ing. Lennert Heilmann

Ein zuverlässiger Effekt

Die im Fused Bonding-Verfahren genutzte Aktivierungsfolie ist mit einem Metalloxid mit hoher Oberflächenenergie versehen. Während der Härtung des Faserverbunds bindet das Oxid reaktive Bestandteile des flüssigen Matrixharzes an sich. Aufgrund der örtlichen Fixierung finden diese adsorbierten Bereiche des sich bildenden Polymernetzwerks keine Reaktionspartner. Durch das Abschälen der Folie werden die reaktiven Enden freigelegt und stehen für eine chemische Vernetzungsreaktion im folgenden Fügeprozess zur Verfügung. Auf diese Weise wird eine Verbindungsqualität wie beim gemeinsamen Aushärten zweier sich kontaktierender Flüssigharze erzielt.

Eine Lösung für viele Anwendungsfälle

Das Verfahren eignet sich unter anderem für Matrixharze und Klebstoffe auf Epoxidbasis mit niedriger bis hoher Härtungstemperatur. Mechanische Versuche zeigen, dass mittels Fused Bonding hergestellte Verbindungen eine ausgezeichnete Festigkeit aufweisen. Bei Belastung bis zum Bruch tritt keinerlei Versagen an den Grenzflächen zwischen vorbehandeltem Faserverbund und Klebstoff auf. Vom Aufkleben kleinster Sensoren bis zum Fügen von Großstrukturen ziviler Flugzeuge: Das Fused-Bonding-Verfahren hat eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Dabei bietet es eine Reihe von technischen, ökonomischen und ökologischen Vorteilen gegenüber dem Stand der Technik.



Mechanische Kennwerte: Fused Bonding vs. konventionelle Vorbehandlung

Mechanical performance: Fused Bonding vs. conventional pre-treatment

Berechnung eines vielschichtigen Phänomens: Ermüdung von Faserverbunden unter thermischer Last

Modelling a multi-faceted phenomenon: Fatigue of fibre composites under thermal loading

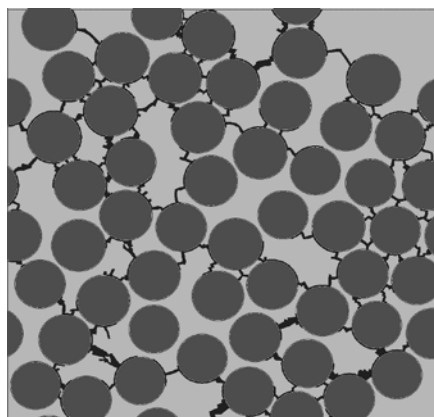
Summary

CFRP pressure vessels are perfectly suitable for the cryo-compressed storage of hydrogen. For their reliable and weight-optimised design novel simulation methods considering cryogenic thermal cycling to -240°C are now available. Such thermal loads induce significant mechanical stresses due to micro- and macromechanical effects. Over a long period, these stresses lead to the fatigue of the material. But thanks to recently developed material models, lifetime predictions on a material scale are now possible. Embedded into numerically efficient algorithms, these material models enable a reliable fatigue life assessment of CFRP pressure vessels.

Zur Kryo-Druckspeicherung von Wasserstoff bei -240°C und 350 bar sind CFK-Druckbehälter hervorragend geeignet. Für deren sichere und gewichtsoptimierte Auslegung stehen neuartige Berechnungsmethoden zur Verfügung, die Temperaturzyklen in diesem kryogenen Temperaturbereich berücksichtigen. Bei derartigen thermischen Lasten entstehen durch mikro- und makroskopische Effekte nicht unerhebliche mechanische Spannungen, die auf Dauer zur Ermüdung des Materials führen. Doch dank neu entwickelter Materialmodelle sind nun Vorhersagen der Lebensdauer unter Berücksichtigung dieser Effekte auf Materialebene möglich. Eingebettet in numerisch effiziente Algorithmen erlauben diese Materialmodelle eine verlässliche Lebensdauerbewertung für CFK-Druckbehälter.

Effekte auf zwei Ebenen ...

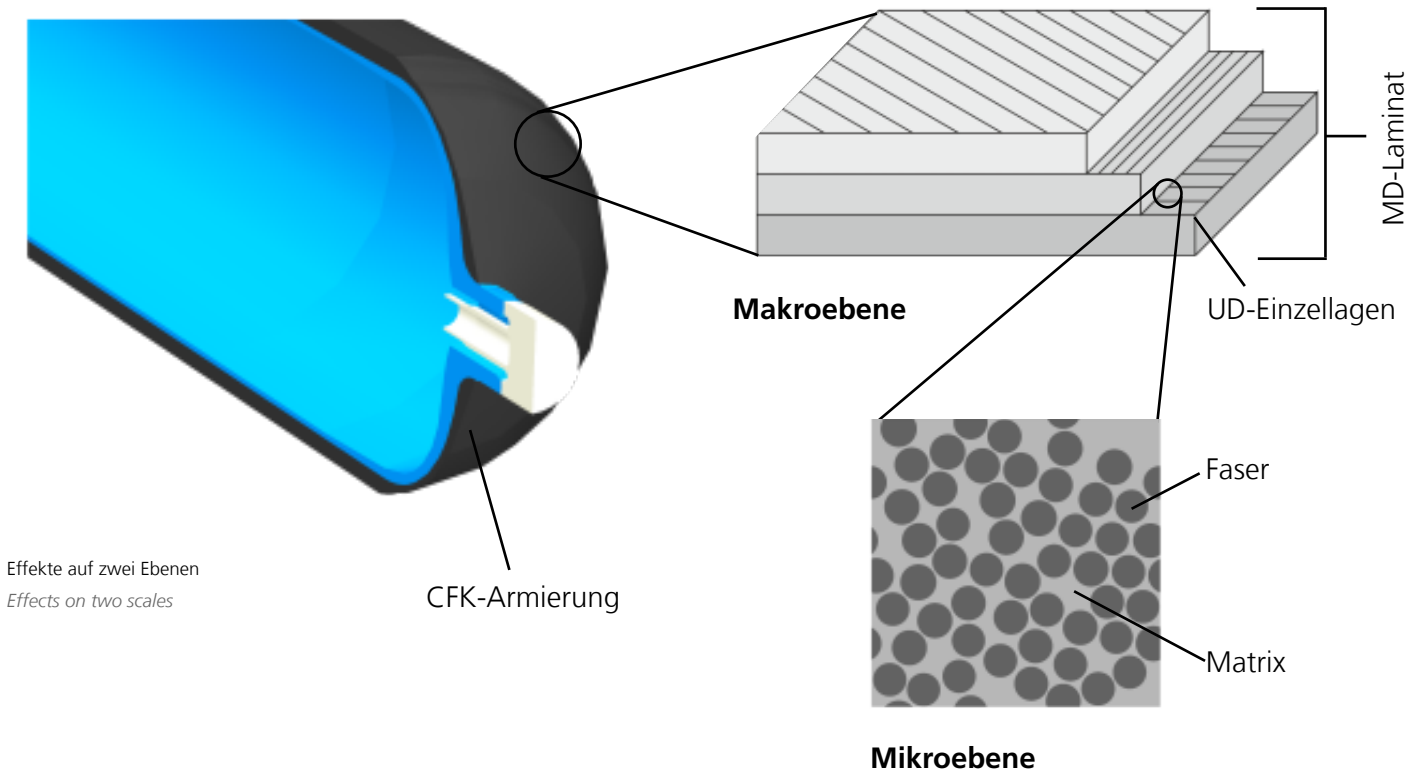
Die Materialeigenschaften der Konstituenten von CFK sind sehr verschieden. Bei einer Abkühlung zieht sich die polymere Matrix zusammen, während sich die Kohlenstofffasern geringfügig ausdehnen. Die Verbindung der Komponenten zu einem Komposit behindert die gegenteiligen thermischen Dehnungen und erzeugt dadurch mechanische Spannungen (Mikro-Effekt). Zudem verhält sich der unidirektionale Verbund, bestehend aus gleich gerichteten Faserlagen, in und quer zur Faserrichtung unterschiedlich. Im multidirektionalen Laminat eines Drucktanks sorgt diese Anisotropie der Einzellagen ebenfalls für eine Behinderung der thermischen Dehnung der Lagen und ruft dadurch mechanische Spannungen in den Einzellagen hervor (Makro-Effekt).



Mikromechanische Simulation: berechnete Matrixrisse (schwarze Bereiche) bei Ermüdungsversagen durch kryogene Temperaturwechsellast
Micromechanical simulation: calculated matrix cracks (black areas) due to cryogenic thermal cycling

Autorin:

 Dr.-Ing. Caroline Lüders



Effekte auf zwei Ebenen
Effects on two scales

CFK-Armierung

Makroebene

UD-Einzellagen

MD-Laminat

Faser

Matrix

Mikroebene

... erfordern eine mehrskalige Modellierung ...

Mikro- und Makroeffekt können das Material schädigen. Die Berücksichtigung beider Effekte in der Lebensdauerberechnung ist daher unabdingbar. Neu entwickelte Berechnungsmodelle erlauben nun eine separierte Betrachtung der Ermüdungsmechanismen auf Mikro- und Makroebene. Der Vergleich mit Validierungsexperimenten zeigt: Die Modelle bilden die Ermüdungsphänomene im Material auf beiden Skalen gut ab und liefern eine sehr gute Lebensdauervorhersage für den Makroeffekt. Sie bieten zudem einen weiteren sehr wichtigen Vorteil: Die einzelnen Beiträge des Mikro- und des Makroeffekts zur Materialermüdung lassen sich nun getrennt quantifizieren. Das war mit bisherigen Test- und Berechnungsmethoden nicht möglich.

... und eine effiziente Kopplung der Skalen

Sobald die Modelle beide Skalen berücksichtigen und die Effekte von der Mikro- auf die Makroebene übertragen, steigt der Rechenaufwand. Für die neuen Berechnungsmodelle sind daher numerisch effiziente Algorithmen vorgesehen, die auch die gewichtsoptimierte Auslegung von Wasserstoffbehältern erlauben. Der Grundstein für die ganzheitliche Lebensdauerbewertung von CFK-Druckbehältern im Sinne eines übergeordneten Simulationsrahmens ist bereits gelegt (s. Innovationsbericht 2016). In diesen integriert, ermöglicht das neuartige Berechnungsmodell eine verlässliche Lebensdauervorhersage für die CFK-Armierung der Tankstruktur.

Weiterführende Literatur:

[*Fatigue of fibre-reinforced plastics due to cryogenic thermal cycling*](#)

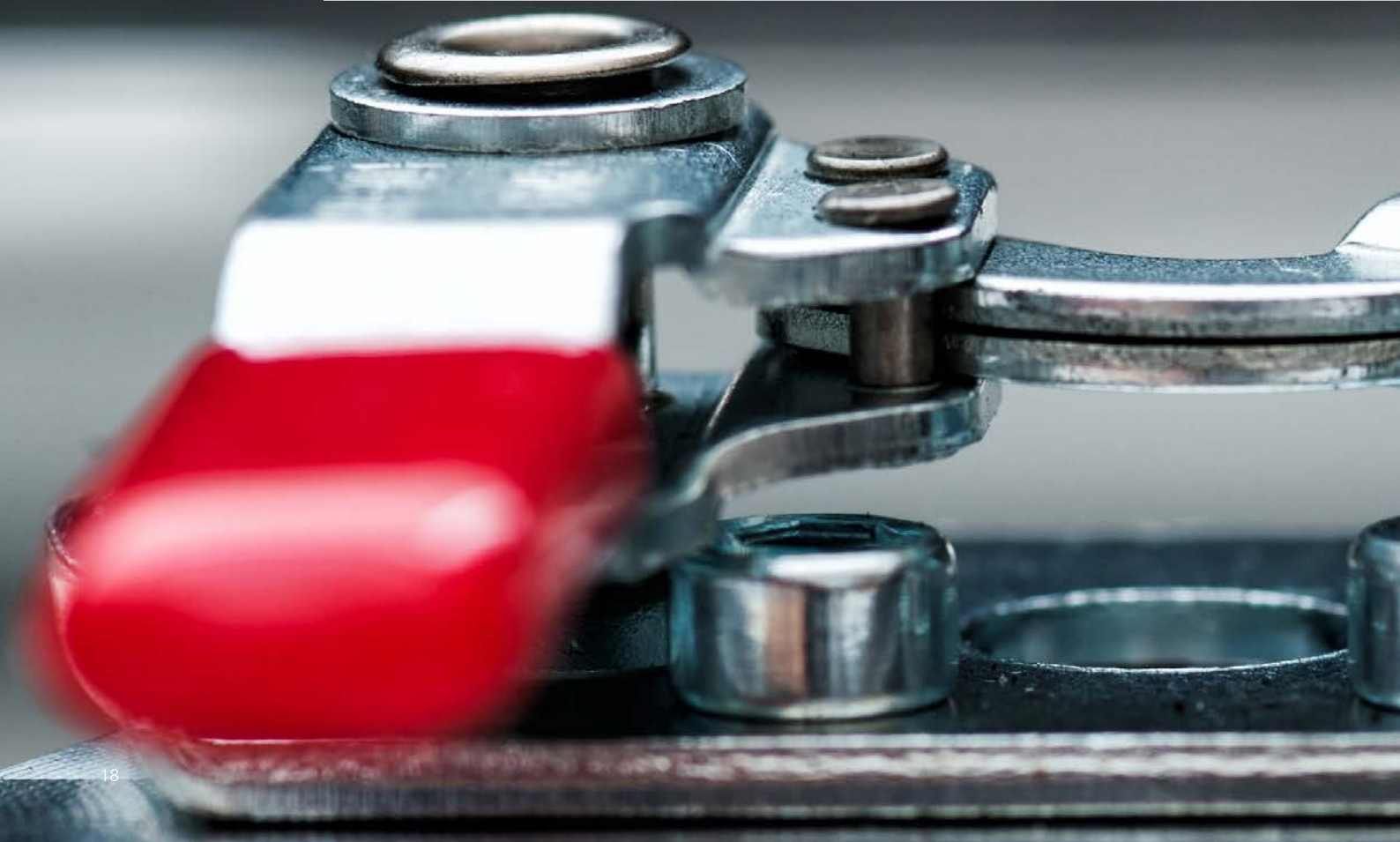
[*Fatigue damage model for fibre-reinforced polymers at different temperatures considering stress ratio effects*](#)

[*Adaptive cycle jump and limits of degradation in micromechanical fatigue simulations of fibre-reinforced plastics*](#)

[*Experimental and numerical multiscale approach to thermally cycled FRP*](#)

METHODEN

Methods



20

Ein innovatives Konzept zur Bewertung von Schlagschäden und Welligkeiten
An innovative approach for the evaluation of impact damages and wavinesses

22

Numerische Vorhersage vereinfacht die Zulassung von Klebeverbindungen in Faserverbundstrukturen
Numerical predictions simplifies the certification of bonded joints in fibre composite structures

24

Was macht einen Windpark aus?
What makes a wind farm?

26

Der Auslegungsprozess im Virtual Product House (VPH)
The VPH sizing process

28

Struktur, wie geht es dir? – Lastmonitoring für eine zustandsorientierte Wartung
Structure, how are you? - Load monitoring for condition-based maintenance

Ein innovatives Konzept zur Bewertung von Schlagschäden und Welligkeiten

An innovative approach for the evaluation of impact damages and wavinesses

Summary

An innovative concept is available for the assessment of impact damage and waviness caused during the production and operation of composite aircraft structures. It is suitable both in the design and manufacturing phase as well as within concessions during series production. This new concept combines and holistically evaluates relevant defect parameters of waviness and impact damage. The benefits are evident: effects from interacting waviness and impact damage are now physically understood. No more general and individual evaluation of the defects takes place. The effort for numerical and experimental material and component qualification is reduced. The tolerance and quality requirements in manufacturing can be newly evaluated, thus reducing costs in the start-up phase and in series production through rework and rejects.

Weiterführende Literatur:

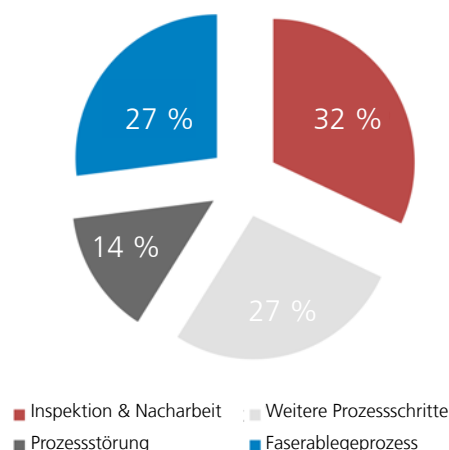
[Manufacturing-Induced Imperfections in Composite Parts Manufactured via Automated Fiber Placement](#)

[In-situ structural evaluation during the fibre deposition process of composite manufacturing.](#)

Zur Bewertung von Schlagschäden und Welligkeiten, die bei der Fertigung und im Betrieb von Flugzeugstrukturen aus Verbundwerkstoffen auftreten können, steht ein neues Konzept bereit. Es kann sowohl in der Entwurfs- und Fertigungsphase als auch im Beanstandungsprozess während der Serienproduktion Anwendung finden. Das neue Konzept umfasst einen Kriterienkatalog, der relevante Defektparameter von Welligkeiten und Schlagschäden kombiniert und ganzheitlich bewertet. Die Vorteile liegen auf der Hand: Die Auswirkungen von interagierenden Welligkeiten und Aufprallschäden werden individuell und effizient analysiert. Der Aufwand zur die numerische und experimentelle Material- und Bauteilqualifizierung lässt sich dadurch reduzieren. Die Toleranz- und Qualitätsanforderungen in der Fertigung lassen sich neu bewerten und dadurch die Kosten in der Hochlaufphase und in der Serienproduktion durch unnötige Beanstandungsprozesse (Concessions), Nacharbeit und Ausschuss reduzieren.

Stand der Technik


In Flugzeugstrukturen aus Verbundwerkstoffen können fertigungs- und betriebsbedingt Defekte auftreten: Welligkeiten beispielsweise entstehen durch Fremdkörper sowie Überlappungen und Lücken im Material oder auch durch die gewählte Fertigungstechnologie. Defekte können aber auch während des Betriebs und der Wartung durch Stein-, Hagel- und Vogelschlag sowie durch Werkzeugfall hervorgerufen werden. All diese Defekte können sich durchaus negativ auf die Lasttragfähigkeit von Faserverbundstrukturen auswirken. Welligkeiten sind meist schwierig zu detektieren und auch Schlagschäden führen zu kaum sichtbaren Schäden. Erfahrungsgemäß akkumulieren sich beide Defektarten, wobei die Interaktion zwischen Welligkeiten und Schlagschäden bislang noch weitestgehend unerforscht ist. Aus dem fehlenden physikalischen Verständnis folgen konservative Annahmen und hohe Toleranz- und Qualitätsanforderungen an die Fertigung. Reparatur und Ausschuss bei der Fertigung erhöhen die Kosten des Bauteils: Beispielsweise macht die Inspektion und Nacharbeit der Cockpitsektion des Dreamliners etwa ein Drittel der gesamten Fertigungszeit aus.



Aufwand für Inspektion und Nacharbeit zur Fertigung der B-787 Cockpitsektion (nach T. Rudberg, J. Nielson, M. Henscheid, and J. Cemenska, "Improving AFP Cell Performance", SAE Int. J. Aerosp., vol. 7, no. 2, pp. 2014-01-2272, 2014)

Effort for inspection and rework for the production of the B-787 cockpit section (according to T. Rudberg, J. Nielson, M. Henscheid, and J. Cemenska, "Improving AFP Cell Performance", SAE Int. J. Aerosp., vol. 7, no. 2, pp. 2014-01-2272, 2014)

AutorInnen:

 [Dipl.-Ing. Falk Heinecke](#)

 [Dipl.-Ing. Nagham Al-Kathemi](#)



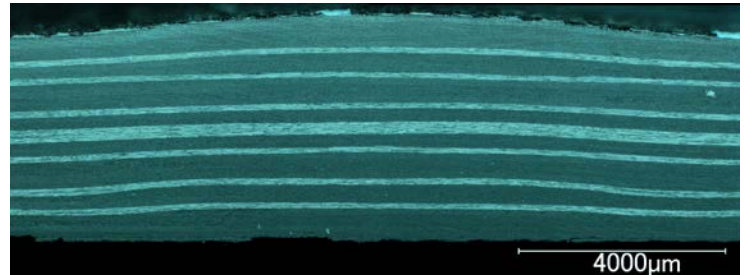
Das neuartige Konzept

Im Rahmen einer sehr umfangreichen „Effects of Defects“-Testkampagne erfolgten experimentelle, numerische und theoretische Untersuchungen zunächst an Welligkeitsdefekten und an deren Ursachen ([aktuelle Forschungsarbeiten](#)) und anschließend zum komplexen Interaktionsverhalten zwischen Welligkeiten und Schlagschäden.

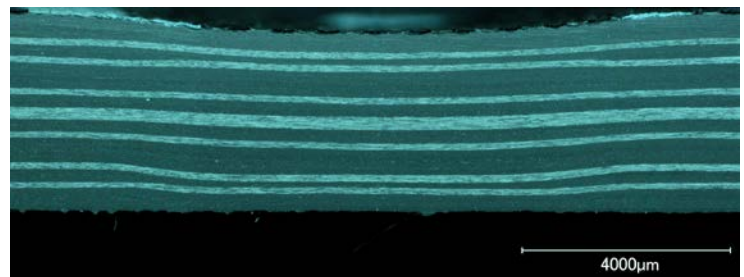
189 Proben, alle nach Airbus-Normen geprüft, sind die Grundlage zur Ableitung aussagekräftiger physikalischer Zusammenhänge, insbesondere zur Wechselwirkung mit den Schlagschäden. Die Ergebnisse der Testkampagne zeigen, dass die Wechselwirkung mit Schlagschäden ein multiplikatives Verhalten darstellt und dass Welligkeiten die Resttragfähigkeit einer Probe mit Schlagschäden zwar abmindern, aber nicht zwangsläufig zusätzlich. Zudem sind relevante Parameter individuell betrachteter Defekte nicht auch zwingend relevant bei ihrer Interaktion. Auf Basis dieser experimentellen Studien wurde ein neuartiges Konzept zur individuellen und effizienten Bewertung von interagierenden Welligkeiten und Schlagschäden formuliert, welches aus zwei Teilen besteht. Der erste Teil umfasst die Festlegung von Fallunterscheidungskriterien mit deren Hilfe Konservatismen in den Methoden reduziert werden können. Diese sind:

- der Energie-Level der Schlagschäden als Funktion der kritischen Parameter,
- die vorliegende Welligkeitsmorphologie und Position des Schlagschadens sowie
- die Aufprallseite als Funktion der kritischen Parameter
- zulässige und auftretende Dehnungen.

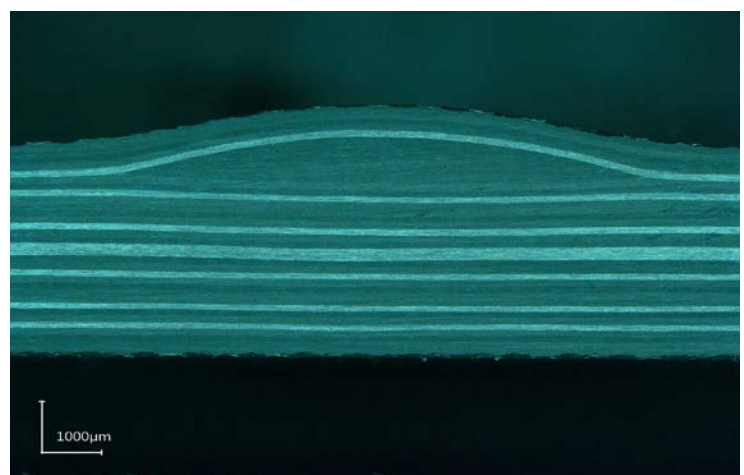
Der zweite Teil dieses Konzeptes umfasst die Schadensbewertung: Der Gesamtabschwächungsfaktor durch interagierende Defekte ergibt sich multiplikativ aus den einzelnen Faktoren für die Welligkeit und den Schlagschaden. Es entsteht großes Einsparpotenzial, was den numerischen und experimentellen Aufwand bei der Material- und Bauteilqualifizierung betrifft. Die bisherigen Untersuchungen der Interaktion von Welligkeiten und Schlagschäden decken einen wichtigen Teil des Parameterraumes ab. In weiterführenden Untersuchungen stehen die Anwendungsgrenzen des neuartigen Entwurfskonzeptes im Fokus.



Faserwelligkeiten verursacht durch Überlappungen
Material overlap-induced fibre waviness



Faserwelligkeiten verursacht durch Lücken
Material gaps-induced fibre waviness



Faserwelligkeiten verursacht durch Fremdkörper (Extramaterial)
Extra material-induced fibre waviness (extra material)

Numerische Vorhersage vereinfacht die Zulassung von Klebeverbindungen in Faserverbundstrukturen

Numerical predictions simplifies the certification of bonded joints in fibre composite structures

Summary

The certification of a bonded fibre composite aircraft structure is more straightforward, if failure under overload is proven to be limited to the surrounding composite structure. To date, usually extensive test campaigns provide this information. A newly developed simulation method now makes it possible to precisely predict the type of failure. The key is to combine compatible models for the various interacting damage phenomena. This enables a detailed analysis of the occurring failure modes. Thus, the test amount is considerably reduced. In order to comply with the certification requirements for bonded primary joints, the integration of disbond arrest features is necessary. Therefore, it is now planned to extend the new method by the simulation of these features.

Weiterführende Literatur:

[A pragmatic approach for a 3D material model considering elasto-plastic behaviour, damage initiation by Puck or Cuntze and progressive failure of fibre-reinforced plastics](#)

[Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with the eXtended Finite Element Method](#)

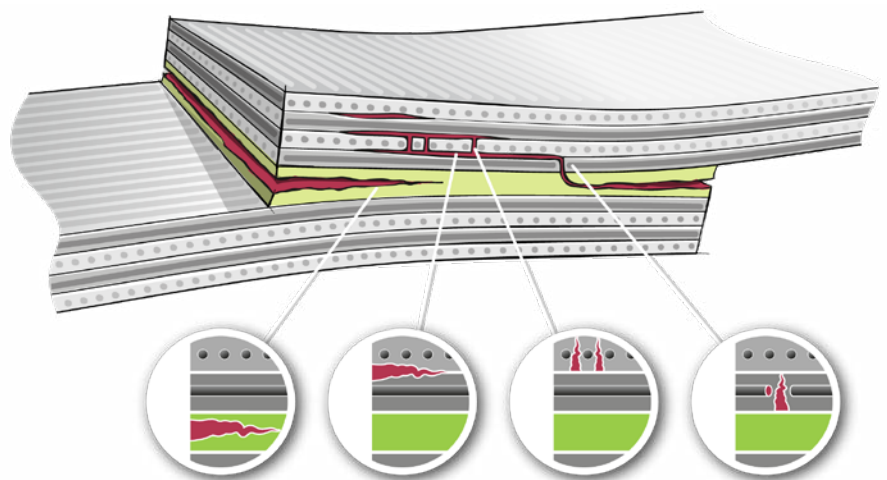
[Surface toughening – a concept to decrease stress peaks in bonded joints](#)

[Digital image correlation strain measurement of thick adherend shear test specimens joined with an epoxy film adhesive](#)

Die Zulassung einer geklebten Struktur im Flugzeugbau vereinfacht sich, wenn nachgewiesen ist, dass das Versagen bei Überlastung auf die umgebende Faserverbundstruktur begrenzt bleibt. Bisher liefern umfangreiche Testkampagnen diese Information. Eine neu entwickelte Berechnungsmethode ermöglicht nun, die Art des Versagens präzise vorherzusagen. Der Clou ist, zueinander passende Modelle für die verschiedenen interagierenden Schädigungsphänomene zu kombinieren. So ist eine detaillierte Analyse der auftretenden Versagensfälle möglich. Der Testumfang reduziert sich dadurch erheblich. Um die Zulassungsvorschriften für geklebte Primärverbindungen zu erfüllen, sind Rissstoppelemente notwendig. Geplant ist nun, die neue Methode um die Simulation dieser Elemente zu erweitern.

Art des Versagens ist entscheidend

Je nach Auslegungsmethodik ist für Klebeverbindungen nachzuweisen, dass die Festigkeit der Klebschicht größer als die Festigkeit der umgebenden Struktur ist. Es ist also entscheidend, zu wissen, wie sich eine Klebeverbindung bei „Überlastung“ verhält. In der industriellen Praxis liefern mangels zuverlässiger Analysemethoden meist physikalische Tests von ausgewählten Designvarianten diese Informationen. Um die Zahl dieser aufwändigen Tests zu reduzieren, besteht der Wunsch nach Analyseverfahren für virtuelle Strukturtests. Es existiert eine Vielzahl von Berechnungsansätzen für die Modellierung der einzelnen Effekte, wie das Verhalten der einzelnen Faserverbundlage, das Ablösen der Einzellagen voneinander, das Fließen des Klebstoffs sowie die Schädigung in Form von Rissen im Klebstoff.

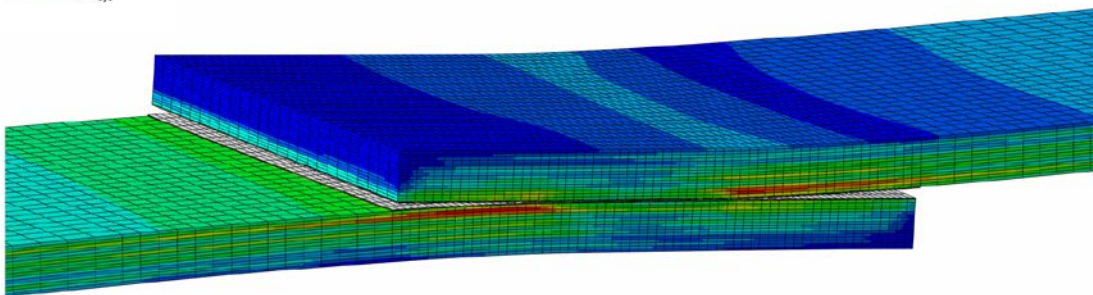
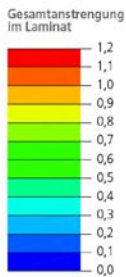


Schädigungsphänomene in den FKV-Fügeteilen und in der Klebschicht (v. l. n. r.: Riss in der Klebschicht, Delamination, Zwischenfaserbruch, Faserbruch)
Damage phenomena in the FRP adherends and in the adhesive layer (f. l. t. r.: crack in bondline, delamination, interfiber failure, fiber failure)



Autor:

 [Oliver Völkerink, M. Sc.](#)



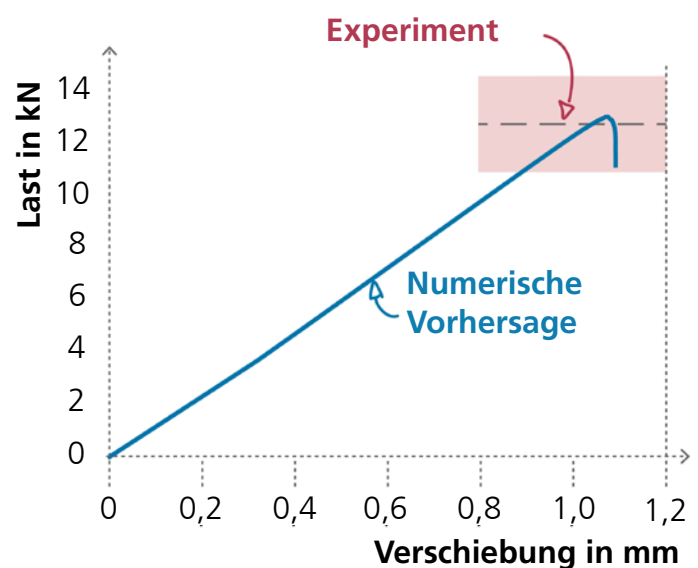
Analyse der Laminatanstrengung (Ausnutzungsgrad des Materials, Schädigungsbeginn bei Werten $> 1,0$) einer einschnittigen Klebeverbindung mit fortgeschrittenen Rissen im Klebstoff

Analysis of the laminate stressing effort (utilisation of the material, start of damage at values > 1.0) of a bonded single lap joint with progressed cracks in the adhesive

Fokus auf Kombination von Berechnungsansätzen

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Kombination dieser Ansätze, um das Schädigungsverhalten der gesamten Verbindung abzubilden. Zu diesem Zweck werden zur Kombination geeignete Ansätze ausgewählt, implementiert und Kennwerte von luftfahrttypischen Materialien im zertifizierten FA-Prüflabor ermittelt. Die für die Anwendung an dünnen Klebschichten weiterentwickelte digitale Bildkorrelation ermöglicht es, hochaufgelöste Dehnungsfelder während des mechanischen Tests von Prüfkörpern aufzunehmen und mit ihnen die kombinierte Berechnungsmethode zu validieren.

Das BMWi fördert im VI. Luftfahrtforschungsprogramm das Projekt JoinDT. Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Robustheit der Berechnungsmethode zu überprüfen. Weiterhin dient die Methode dazu, die Wirkungsweise und Effektivität von Konzepten zur Festigkeitssteigerung und zum Rissstopp, wie der [Surface-Toughening-Technologie](#), zu untersuchen. Schließlich soll die weiterentwickelte Methode Konstruktionsempfehlungen für diese Art von Klebeverbindungen liefern.



Numerische Vorhersage der Versagenslast einer einschnittigen Klebeverbindung
Numerical failure load prediction of a bonded single lap joint

Was macht einen Windpark aus?

What makes a wind farm?

Summary

DLR is building a research wind farm together with Enercon and the Wind Energy Research Association. New technologies such as wind farm control systems or structural health monitoring systems can then be tested on the highly instrumented wind turbines of the latest generation. The aerodynamic interaction between the turbines is one of the main areas of research to investigate the influence of wake loads on the structure. Validated aerodynamic, meteorological and aeroelastic models are required to evaluate this interaction on the structural level. These models provide structural loads for further analysis. In the field of component evaluation of composite structures, this is the last step in a test hierarchy. It ranges from sub-component investigations, test bench tests to measurements on a single system. The results are very precise validated structural models.

Das DLR baut gemeinsam mit [Enercon](#) und dem [Forschungsverbund Windenergie](#) einen [Forschungswindpark](#) auf. Neue Technologien wie Anlagenregelungen oder Strukturüberwachungssysteme sind dann an den hochinstrumentierten Windenergieanlagen der neuesten Generation [untersuchbar](#). Die aerodynamische Wechselwirkung zwischen den Anlagen ist einer der [Forschungsschwerpunkte](#), um den Einfluss der Nachlauflasten auf die Struktur zu untersuchen. Zur Bewertung dieser Wechselwirkung auf der Strukturebene bedarf es validierter [aerodynamischer](#), [meteorologischer](#) und [aeroelastischer](#) Modelle. Diese stellen Strukturlasten für eine weitere Analyse bereit. Im Bereich der Bauteilbewertung von Faserverbundstrukturen ist dies der letzte Schritt in einer Testhierarchie. Sie reicht von Subkomponentenuntersuchungen über Prüfstandtests bis hin zu Messungen an einer einzelnen Anlage. Das Ergebnis sind hochgenaue validierte Strukturmodelle.

Wie baue ich einen Windpark

Die Modellierung eines Windparks ist eine große Herausforderung. Durch die dichte Bebauung zwischen den Anlagen beeinflusst der Nachlauf einer Windenergieanlage die dahinter stehenden. Wie bei der Wirbelschleppes eines Flugzeugs sorgen die Verwirbelungen des Nachlaufs für eine deutlich größere strukturelle Belastung. Gleichzeitig ernten die Windturbinen weniger Strom. Eine parkweite Regelung ist eine Möglichkeit, diese Herausforderungen zu bewältigen. Zukünftig ist nicht nur der maximale Energieertrag ein Optimierungsziel. Nimmt der Betreiber neben dem Ertrag die Lebensdauer mit in den Blick, sind die operationellen Kosten reduzierbar. Dies führt bei sinkenden Erträgen von Einzelanlagen zu steigenden Erträgen im gesamten Park.



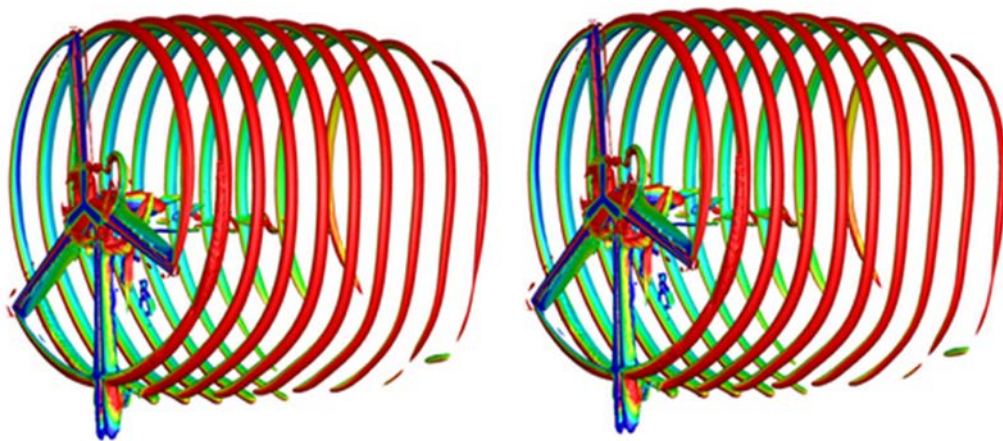
Konzept des DLR-Forschungswindparks

Concept of the DLR research wind farm



Autor:

 [Dr.-Ing. Christian Willberg](#)



Darstellung der Anlageninteraktion
Visualisation of the turbine interaction

Genauigkeit

Die Qualität einer solchen strukturellen Bewertung hängt maßgeblich von der Qualität der verwendeten Modelle ab. Es ist daher sinnvoll, neben der Validierung auf Parkebene Einzelmodelle und teilweise gekoppelte Simulationen zu validieren. Eine mehrschichtige Validierungsstrategie beschreibt klare Modellierungsziele, Definitionen von Schnittstellen zwischen verschiedenen Disziplinen und Validierungsszenarien. Startpunkt für die strukturmechanischen Modelle ist das Windrotorblatt als wesentliche Komponente. Im Projekt [Smartblades 2](#) fand eine [Validierung](#) statt. Das Strukturmodell des Windrotorblatts bildet die gemessenen Verformungen und Dehnungen sehr gut ab. Auch stimmen die Eigenfrequenzen und Eigenformen sehr gut überein. Das Rotorblattmodell ist die Basis für die Bewertung von Strukturmodellen verschiedener Güte und Komplexität, wie sie beispielsweise in einer Lastenberechnung nötig sind. Die [Daten](#) sind am Ende des Projekts als Referenz als Abaqus-, Ansys- und Nastran-Format verfügbar. Das ermöglicht der Industrie und den Forschenden, ihre Modelle und Methoden zu verifizieren, zu validieren und zu verbessern.

Der Auslegungsprozess im Virtual Product House (VPH)

The VPH sizing process

Summary

The simulation processes developed at VPH allow for result predictions of structural and system tests for virtually manufactured structures already in early design phases. Thus, the analysis and evaluation methods allow for more agile development processes. Waiting periods until physical test data becomes available are eliminated. If the underlying simulation methods and calculation steps are validated and traceable, this opens the way to simulation-based certification. An open framework serves as a platform for the method deployment. Partners can participate without having to disclose their intellectual property.

Weiterführende Literatur:

- [Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS. Alder, M., et al., et al. Bordeaux : s.n., 2020.](#)
- [Führer, Tanja, et al., et al. Automated model generation and sizing of aircraft structures.](#)
- [Dähne, Sascha. Strukturbewertung so schnell wie möglich und so genau wie nötig.](#)
- [Heinecke, Falk and Wille, Tobias. Prozessintegrierte In-situ-Strukturbewertung.](#)
- [Bertling, Dominic. Qualitätsgesicherte Liquid Composite Moulding \(LCM\) Prozesse.](#)
- [Hein, Robert and Heinecke, Falk. Digitaler Zwilling – ein dynamisches Abbild und nicht nur eine digitale Kopie.](#)

Die im VPH entwickelten simulativen Prozesse ermöglichen bereits in frühen Auslegungsphasen Ergebnisvorhersagen von Struktur- und Systemtests virtuell gefertigter Strukturen. Die Analyse- und Bewertungsmethoden erlauben somit agilere Entwicklungsprozesse. Wartezeiten bis zum Vorliegen physischer Testdaten entfallen. Sind die zugrunde liegenden Simulationsmethoden und Berechnungsschritte validiert und nachvollziehbar, öffnet dies, in Absprache mit unserem Partner [EASA](#), den Weg zu einer simulationsbasierten Zertifizierung. Ein offenes Framework dient als Plattform für die Bereitstellung der Methoden. An diesem können Partner teilnehmen, ohne ihr geistiges Eigentum preiszugeben.

Modulare Schritte

Das Ergebnis der digitalen Strukturentwicklung ist das [virtuelle Produkt](#). Selbiges und der digitale Zwilling dienen als Abbilder des Sollzustands und der real gefertigten Struktur. Über den Sollzustand hinaus berücksichtigt das virtuelle Produkt Streuungen, die zum Beispiel aus zu erwartenden Fertigungsunsicherheiten resultieren.

Im Rahmen des VPH-Startprojekts dient eine multifunktionale Flugzeugsteuerfläche (Moveable) als multidisziplinärer Anwendungsfall. Die Entwicklung und Demonstration des multidisziplinären Prozesses zwischen Aerodynamik, Struktur und System erfolgt mit den Partnern [Airbus](#), [FET](#), [IABG](#) und [Liebherr](#) sowie den DLR-Instituten für Aerodynamik und Strömungstechnik, Flugsystemtechnik und Softwaretechnologie.

Die Auslegung basiert auf vorhandenen Ergebnissen aus DLR-Gesamtentwurfsprojekten. Der aktuelle Strukturentwicklungsprozess des virtuellen Produkts umfasst die Schritte Auslegung, virtuelle Fertigung und virtuelle Strukturtests zur Nachweisführung. Nach jedem Auslegungsschritt liegt das virtuelle Produkt in einem neuen Zustand vor. Innerhalb der Schritte kann flexibel auf problemabhängige Fragestellungen reagiert werden. Diese ergeben sich beispielsweise aus unterschiedlichen Struktur- und Fertigungskonzepten.

Eine zuverlässige Bewertung benötigt zuvor eine adäquate Modellierung. Im VPH-Startprojekt dient eine [CPACS](#)-Beschreibung des Referenzflugzeugs als Grundlage. Auf dieser Basis erfolgt eine maßgebliche Erweiterung der parametrischen Strukturmodellierung von Moveables innerhalb des Modellgenerators DELiS auf die Anforderungen im Niedergeschwindigkeits- und Hochauftriebsbereich. Die Auslegung geschieht effizient durch eine Kopplung analytischer und numerischer Methoden mit VERSO.

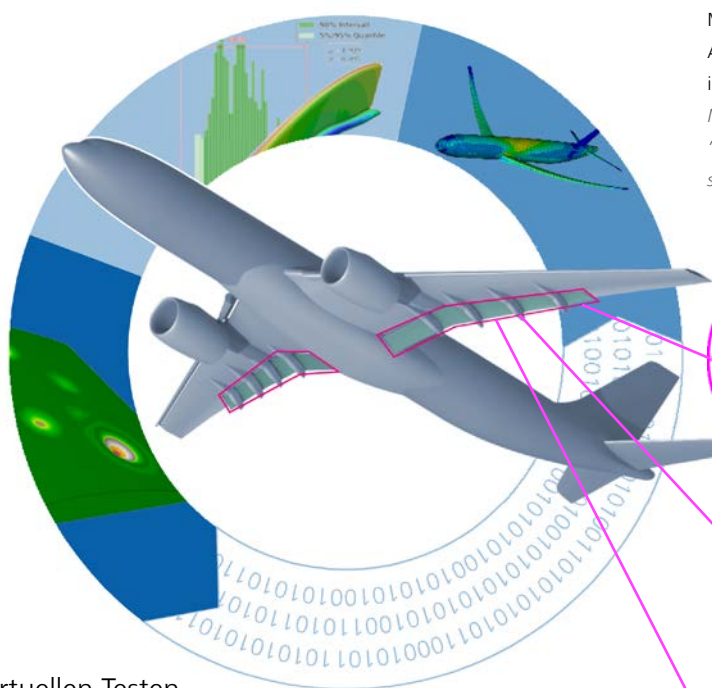


Autor:

 Dipl.-Ing. Martin Rädels

Mit abgesicherter Unsicherheit

Fertigungssimulationen in Kombination mit probabilistischen Methoden dienen zur Analyse des Zustands des virtuellen Produkts bei jedem Fertigungsschritt. Für das Moveable erfolgt dies am Beispiel des Automated Fiber Placement (AFP)-Prozesses trockener Fasern sowie eines anschließenden Infusionsprozesses der Gesamtstruktur. Auf diese Weise finden planbare Effekte aus der Faserablage, der Infusion und der Aushärtung Berücksichtigung im Versuch. Zudem schafft dies die Möglichkeit, Einflüsse statistischer Streuungen aus dem Fertigungsprozess auf die Robustheit der Struktur zu untersuchen. Dies erlaubt die Ableitung erforderlicher Fertigungstoleranzen.



Modellierungs- und Auslegungsaspekte des Anwendungsfalls „Multifunctional Moveable“ im VPH-Startprojekt

Modelling- and sizing aspects of the use case "Multifunctional Moveable" in the VPH starting project

Gesamtstrukturmodell Flügel und Moveables

Modellierung kinematischer Anbindungsarten

Automatisierte Modellierung & Sizing innovativer Strukturkonzepte

Zum robusten virtuellen Testen

Das virtuelle Testen erfolgt mehrstufig. Detaillierte strukturmechanische Simulationen untersuchen zunächst die Einhaltung aller Anforderungen an die Struktur des virtuellen Produkts unter Berücksichtigung der Fertigungseffekte. Darauf folgt die Kombination aerodynamischer Lasten, Aktuatorik, Kinematik und Struktur in der Mehrkörpersimulation. Diese ermöglicht die Simulation von Betriebs- und Fehlerfällen über die Grenzen physischer Testmöglichkeiten hinaus. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Lasten fließen direkt in die Auslegung zurück.

Mit nachvollziehbaren Prozessen

Die Umsetzung des VPH-Prozesses findet im offenen Workflowtool [RCE](#) statt. Um eine Zertifizierung zu ermöglichen, ist in solch komplexen Entwurfsprozessen das Vertrauen in die verwendeten Daten essentiell. Daher ist die Provenienz der Daten und der Datenfluss im Prozess nachvollziehbar und fälschungssicher rekonstruierbar.

Struktur, wie geht es dir? – Lastmonitoring für eine zustandsorientierte Wartung

Structure, how are you? – Load monitoring for condition-based maintenance

Summary

The prototype for a load monitoring system allows for real-time condition assessment of aircraft structures on the ground or on-board in the air. With the help of flight data, simulation models determine the actual operating loads without having to integrate additional sensors in the aircraft. In areas of structural components at risk of fatigue and crack growth, an assessment of the actual condition is carried out. Here, the current prototype compares the occurring loads with the fatigue loads assumed in the design. To reduce costs, the maintenance interval can be adjusted if the components are less stressed than assumed in the design.

Der Prototyp für ein Lastmonitoring erlaubt die echtzeitfähige Zustandsbewertung von Flugzeugstrukturen am Boden oder in der Luft. Mit Hilfe von Flugdaten bestimmen Simulationsmodelle die real aufgetretenen Betriebslasten, ohne zusätzliche Sensoren im Flugzeug integrieren zu müssen. In Bereichen von ermüdungs- und risswachstumsgefährdeten Strukturbauteilen findet eine Bewertung des Ist-Zustandes statt. Der aktuelle Prototyp vergleicht hier die aufgetretenen Lasten mit den im Design angenommenen Ermüdungslasten. Um Kosten zu senken, ist das Wartungsintervall anpassbar, z. B. wenn die Bauteile weniger belastet sind als im Design angenommen.

Lastenanalysen

Konservative Lastannahmen während des Entwicklungsprozesses eines Flugzeugs stellen die Sicherheit der Passagiere und des Flugzeugs sicher. Diese Lasten sind im Wesentlichen die Maximallasten, aber auch die auftretenden Belastungen im operativen Betrieb für den gesamten Lebenszyklus.

Ein Lastmonitoring basiert auf der Annahme, dass die auftretenden Belastungen im Betrieb geringer ausfallen als die im Design angenommenen. Die tatsächliche Lebensdauer für ermüdungsgefährdete Strukturen wird im Vergleich zur konservativen Annahme dementsprechend höher. Durch eine Anpassung der Wartungsintervalle ist dieser Lebensdauerertrag nutzbar, was sich direkt auf die Wartungskosten auswirkt.

Der Verzicht auf zusätzliche Sensoren schöpft das volle Potenzial eines Lastmonitorings aus. Dies reduziert die Komplexität und bereits produzierte Flugzeuge sind nachrüstbar. Flugmodelle berechnen auf virtuell nachgeflogenen Routen die aufgetretenen Belastungen am Strukturbauteil. Sie nutzen Positionsdaten und ermitteln daraus die Steuerflächenausschläge.

Böenmodelle erweitern die simulierten Daten, um realistische Fluglasten für alle durchgeführten Flüge zu erhalten. Die Ergebnisse der lokalen Analyse der Bauteilbelastungen erlauben anschließend eine Ermüdungs- und Risswachstumsbewertung und schlussendlich eine Aussage über die tatsächliche Lebensdauer. Dabei ist eine Verlängerung des Wartungsintervalls nicht immer gewünscht. Es bedarf einer Optimierung der Wartung, basierend auf dem Businesscase der Airline. Analysen zeigen ein Potenzial einer Wartungskostenreduktion von 0.3%.

Autoren:

 [Dr.-Ing. Christian Willberg](#)

 [Dr.-Ing. Sebastian Freund](#)



Umsetzung

Eine Triebwerktaufhängung ist der Anwendungsfall für den Prototyp des Lastmonitorings. In der Regel wird das Triebwerk demontiert, um die Aufhängung zu inspizieren. Das macht eine Prüfung meist sehr aufwändig. Die Analyseketten des Prototyps ist in eine Trainings- und Nutzungsphase unterteilt. Die Trainingsphase verwendet Methoden des maschinellen Lernens, um Ersatzmodelle zu trainieren. Sie eröffnen die Möglichkeit einer echtzeitfähigen Analyse in der Nutzungsphase bei einem angemessenen Rechenaufwand. In die Wartungsoptimierung einbezogen werden nun alle relevanten Bauteile und sogar ganze Flugzeugflotten. Die entwickelten Methoden sind generisch. Somit ist das Vorgehen auf verschiedenste Strukturen auch außerhalb der Luftfahrt, z. B. an ein Windrotorblatt, anwendbar.

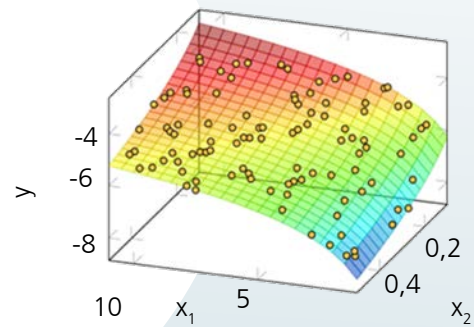
Transformation der aufgezeichneten Flugdaten in ein Wartungsintervall über eine Last-, Spannungs-, Ermüdungs- und Risswachstumsbestimmung

Transformation of the recorded flight data into a maintenance interval by using a simulation of loads, tension, fatigue and crack growth

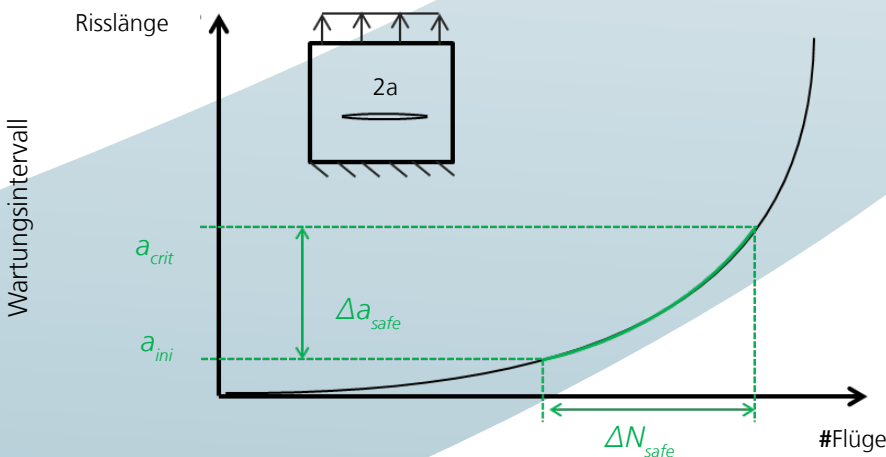
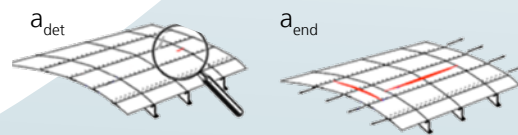
Flugdaten



Spannungen
Metamodell



Riss-
wachstum





KONSTRUKTION

Construction

Struktur aus dem Übergangsdreieck des Querruders aus dem Projekt FlexMat
Structure from the aileron transition triangle from the FlexMat project

32

Alles drin – Multifunktionalität in Raumfahrtstrukturen
All in – Multifunctionality in space structures

34

Hochleistungsleichtbau für ein innovatives Rettungssystem am Silent Air Taxi
High-performance lightweight construction for an innovative rescue system of the Silent Air Taxi

36

Leichtbau im Grenzbereich
At the limits of lightweight construction

38

Flugwindanlagen leicht gemacht – Effiziente Energieerzeugung mit seilgebundenen Flugkörpern
Airborne wind energy light and easy – Efficient energy harvesting with tethered wing

40

Auf leisen Schwingen – Spaltabdeckungen am Flügel zur Reduktion von Start- und Landelärm
Quieter wings – Gap covers at the wing for reduction of takeoff and landing noise

Alles drin – Multifunktionalität in Raumfahrtstrukturen

All in – Multifunctionality in space structures

Summary

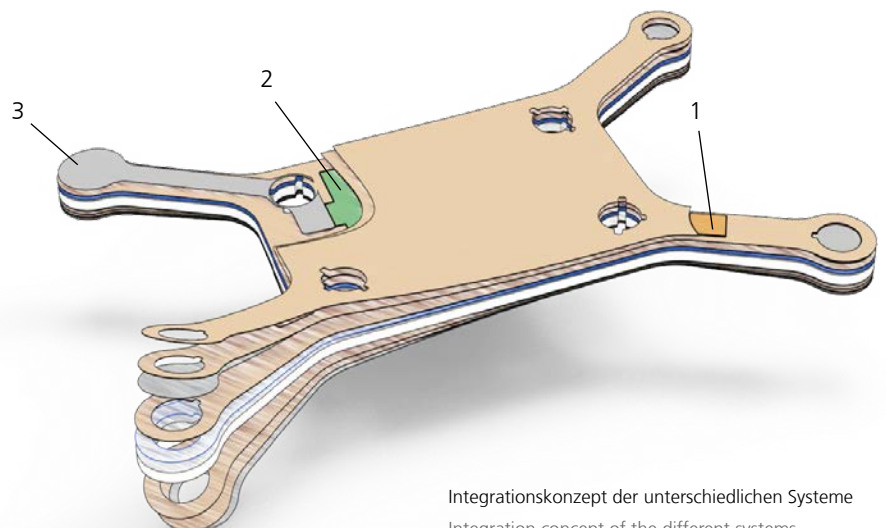
Last year, a team of the Institute of Composite Structures and Adaptive Systems developed a vision for space structures that, thanks to their multifunctionality, can be universally assembled and mounted together - even in orbit. This idea won the institute's internal Competition for Ideas. This year, the idea has been exemplarily realised in the form of a multifunctional primary structure for a satellite. The system possesses several functionalities, all of which are structurally integrated: active vibration reduction, energy supply and data transfer including energy storage and conducting paths, thermal control and operational load transfer to the payload. In addition to the advantage of saving mass and volume, the new design allows for its implementation not only in near-earth satellites but also in deep space exploration probes.

Im letzten Jahr hat ein institutsinternes Team die Vision von Raumfahrtstrukturen entwickelt, die aufgrund ihrer Multifunktionalität und Modularität universell zusammenbaubar und einsetzbar sind – sogar im Orbit. Bei dem institutsinternen Wettbewerb der Ideen hat diese Idee gewonnen. In diesem Jahr wurde sie umgesetzt, beispielhaft in Form einer multifunktionalen Struktur für einen Satelliten. Das System verfügt über eine Reihe von Funktionalitäten, die allesamt strukturintegriert sind: eine aktive Schwingungsreduktion, die Energieversorgung und der Datentransfer inklusive Energiespeicher und Leiterbahnen, die Thermalkontrolle und eine betriebsfeste Lastübertragung zur Nutzlast. Neben dem Vorteil, Masse und Volumen zu sparen, erlaubt das neue Design den Einsatz sowohl für erdnahe Satelliten als auch für Raumsonden.

Multifunktionales Satellitenwandpaneel

Ein Satellitenbus ist das Versorgungsmodul eines Raumfahrzeugs und besteht normalerweise aus mehreren schweren und voluminösen Komponenten. Da dieses System auch nahezu alle mechanischen Lasten beim Start und Betrieb des Satelliten aufnimmt, sind die Anforderungen an diese Primärstruktur sehr hoch. Ein abteilungsübergreifendes Team hat es nun geschafft, alle Funktionalitäten in ein sich selbst anpassendes, universales Satellitenwandpaneel zu integrieren. Der erste Prototyp des Paneels enthält fünf strukturintegrierte Funktionen:

1. ein Schwingungsunterdrückungssystem,
2. ein Energiespeichersystem mit Superkondensatoren
3. integrierte Leiterbahnen,
4. ein Thermalkontrollsystem und
5. ein multifunktionale Lasteinleitungselemente (sog. Inserts).

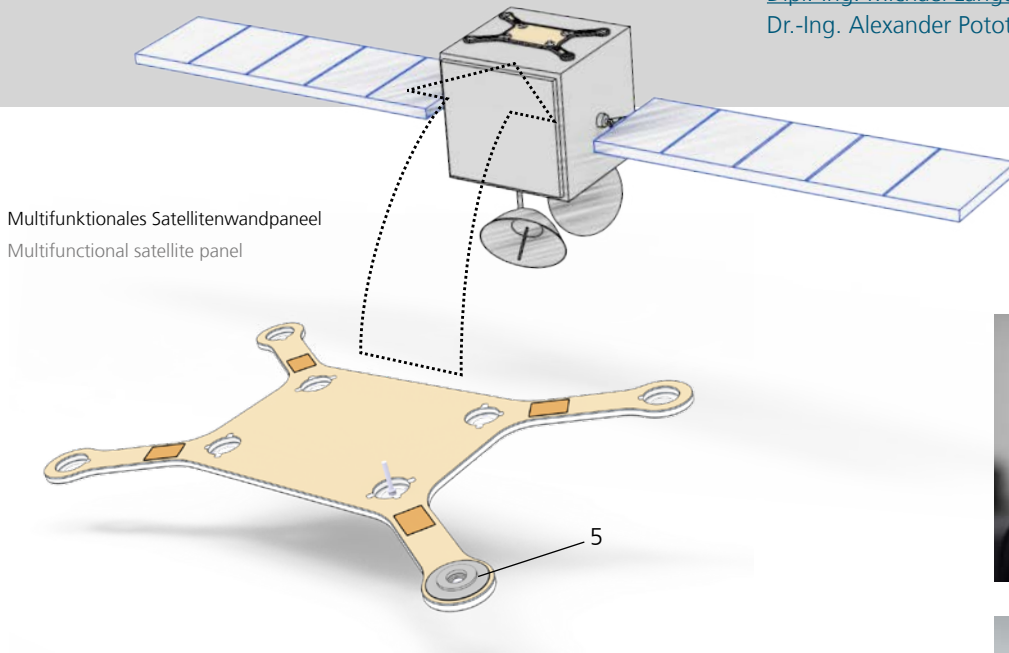


Integrationskonzept der unterschiedlichen Systeme
Integration concept of the different systems

Autoren:

[Dipl.-Ing. Zhuzhell Montano](#)
[Dr.-Ing. Sebastian Geier](#)
[Dipl.-Ing. Michael Lange](#)
[Dr.-Ing. Alexander Pototzky](#)

[Dipl.-Ing. Olaf Mierheim](#)
[Dipl.-Ing. Ralf Keimer](#)
[Dipl.-Ing. Jan Petersen](#)
[Dipl.-Ing. Johannes Wolff](#)

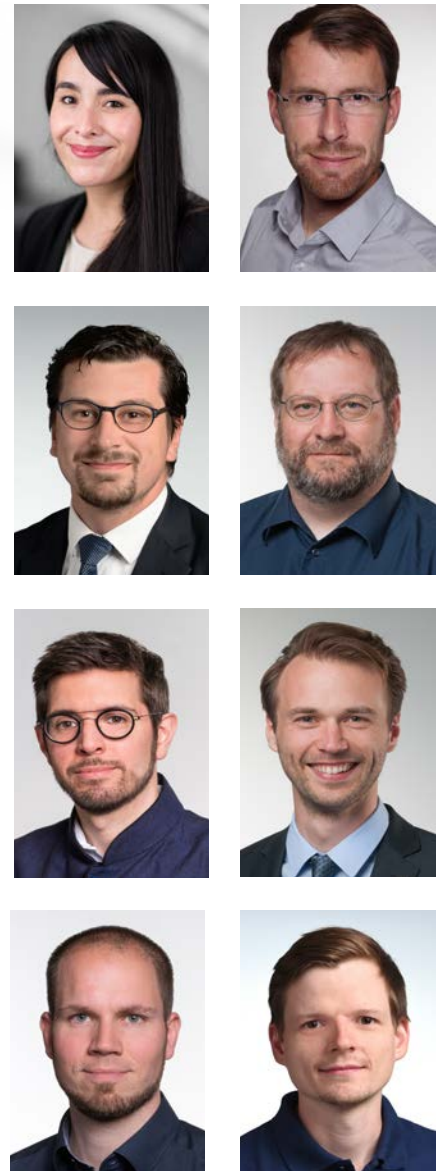


Die Basis für das Paneel ist eine Sandwichstruktur in Faserverbundbauweise. Bis auf die Inserts sind alle Subsysteme in den Deckschichten des Sandwich-Paneels integriert. Die Inserts reichen durch die Deckschichten sowie den Kern hindurch. Integrierte Leiterbahnschichten aus rostfreiem Stahl sind schichtweise über die Sandwich-Deckschichten verteilt, was eine Daten- und Energieübertragung zwischen allen Komponenten ermöglicht. Die großflächigen Superkondensatoren bestehen aus zwei Funktionsschichten, die ebenfalls in beiden Deckschichten integriert und mit den internen Leiterbahnen verbunden sind. Zusammen mit den multifunktionalen Inserts erlaubt diese Verbindung die Energieübertragung zwischen den Kondensatoren, den Paneelkomponenten, der Satellitenhauptstruktur und der Nutzlast. Das aktive Schwingungsreduktionssystem enthält Piezo-Aktoren, die in die Träger des Paneels integriert sind.

Das Piezo-Reglersystem ist zusammen mit einem Thermal-Experiment als Test-Nutzlast auf dem Sandwich montiert. Das thermische Design der Deckschichten erlaubt eine Wärmeübertragung von der Nutzlast über die multifunktionalen Inserts auf die Satellitenhauptstruktur. Eine hochintegrale Gestaltung der Inserts im Satellitenwandpaneel ermöglicht neben der Verbindung ebenso die Übertragung eines kontrollierten Wärmestroms, der elektrischen Energie und der Daten in die Deckschichtleiterbahnen.

Qualifikation für den Weltraum

Ziel der nun anstehenden Arbeiten sind die Qualifikation und Zertifizierung des multifunktionalen Satellitenwandpaneels für zukünftige Raumfahrtanwendungen. Die Entwurfsanforderungen betrachten zwei Szenarien: Start und Orbit. Alle Komponenten müssen dabei sowohl den starken mechanischen Belastungen während des Starts als auch den hohen thermischen Belastungen und dem Vakuum im Orbit standhalten. Zur Überprüfung der vielfältigen Funktionalitäten sind Thermal-, Vakuum- sowie Schwingungstests unter extremen Bedingungen vorgesehen.



Hochleistungsleichtbau für ein innovatives Rettungssystem am Silent Air Taxi

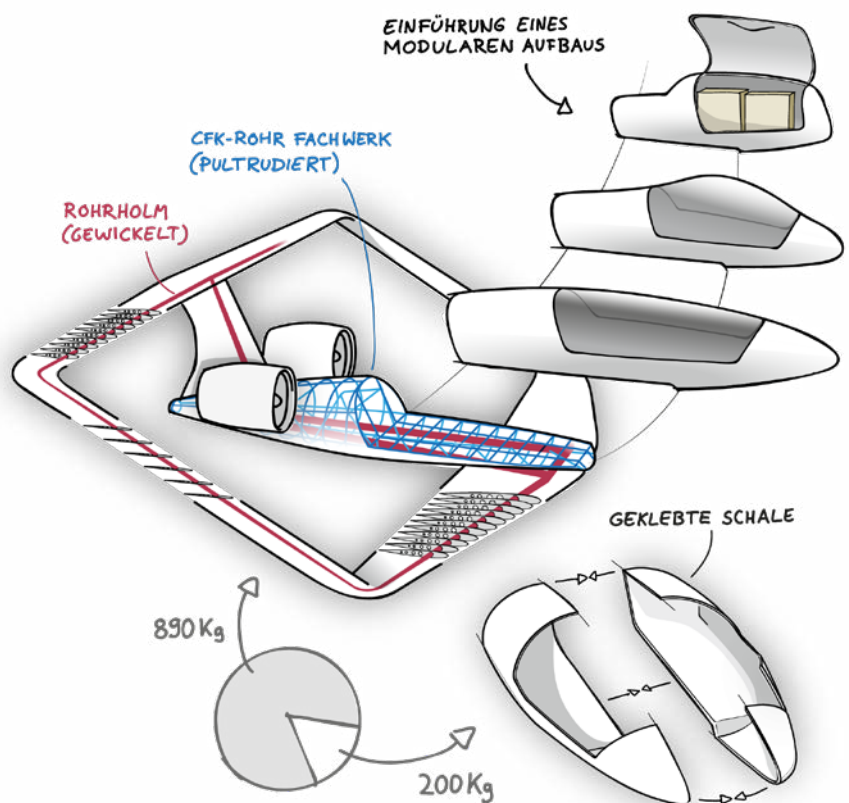
High-performance lightweight construction for an innovative rescue system of the Silent Air Taxi

Summary

The future of air mobility will be shaped by autonomously flying commercial aircraft. Integrated autonomous rescue systems can be the solution to win passengers' confidence in autonomous flights.

Based on the project Silent Air Taxi at RWTH Aachen University, the aircraft's structural concept has been redesigned based on the safety system. For the Silent Air Taxi, the cabin is now simultaneously used as a rescue unit and separated from the fuselage. Separating the cabin from the fuselage reduces the weight of the rescue unit by more than 80% compared to the aircraft's total structural weight. Both the fuselage and the cabin are landed, but only the cabin needs to fulfill the conditions for a safe landing. Therefore, even in case of an emergency, passengers can still land safely. Furthermore, by modularising aircraft their turnaround times are reduced because the cabin can be replaced with payload elements depending on the purpose of use. The diversity of fibre composite materials allows for a variety of innovative, high-performance lightweight construction solutions in this context.

Die Mobilität am Himmel soll zukünftig durch autonom fliegende Verkehrsflugzeuge geprägt sein. Um das Vertrauen der Passagiere für eine Steuerung ohne Pilot zu gewinnen, können integrierte, autonome Rettungssysteme einen Beitrag liefern. Aufbauend auf dem Lufttaxi-Entwicklungsprojekt Silent Air Taxi der RWTH Aachen wurde das Flugzeug-Strukturkonzept vom Sicherheitssystem ausgehend neu entworfen. Beim Silent Air Taxi wird nun im Notfall die Kabine gleichzeitig als Rettungseinheit genutzt und vom Rumpf getrennt. Im Notfall gelangen dann die Passagiere sicher zur Erde zurück. Die Vielfalt der Faserverbunde stellt hierfür zahlreiche Möglichkeiten und Lösungen für einen innovativen Hochleistungsleichtbau bereit.



Modulares Strukturkonzept am Silent Air Taxi dank Hochleistungsleichtbau

Modular structural concept of the Silent Air Taxi due to high-performance lightweight construction



Autorin:

Seunghee Ko, M. Eng.

Trennung erwünscht

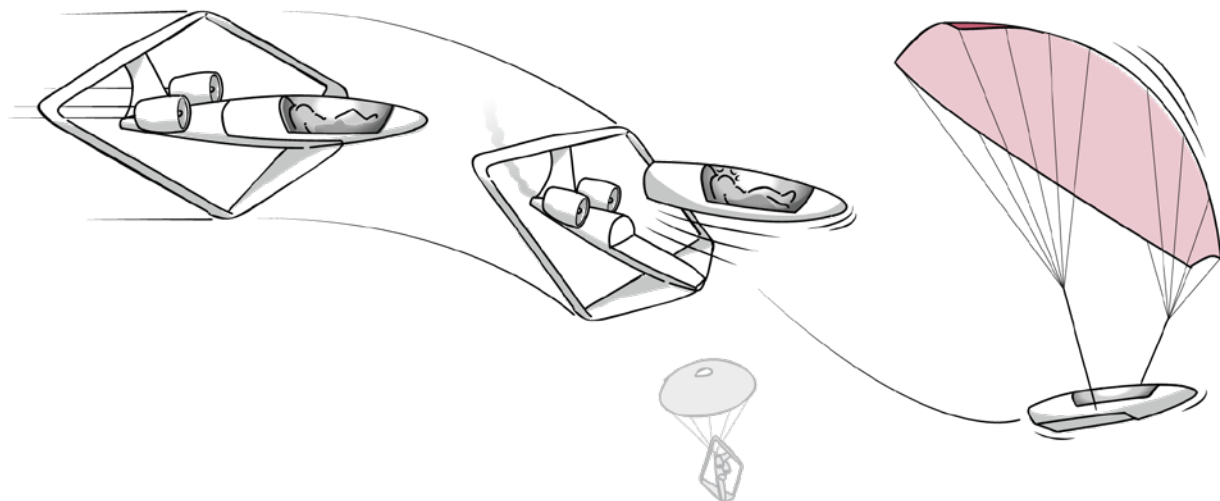
Bisher existieren für Ultraleichtflugzeuge sogenannte Gesamtrrettungssysteme, engl. Ballistic Recovery Systems. Der Pilot kann in einer Notlage einen Rettungsfallschirm mit einer Rakete abschießen, an welchem das gesamte Flugzeug samt Insassen zu Boden sinkt. Der Unterschied zu dem hier vorgestellten Rettungssystem liegt in der Zweiteilung des Flugzeugs zwischen Kabinenkapsel und Rumpf mit seinen Tragflächen. Ist eine Notlandung aufgrund eines Zwischenfalls im autonomen Steuerungssystem erforderlich, wird das Kabinenteil von den übrigen Flugzeugkomponenten getrennt. Automatisch werden die Passagiere vor direkten Gefahrenquellen wie Kraftstoff, Motor und Propellern geschützt. Gleichzeitig reduziert sich das Strukturgewicht der Rettungseinheit um mehr als 80%. Anstelle eines Fallschirms kommt ein Gleitschirm zum Einsatz, der die Sinkgeschwindigkeit des Moduls verringert und zu einer besseren Steuerung beiträgt. Um den Aufprall zu reduzieren, wird zusätzlich kurz vor der Landung der integrierte Bodenaibag aktiviert. Auch der Rumpf wird sicher per Schirm zur Erde gebracht, muss aber nicht den Anforderungen an eine sichere Landung genügen.

Der Mix macht's!

Drei Fertigungskonzepte finden Anwendung, um leichte, aber robuste Strukturen zu realisieren. Die Rumpfstruktur bildet ein Fachwerk aus pultrudierten CFK-Rohren und ermöglicht hierbei einen extremen Leichtbau bei günstigen Produktionskosten. Die Flügelstruktur basiert auf einem durch Wickeln einfach herzustellenden Rohrholmkonzept. Eine Änderung der inneren Dicken am Rohr erlaubt es zudem, mit geringem Aufwand die Steifigkeit anzupassen, ohne dessen äußere Geometrie zu verändern. Das Kabinensegment, die Sicherheitskapsel für die Passagiere, erfüllt die Craschanforderungen im Falle einer ungewollten Landung. Dafür kommen nach dem Resin-Transfer-Moulding-Verfahren hergestellte verklebte Schalen aus carbonfaserverstärktem Kunststoff zum Einsatz.

Im vorgestellten Konzept entfallen so lediglich 200kg auf die Kabine und etwa 900kg auf die restliche Struktur, womit die Rettungseinheit am Boden geringeren Lasten ausgesetzt ist.

Die Einführung eines modularen Aufbaus reduziert weiterhin die Turnaround-Zeit autonomer Flugzeuge. So kann je nach Verwendungszweck das Kabinenmodul zum Transport von Gütern durch ein Nutzlastelement getauscht werden. Auch die Wartung sonst schwer zugänglicher Komponenten wird schnell und einfach ermöglicht. Die Individualität wiederum kann durch personalisierte Passagiermodule erreicht werden.



Anwendungsfall des
Rettungssystems
*Use case of the
rescue system*

Leichtbau im Grenzbereich

At the limits of lightweight construction

Summary

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

The HAP-Alpha team of the DLR investigate, design and builds first wing demonstrators and tubular spar specimen for structural system evaluation and for the upcoming first flight of HAP-Alpha in 2022.

Die zeitlich nahezu unbegrenzte Stationierung unbemannter Flugzeuge in der Stratosphäre stellt eine der großen Herausforderungen in der Fliegerei dar. Treibende Kraft ist dabei die Option, kostenintensive Satelliten durch unbemanntes, solar betriebenes Fluggerät zu ersetzen und zum Beispiel Krisengebiete dauerhaft stationär beobachten zu können.

Gemeinsam mit sechzehn weiteren Einrichtungen des DLR arbeitet das Institut im Querschnittsprojekt HAP – High Altitude Platform daran, diesen lang gehegten Wunsch der Fliegerei zu verwirklichen. Dabei ist unsere vorrangige Aufgabe ein kompromissloser Leichtbau an der multidisziplinär zu entwickelnden und zu betreibenden Demonstrations-Plattform HAP-Alpha.

Leichtbau im Grenzbereich

Neben der Atmosphärenforschung ist besonders die Erdbeobachtung, z. B. zur Einschätzung von Gefährdungslagen durch Erdbeben und Überschwemmungen, von steigender Bedeutung. Auch die Koordination humanitärer Einsätze kann durch die Verfügbarkeit von Echtzeitinformationen aus dem Krisengebiet deutlich effizienter gestaltet werden.

Diverse Studien zeigen, dass die Machbarkeit einer derartigen Plattform durch aktuelle technologische Fortschritte in greifbare Nähe gerückt ist.

Insbesondere die Miniaturisierung elektronischer Bauelemente und Computer sowie die deutliche Steigerung der Energiedichte von Akkumulatoren und der spezifischen Wirkungsgrade von Solarzellen sind in diesem Zusammenhang entscheidend. Die im Flugzeugbau bekannte „Breguet“- oder Reichweitenformel zeigt außerdem eine direkte Abhängigkeit der dauerhaften Stationierbarkeit vom Flächengewicht des Luftfahrzeuges. Mit dem Einsatz innovativer Flügelbauweisen und Hochleistungs-CFK-Strukturen kann die Abflugmasse auf das minimal mögliche Limit reduziert werden. Die Studien belegen aber auch, dass größer nicht unbedingt besser ist und die Flächenbelastung durch Skalierungseffekte mit zunehmender Größe überproportional ansteigt.

Datenblatt HAP-Alpha/ Factsheet HAP-Alpha

Spannweite/ wingspan:	27 m
Flügelfläche/ wing surface:	35,9 m ²
Streckung/ snatch:	20,3
Flächengewicht/ surface weight:	3,8 kg/m ²
Gesamtmasse/ total mass:	138 kg
Strukturgewichte/ structural weights:	Rohrholm Ø 150 mm: ab 300 g/m (tubular spar Ø 150 mm: from 300 g/m)
Sandwichrippe/ sandwich rib:	68 g/Stck. (g/pcs.)
Strukturanteil/ structural share:	25,4 %; 35 kg

Autor:

Dipl.-Ing. Michael Hanke



Ultraleichter Flügel

Für die gewünschte Nutzlastdemonstration ist daher ein sehr großer Flügel mit über 35m² Fläche bei einem Gesamtsystemflächengewicht von unter 3,5 kg/m² erforderlich.

Durch die Anforderungen aus den Disziplinen der Aerodynamik, Aeroelastik, Systemintegration und elektrischen Antriebstechnik nebst Akkumulatoren und Photovoltaikzellen, die jeweils ein komplexes Thermal- und Energiemanagement erfordern, wird der Strukturentwurf vor größte Herausforderungen gestellt.

In Voruntersuchungen wurden verschiedene Bauweisen verglichen und unter dem Strich eine Rohrholmbauweise in Verbindung mit Sandwichrippen als das Strukturkonzept mit dem effizientesten Leichtbaupotenzial identifiziert. Derzeit laufen die Ausdetaillierung und der Nachweis der Bauweisen in Form von Fertigungsstudien und Versuchskörpern, insbesondere für die Fügstellen der intern in Prepreg-Tow-Placement gewickelten Rohrholme.



Flugwindanlagen leicht gemacht – Effiziente Energieerzeugung mit seilgebundenen Flugkörpern

Airborne wind energy light and easy – Efficient energy harvesting with tethered wing

Summary

Harnessing persistent high-altitude winds is the basic intention of the EnerWing project. In order to do that a lightweight but also very robust wing structure is harvesting wind energy by flying a pre-determined pattern and transferring the lift energy via control ropes to a ground-based generator. The major challenge addressed in the EnerWing project is the tethered wing structure which needs to be capable of bearing extreme loads in strong wind situations while at the same time being very lightweight and low-cost. To achieve this goal, prefabricated standard composite tubes and sandwich panels and a mainly adhesive-based joining concept are used. In addition, the wing structure is subdivided into several modules that can easily be stored and transported in a standard shipping container. To validate the building concept, a stepwise demonstration approach has been chosen that takes a representative lateral wing module, a downscaled full wing and critical details of an upscaled wing into account.

Die Nutzung von sogenannten Flugwindanlagen zur Erzeugung von Strom aus Windenergie hat gegenüber den klassischen Windenergieanlagen (WEA) entscheidende Vorteile, da die Energieerzeugung in größeren und damit windreicheren Höhen erfolgt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, auch bei sehr schwachem Wind Energie zu erzeugen, wobei die erforderliche mobile Infrastruktur vergleichsweise gering ist. Eine wesentliche Randbedingung im Projekt EnerWing ist die Nutzung von Standardcontainern, um eine maximale Flexibilität beim Transport, der Errichtung und im Betrieb sicherzustellen.

Leicht, robust, mobil und günstig

Aus Forschungssicht ist der Anspruch, auch bei geringer Windstärke operieren zu können, herausfordernd, da er sich nur durch konsequenten Leichtbau erfüllen lässt. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Systemkosten sehr hoch, da Flugwindanlagen am sehr niedrigen Kostenniveau konventioneller WEA gemessen werden. Die Festlegung der Gesamtkonfiguration erfolgte in einem multidisziplinären Entwicklungsprozess. Beim Strukturgewicht überzeugt der gefeilte Nurflügler und lässt folglich den kostenmäßig günstigeren „Drachen“ in der klassischen Flügel-Rumpf-Leitwerk-Konfiguration hinter sich. Das modulare Strukturkonzept gewährleistet weiterhin den Einsatz von Frachtcontainern. Einer sehr leichten, aber fertigungstechnisch anspruchsvollen Bauweise wird eine robuste aber weniger leichte Variante gegenübergestellt. Der im DLR untersuchte robuste, Lösungsansatz kombiniert vorgefertigte CFK-Standardrohre mit Sandwichplatten. Zur Vermeidung lokaler Lastspitzen werden die extrem dünnwandigen Strukturkomponenten vorzugsweise verklebt.



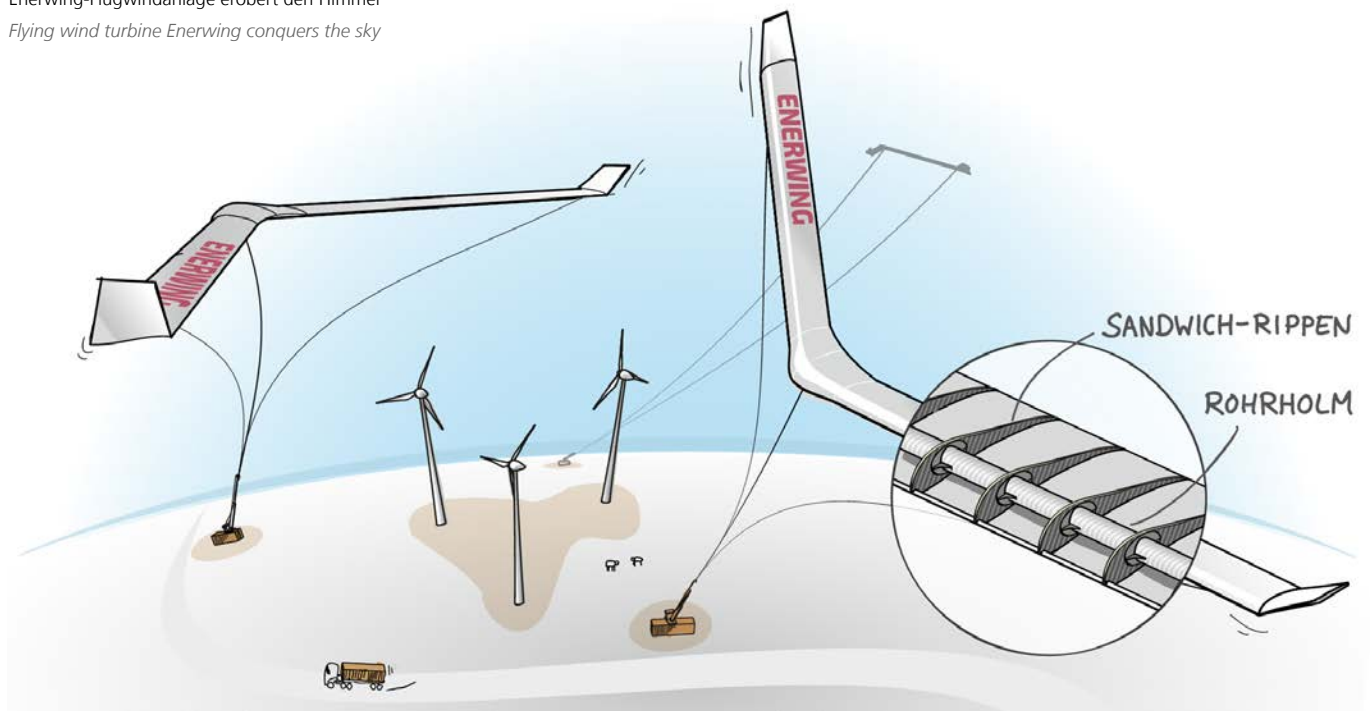
CFK-Struktur des Enerwing Testsegmentes mit Rohrholmen und Sandwichrippen
CFRP structure of the Enerwing test segment with tubular spars and sandwich ribs



Autor:

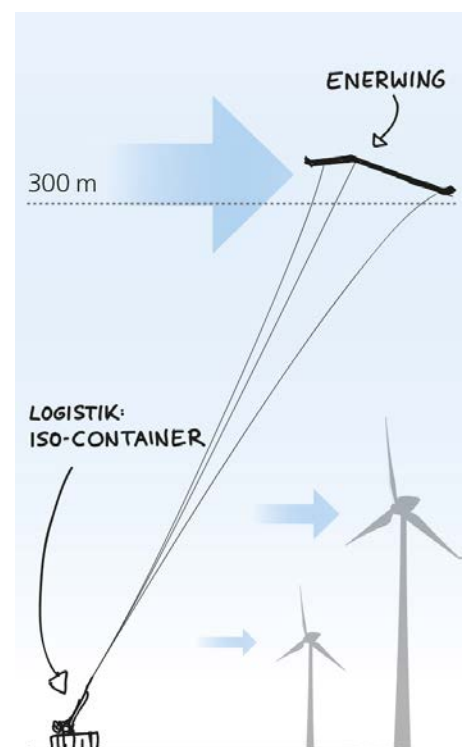
Manuel Buggisch, M. Eng.

Enerwing-Flugwindanlage erobert den Himmel
Flying wind turbine Enerwing conquers the sky



Von der Skizze zur Flugerprobung

Die Besonderheit im Projekt EnerWing liegt in der ganzheitlichen Betrachtung von der Skizze bis zum Flugversuch. Das Konsortium des vom Projektträger Jülich geförderten Vorhabens „EnerWing_xM“ (FKZ 0324355B) deckt die gesamte Kette von der Entwicklung über die Fertigung bis zum Betrieb ab. Der Verbundführer **Enerkite** ist für das Gesamtsystem verantwortlich, der Fertigungsspezialist **Invent** koordiniert die Fertigungsaktivitäten und die Firma **Teut** konzentriert sich auf die Zulassung und den effizienten Anlagenbetrieb. Die aerodynamische Auslegung erfolgt durch die **TU Berlin** und das DLR unterstützt bei der Dimensionierung und Fertigung. Die erste Verifizierung erfolgt an einem Testsegment mit ca. 1,6 m Spannweite. Die Umsetzung eines kompletten Flugkörpers mit einer Spannweite von etwa 10 m folgt. Die Skalierbarkeit des Flugkörpers auf bis zu 50 m Spannweite wird an kritischen Strukturelementen verifiziert.



Mit der mobilen Infrastruktur immer im Wind
Always in the wind thanks to mobile infrastructure

Auf leisen Schwingen – Spaltabdeckungen am Flügel zur Reduktion von Start- und Landelärm

Quieter wings – Gap covers at the wing for reduction of takeoff and landing noise

Summary

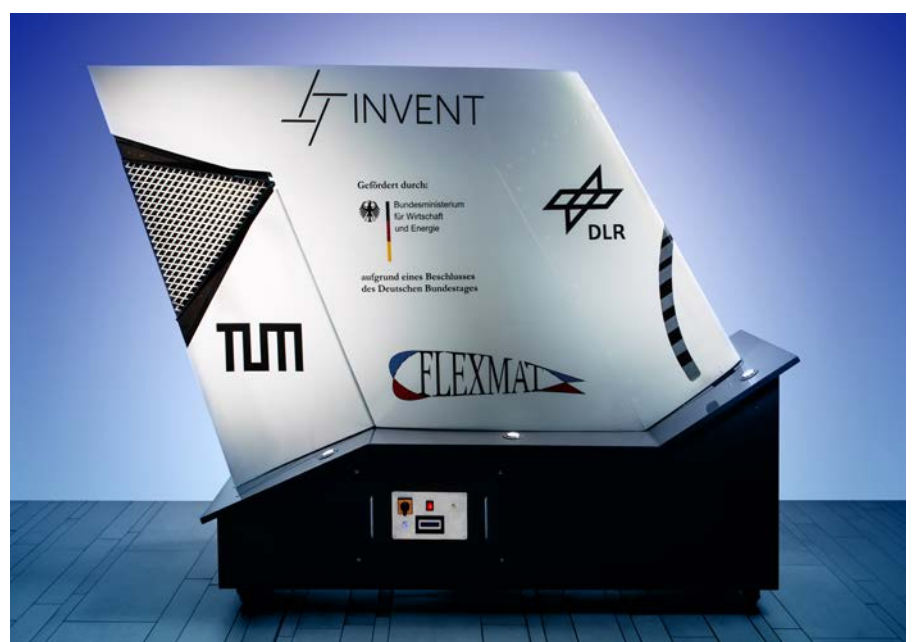
Gap covers are an essential step towards reducing the noise emissions of future aircraft. High-lift systems and airbrakes generate gaps on the wing when they are deployed. These gaps cause part of the typical aircraft noise. Covers made of an elastomer and glass-fibre composite close these gaps. The design of the material combination enables a defined and continuous transition. The material mix also resists several percent strains, which occur during the movement of flap systems in the transition area.

Spaltabdeckungen sind ein wichtiger Schritt, um die Lärmemission der Flugzeuge von morgen zu reduzieren.

Bremsklappen und Hochauftriebssysteme erzeugen im ausgefahrenen Zustand Spalte am Flügel. Diese Unterbrechungen an der Flügeloberfläche verursachen einen Teil des typischen Flugzeuglärms. Spaltabdeckungen aus einem Elastomer-Glasfaserverbund schließen diese Lücken. Durch die Gestaltung des Verbunds ermöglichen die Abdeckungen einen definierten und kontinuierlichen Übergang. Die Materialkombination erträgt mehrere Prozent Dehnung, die bei der Bewegung von Klappensystemen im Übergangsbereich auftreten.

Spalte kontinuierlich abdecken

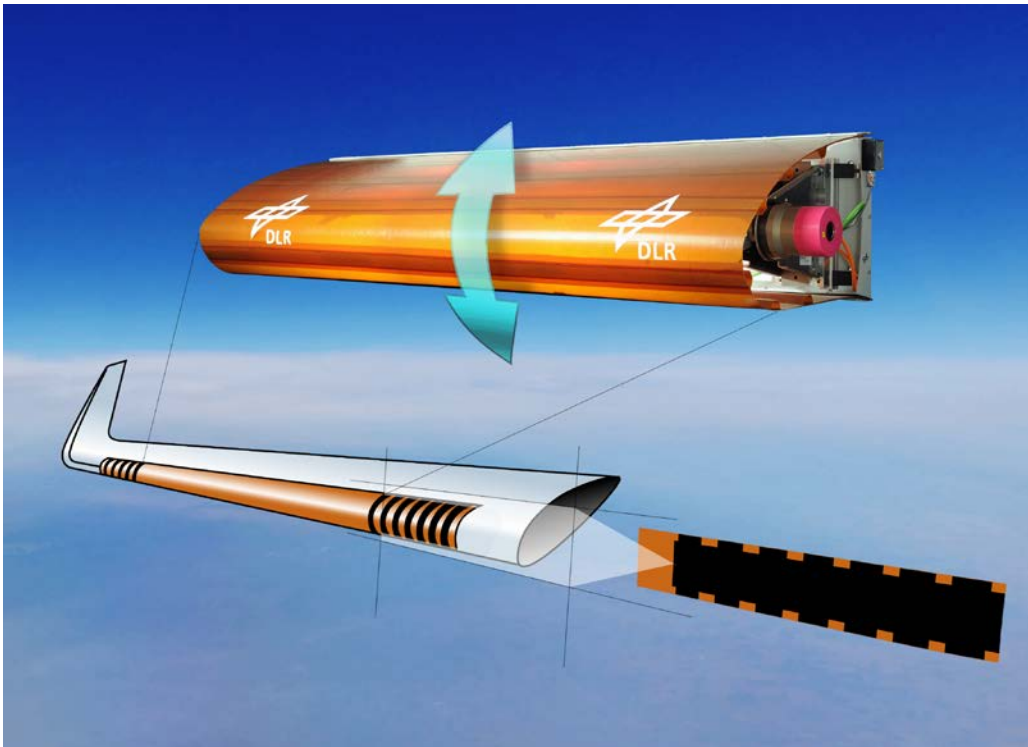
Für die Spaltabdeckung kommt eine Materialkombination aus Synthetik kautschuk (EPDM) und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) zum Einsatz. Das gewählte Einsatzbeispiel ist eine Übergangshaut zwischen einer formvariablen Flügelvorderkante (Droop Nose) und einem festen Flügelteil. Die Spannweite der Übergangshaut beträgt einen Meter und muss dabei bis zu fünf Prozent Dehnung ertragen. Die Dehnung ist das Resultat aus der Verformung der Droop Nose, deren Skelettlinie sich um bis zu 13° gegenüber dem starren Flügel absenkt. Das extrem dehnbare EPDM dient daher als Materialgrundlage für die Haut. Die Größe und Positionierung von 24 GFK-Streifen in der EPDM-Haut ermöglicht die lokale Steifigkeitsanpassung der Haut und bestimmt damit auch die Form des Hautübergangs. Aufgrund der GFK-Streifenanzahl und der daraus resultierenden Anordnungsmöglichkeiten ist die Auswahl einer Konfiguration nur mit Hilfe einer simulationsgestützten Optimierung erfassbar.



FlexMat Demonstrator mit Hautübergängen
FlexMat Demonstrator with skin transitions

Autor:

Dipl.-Ing. Martin Radestock



CAD-Modell des Hautübergangs mit Synthetikgummi in Schwarz und glasfaserverstärktem Kunststoff in Orange
CAD model of the skin transition with synthetic rubber in black, glass-fibre reinforced plastic in orange

Realisierung der Spaltabdeckung in Originalgröße

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde eine Hautkonfiguration ausgewählt und als Demonstrator im Maßstab 1:1 umgesetzt. Bei der experimentellen Messung der Hautverformung zeigte sich eine gleichmäßige Oberfläche am Übergang zwischen Droop Nose und festem Flügelteil. Dieses Verformungsbild stimmt auch mit der Simulation überein. Somit zeigt sich, dass mit Hilfe der GFK-Streifen die Steifigkeit der Haut eingestellt werden kann, um einen definierten Hautübergang zu erhalten.

Der Demonstrator ist ein Resultat des Verbundprojektes FlexMat (Flexible Materialien und Strukturen für formvariable Komponenten in industrieller Fertigung). Die Förderung des Vorhabens erfolgte durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 20W1507C.

Der Demonstrator ist ein erster Schritt zur Realisierung von spaltfreien Flügeln. Weitere Untersuchungen zu aerodynamischen Anforderungen oder der Einsatz an Testflugzeugen erhöhen den Technologiereifegrad der Abdeckungskonzepte. Somit kann in Zukunft die Lärmemission von Flugzeugen reduziert werden.

Weiterführende Literatur:

[Hybrid Skin Design of the Transition Region Between Morphing Wing and Fixed Wing](#)

[Experimental investigation of a hybrid skin design between de morphing leading edge and a fixed wing on a full scale demonstrator](#)



FERTIGUNG

Production

Das Innere eines Rotorblatts aus dem Projekt SegBlade
The inside of a rotor blade from the [segBlade project](#)

44

3D-gedruckte CFK-Bauteile – Eine neue Imprägniertechnologie senkt die Kosten
3D-printed CFRP components – A new impregnation technology reduces costs

46

Smart-Work-Station – Der digitale Berater fürs Handwerk
Smart-Work-Station – The digital consultant for craftsmen

48

DIGICOMP: Wissen verknüpfen und für nachhaltiges Design nutzen
DIGICOMP: Linking knowledge and using it for sustainable design

50

3D-gedruckte Aktuatoren und Sensoren per Knopfdruck
3D-printed actuators and sensors via push of a button

52

Faser-Metall-Laminat: Die richtige Entspannungstechnik für Alleskönner
Fiber-metal-laminates: The ideal relaxation technique for all-rounders

54

Laminat-Orthotropie – Ein Toleranzproblem?
Orthotropic laminates – A design issue?

3D-gedruckte CFK-Bauteile – Eine neue Imprägniertechnologie senkt die Kosten

3D-printed CFRP components – A new impregnation technology reduces costs

Summary

A new, ultrasound-induced impregnation method promises to reduce production costs for continuous fibre-reinforced thermoplastic tapes and 3D-printing filaments up to 80 %. This lowers existing economical barriers in the application of additive manufacturing processes for composite components. Within the project ENDLOSEFFEKT the new impregnation technology is integrated in an extruder nozzle. This nozzle preheats, impregnates and consolidates rovings up to 24K (24,000 single filaments). By adapting the nozzle, existing extrusion lines will be able to produce CFRP semi-finished products with up to 60 % fibre volume content and less than 2 % porosity.

Mit einer neu entwickelten Imprägniertechnologie sollen die Herstellkosten von endlosfaserverstärkten thermoplastischen 3D-Druckfilamenten um bis zu 80% reduziert werden. Durch eine in die Extruderdüse integrierte Imprägnierung entstehen insbesondere in Verbindung mit additiven Herstellungsverfahren wirtschaftliche Anwendungsperspektiven für die Industrie.

Eine neue Imprägniertechnologie

Die Imprägniertechnologie basiert auf der Einbringung von Ultraschall in eine thermoplastische Schmelze, die einen Faseroving (Faserbündel aus endlosen Einzelfilamenten) umgibt. Hierdurch wird eine hohe Imprägnierqualität bei kurzen Prozesszeiten erreicht. Ein besonderer Vorteil ist die uneingeschränkte Verarbeitbarkeit kommerziell verfügbarer Fasern und Thermoplaste. Aufgrund des geringen Raumbedarfs kann die ultraschallbasierte Imprägniertechnologie leicht in schmelzeverarbeitende Prozesse integriert werden. Mögliche Anwendungen reichen von der miniaturisierten Integration in 3D-Druckköpfe über die Einbringung in Wickelprozesse bis zur Halbzeugherstellung. Die Schlißbildaufnahmen zeigen eine sehr gute Faser-Verteilung und Durchdringung mit Thermoplast eines aufgespreizten 24K (24.000 Einzelfilamente)-Rovings durch das Einbringen von Ultraschall in ein Schmelzebad.

Labora Aufbau zur Herstellung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Halbzeugen

Laboratory set-up for the production of continuous fibre-reinforced semi-finished products



Autoren:

Maik Titze, M. Sc.
Dr.-Ing. Steffen Opitz

Dipl.-Ing. Yannis Grohmann
Matteo Rege, M. Sc.

Die industrielle Anwendung

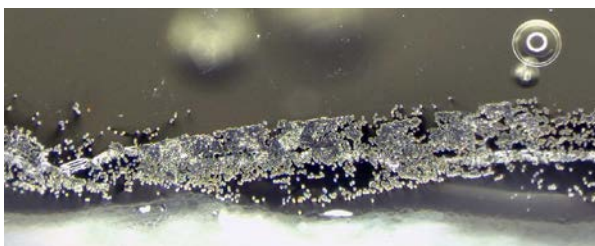
Unterstützt durch das DLR-Technologiemarketing wird in dem Projekt ENDLOSEFFEKT die neue Imprägniertechnologie in einen Extrusionsprozess integriert. Ziel ist es, vorhandene investitionsintensive Extrusionsanlagen durch einen Austausch der Düse zu befähigen, endlosfaserverstärkte Halbzeuge herzustellen. Diese Halbzeuge haben einen Faservolumengehalt von bis zu 60 % und eine Porosität unter 2 %. In der Extruderdüse werden Rovings bis 24K zugeführt und aufgespreizt. Anschließend findet eine elektrische Aufheizung des CFK-Rovings über dessen elektrischen Widerstand mit der am DLR entwickelten [CoRe HeaT-Technologie](#) statt. Der aufgeheizte Roving wird nachfolgend vom Schmelzestrom des Extruders ummantelt und durch eine Ultraschalldurchflusszelle geführt. Diese stellt eine vollständige Imprägnierung sicher, bevor die Konsolidierung des Faserhalbzeugs folgt. Für eine zielgerichtete und schnelle Markteinführung sind sowohl Material- und Halbzeughersteller als auch Anbieter von additiven Fertigungstechnologien in das Projekt involviert. Als industriennahe Testumgebung dienen ein Collin ZK 25 E Laborcompounder sowie ein selbst entwickelter 3D-Druckkopf, bestehend aus einem Miniaturextruder und einer Schmelzepumpe.

Mit dem Projekt ENDLOSEFFEKT wird somit die Verfügbarkeit und Vielfalt verwendbarer endlosfaserverstärkter 3D-Druckmaterialien erhöht und deren Bezugskosten gemindert. Auf diese Weise kann der Zugang der Industrie zu additiven Fertigungstechnologien für faserverstärkte Materialien erleichtert werden.

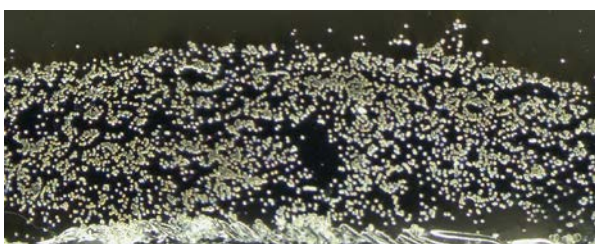


Weiterführende Literatur:

[AddCompS Seite](#)



Darstellung der Faserimprägnierung in einem Schmelzbad ohne Ultraschalleinwirkung
Representation of fibre impregnation in a melt bath without introduced ultrasound



Darstellung der Faserimprägnierung in einem Schmelzbad mit Ultraschalleinwirkung
Representation of fibre impregnation in a melt bath with introduced ultrasound

Smart-Work-Station – Der digitale Berater fürs Handwerk

Smart-Work-Station – The digital consultant for craftsmen

Summary

The Smart-Work-Station (SWS) is a sensor-based process assessment tool that serves especially manual to semi-automated production processes. Based on process characteristics, suitable real-time sensor systems are used to carry out reliable automated process assessment. The interpretation of the measurement data is performed in real time by the implementation of artificial intelligence (AI)-based algorithms. Depending on their needs, users can choose the proper Key Result Indicators (KRIs), such as process costs, amount and duration of work as well as material and energy consumption. This evaluation provides users with an intuitive and comprehensible overview of their processes that illuminates possible optimizations. The digitalised consulting service from SWS is of considerable benefit in particular to companies that rely on flexible production processes, product customisation, and constant technology development. SWS provides you with consulting services in real time.

Neben großem Aufwand sowie höheren Kosten ist eine konventionelle Beratung mit vielfachen Datenerhebungsereignissen für die flexibilisierte Massenproduktion im Handwerk verbunden. Darüber hinaus suchen die Entscheidungsträger zurzeit nach digitalen Datenerhebungs- sowie Prozessbewertungslösungen, um vielfältige Kontaktaufnahmen aufgrund der Corona-Pandemie zu vermeiden. Die Smart-Work-Station (SWS) ist ein sensorgestütztes Prozessbewertungstool insbesondere für manuelle bis halbautomatisierte Produktionsprozesse. Je nach Tätigkeit wird eine geeignete Echtzeit-Sensorik verwendet, um eine zuverlässige automatisierte Prozessbewertung durchführen zu können. Die Interpretation der Messdaten erfolgt dabei parallel durch eine Künstliche Intelligenz (KI)-basierte Software. Nutzer können je nach Bedarf eigene Schlüsselindikatoren wählen, wie etwa Prozesskosten, -aufwand und -dauer sowie Material- und Energieverbrauch. Als Ergebnis dieser Bewertung erhalten Anwender einen intuitiv verständlichen Überblick über ihre Prozesse sowie eine Beratung für mögliche Prozessoptimierungen.

Dein Arbeitsplatz berät Dich!

Die digitalisierte Beratungsleistung der SWS bietet insbesondere für Firmen mit flexiblen Prozessen, Produktindividualisierung und ständiger Technologie-Entwicklung erheblichen Nutzen. Neben Statusinformationen, Arbeitsanweisungen sowie Empfehlungen in Echtzeit für den Werker werden die Produktionsprozesse in Handwerksbetrieben im Hinblick auf Kosten, Material- und Energieverbrauch, CO₂ sowie weitere kundenspezifische Schlüsselindikatoren analysiert. Mit Hilfe des Messsystems werden alle relevanten Parameter der Fertigungsschritte wie Material- und Anlagenerkennung ermittelt. Parallel hierzu berät die KI-basierte Auswertung und Optimierung den Entscheidungsträgern. Sie interpretieren die erhobenen Daten, bewertet die Tätigkeiten bezüglich der ausgewählten Schlüsselindikatoren, simuliert die relevanten Optimierungsszenarien, wählt die passenden Schritte aus, und stellt die Vorschläge zu Material- und Geräteauswahl an die Entscheidungsträger vor. Der modulare Aufbau sowie der parallele Einsatz mehrerer SWS in einer Plattform generiert und nutzt mitarbeiterübergreifend ein gemeinsames Firmenwissen.



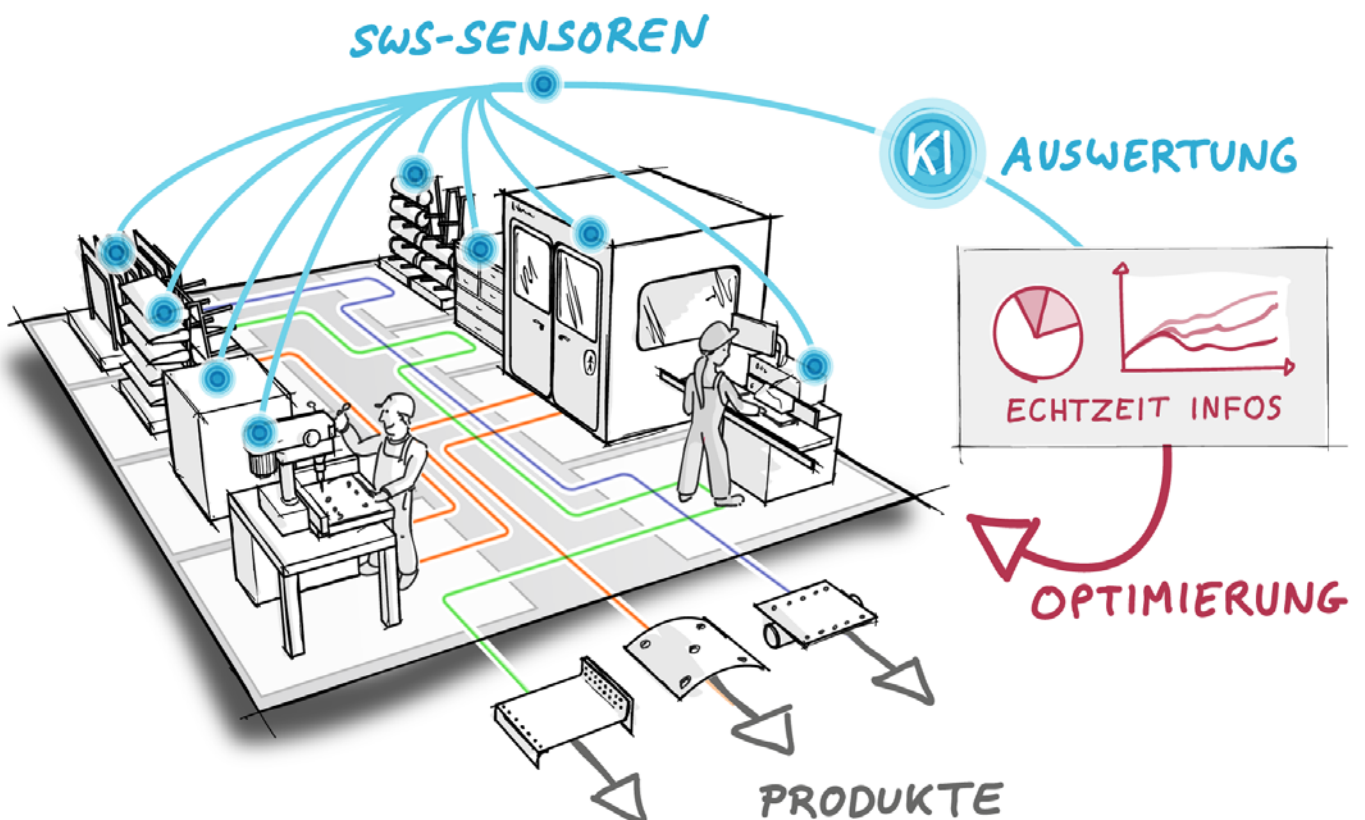


Autor:

 [Ali Al-Lami, M.Sc.](#)

Beratungsqualität auf Luftfahrtniveau

Mit spezifischen Anpassungen kann dieses Beratungstool in vielen Anwendungsfällen im Handwerksbereich wie Metallbau-, Tischlerei-, Montage- sowie Wartungstätigkeiten implementiert werden. Des Weiteren kann ein Handwerksbetrieb die Produktionsszenarien mehrerer Produkte mit denselben SWS-Sensoren sowie KI-Werkzeugen bewerten, um die passenden Optimierungsschritte jedes Szenarios in Echtzeit vorzuschlagen. Beispielsweise kann ein Ergebnis der Analyse das Aufzeigen von Prozessalternativen sein. Schneller, günstiger und datenzuverlässiger als eine konventionelle Entscheidungsunterstützung bietet die SWS eine Beratungsqualität auf Luftfahrtniveau auch fürs Handwerk. Für Entscheidungsträger ist eine zuverlässige Kommunikation der Prozessparameter sehr entscheidend. Gemäß den Arbeitsplatzregeln in Deutschland liefert die SWS eine produkt- sowie prozessspezifische Echtzeitbewertung.



SWS: Echtzeitbewertungsfähigkeit unterschiedlicher Produkt- sowie Prozessszenarien
SWS: Real-time assessment capability for various product and process scenarios

DIGICOMP: Wissen verknüpfen und für nachhaltiges Design nutzen

DIGICOMP: Linking knowledge and using it for sustainable design

Summary

Not only because of shorter cycles of technology development and innovation, research facilities have to tackle the challenge of making their deep expert knowledge applicable and sustainable. Often researchers develop software to solve scientific problems without a focus on applicability by others due to lacking usability and documentation – forming a lonely expert's island. A solution is the use of modern software technologies and a service-oriented architecture. DIGICOMP – a complete digitised value chain along the composite design and production is realised by using service-oriented software and using APIs for communication between the services. Services can be connected to achieve a smart composite production. As an example, ultrasonic flow front monitoring was coupled with a flow simulation to adapt the model material parameters to the obtained status and make predictions of possible defects. New methods can easily be added and tested and form new smart production chains.

Moderne Softwaremethoden und eine serviceorientierte Architektur entlang einer schlanken Informationslogistik räumen in der Wissenschaft auf und machen das Wissen von morgen allgemein zugänglich. Nicht zuletzt aufgrund immer kürzerer Zyklen bei Technologieentwicklungen und Innovationen stehen Forschungseinrichtungen vor der Herausforderung, Expertenwissen aus mehrjährigen wissenschaftlichen Arbeiten nachhaltig nutzbar zu machen und weiter fortzuführen. Besonders bei Software entstehen in der Regel einsame Inseln, da sie meist vor dem Hintergrund einer stark fokussierten wissenschaftlichen Fragestellung entwickelt wird. Bedienungsfreundlichkeit, Dokumentation oder nachhaltige Weiterentwicklung finden oftmals in der Wissenschaft weniger Beachtung. Mit dem smarten Digitalisierungsansatz für die Faserverbundfertigung, DIGICOMP, wird nun Abhilfe geschaffen.

Serviceorientierte Architektur

Aus diesem Grund wird der digitale Informationsfluss entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Faserverbunden über eine serviceorientierte Sichtweise realisiert. Die MitarbeiterInnen sind angehalten, technische Prozesse, Infrastrukturen sowie Softwaresysteme über alle Ebenen als Dienst (engl. Service) zu denken. Im Fokus stehen neben dem zu fertigenden Produkt die damit verknüpften Daten und deren Historie. Alle Informationen stehen beim Servicenehmer jederzeit uneingeschränkt zur Verfügung. Die Expertensysteme laufen auf einer serviceorientierten Architektur (SoA) und sind über netzwerkfähige Programmschnittstellen (engl. APIs) verknüpfbar. Unterstützt wird dies durch eine plattformübergreifende Virtualisierung mittels Containern. Dies stellt die Flexibilität und Individualität sowohl der Experten als auch ihrer Systeme bei maximaler Konnektivität und transparenter Datenverfügbarkeit sicher. Mit der Orientierung an vorhandenen Geschäftsprozessen sind direkter Austausch und Erweiterbarkeit, einfache Pflege sowie allgemeine Verfügbarkeit durchgängig gegeben.


DIGICOMP – Die smarte Fertigung

Erstmals wurde im Rahmen der smarten Fertigung die Brücke zwischen den Experteninseln der ultraschallbasierten Überwachung und der Simulation des Injektionsprozesses von Faserverbunden gebaut. Im ersten Service erfolgt die Aufnahme der Ultraschallsignale und deren Auswertung. Im zweiten Service werden die Sensorsignale zu einer Fließfrontinformation zusammengesetzt. Dies geschieht durch kontinuierliche Minimierung der Abweichung zwischen Fließsimulation und Realität. Ausgewählte Parameter der Fließsimulation werden angepasst, bis die Unterschiede zwischen Realität und Simulation minimal sind. Das Ergebnis ermöglicht eine Inline-Bewertung des aktuellen Bauteilzustands sowie eine Bewertung des weiteren Verlaufs hinsichtlich möglicher Defekte. Neben der Generierung neuer Prozessparameter zur Auflösung von Tränkungsfehlern findet zugleich die Qualitätssicherung statt. Einzig in Bereichen hoher Defektwahrscheinlichkeiten ist das entstehende Bauteil noch zu prüfen.

Autoren:

 [Dipl.-Ing. Mark Opitz](#)

 [Dr.-Ing. Nico Liebers](#)

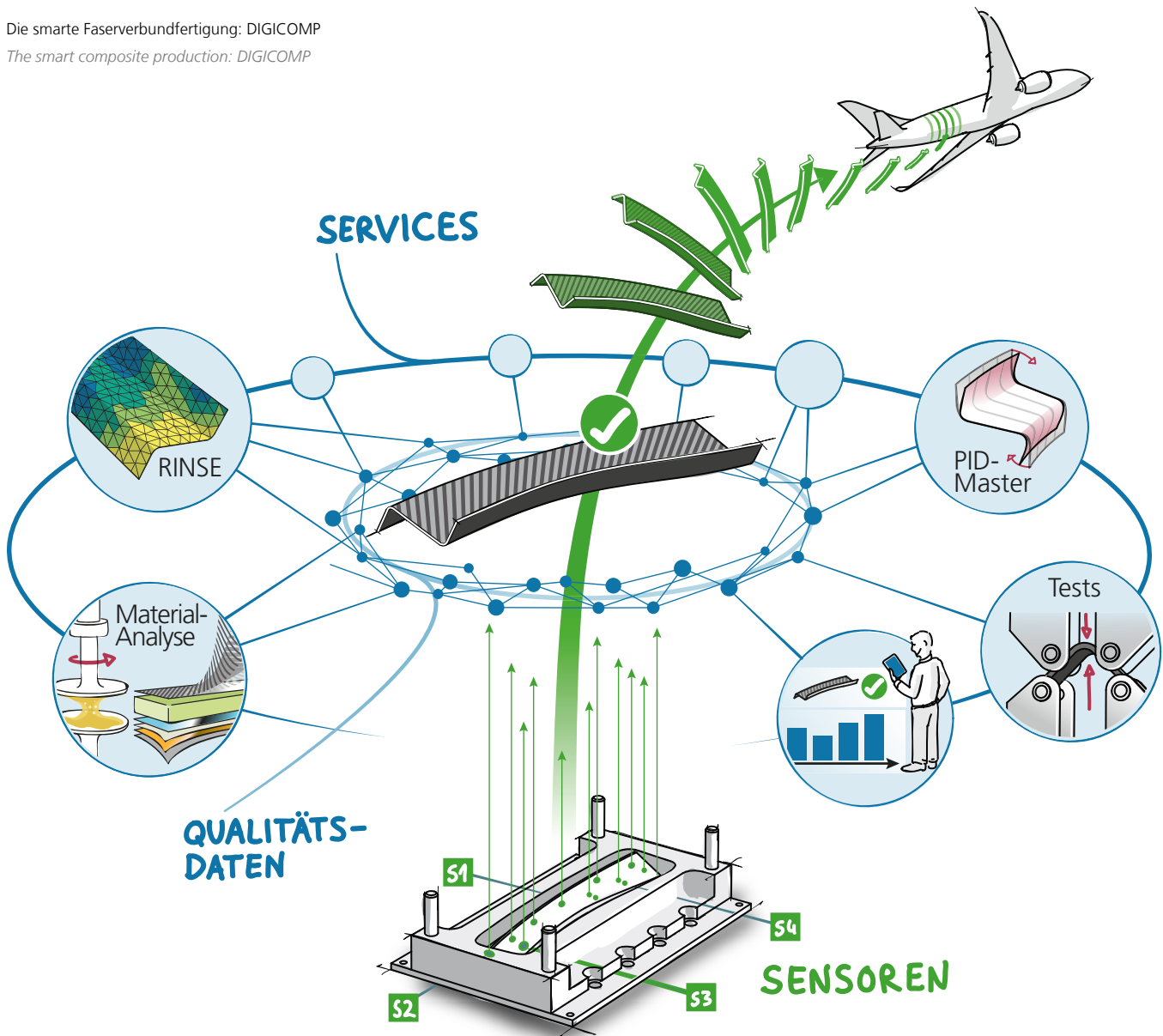
 [Dominic Bertling, M. Eng.](#)



Die Kopplung beider Dienste zeigt, wie Expertensysteme als Bausteine einer digitalen Kette innerhalb einer smarten Fertigung funktionieren und agieren können. Neue Erkenntnisse lassen sich schnell implementieren und erproben. In gleicher Weise sind, basierend auf weiteren Diensten und Daten, z. B. Ketten zur Berechnung und Überwachung des Aushärtegrades, induzierter Spannungen und Geometrieabweichungen bildbar. Die Vision „Von der Form ins Flugzeug“ wird damit zunehmend real.

Die smarte Faserverbundfertigung: DIGICOMP

The smart composite production: DIGICOMP



3D-gedruckte Aktuatoren und Sensoren per Knopfdruck

3D-printed actuators and sensors via push of a button

Summary

3D-printing techniques allow for the realisation of [new ideas in lightweight construction](#) – even in the presence of structural complexities. In combination with multifunctional materials, also ready-to-use actuators and sensors (transducers) are conceivable. Using the piezoelectric polymer PVDF, the print of piezoelectric transducers together with the electrodes, feed lines and terminals is achieved. Even the print of a complete [adaptive structure with structural integrated actuators and sensors](#) is now possible. Merely the polarisation of the piezoelectric components follows in a second step. New designs of adaptive lightweight construction can now be easily printed.

Der 3D-Druck ermöglicht die Umsetzung [neuer Leichtbauideen](#), nahezu unabhängig von der Komplexität der Struktur. Durch die Verwendung multifunktionaler Materialien beim 3D-Druck sind Aktuatoren und Sensoren (Energiewandler) nahezu per Knopfdruck herstellbar. Durch den Einsatz des piezoelektrischen Polymers PVDF ist es nun gelungen, piezoelektrische Wandler zu drucken, samt den Elektroden, Zuleitungen und Anschlüssen. Sogar der 3D-Druck einer vollständigen [adaptiven Struktur mit strukturintegrierten Aktuatoren und Sensoren](#) ist möglich.

Eine neue Technologie für den adaptiven Leichtbau

Piezoelektrische Wandler sind Bauteile, die sich bei dem Anlegen einer elektrischen Spannung verformen bzw. Kräfte erzeugen (Aktuatoreffekt) oder die bei Einwirkung einer mechanischen Kraft eine elektrische Spannung generieren (Sensoreffekt). Jedoch arbeiten sie nur dann optimal, wenn sie hinsichtlich ihrer mechanischen sowie dynamischen Steifigkeit an ihre strukturelle Umgebung angepasst sind. Nur dann erfolgt eine maximale Leistungsübertragung. Die Kernidee ist, die strukturdynamische Anpassung in einem weiten Frequenzbereich durch ihre Form zu erzielen. Umgesetzt wird sie im Promotionsprogramm des [Campus Funktionswerkstoffe und -strukturen](#), ein wissenschaftlichen Forschungsverbund der TU Clausthal zusammen mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Ein dreischichtiger 3D-Druck eines piezoelektrischen Flächenaktuators ist das erste Funktionsmuster. Für die mittlere Schicht hat der FDM-Drucker (Fused Deposition Modeling) das piezoelektrische Polymer PVDF (Polyvinylidenfluorid) verwendet. Die beiden äußeren Schichten bestehen aus mit Graphen angereichertem PVDF. Sie dienen als Elektroden, zwischen denen das elektrische Feld zum Betrieb des Wandlers generiert wird. Auch bestehen die Zuleitungen und die Anschlüsse aus diesem Materialsystem. Die Polarisierung erfolgt mit einer Feldstärke von etwa 15 MV/m in einem zweiten Herstellungsschritt. Bei Bedarf lässt sich auch ein elektrisch isolierendes Gehäuse aus dem Polymer PLA (Polylactid) drucken.

Explosionsansicht eines piezoelektrischen Wandlers
Exploded view of a piezoelectric transducer





Autor:

Marc Sparenberg, M. Eng.

Perfekt angepasste Wandler

Das neue Verfahren ermöglicht die Herstellung hochkomplexer Wandlertopologien, wie z. B. [gyroidähnliche Strukturen](#), die eine Alternative zu den konventionellen Bauweisen darstellen. Durch die Variation der Gitterkonstanten (Porosität) dieser Wandler ist ihre dynamische Steifigkeit an die einzusetzende Struktur anpassbar. Damit ist die mechanische Anpassung der dynamischen Steifigkeit einfach realisierbar und führt zu perfekt angepassten Wandlern direkt aus dem 3D-Drucker.

Eine neue Technologie des [adaptiven Leichtbaus](#) steht bereit für viele technische Anwendungen.



3D-gedruckte adaptive Struktur:
Balken und Piezo-Aktuator sind in einem Druckprozess entstanden
*3D-printed adaptive structure:
Beam and piezo-actuator are manufactured in a single print job*



Modell eines dreischichtigen Gyroid-ähnlichen Wandlers mit konstanten Schichtdicken aus PLA.
Model of a three-layer Gyroid-like transducer with constant layer thicknesses made of PLA.

Faser-Metall-Lamine:

Die richtige Entspannungstechnik für Alleskönner

Fibre-metal laminates: The ideal relaxation technique for all-rounders

Summary

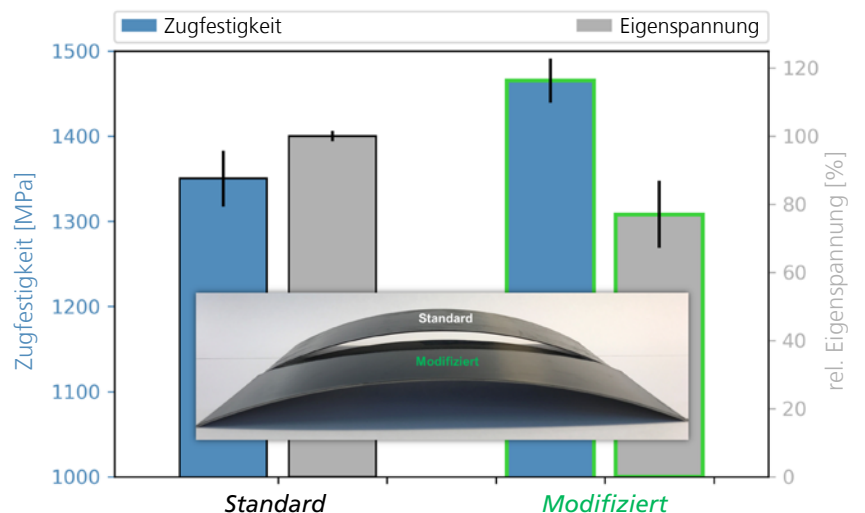
Fibre-metal laminates are fibre composites with intermediate layers of metal foils. The advantages are better structural properties and a higher potential to integrate further functionalities. A novel application of the hybrid laminates is the CFRP vehicle underbody of the Next Generation Car (NGC) with integrated conductor tracks made of individual steel layers. A temperature cycle specially adapted to the hybridisation process was developed for production. The manufacturing process is subdivided into initial and post-curing by an intermediate cooling step, which is adjusted by fibre Bragg grating sensors. The modified process lowers residual stresses and increases the structural potential of the integrated metallic conductor tracks. Specifically, the residual stresses are reduced by 25 % and the strength is increased by 10 % in comparison to the standard process. In addition, the two-stage process reduces the autoclave occupancy times and also the costs (by outsourcing the post curing process).

Vergleich der experimentell ermittelten Eigenspannungen und Festigkeiten zwischen den unterschiedlichen Prozessen sowie die Darstellung des Eigenspannungszustands anhand der Krümmung asymmetrischer Versuchsproben
Comparison of the experimentally determined residual stresses and strengths of the different processes and the representation of the residual stress state based on the curvature of asymmetrical specimens.


Durch den Einsatz faseroptischer Dehnungsmessungen im Herstellungsprozess von Faser-Metall Lamine (FML) ist es gelungen, einen Prozess mit gezielter Zwischenabkühlung zu entwickeln, der die **Eigenspannungen** um bis zu 25 % senkt. Eine neuartige Anwendung der untersuchten Hybridlamine stellt der CFK-Fahrzeugunterboden des Next Generation Car (NGC) mit integrierten Leiterbahnen aus einzelnen Stahllagen dar. Der Einsatz des modifizierten Herstellungsprozesses erhöht das strukturelle Potenzial der integrierten metallischen Lagen, wodurch die Festigkeit um 10 % steigt. Der mehrstufige Prozess ermöglicht zudem eine Auslagerung des zweiten Prozessschrittes. Die Belegungszeiten des Autoklaven und damit verbundene Kosten sinken.

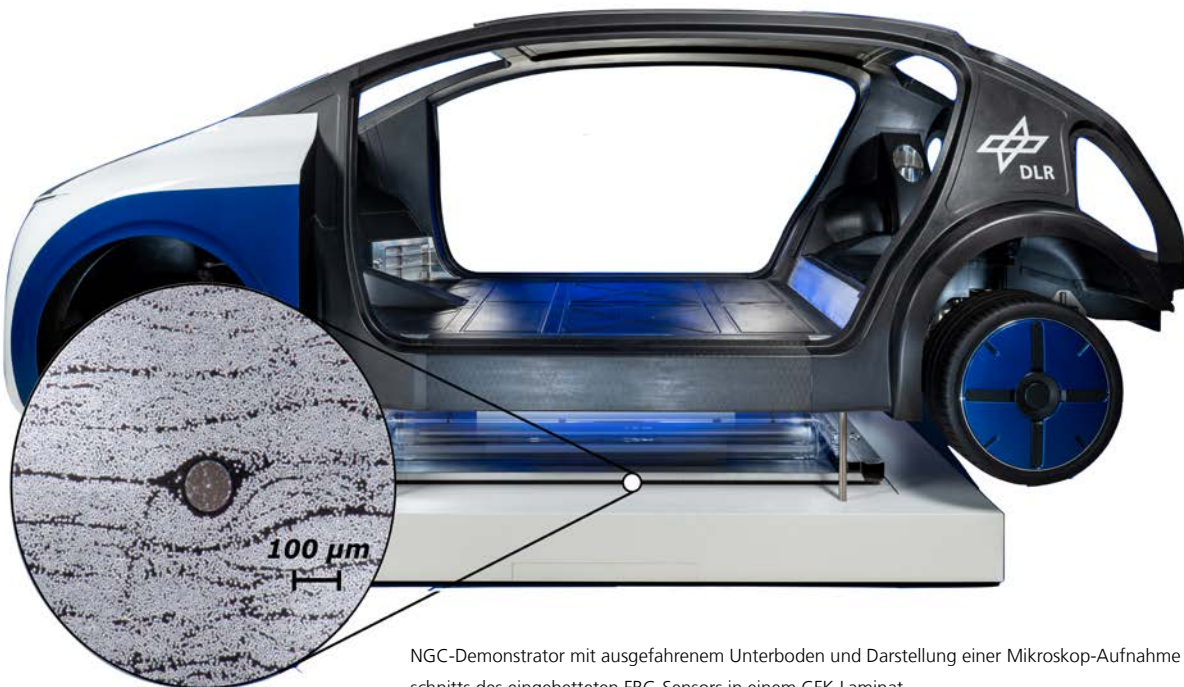
Alleskönner: Faser-Metall-Lamine

Faser-Metall-Lamine bestehen aus lagenweise kombinierten Faserverbundwerkstoffen (FVK) und Metallen. Die metallischen Lagen können neben strukturellen Aufgaben noch weitere Funktionen erfüllen. Dazu gehören die Strom- und Datenübertragung oder die Erzielung eines Brand-, Impact- oder Erosionsschutzes. Ein Beispiel stellt der **NGC-Unterboden** dar. Metallische Lagen ersetzen elektrische Leitungen in einem Kabelbaum und tragen zusätzlich Lasten ab. Dadurch lassen sich Kosten und Gewicht einsparen. Eine Herausforderung stellt die Verbindung der Einzelkomponenten dar. Hohe Prozesstemperaturen und stark unterschiedliche thermische Eigenschaften bewirken hohe **Eigenspannungen** im Bauteil. Denn um den Fertigungsaufwand gering zu halten, findet die Integration der metallischen Lagen während der Herstellung der FVK-Komponente statt. Die entstehenden Eigenspannungen verringern normalerweise das mechanische Potenzial der strukturintegrierten Leiterbahnen und bedürfen daher einer materialspezifischen Entspannungsmethode.



Autor:

 Dipl.-Ing. Robert Prussak

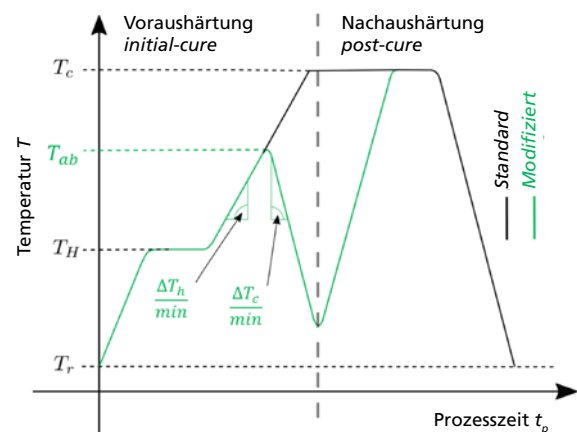


NGC-Demonstrator mit ausgefahrenem Unterboden und Darstellung einer Mikroskop-Aufnahme des Querschnitts des eingebetteten FBG-Sensors in einem CFK-Laminat.

NGC demonstrator with exchangeable vehicle underbody and illustration of a microscopic image of the cross-section of the embedded FBG sensor in a CFRP laminate.

Entspannungsmethode

Bei der FML-Herstellung ist der Temperaturzyklus der maßgebliche Einflussfaktor in Bezug auf die Höhe der Eigenspannungen. Eine gezielte Zwischenabkühlung verringert die Temperaturvorbelastungen sowie die daraus resultierenden Eigenspannungen. Die eingebrachte Abkühlung erfolgt, bevor eine feste Anbindung zwischen Metall und FVK aufgrund der Vernetzungsreaktion entsteht. Der modifizierte zweistufige Prozess besitzt die variablen Parameter des Abkühlzeitpunkts T_{ab} sowie der Heiz- und Kühlraten $\Delta T_h/\text{min}$, $\Delta T_c/\text{min}$. Die Einstellung dieser Parameter erfolgt durch den Einsatz von Dehnungsmessungen im Herstellungsprozess mittels integrierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren. Die Sensorik zeigt den Anbindungszeitpunkt zwischen FVK und Metall und ermöglicht eine Bewertung einer ausreichenden Vorvernetzung in der ersten Prozessstufe. Die Beurteilung der Eigenspannung erfolgt über die Krümmungsmessung asymmetrischer Prozessbegleitproben. Diese zeigen eine Eigenspannungsreduktion von bis zu 25 % gegenüber Proben aus dem Standardprozess auf. Zusätzlich weisen im modifizierten Prozess hergestellte Prüfkörper eine um 10 Prozent erhöhte Festigkeit auf.



Vergleich der Temperaturverläufe des Standardprozesses und des modifizierten Prozesses mit definierter Haltephase bei T_H und einer Aushärtemperatur T_c sowie den variablen Parametern der Abkühltemperatur T_{ab} und der Heiz- und Kühlraten $\Delta T_h/\text{min}$, $\Delta T_c/\text{min}$

Comparison of the temperature curves of the standard process and the modified process with defined holding phase at T_H and a curing temperature T_c as well as the modifiable parameters of the cooling temperature T_{ab} and the heating and cooling rates $\Delta T_h/\text{min}$, $\Delta T_c/\text{min}$

Laminatorthotropie – Ein Toleranzproblem?

Orthotropic laminates – A design issue?

Summary

More-orthotropic laminates are increasingly used for modern CFRP airframe components. Recent experiments on thermal expansion of those laminates indicate that the classical laminate theory underpredicts the laminates' real thermal expansion, which leads to the risk of unsatisfactory dimensional fidelity of fabricated parts. Recent studies of the author aim at material-specific quantification of the effects caused by orthotropy, in order to consider them adequately early on in the design process.

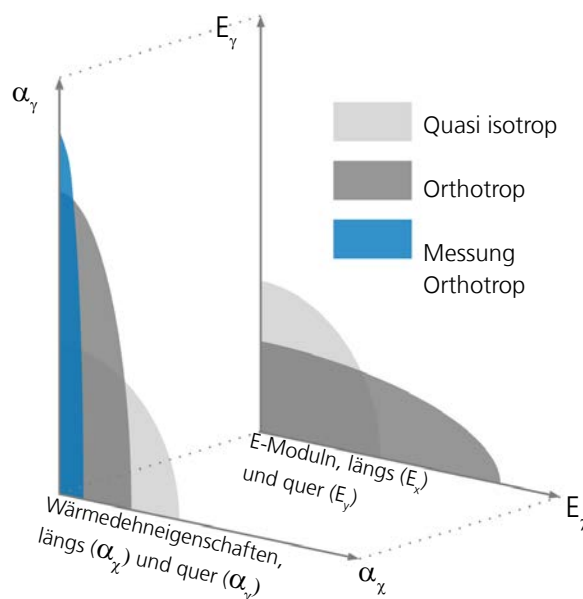
Die erste Wahl für lasttragende Strukturen moderner Verkehrsflugzeuge sind hochorthotrope CFK-Lamine. Das sind dünn geschichtete Strukturen mit ausgeprägten Vorzugsrichtungen. Mit einer innovativen Ergänzung zur klassischen Laminattheorie lässt sich die Leistungsfähigkeit der Strukturen zukünftig noch weiter steigern: Ungewollte Formabweichungen werden bei der Fertigung vermieden und Kosten und Ausschuss in den Montageprozessen reduziert. **Neue Untersuchungen** verfolgen das Ziel, die durch die starke Orthotropie bedingten Effekte materialspezifisch zu quantifizieren, um sie im Strukturauslegungsprozess adäquat berücksichtigen zu können.

Hochorthotrope Lamine nehmen zu

Flugzeugstrukturen neuester Generation nutzen gezielt Lamine mit richtungsabhängigen Eigenschaften. Man spricht von orthotropen Laminen. Diese weisen mechanische Vorzugsrichtungen auf, die Konstrukteure idealerweise entlang der größten strukturellen Belastung ausrichten. Das spart Material und somit Gewicht.

Der Orthotropiegrad eines Laminats beschreibt das Verhältnis der Elastizitätsmoduln in Längs- zu Querrichtung. Die Ausprägung einer Vorzugsrichtung im Laminat, z. B. durch Anpassung der Lagenorientierungen, beeinflusst die Wärmeausdehnungseigenschaften deutlich.


Die Orthotropiegrade und deren Verteilungen für Spantstrukturen älterer und neuester Generation sind den Bildern zu entnehmen.

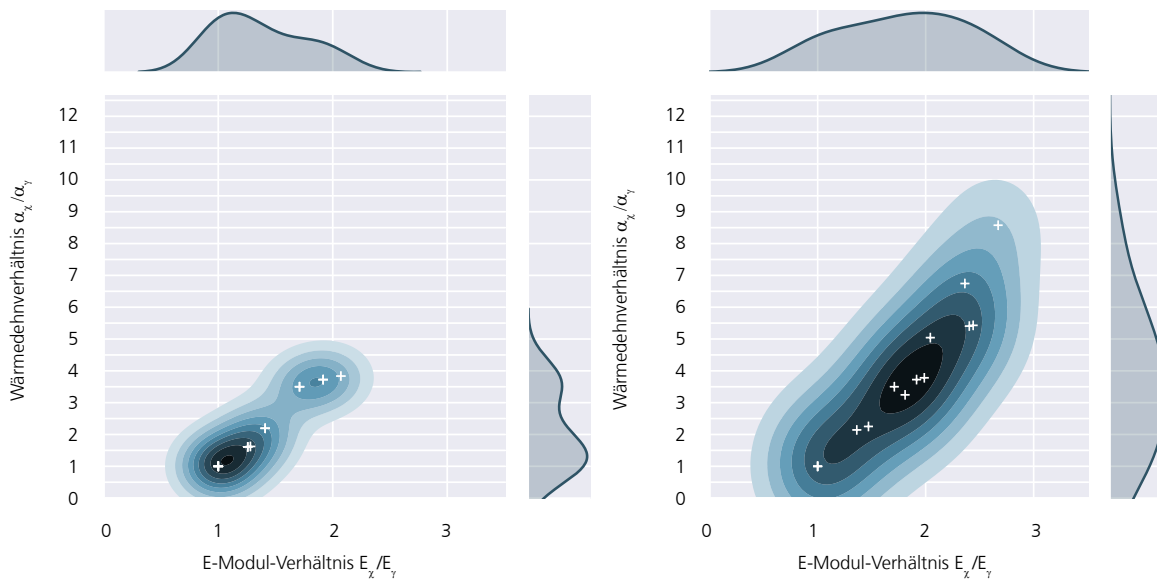


Orthotropie-Einfluss auf Laminat-Elastizitätsmodul und Wärmedehnverhalten
The effect of more-orthotropic layups on Young's moduli and thermal expansion properties



Autor:

 [Dr.-Ing. Erik Kappel](#)



Orthotropiegrad-Verteilungen älterer (links) und neuer (rechts) Flugzeugspanten
Degree of orthotropy distributions of older (left) and new (right) frame structures

Die Darstellungen zeigen, dass zunehmend Lamine mit erhöhtem Orthotropiegrad eingesetzt werden, um die Leistungsfähigkeit der Strukturen noch weiter zu steigern. Die Grafik zeigt auch, dass eine erhöhte Orthotropie gleichzeitig das Wärmeausdehnungsverhalten der CFK-Lamine stark beeinflusst. Dies generiert potenziell ungewollte Formabweichungen von gefertigten CFK-Strukturen und stellt Montageprozesse vor Herausforderungen.

Konsequenz: Toleranzproblematik

Neueste Messungen von Wärmedehnungen hochorthotroper Lamine zeigen, dass die heute zur Laminatauslegung eingesetzte klassische Laminattheorie das Ausdehnungsverhalten für diese Lamine nicht zufriedenstellend berechnet. Die zu erwartenden Wärmedehnungen werden unterschätzt (siehe Graphik).

Die Herstellung von CFK-Flugzeugstrukturen findet im Autoklaven bei 180 °C statt. Unterschätztes Wärmedehnverhalten bedeutet eine Unterschätzung des Bauteilverzugs. Im Vorfeld berechnete, werkzeugseitige Kompensationsmaßnahmen erzielen nicht vollständig den gewünschten Erfolg.

Die aktuellen Untersuchungen des Autors verfolgen das Ziel, das besondere Wärmedehnverhalten hochorthotroper CFK-Lamine zu erklären und materialspezifisch zu quantifizieren. Daraus sollen Handlungsempfehlungen für Konstrukteure entstehen, die helfen sollen, ungewollte Formabweichungen zu vermeiden und den Einfluss der Orthotropie frühzeitig adäquat zu berücksichtigen.



SYSTEM

System

Detailaufnahme des Sensornetzwerks und eines Anbindungspunkts
– Projekt faWaSiS
Detailed view of the sensor network and a connection point
– *faWaSiS project*

58

Auf dem Weg zu fühlenden Faserverbundstrukturen
Towards sensing fibre composite structures

60

Fasern unter Spannung –
Elektrische Energieübertragung mittels multifunktionaler Faserverbundwerkstoffe
Hot fibres – Electric energy transfer by means of multifunctional composites

62

Lastminderung an Windenergieanlagen:
Experimentelle Vermessung einer flexiblen Hinterkante für Rotorblätter im Windkanal
*Load alleviation at wind energy turbines:
Experimental investigation of a flexible trailing edge for wind energy turbine blades in a wind tunnel*

64

Adaptive Schaufeln – Effizient fliegen mit dem Strom
Adaptive blades – Flying efficiently with the flow

66

Smart Tooling – Intelligente Werkzeuge für die vernetzte Produktion der Zukunft
Smart Tooling – Intelligent tools for the networked production of the future

Auf dem Weg zu fühlenden Faserverbundstrukturen – Aktive Strukturüberwachung im Feldtest

Towards sensing fibre composite structures – Active structural-health-monitoring systems in field test

Summary

Barely visible impact damages are a challenge in the operation of composite structures. The non-destructive testing investigations necessary to determine the total impact damage are time- and cost-intensive. An active structural-health-monitoring (SHM) system can quickly detect potential damage in the components. Such a system has already shown good damage detection and localisation on a laboratory scale in completed projects. For the further investigation of this system, a side skirt of a regional train has been equipped as a demonstrator component and a realistic test will be carried out over several months. The changes in the SHM system due to varying environmental conditions will be investigated. The focus of the investigations is to be able to perform a safe and reliable damage detection despite these variations. First results show a robust behaviour of the whole system and good starting points for the development of extended damage diagnosis algorithms by means of machine learning.

Ein aktives System zur Überwachung des Bauteilzustands wird erstmals in einem Feldversuch unter Realbedingungen getestet und sammelt wertvolle Daten für die Weiterentwicklung des Systems. Hierbei wird das Ziel verfolgt, Einschränkungen für hochbelastete Faserverbundstrukturen durch deren „schadenstolerante“ Auslegung zu reduzieren. Bei diesem konstruktiven Ansatz stellen mögliche Beschädigungen Bedingungen an die sich ergebende Restfestigkeit der Struktur. Die beschädigte Struktur muss weiterhin alle auftretenden Belastungen ertragen können. Hieraus werden hohe Sicherheitsfaktoren abgeleitet, aus welchen ein erhöhtes Strukturgewicht resultiert. Weiterhin sind regelmäßig aufwändige Inspektionen notwendig, um kritische Beschädigungen aufzudecken.

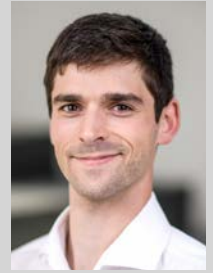
Unsichtbare Schäden erkennen

Faserverbundwerkstoffe weisen schadensmechanische Besonderheiten gegenüber metallischen Werkstoffen infolge ihres komplexen, mehrschichtigen Aufbaus auf. Hierbei sind in der Praxis insbesondere kaum oder gar nicht sichtbare Beschädigungen (engl. „barely visible impact damages“) kurz BVID, relevant. Bei dieser Schadensart handelt es sich um Ablösungen von Laminatschichten im Inneren des Materials, die visuell nicht zu erkennen sind. Hervorgerufen werden diese auch als Delaminationen bezeichneten Beschädigungen häufig durch einen stumpfen Schlag auf die Struktur. Da diese Schadensart bei einer visuellen Inspektion übersehen werden kann, erfolgt nach einem po-



Lackierte Oberfläche der Seitenschürze mit gekennzeichneten Schäden

Painted surface of the side skirt with marked damages



Autor:

Lars Trampe, M. Sc.

enziellen Schadensfall eine detaillierte Inspektion mittels zerstörungsfreier Prüfung. Ein Entwicklungsziel bei dem Einsatz von aktiven Strukturüberwachungssystemen (eng.: „Structural-Health-Monitoring“, kurz „SHM“) ist es, diese Inspektion signifikant zu beschleunigen und damit die Ausfallzeit zu verringern. Durch die aktive Überwachung eignet sich ein SHM-System ebenfalls zur präzisen Planung von Wartungsintervallen, da diese an den realen Bauteilzustand angepasst werden können. Hierdurch wird die Verfügbarkeit der instrumentierten Fahrzeuge nochmals erhöht. Das am DLR entwickelte SHM-System hat in verschiedenen Forschungsprojekten seine Einsatzfähigkeit unter Laborbedingungen bewiesen. Der nächste Schritt in der Erforschung des Systems liegt in der Erprobung unter realen Umgebungsbedingungen. Hierzu wurde die Frontschürze eines Schienenfahrzeugs in dem Projekt „faWaSiS“ mit einem piezoelektrischen Sensornetzwerk ausgestattet und in einem mehrmonatigen Feldtest aktiv überwacht. Die Ergebnisse zeigen, dass das Messsystem und das Sensornetzwerk zuverlässig arbeiten. Das Beispielbauteil bietet durch die fordernden Einsatzbedingungen eine gute Plattform zur Erprobung des Systems. Zukünftige Einsatzfelder sind ebenfalls im Luftfahrtbereich, bspw. bei Zusammenstößen von Flugzeugen mit Bodenfahrzeugen, zu sehen.



Innenseite der Seitenschürze mit integriertem Sensornetzwerk nach abgeschlossenem Feldversuch

Inner side of the side skirt with integrated sensor network after completed field test

Robuste Algorithmen

Die erhobenen Daten aus dem Realbetrieb bilden die Grundlage insbesondere für die Weiterentwicklung der Algorithmen zur Schadensdetektion. Durch den Einsatz maschinellen Lernens werden Algorithmen entwickelt, die robust zwischen schadensartigen Strukturveränderungen und Veränderungen durch variierende Umgebungsbedingungen unterscheiden können. Das Ziel bei dieser Entwicklung ist, die Zuverlässigkeit des SHM-Systems im Hinblick auf die Schadensbewertung nochmals zu steigern.

Fasern unter Spannung – Elektrische Energieübertragung mittels multifunktionaler Faserverbundwerkstoffe

Hot fibres – Electric energy transfer by means of multifunctional composites

Summary

Multifunctional composite materials with both structural and electrical properties are a promising approach to achieve considerable mass reductions of future electric aircrafts. In order to enable efficient structural electric energy transfer, a hybrid glass-fibre-reinforced composite containing 10 volume per cent of endless aluminum fibres was developed. In addition to characterising the material behaviour under static and fatigue loads, combined mechanical-electrical tests were conducted during a research visit at the University of Alberta, Canada (ACME Group, Dr. Mertiny). Experimental results prove the hybrid material's capability of carrying currents up to 300 mA/mm² (3 A/mm² in the aluminum fibres) with static and fatigue strengths competitive with the reference material.

Multifunktionale Faserverbundwerkstoffe, die sowohl Leichtbauwerkstoffe als auch elektrische Leiter sind, können signifikant zur Gewichtsreduktion elektrischer Flugzeuge beitragen. Einen effektiven Ansatz zur Erzeugung der erforderlichen Leitfähigkeit und Strombelastbarkeit stellt die Integration mikroskaliger Metallfasern dar. Erstmals konnten im Rahmen einer kombinierten elektrisch-mechanischen Charakterisierung das Leichtbaupotenzial und die Strombelastbarkeit eines neuartigen Verbundwerkstoffes aus Glas- und Aluminiumfasern aufgezeigt werden.

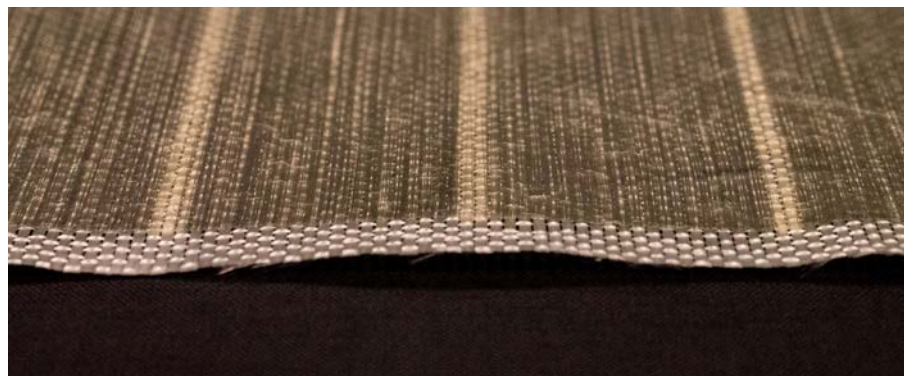
Leitfähig durch Aluminiumfasern

Im Rahmen einer internen Forschungsarbeit entstand ein neuer hybrider Verbundwerkstoff mit Verstärkungsfasern aus Glas und einer Aluminium-Magnesium-Legierung. Verglichen mit Stahlfaserkompositen ermöglicht die Verwendung von Aluminium eine um den Faktor 20 höhere Leitfähigkeit bei signifikant geringerer Beeinflussung der Verbunddicke. Herausforderungen stellen die Anbindung der Aluminiumfasern an die Epoxidharzmatrix und die elektrische Kontaktierung dar. Aufgrund des geringen Aluminiumfaserdurchmessers von 45 Mikrometern und der mechanischen Kompatibilität zu den Glasfasern ergibt sich ein multifunktionaler Faserverbundwerkstoff mit zum herkömmlichen glasfaserverstärkten Kunststoff konkurrenzfähigen mechanischen Eigenschaften. Der Anteil der Aluminiumfasern am Verbund beträgt nur circa 10 Volumenprozent.

Homogenität durch Einzelfilamentwickeln

Zur Realisierung einer möglichst homogenen Verteilung der Aluminiumfasern in dem auf unidirektionalen Glasfaserhalbzeugen basierenden Schichtverbund erfolgt die Einbringung nicht als Bündel, sondern als Einzelfilament. Eine dafür beim DLR entwickelte Filamentwickelmaschine ermöglicht die Herstellung vorimprägnierter, sowohl durchgängiger als auch unterbrochener Aluminiumfaserlagen zur Verarbeitung im Autoklavverfahren. Was einfach klingt, ist technisch durchaus anspruchsvoll: Die Bruchlast einer Aluminiumfaser ist kleiner als 1 Newton.

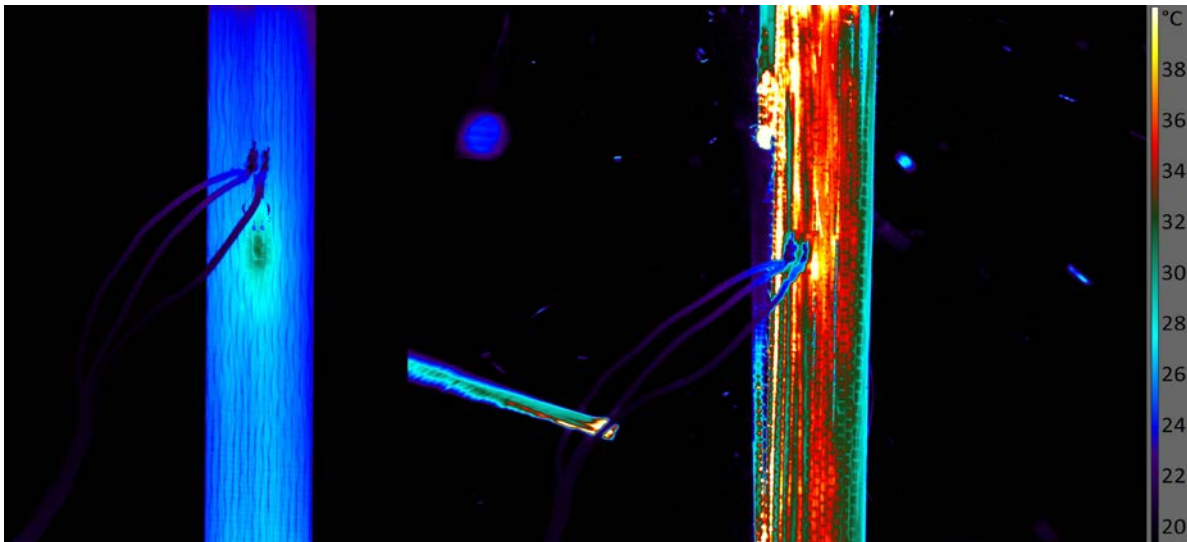
Gestapelte
Einzelschichten:
Glasgewebe und
unterbrochener
Aluminiumfaser-
Prepreg
Stacked single plies:
Glass-fibre fabric
and aluminum fibre
prepreg





Autor:

Dr.-Ing. Till Julian Adam



Thermogramm eines mit 5 Ampere strombelasteten Probekörpers im Zugversuch: ungeschädigt (links) und im Augenblick des Endversagens (rechts)

Thermographic image of a 5A current-carrying specimen under tension load, undamaged (left) and at final failure (right)

Experimentelle Premiere

Eine umfassende mechanische und elektrische Charakterisierung des Hybridmaterials wurde im Rahmen eines Forschungsaufenthalts an der kanadischen University of Alberta in Zusammenarbeit mit Dr. Pierre Mertiny durchgeführt. Kontinuierlich ausgeführte Widerstandsmessungen, Thermografie und Mikroskopie ermöglichten wichtige Einblicke in das Material- und Schädigungsverhalten unter quasistatischen und schwellenden Zuglasten. Den Höhepunkt stellten die erstmals durchgeführten Ermüdungsversuche mit zeitgleicher elektrischer Strombelastung dar.

Starker Ersteindruck

Die experimentellen Ergebnisse zeigen eine nur fünfprozentige Reduktion der faserparallelen Zugfestigkeit aufgrund der Aluminiumintegration. Die Leitfähigkeit bleibt bis zum Endversagen des Laminats bei Bruchdehnungen um 2,7 % erhalten. Eine beobachtete Abnahme der Quersugfestigkeit von 15 % ist zukünftig durch intensivere Oberflächenvorbehandlung der Aluminiumfasern reduzierbar. In den Dauerschwingversuchen erreichten das Referenz- und das Hybridmaterial eine vergleichbare Lebensdauern. Die Versuche bei gleichzeitiger Strombelastung ergaben, dass das multifunktionale Verbundmaterial Ströme bis 300 mA/mm² ohne signifikante Beeinträchtigung der Ermüdungslebensdauer leiten kann. Die mittlere Stromdichte im Aluminium betrug dabei 3 A/mm², vergleichbar mit handelsüblichen Aluminiumkabeln.

Lastminderung an Windenergieanlagen: Experimentelle Vermessung einer flexiblen Hinterkante für Rotorblätter im Windkanal

Load alleviation at wind energy turbines:

Experimental investigation of a flexible trailing edge for wind energy turbine blades in a wind tunnel

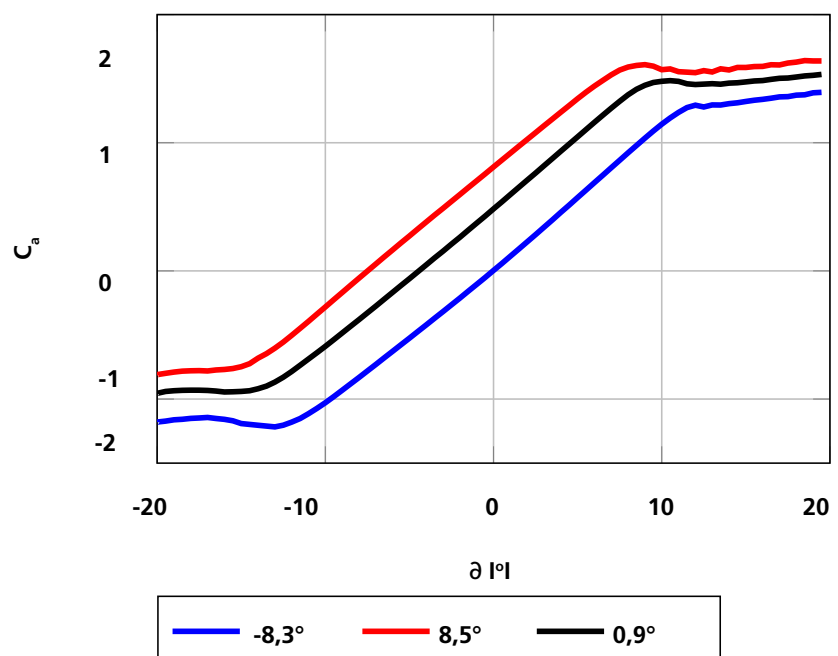
Summary

Wind energy is an essential component of the upcoming regenerative energy supply. For maximum yields at the turbine site, the turbines have grown to impressive proportions. The main drawback of this size consists in the increasingly heavier loading of the blades by their weight. Smart rotor blades offer a way out in order to reduce fatigue loads arising from gusts, turbulence or wind gradients. Within the SmartBlades (0325601A/B/C/D) and Smartblades 2 (0324032A-H) projects, different approaches have been investigated. At the end of 2019, the project ended with the wind tunnel test of the flexible trailing edge at the test site at Oldenburg University. There, the expected flow control was experimentally proven, with the help of which the fatigue loads on the rotor blade can be compensated.

Windenergie ist eine zentrale Komponente der zukünftigen regenerativen Energieversorgung. Für maximale Erträge sind Windenergieanlagen heute auf beeindruckende Ausmaße gewachsen, bei denen die Blätter bereits durch Ermüdungslasten infolge des Eigengewichts und durch Turbulenz, Windgradienten und Böen stark belastet sind. Einen Ausweg bieten smarte Rotorblätter, die die Ermüdungslasten reduzieren. In den vom BMWi geförderten Projekten [Smartblades](#) und [Smartblades 2](#) sind in den letzten Jahren verschiedene Konzepte erforscht worden. Ende 2019 wurde das Konzept eines Rotorblatts mit flexibler Hinterkante im Windkanal an der Universität Oldenburg validiert. Die Experimente bestätigen die erwartete Strömungsbeeinflussung, mit deren Hilfe die Ermüdungslasten auf dem Rotorblatt ausgeregelt werden können.

Mit Flexibilität für eine lange Lebensdauer

Eine Maßnahme zur Reduktion von Ermüdungslasten durch Biegemomente an der Blattwurzel ist die Nutzung einer flexiblen Hinterkante. Diese wechselnden Biegemomente entstehen in erster Linie durch Schwankungen in der Anströmung der Anlage, z. B. durch Böen, Windgradienten, Turbulenz oder den Mastschock, wenn das Rotorblatt am Anlagenmast vorbeizieht. Die Hinterkante wirkt dabei auf die Strömung wie das Ruder eines Flugzeugs und kann Schwankungen in der Anströmung durch einen Ausschlag ausgleichen, sodass sich der Auftrieb des Profils nicht ändert. Im Gegensatz zu Flugzeugen, bei denen starre Steuerflächen mit Gelenken eingesetzt werden, verwendet die entwickelte Hinterkante ein neuartiges flexibles Konzept, bei dem die gesamte Hinterkante kontinuierlich verformt wird. Dies erlaubt, die Hinterkante geschlossen auszuführen, sodass kein Wasser, kein Staub und keine Insekten eindringen können. Nur so lassen sich für den kosteneffizienten Betrieb von Windenergieanlagen ausreichend lange Wartungsintervalle erreichen.



Gemessene Polaren der flexiblen Hinterkante für drei Ausschlagwinkel der Hinterkante
Measured polars of the flexible trailing edge for three different deflection angles



Autor:

Dr.-Ing. Martin Pohl

Zur experimentellen Untersuchung der Strömungsbeeinflussung fand Ende 2019 ein Windkanalversuch im Windkanal der Universität Oldenburg statt. Dabei wurde der Profilauftrieb für sieben Ausschlagwinkel der Hinterkante bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 10 m/s bis 30 m/s ermittelt. Die erwartete Änderung des Profilauftriebes infolge des Ausschlags der Hinterkante konnte dabei bestätigt werden. Die Resultate decken sich mit den Ergebnissen, die vom Projektpartner ENERCON in Simulationen erzielt wurden.

Da die flexible Hinterkante im Gegensatz zur langsamen Blattverstellung an der Blattwurzel sehr schnell agieren kann, sind weitreichende Änderungen der Aerodynamik auch mehrfach pro Blattumlauf möglich. Mit einer geeigneten Anlagenregelung in Kombination mit der flexiblen Hinterkante besteht ein großes Potenzial, die Ermüdungslasten der Anlage signifikant zu reduzieren.

Nächster Schritt: Erprobung auf einer Experimentalturbine

Aufgrund der bisher erzielten positiven Resultate mit der flexiblen Hinterkante besteht der nächste Schritt darin, die Technologie an einem realen Rotorblatt zu erproben. Reale Rotorblätter weisen, im Gegensatz zu den bisherigen Demonstratoren, eine dreidimensionale Geometrie mit Zuspitzung, Verwindung und veränderlichen Profilen auf. Um diese Eigenschaften abzubilden, wurde im letzten Schritt des Projektes Smartblades2 ein parametrisches Finite-Elemente (FE)-Modell der flexiblen Hinterkante aufgebaut. In einem Folgeprojekt wird auf Basis des erstellten FE-Modells ein Rotorblatt mit flexibler Hinterkante für die Geometrie der Versuchsanlage ausgelegt und drei Rotorblätter gefertigt. Damit sind Untersuchungen zur Struktur und zur Technologie des Rotorblatts und der flexiblen Hinterkante in einer realen Umgebung möglich. Darüber hinaus kann das Lastminderungspotenzial durch verschiedene Ansteuerverfahren der Hinterkante experimentell ermittelt werden.

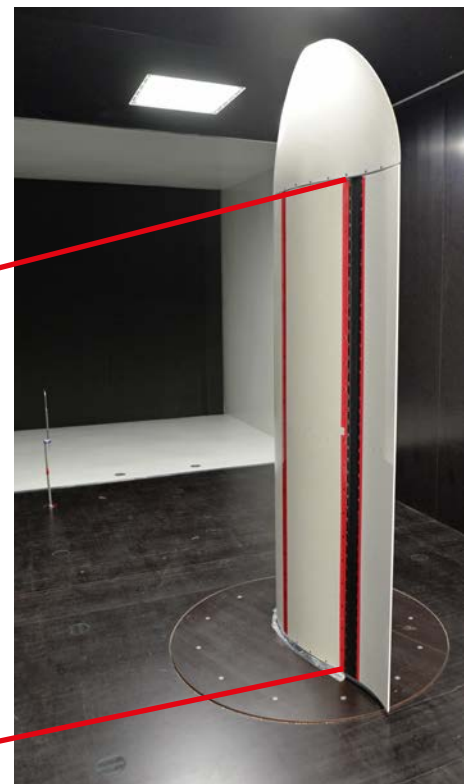


Martin Pohl (l., DLR) und Piyush Singh (r., Uni Oldenburg) installieren den Demonstrator

Martin Pohl (l., DLR) and Piyush Singh (r., Oldenburg University) are installing the demonstrator

Segmentdemonstrator mit flexibler Hinterkante im Windkanal

Segment demonstrator with flexible trailing edge in the wind tunnel



Adaptive Schaufeln – Effizient fliegen mit dem Strom

Adaptive blades – Flying efficiently with the flow

Summary

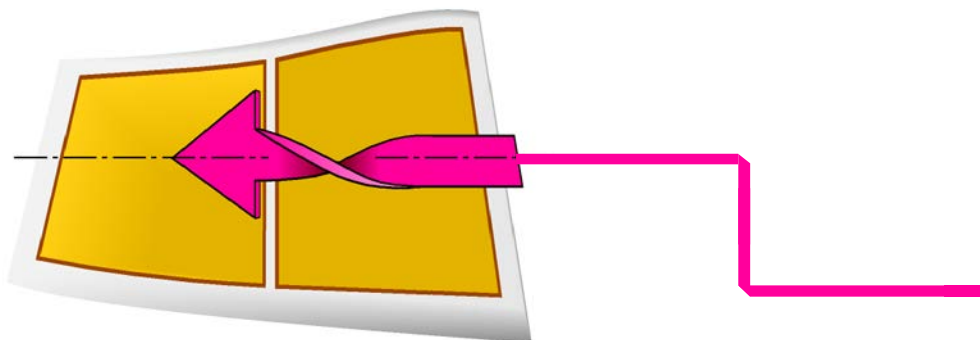
The design of engines that are highly efficient at different operating conditions is an important target to achieve in the development of low-emission and more environmentally friendly aircraft. Adaptive blades applied to engine intake fans and compressors are capable of modifying their shape according to the aerodynamic requirements encountered during different flight phases. Actuators made of active materials such as piezoactuators or shape memory alloys, can be integrated on the suction and pressure sides of the blades. By expanding or contracting, these actuators are capable of modifying the blades geometry, aiming to reach the desired aerodynamic shapes and effects. This, in turn, increases the system's efficiency, lowering fuel consumption and reducing greenhouse gas emissions.

Das Design von Triebwerken mit hoher Effizienz bei veränderlichen Betriebsbedingungen ist ein wichtiger Schritt zur Entwicklung nachhaltiger und emissionsarmer Flugzeuge. Mit adaptiven Schaufeln ausgestattete Fans und Verdichter können ihre Form gezielt verändern und dadurch die aerodynamischen Anforderungen in jedem Betriebszustand des Triebwerks und des Flugzeugs optimal erfüllen.

Strömungsanpassung für mehr Umweltfreundlichkeit

Mit Hilfe adaptiver Schaufeln werden der Treibstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen reduziert. Die Anwendung dieser Art von Schaufeln ist aber nicht nur für herkömmliche Flugzeuge und Triebwerke geplant, sondern auch für alternative Antriebskonzepte und Flugzeugkonfigurationen wie Blended Wing Body (BWB)-Flugzeuge sowie bei Systemen, die neue Treibstoffe als mögliche Wege zur Emissionsreduktion anwenden.

Durch solche innovativen Konzepte entstehen neue Herausforderungen beim Flugzeugkonzeptentwurf und insbesondere bei der Triebwerksentwicklung, da die Leistung dieses Systems für die Gesamteffizienz des Luftfahrzeugs von wesentlicher Bedeutung ist. Durch die Implementierung formvariabler Schaufeln an den verschiedenen Komponenten eines Triebwerks, z. B. dem Fan oder dem Verdichter, ist es möglich, die Geometrie der Schaufeln entsprechend den aerodynamischen Anforderungen im aktuellen Betriebszustand des Triebwerks zu verändern. Die adaptierten Komponenten erlauben eine Anpassung an unterschiedliche Luftströme, was zu einer Erhöhung der Betriebsflexibilität und einem effizienteren Triebwerks- und Flugzeugsystem führt. Eine mögliche technische Lösung zur Erreichung dieser Ziele besteht in der Verwendung strukturintegrierter Aktuatoren auf den Schaufeloberflächen. Die Aktuatoren werden aus aktiven Materialien wie Piezokeramiken oder Formgedächtnislegierungen hergestellt. Durch ihre Fähigkeit zur kontrollierten Ausdehnung oder Kontraktion sind sie in der Lage, die Form der Schaufeln zu verändern, um die gewünschten aerodynamischen Effekte zu erreichen.



Adaptives Schaufelkonzept mit integrierten Aktuatoren
Adaptive blade concept with integrated actuators

Autorinnen:

Dipl.-Ing. Zhuzhell Montano
Giada Abate, Ph.D.

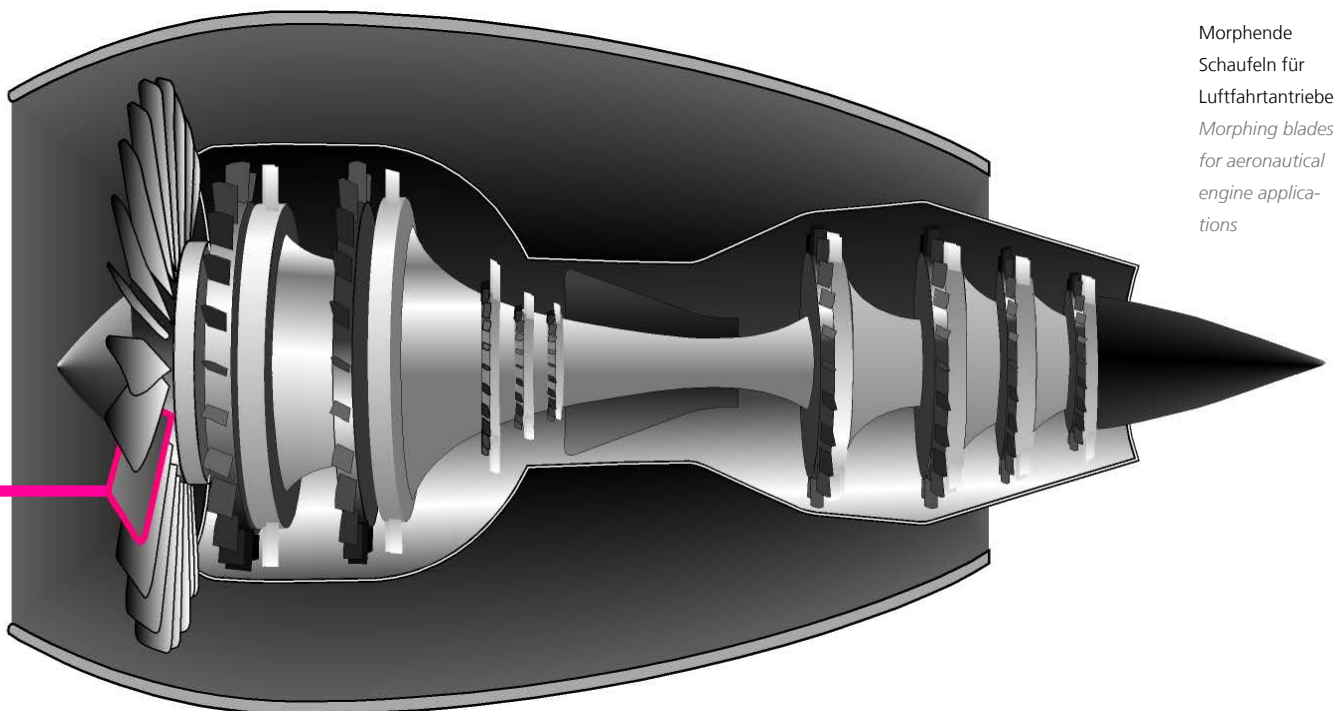


Aerodynamik und Struktur in Interaktion

Da die Änderung der Schaufelgeometrie signifikante Auswirkungen auf das Strömungsverhalten hat, ist eine starke und robuste Kopplung zwischen den Disziplinen Strukturentwurf und Aerodynamik notwendig. Nur so kann ein effizienter Designprozess gewährleistet werden.

Eine Basisgeometrie, beispielsweise aus einer Standardtriebwerkschaufel-Konfiguration, bildet den Ausgangspunkt des gekoppelten Entwurfsprozesses. Die Zielgeometrie ergibt sich aus Vorgaben an das aerodynamische Verhalten bei maximaler Effizienz oder unter extremen Strömungsbedingungen. Durch die Modifikation der Schaufelgeometrie ist es möglich, eine Effizienzsteigerung zu bewirken. Um die adäquate Form zu erreichen, muss der Entwurfsprozess den Einfluss verschiedener struktureller und aerodynamischer Parameter berücksichtigen, wie geometrische Variablen, Belastungsbedingungen, Luftgeschwindigkeiten und mögliche Materialeigenschaften. Auch die Art und Weise, wie die Schaufeln hergestellt oder montiert werden, spielen eine Rolle. Um die Abweichung zwischen den aerodynamischen Zielgeometrien und den strukturell realisierbaren verformten Geometrien zu minimieren, führt ein iterativer Entwurfsprozess eine kontinuierliche und enge Kopplung zwischen den Entwurfsvariablen beider Disziplinen durch. Die Abweichung zwischen beiden Formen wird bei jedem Iterationsschritt überwacht, bis eine ideale Form erreicht worden ist. Diese gekoppelte Analyse ermöglicht eine detaillierte Bewertung des Potenzials der unterschiedlichen Arten von Schaufeldeformationen hinsichtlich ihrer aerodynamischen Wirkung.

Die Auswahl und der Entwurf von Aktuator Konzepten und adaptiven Triebwerkschaufeln, die mehr Flexibilität und einen höheren Gesamtwirkungsgrad des Triebwerks erlauben, leisten einen Beitrag zu einer umweltfreundlicheren Luftfahrt.



Morphende
Schaufeln für
Luftfahrtantriebe
*Morphing blades
for aeronautical
engine applica-
tions*

Smart Tooling – Intelligente Werkzeuge für die vernetzte Produktion der Zukunft

Smart Tooling – Intelligent tools for the networked production of the future

Summary

Imagine that the moulding tools of the future in the area of composite production would be able to communicate with their environment. They would be able to transmit all relevant process-related information about their own status as well as relevant information from the environment, to man and machine! Imagine that, in this process, information about material wear/surface quality, tightness of the vacuum system and the failure of all connected sensors would be available via self-diagnosis! Imagine that not a single cable had to be connected for these processes, since all information is transmitted wirelessly! This is Smart Tooling - intelligent tools that are to find their way into series production in cooperation with the aviation industry.

*Formgebendes Medium, auf dem Faserverbundhalbzeuge abgelegt und ausgehärtet werden

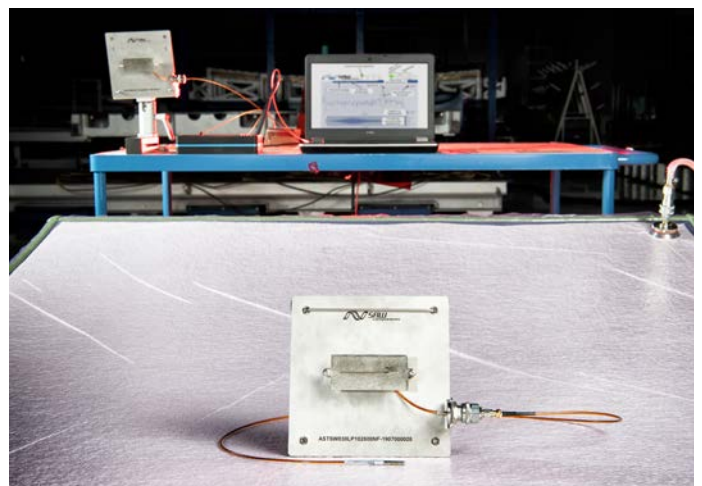
Stellen Sie sich vor, die Formwerkzeuge* der Zukunft im Bereich der Faserverbundfertigung wären in der Lage, mit ihrer Umgebung zu kommunizieren. Sie könnten alle relevanten prozesstechnischen Informationen über den eigenen Zustand, sowie relevante Umgebungsinformationen an Mensch und Maschine weiterleiten! Stellen Sie sich vor, in diesem Zuge wären in einer Selbstdiagnose Informationen über Materialverschleiß/Oberflächengüte, Dichtigkeit des Vakuumsystems und den Ausfall aller angeschlossenen Sensoren verfügbar! Stellen Sie sich vor, für diese Vorgänge müsste kein einziges Kabel angeschlossen werden, da alle Informationen kabellos übertragen werden! Das ist Smart Tooling – intelligente Werkzeuge, die in Zusammenarbeit mit der Luftfahrtindustrie ihren Weg in die Serienfertigung finden werden.

Ein smarterer Begleiter

Die Qualität eines gefertigten Faserverbundbauteils hängt von verschiedensten Faktoren ab. Neben den heutzutage bei der Aushärtung erfassten Prozessparametern Temperatur, Druck und Vakuumbüte bestimmen auch an vorgelagerten Arbeitsstationen vorherrschende Umgebungsfaktoren wie etwa Luftfeuchtigkeit, Temperatur oder Partikelbelastung die Qualität des fertigen Bauteils. Diese Zustandsgrößen werden in der industriellen Fertigung bisher selten erfasst. Intelligente Formwerkzeuge helfen, die Lücken in der Datenakquise zu schließen, da sie ihre zugehörigen Faserverbundbauteile entlang der Stationen des Fertigungsablaufs begleiten.

In das Formwerkzeug integrierte Sensorik misst qualitätsrelevante Größen entlang der Prozesskette und bietet dadurch vielfältige Möglichkeiten für Qualitätssicherung und Industrie 4.0. Eingebettete Sender-Empfänger-Systeme zur automatischen und berührungslosen Identifikation von Formwerkzeugen ermöglichen die Nachverfolgung einzelner Bauteile entlang der Fertigung sowie die Zuordnung aufgenommener Messdaten zu einzelnen Fertigungsplätzen.

Im Projekt TempeST eingesetzte werkzeuggebundene Messtechnik zur kabellosen Übertragung von Temperaturen
Tool-bound measurement technology used in the TempeST project for wireless transmission of temperatures



AutorInnen:

Dipl.-Ing. Hacan Uçan
Niklas Menke, M. Sc.
Anja Haschenburger, M. A.



Smart Tooling: Mit Hilfe innovativer Messtechnik sollen in Zukunft der Werkzeug- und der Bauteilzustand in Echtzeit aufgezeichnet und analysiert werden

Smart Tooling: Innovative measuring technology will be used in the future to record and analyse tool and component condition in real time

In einer digitalen Bauteilakte zusammengeführt, lassen sich diese Daten auswerten, um auftretende Bauteildefekte auf einen bestimmten Parameter oder eine Kombination mehrerer Einflüsse zurückzuführen. Zusätzlich dienen die aufgenommenen Daten der Speisung prozessanalytischer Systeme im Zuge der Industrie 4.0. So unterstützen sie die Verifizierung digitaler Bauteil- und Prozesszwillinge sowie zugehöriger Simulationen.

Ready for Big Data

Ein erster Schritt in Richtung Smart Tooling wurde mit der Direktbeauftragung TempeSt realisiert, in welcher eine Auswahl an hochtemperaturfähiger, kabelloser Temperatursensorik getestet und ein Integrationskonzept für Formwerkzeuge erarbeitet wurden. Diese Sensorik kann ebenfalls als RFID-Sensorik genutzt werden, so ist es zudem möglich, einem Bauteil externe Daten schnell und sicher zuzuordnen. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die untersuchte Leckageprüfung mittels Durchflussmessung, welche aktuell in den Industriemaßstab überführt wird. Die durch Smart Tooling ermöglichte Datenerfassung über den kompletten Fertigungsprozess und die Sicherung in der digitalen Bauteilakte ermöglichen es in Kombination mit modernen Datenanalysen, Prozessabweichungen und Mehraufwand schneller zu erkennen und zu vermeiden.



INDUSTRIALISIERUNG

Industrialisation

[Ressourcenschonende Serienproduktion von thermoplastischen Großbauteilen](#) – mit Hilfe des Forschungsautoklavs BALU® wird dies erforscht.

Resource-saving series production of large thermoplastic components – with the help of the autoclave BALU® researched has begun.



58

Endmontagelinie mit künstlicher Intelligenz
Final assembly line with artificial intelligence

60

Heiß begehrt –
Konsolidierungsprozess von thermoplastischen Großbauteilen für die Serienfertigung
*In high demand –
Consolidation process of large thermoplastic components for series production*

62

Von der Theorie zur Praxis und zurück:
Eine Forschungsanlage wird zum Wissenstransporter
Scientific approaches on industrial challenges - Automated wing-rib production

64

Neuartige Fertigungsautomatisierung durch selbstregulierte Multi-Roboter-Systeme
Modern manufacturing automation concepts in self-regulated multi-robot systems

66

“Geteiltes Blatt = halbiertes Leid beim Blatttransport” – Das Projekt SegBlaTe
“Segmented rotor blade = half the effort of rotor blade transport” – The SegBlaTe project

Endmontagelinie mit künstlicher Intelligenz

Final assembly line with artificial intelligence

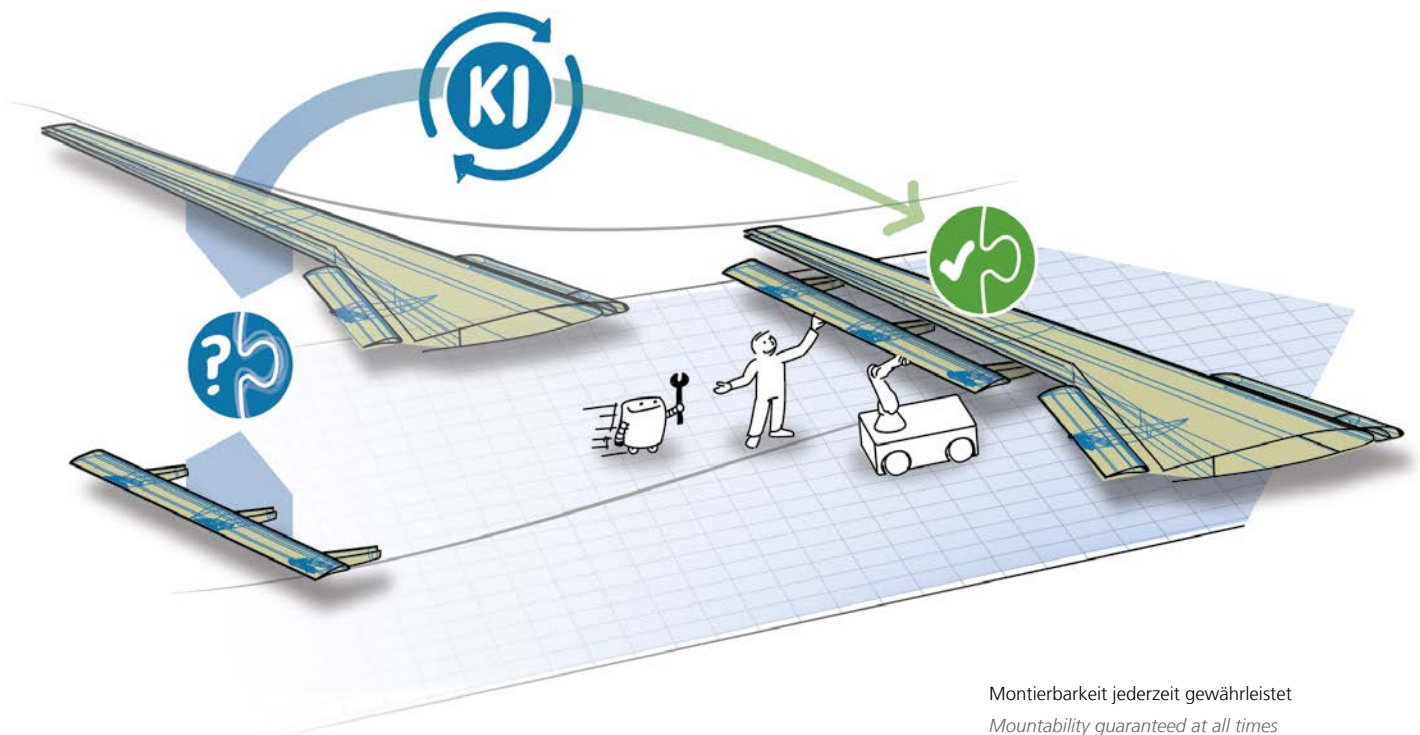
Summary

A final assembly line with artificial intelligence is feasible. Manual compensation procedures and delays caused by them are a thing of the past. Using artificial intelligence, any assembly group can be assembled immediately, because a clever pre-selection of components reduces excessive tolerances at the connection areas. Even high-rate production is possible using the "Plug and Fly" principle. Our vision is the complete introduction of this expert system into series production.

Eine Endmontagelinie mit künstlicher Intelligenz ist realisierbar. Manuelle Ausgleichsverfahren und dadurch bedingte Verzögerungen sind Vergangenheit. Mittels künstlicher Intelligenz lässt sich jede Baugruppe sofort montieren, denn eine geschickte Vorauswahl der Bauteile reduziert zu große Toleranzen an den Anschlussbereichen. Selbst eine Hochratenfertigung ist durch das Prinzip „Plug and Fly“ möglich. Unsere Vision ist die vollständige Einführung dieses Expertensystems in die Serienproduktion.

Selbstständige Montageentscheidung

In einem Expertensystem wählt die künstliche Intelligenz selbstständig montierbare Einzelteile aus. Die Anschlussmaße und deren Toleranzen entscheiden über die Montierbarkeit der Bauteile. Das neuronale Netz wertet die erfassten Kenngrößen aus, greift dabei auf seine „Erfahrungen“ zurück und signalisiert einen positiven oder negativen Montagevorgang. Erfahrungswerte erreicht das neuronale Netz durch sogenannte überwachte Trainingszyklen (Supervised Learning). Häufig sind dafür sehr viele unabhängige Montage-Szenarien bzw. Datenpunkte notwendig. Die größte Herausforderung ist die begrenzte Verfügbarkeit dieser Trainingsdaten für Montagevorgänge in der Endmontagelinie.

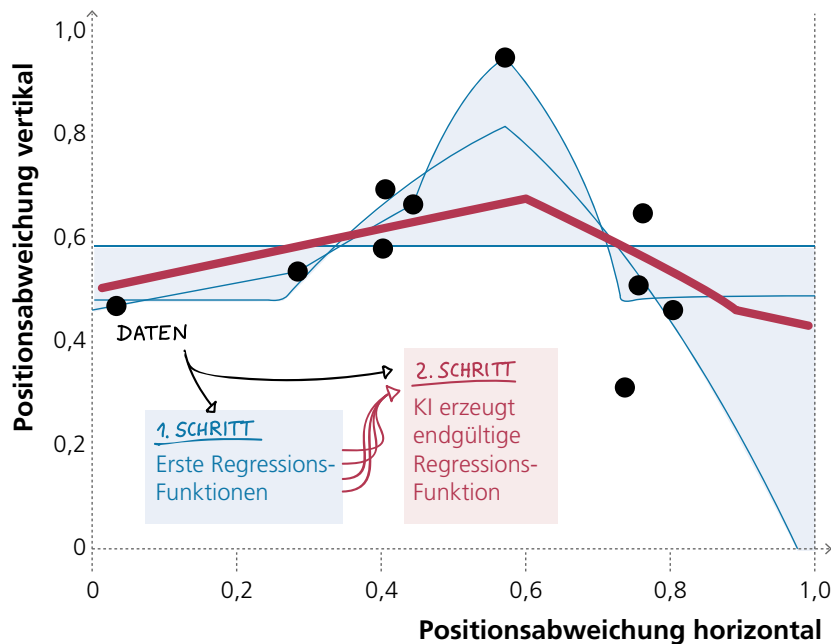


Montierbarkeit jederzeit gewährleistet
Mountability guaranteed at all times



Autor:

 [Dr.-Ing. Lennart Weiß](#)



Regressionsfunktionen erster und zweiter Schritt
Regression functions, first and second

Computerunterstützt bei kleinen Losgrößen

Ein zweistufiges Verfahren löst dabei die Problemstellung im Umgang mit kleinen Losgrößen. Der erste Schritt des Verfahrens besteht aus dem Training mehrerer neuronaler Netze. Sie repräsentieren verschiedene vorausgewählte Ansatzfunktionen. Deren Training für eine bestmögliche Regression der Datenpunkte führt zu den ersten „Erfahrungen“. Jedoch ist dabei der Einfluss der Vorauswahl von Ansatzfunktionen auf das Regressionsergebnis zu groß. Deshalb ist es dem Algorithmus im zweiten Schritt freigestellt, eine eigene Ansatzfunktion basierend auf seinen „Erfahrungen“ aus dem ersten Schritt zu erzeugen und das Training mit dieser erneut durchzuführen. Der Algorithmus lernt aus seinen Trainingserfahrungen und ermittelt selbstständig eine Regressionsfunktion, die auch bei kleinen Losgrößen über eine ausreichende Vorhersagegüte verfügt. Die künstliche Intelligenz durchläuft diesen computerunterstützten Prozess nach jeder Montage, sodass der Erfahrungsschatz mit jedem positiven oder auch negativen Montagevorgang wächst. Das verbessert die Vorhersagegüte des Expertensystems mit jedem durchgeführten Montagevorgang.

Das lernende Expertensystem begleitet die Endmontagelinie in der Serienproduktion. Die gewonnenen Erkenntnisse sind sowohl für neue flexible Montagekonzepte in der Fabrik der Zukunft als auch für eine neue Konstruktionsphilosophie für den Konstrukteur der Zukunft einsetzbar.

Heiß begehrt – Konsolidierungsprozess von thermoplastischen Großbauteilen für die Serienfertigung

In high demand – Consolidation process of large thermoplastic components for series production

Summary

The aviation industry demands high standards for materials and manufacturing processes for next generation aircraft. They must be light, stable, resource-saving and capable of high production rates. Fibre-reinforced high-temperature thermoplastics are a material of particular interest. Current research projects are concerned with the consolidation process of thermoplastics in the autoclave.

The work focuses on sustainable auxiliary substance concepts:

Materials used in this high temperature range are very expensive and cannot be reused. The aim of the developed concepts is a contribute to the efficient, competitive and resource-saving series production of large thermoplastic components.

Eines der Arbeitsschwerpunkte im Projekt InTGroH war die Thermoplastkonsolidierung im weltgrößten Forschungsautoklav

One of the focal points of the InTGroH project was the consolidation of thermoplastics in the world's largest research autoclave

Die Luftfahrt stellt an Werkstoffe und Fertigungsverfahren von Flugzeugen der nächsten Generation hohe Ansprüche. Sie müssen leicht, stabil, ressourcenschonend und hochratenfähig sein. Ein Werkstoff von besonderem Interesse sind die faserverstärkten Hochtemperaturthermoplaste. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich mit dem Konsolidierungsprozess von Thermoplasten im Autoklav. Im Fokus der Arbeiten stehen nachhaltige Hilfsstoffkonzepte: Die verwendeten Materialien sind in diesem Hochtemperaturbereich sehr teuer und nicht wiederverwendbar. Das Ziel der entwickelten Konzepte ist ein Beitrag zur effizienten, wettbewerbsfähigen und ressourcenschonenden Serienproduktion von thermoplastischen Großbauteilen.

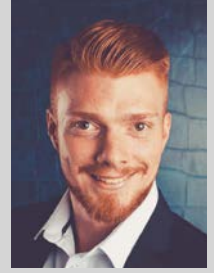


Am Temperaturlimit

Thermoplastische Polymere zeichnen sich dadurch aus, dass bei Erwärmung ihre kristalline Struktur aufgebrochen wird. Bei einer Abkühlung bewegen sich die Molekülketten immer weniger und beginnen sich regelmäßig anzuordnen, was man als Kristallisation bezeichnet. Die Kristallisation hat Einfluss auf die optischen, mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften des Polymers. Wird ein Bauteil aus thermoplastischem Polymer im Autoklav konsolidiert, wird bei Drücken von bis zu 11 bar und Temperaturen von bis zu 420°C der oben beschriebene Prozess durchfahren mit dem Ziel, die notwendigen Bauteileigenschaften einzustellen. Die Bauteile sind bei diesem Konsolidierungsprozess mit einem luftdichten Hilfsstoffaufbau abgedichtet.

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Hakan Uçan
Anja Haschenburger, M. A.
Constantin Bäns



Das erzeugt einen Unterdruck, die Druckdifferenz zum Umgebungsdruck drückt auf das Bauteil und verdichtet es somit, was auch notwendig ist, um die gewünschte Bauteilqualität zu erreichen. Die hohen Temperaturen in Kombination mit einem Differenzdruck von bis zu 11 bar stellen große Anforderungen an die Hilfsstoffe. In Anbetracht des anvisierten Serieneinsatzes wird an einem Lösungsansatz für den Hilfsstoffaufbau bei der Fertigung von komplexen hochintegralen Thermoplaststrukturen gearbeitet.

Im Projekt InTGroH (Niedersachsen, Förderung durch die N-Bank) wurden Lamine mit unterschiedlichen Hilfsstoffaufbauten konsolidiert. Die untersuchten Porositäten und mechanischen Eigenschaften dieser Lamine dienen als Qualitätsindikatoren. Im EU-geförderten Projekt ICASUS liegt ein Schwerpunkt auf dem Probenprogramm für Zugscherfestigkeiten (engl. lap shear), wo u.a. die Längsnahtfügestellen eines thermoplastischen Rumpfes untersucht werden. Die im Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) Stade gefertigten Probekörper dienen weiterhin als Referenz für die Validierung des thermoplastischen Fügeprozesses von unterschiedlichen Schweißverfahren.

Autoklav im Fokus

Im Rahmen der oben genannten Projekte forscht das ZLP in Stade an Herausforderungen, die mit dem Einsatz von thermoplastischen Verbundwerkstoffen verbunden sind und greift dabei auf vorhandene Infrastrukturen wie den Forschungsautoklav zurück. Das Ergebnis sind Konzepte für den Konsolidierungsprozess samt nachhaltigem Hilfsaufbau. Hierbei werden nicht nur die Bauteilqualität und der Ressourcenverbrauch an Hilfsstoffen mit dem Heißpressprozess verglichen, sondern auch untersucht, wie der Aufheiz- und der Abkühlvorgang effizienter gestaltet werden können. In Zukunft sollen simulationsgestützte Applikationen, die reale Objekte in der digitalen Welt darstellen können, sogenannte digitale Anlagenzwillinge wie der virtuelle Autoklav, eingesetzt werden. Das Ziel hierbei ist, die ressourcenintensiven Vorversuche auf dem virtuellen Autoklaven zu prozessieren. Ein Vorgang, der heute beim Einsatz von duroplastischen Polymeren eingesetzt wird.



Im Hilfsstoffaufbau von Thermoplastbauteilen kommen Hochtemperaturmaterialien zum Einsatz
High temperature materials are used in the auxiliary structure of thermoplastic components

Von der Theorie zur Praxis und zurück: Eine Forschungsanlage wird zum Wissenstransporter

Scientific approaches on industrial challenges - Automated wing-rib production

Summary

What does research in an industrial scale mean? Being told about industrial needs is just one side of the story. Another efficient way is to forecast future challenges by operating an industrial environment.

The key for a predictable and robust production is in extracting research questions based upon experience, analysing them and transferring results back into production.

DLR's fully automated RTM production line, taking the role of a problem seeker, applies this approach to an automated one-shot-production of a wing rib. Due to complex part design and resulting mould concept, bulking behaviour and demoulding process were identified as critical process steps. Therefore, DLR developed test benches to analyse the extracted process challenges and answer questions like "What are the process parameters to achieve a specific preform thickness for a sufficient insertion?" or "Which effect on the demoulding behaviour has the release agent?"

To validate the results obtained, the research facility produces wing ribs on an industrial scale, thus demonstrating practice to theory.

Theorie – Erstellung von Ersatzmodellen mit Hilfe von Prüfständen (hier: Komprimierungsprüfstand)
Theory – Creation of validated models using test benches (here: consolidation test bench)

Der Transfer von Theorie zur Praxis wirft Fragen auf, die sich im Vorfeld einer industriellen Umsetzung neuer Technologien oft nur schwer vorhersagen lassen. Der Betrieb einer vollautomatisierten Fertigungsstraße als Forschungsplattform hilft dabei, diese zu identifizieren. Das Produzieren von Bauteilen im Industriemaßstab deckt Herausforderungen auf und macht sie greifbar. Spezielle Prüfstände übertragen diese zur weiteren Analyse auf Laborbedingungen. Wissenschaftliche Untersuchungen führen zu Vorhersagemodellen, die wiederum dabei helfen, den eigentlichen Prozess effizienter und robuster zu machen.

Ein aktuelles Beispiel für diesen Ansatz ist das LuFo-Projekt ISENGART, in dem die Produktionslinie endkonturnahe Flügelrippen in einem isothermen Harzinjektionsprozess (Resin Transfer Moulding, RTM) erzeugt. Das integrale Bauteildesign führt zu einer komplexen Struktur mit schrägem T-Flansch, Hinterschnitt, Systemdurchführungen und beidseitigen T-Steifen. Der Prozess bedingt das gemeinsame Kompaktieren und das anschließende Zusammenführen mehrerer Teilpreforms in die Kavität des Injektionsformwerkzeugs. Dessen Öffnung und die Entformung des ausgehärteten Bauteils bergen die Gefahr einer Bauteilschädigung. Die genaue Vorhersage der Prozessparameter soll das verhindern.

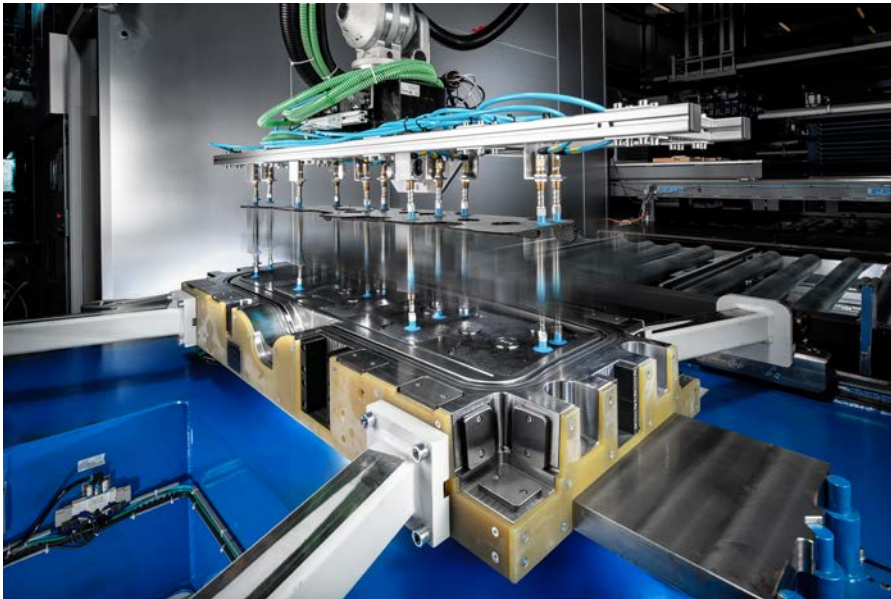
Preform Bulking

Der Einsatzvorgang des kompaktierten T-Stringer-Preforms in ein Formwerkzeug erfordert detaillierte Kenntnisse über das Komprimierungs- und Relaxationsverhalten des Fasermaterials. Die hierfür notwendige Datenbasis für eine zielgerichtete Auswahl von Prozessparametern bei unterschiedlichen Faserhalbzeugen ergab sich aus über 1.000 Versuchen mit Hilfe eines entwickelten Prüfstands. Weder ein zu dicker noch ein zu dünner Preform darf aufgrund der erforderlichen Prozesssicherheit und der luftfahrtspezifischen Anforderungen an die Bauteilqualität entstehen. Mit den ermittelten Versuchsdaten entsteht eine Vorhersagefähigkeit für die Prefomdicke, sodass der Einsatzvorgang prozesssicher erfolgen kann.



Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Sven Torstrick-von der Lieth
Florian Behrens, M. Sc.
Björn Denker, M. Sc.



Praxis – Validierung von Ersatzmodellen an realen Anwendungsfällen mit Hilfe der EVo-Pilotanlage
(hier: Bauteilentformung)

Practice – Validation of created models on real application cases using the EVo pilot plant
(here: component demoulding)

Weiterführende Literatur:

[EVo: Net Shape RTM Production Line](#)

[Kleine Serien ganz groß](#)

[Digitale Zwillinge](#)

[Modifikation einer Versuchsmethodik](#)

[Komprimierungs- und Relaxationsanalyse
von trockenen Faserhalbzeugen](#)

[Automatisierte, endkonturnahe RTM-
Fertigung](#)

[Schadenfreie Entformung von hochinteg-
ralen Faserverbundbauteilen](#)

[Modifikation einer Versuchsmethodik](#)

Entformungsverhalten

Bei zunehmender Komplexität der Bauteile rückt die Entnahme der Bauteile aus dem Formwerkzeug verstärkt in den Vordergrund. Durch die spezielle Geometrie der Flügelrippe, aber auch durch die veränderten Eigenschaften wie Oberflächenrauheit und Oberflächenenergie steigen die Anforderungen an eine kontrollierte und wiederholgenaue Entformung aus dem heißen Injektionswerkzeug. Ein eigens entwickeltes Testverfahren untersucht dafür den Einfluss der Hafteigenschaften von Harzsystemen auf unterschiedlichen Werkzeugoberflächen. Dieses Testverfahren dient zur Bestimmung der Kräfte auf Bauteil und Werkzeug während des Entformvorgangs, in Abhängigkeit von den Einflussgrößen wie z. B. Harzsystem, Trennmittel oder Oberflächenbeschaffenheit. Es ermöglicht die frühzeitige Vorhersage der auftretenden Kräfte bei der Entformung. Die Anpassung von Prozessparametern kann somit die Belastung verringern und eine zerstörungsfreie Entformung der Bauteile gewährleisten.

Die industrienähe Produktion der Flügelrippen auf der Forschungsanlage validiert die gewonnenen Ergebnisse und demonstriert die Praxis zur Theorie.

Neuartige Fertigungsautomatisierung durch selbstregulierte Multi-Roboter-Systeme

Modern manufacturing automation concepts in self-regulated multi-robot systems

Summary

The research platform GroFi® represents an innovative concept for production facilities of lightweight components. Redundancy and cooperative concepts are used for an efficient and self-regulated manufacturing process.

DLR develops a Manufacturing Execution System (MES), which is capable of controlling this process by integrating several digital twins and further specialised software tools. It is capable of planning and coordinating several robotic units simultaneously and is flexible in adjusting the process schedule, if defects are detected by inline QA systems. Several of these steps have been demonstrated in the Protec NSR project in 2019.

This development is an important step for a new generation of flexible and efficient robot cells for automated manufacturing.

Am DLR wird ein Manufacturing Execution System (MES) für die Steuerung eines neuartigen Fertigungskonzeptes umgesetzt, das eine hochflexible und effiziente Fertigung von Leichtbaukomponenten ermöglicht. Das System ermöglicht die Modernisierung von automatisierten Fertigungsprozessen durch den Einsatz komplexer, eng gekoppelter Softwaresysteme. MES dient zur Planung, Steuerung und Überwachung von Fertigungsprozessen. Darüber hinaus arbeitet sie die erfassten Daten für übergeordnete Planungs- und Steuerungsprozesse sowie für digitale Zwillinge von Bauteil und Fertigung auf.

Selbstregulierende Multiroboterfertigung

Die Fibre-Placement-Anlage GroFi® stellt ein innovatives und einzigartiges Konzept zukünftiger Fertigungsanlagen für Faserverbundstrukturen dar. Ziel ist es durch den Einsatz mehrerer redundanter und kompatibler Roboter einen produktiven und selbstregulierenden Fertigungsprozess darzustellen. Dafür müssen der Fertigungssteuerung bewertbare Zielsetzungen und Entscheidungskriterien vermittelt werden. Die Möglichkeiten der verfügbaren Einheiten und durch den Prozess zwingend erforderliche Reihenfolgen für Arbeitsschritte schränken den Entscheidungsspielraum hierbei ein. Außerdem sollen Abweichungen und Fehler automatisiert detektiert, Fehlerklassifikationen ermittelt und Fehlerreaktionen abgeleitet werden. Zur Realisierung eines selbstregulierenden Fertigungsprozesses bedarf es zudem Methoden zur automatisierten Erarbeitung von Lösungsstrategien, der Identifikation der geeignetsten Lösung sowie deren Umsetzung. Und dies muss online ohne Stillstandszeit erfolgen. Dafür können Optimierungsmethoden des Operations Research oder Applikationen basierend auf künstlichen Intelligenzen eingesetzt werden.

Realisierung als MES

Um dieses Konzept umzusetzen, ist es erforderlich, Werkzeuge zur Analyse, Modellierung und Simulation der Fertigungsprozesse zur Verfügung zu stellen. Für den automatisierten Faserlegeprozess hat das DLR mehrere solcher Werkzeuge als Softwaresysteme erarbeitet und validiert. Dafür wurde im Rahmen des grundfinanzierten Projekts Protec NSR ein Fertigungsprozess demonstriert, in dem erstmals ein Bauteilpreforming mittels Multirobotik, Multitechnologie und Multimaterialien sowie inklusive automatisierter NDI-Methoden realisiert wurde.

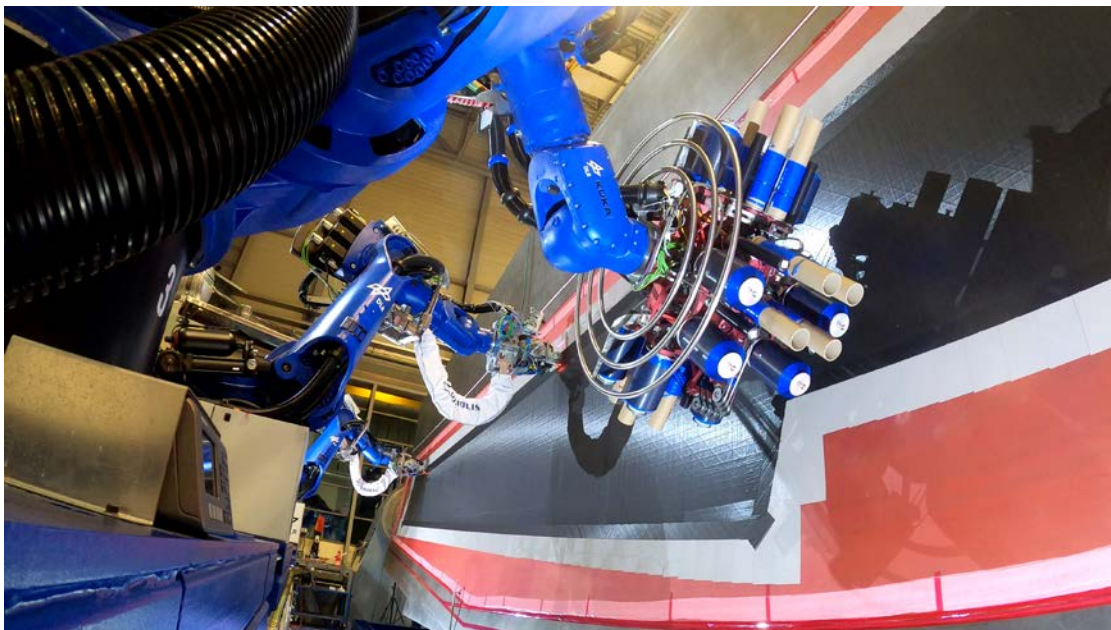
Autoren:

Markus Schreiber, M. Sc.
Dipl.-Ing. Christian Krombholz



Diese Ansätze werden im gleichen Projekt im Rahmen eines MES verknüpft. Das MES plant den Multirobotereinsatz, koordiniert die Robotereinheiten während der Fertigung und weist ihnen Arbeitsbereiche und -aufträge flexibel zu. Dabei erkennt und verhindert das System Kollisionssituationen. Durch den Einsatz von inline-QS-Systemen kann es auftretende Fehler detektieren und klassifizieren, bei Bedarf leitet es ein Online-Rescheduling ein. Der Arbeitsfortschritt wird visualisiert, dokumentiert und die Daten dem digitalen Zwillingen des Bauteils und der Fertigung hinzugefügt.

Mit den Entwicklungen dieses Projekts realisiert das DLR einen wichtigen Schritt für eine neue Generation an Fertigungszellen, die durch eine gesteigerte Produktivität und Effizienz in der Luft- und Raumfahrt, aber auch in der Automobilindustrie Einsatz finden wird. Darüber hinaus wird die Automatisierung für neue Industriezweige ermöglicht, denen diese Entwicklung bisher aufgrund der Flexibilitätsanforderungen ihrer Prozesse verwehrt war.



Drei Legeeinheiten bei der simultanen Herstellung einer Preform. Sie ist aus einer Kombination verschiedener Materialien aufgebaut und wird unter Einsatz verschiedener Faserlegetechnologien hergestellt.

Three layup units manufacturing a preform simultaneously. The preform is built using a combination of several material types and layup technologies.

„Geteiltes Blatt = halbiertes Leid beim Blatttransport“ – Das Projekt SegBlaTe

“Segmented rotor blade = half the effort of rotor blade transport” – The SegBlaTe project

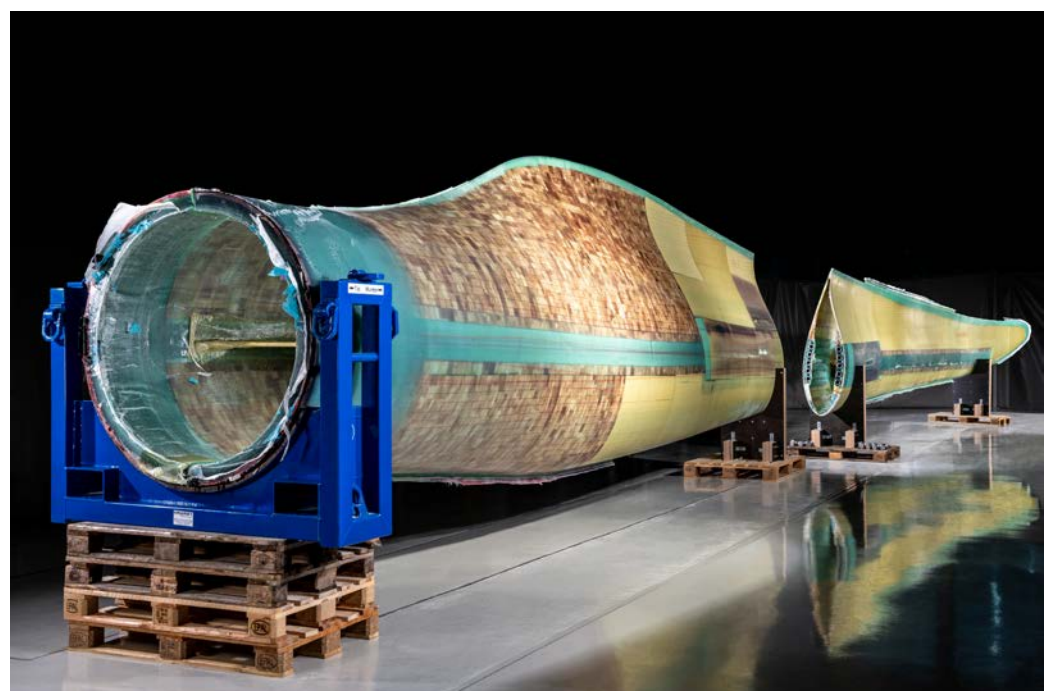
Summary

The enlargement of rotor blade diameters offers the advantage of reducing the energy production costs of onshore wind turbines, and even in low-wind areas larger rotor blades increase the yield. Easily accessible sites are becoming fewer and fewer worldwide and many sites require complex transport logistics. Due to increasing rotor diameters, production halls must also be enlarged or newly built. The challenge with segmented rotor blades lies in the fact that all segments of a blade have to fit together after production. Therefore, the demands on precision and quality assurance are increasing. In collaboration with Nordex Acciona and the Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems (IWES), the feasibility is being tested using a 20 m long rotor blade as a production and assembly demonstrator.

„Geteiltes Leid ist halbes Leid.“ Nicht nur der Volksmund kennt diese Weisheit, sondern auch auf den Transport von Rotorblättern für Windenergieanlagen kann diese Aussage übertragen werden. Die Reduzierung der Energieerzeugungskosten von Onshore-Windenergieanlagen setzt eine Vergrößerung der Rotorblattlänge voraus. Allerdings sind gut erreichbare Standorte kaum noch vorhanden und somit steigt der Transportaufwand. Eine Unterteilung von Rotorblättern in Segmente, die erst am Standort zum gesamten Rotorblatt gefügt werden, ist daher anstrengenswert. Das DLR erforscht in Zusammenarbeit mit Nordex Acciona und dem Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) die Möglichkeiten zur Verbindung von Rotorblattsegmenten für Windenergieanlagen.

Die Herausforderung

Die Fertigung der Rotorblätter erfolgt nicht im Ganzen mit einer anschließenden Zerteilung in einzelne Segmente, sondern direkt als einzelne Teile. Somit sind die notwendigen Strukturbauteile und Verbindungselemente in die Schalen integriert. Für jedes Blattsegment gibt es ein entsprechendes Formwerkzeug und die Fertigung aller Komponenten läuft parallel ab. Diese Vorgehensweise stellt aber hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und Qualitätssicherung. Die Verbindung der Rotorblattsegmente muss auch in Bezug auf Kosten und Gewicht den Anforderungen moderner Rotorblätter entsprechen. Das Ziel ist es, die ansteigenden Kosten, die aus der Segmentierung resultieren, durch die Reduzierung der Transportkosten zu kompensieren. Der Bau eines Fertigungs- und Montagedemonstrators zeigt anhand eines 20 m langen Rotorblatts die Herausforderungen dieser neuen Konstruktionstechnik auf.



Wurzel- und Tipsegment
des geteilten Rotorblatts
Root and tip segment of
the sectioned rotor blade

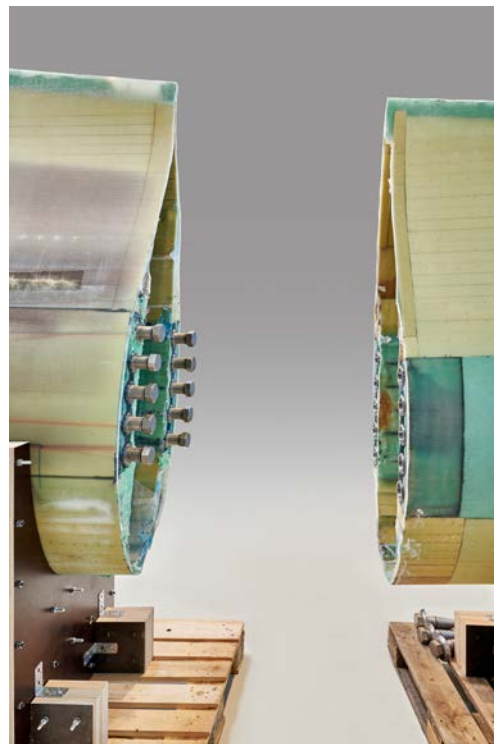
Autoren:

Dr.-Ing. Arne Hindersmann
Dipl.-Ing. Michael Kühn



Verschraubungstest der
einzelnen Verbindungsele-
mente

*Bolting test of the individu-
al connecting elements*



Verbindungsstelle der
einzelnen Rotorblattseg-
mente

*Connection point of the
individual rotor blade
segments*

Darauf kommt es an

Die üblicherweise in einer GFK-Sandwich-Halbschalenbauweise gefertigten Rotorblätter unterteilen sich in ein Tip- und ein Wurzelsegment. Die Positionierung der Verbindungselemente in den Halbschalen und die Verklebung der Halbschalen sind mit Toleranzen verbunden. Die einzelnen Toleranzen addieren sich und es gilt, diese aufzufangen. Da das Zusammenfügen der Blatthälften erst am Turm stattfindet, müssen die Verbindungselemente der Bauteile während der Infusion, der Aushärtung und der Halbschalenverklebung in Position bleiben. Unterstützt wird dies zum einen durch eine Positioniervorrichtung und zum anderen durch eine bewegliche optische Messzelle. Die Messzelle ist unter anderem mit einem Laserlichtschnittsensor ausgestattet, wodurch im Fertigungsprozess die Ermittlung der Laminatdicke gelingt. Das Einmessen der Positioniervorrichtung erfolgt mit einer CNC-gefrästen Schablone, die dem Rotorblattquerschnitt an der Verbindungsstelle entspricht. Die Positionsüberprüfung funktioniert durch ein Probeklappen der Halbschalen. Somit sind mit einem einfachen Hilfsmittel die genauen Positionen der Verbindungselemente sichergestellt und Toleranzen minimiert.

DAS INSTITUT IM DETAIL

The institute in detail

Mikrogebohrte Titanhaut
Micro-drilled titanium skin

82

Abteilungen
Departments

88

Geschäftsfelder
Business areas

96

Strategiefelder
Strategic fields

100

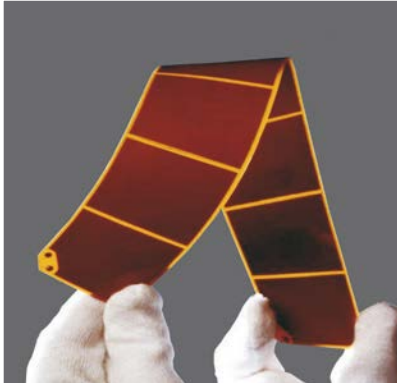
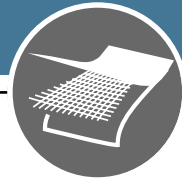
Veröffentlichungen 2019-2020
Publications

102

Patente 2019-2020
Patents

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 im Herstellungsprozess einzustellen. Für die Verbesserung matrixdominierter Eigenschaften nutzen wir verschiedene Dispergierungsverfahren zur Herstellung von Nanocompositen 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 Wissenschaftler-Teams fokussiert sich die Forschung auf folgende Bereiche:

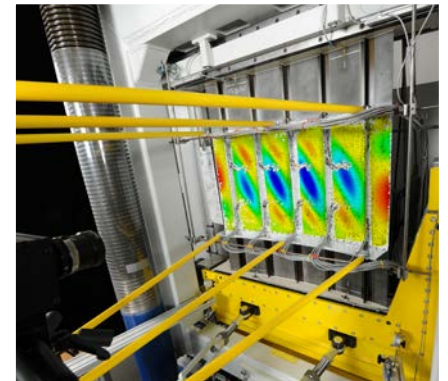
- Effiziente Entwurfsmethoden
- Innovative Prüf- und Messverfahren auf Bauteilebene
- Virtuelle Strukturen und digitaler Zwilling für den ganzen Lebenszyklus

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.

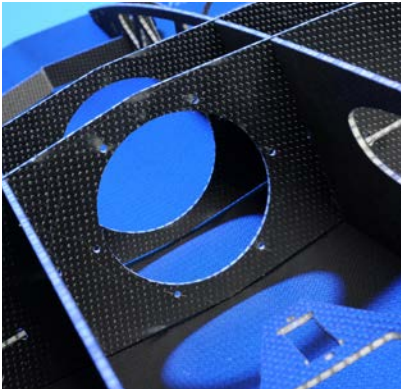


Abteilungsleiter:
Dr. Ing. Tobias Wille



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 essentiell 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.

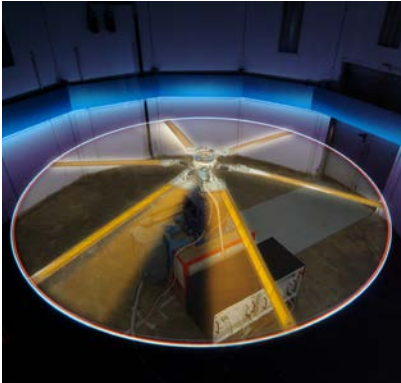


Abteilungsleiter:
Dr.-Ing. Markus Kleineberg



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 localized 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 new opportunities to build smart structures and is being developed within the department accordingly.



Abteilungsleiter:
Prof. Dr. Ing.
Hans Peter Monner



Dr. Ing. Johannes
Riemenschneider

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 Technology



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

Die Großanlagen des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP®) 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.

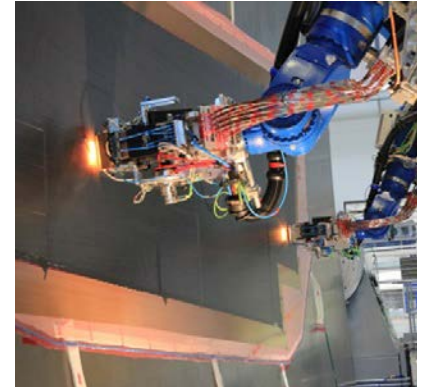
Kompetenzen

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. Jan Stüve





Geschäftsfelder

Business aeras

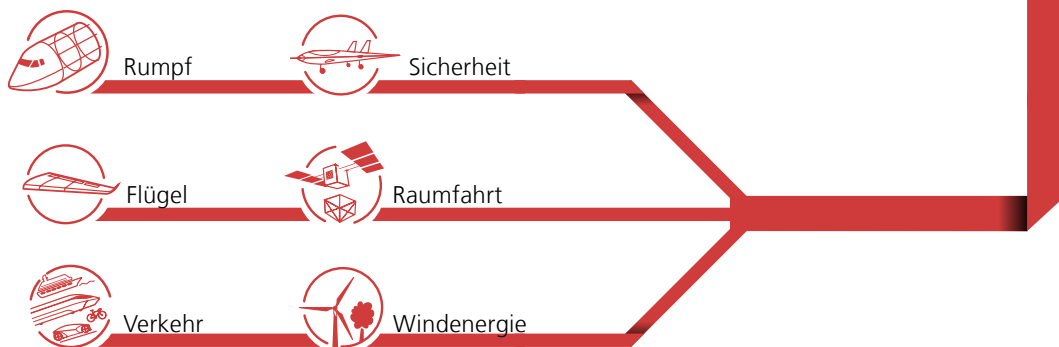
Flügelhaut aus Glasfaserstreifen und Kautschuk
Wing skin made of glass-fibre reinforced composite strips and rubber



Das Institut besitzt 6 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.

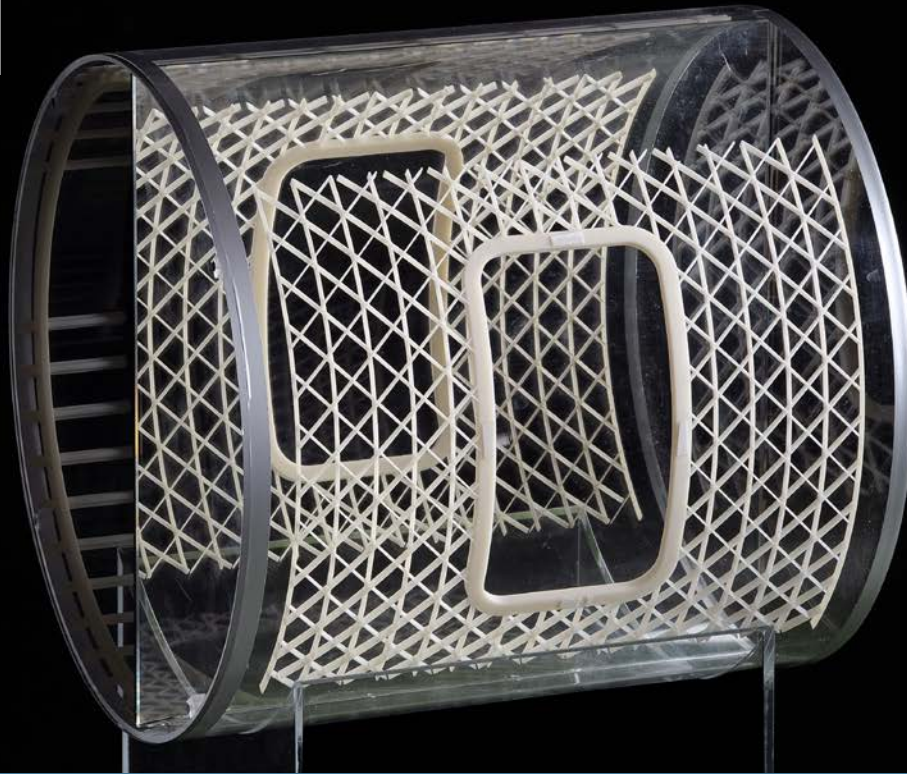
Die Anwendungsthemen der Geschäftsfelder sind:



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 will be 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 in 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. Janko Kreikemeier





Geschäftsfeld Sicherheit

Business area Security

Dem Geschäftsfeld Sicherheit sind sämtliche Luftfahrzeuge und deren Strukturkomponentenzugeordnet, die nicht als klassische Großkomponente – 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.

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.



Geschäftsfeldleiter:
Dipl.-Ing. Michael Hanke



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-Wissenschaftler in dem Projekt EXACT.

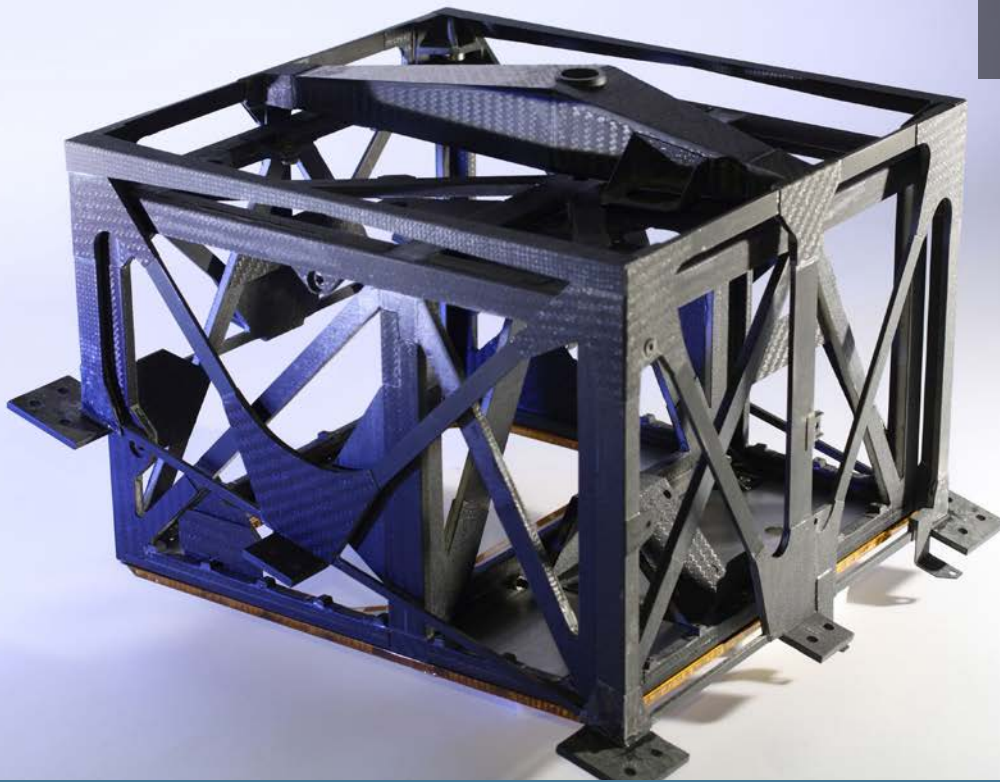
Im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms Horizon 2020/Clean Sky 2 hat das Projekt HLFC-Win (Hybrid Laminar Flow Control on the Wing) die Reduktion des Widerstands zum Ziel. Zukünftige Tragflächen sind voraussichtlich kleiner und smarter. In den Flügel integriert sind Absaugsysteme zur Laminarhaltung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

In einem Forschungsprojekt des Luftfahrtforschungsprogramms, dem Projekt ELWIS-Alive (Automatisierte Faserlegeprozesse und Infusionsverfahren für die 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. Daniel Stefaniak



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.

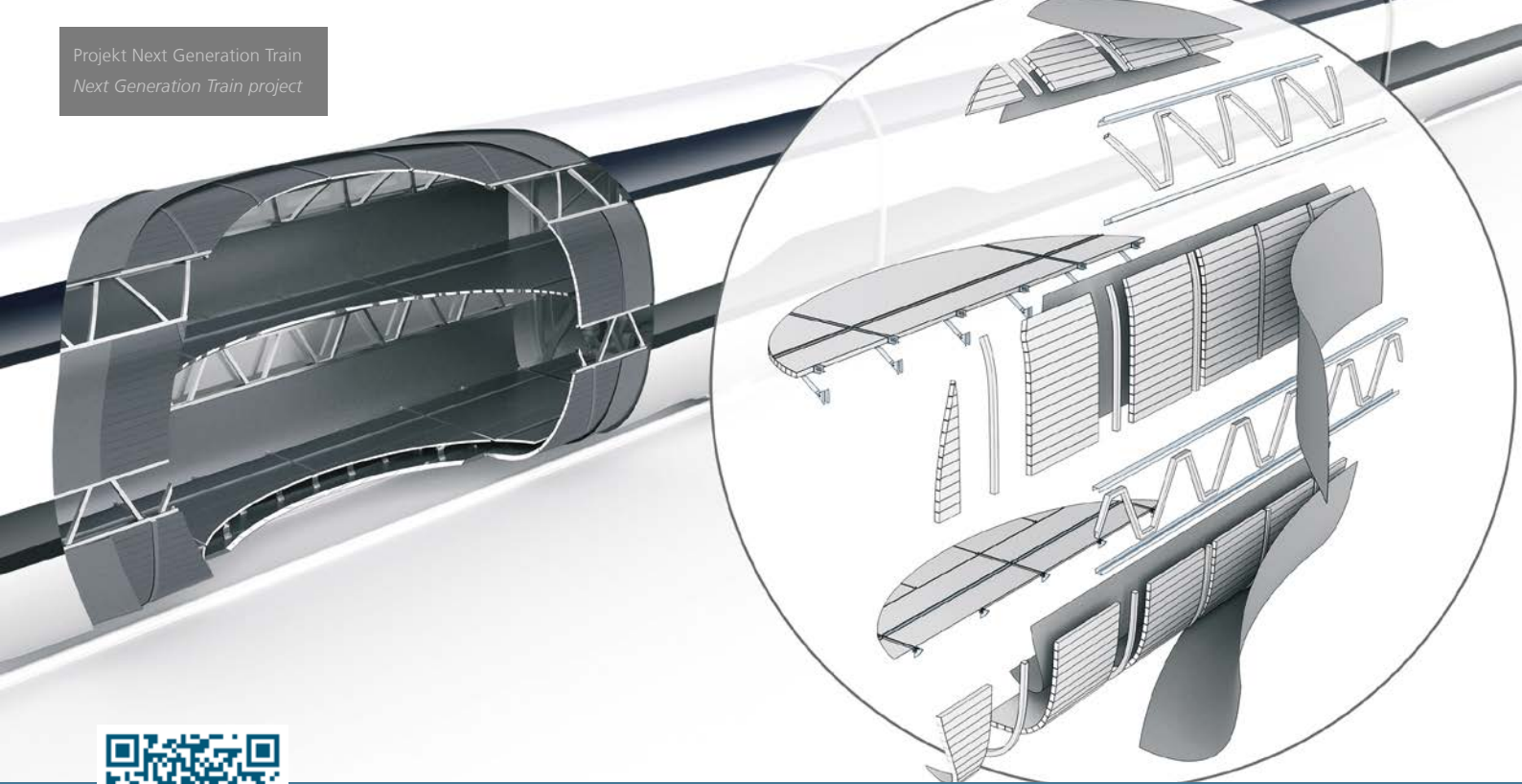
Im Bereich des Raumtransports erforscht das Institut hybride Verbindungselemente sowie hochbelastbare Strukturen für neuartige Startsysteme. Zukünftig sollen die Raumfahrtstrukturen des Instituts zudem smarter werden: „Sensieren“, „Reagieren“ und „Heilen“ sind Schlagworte zu diesem Ansatz. Das Ziel sind 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 and DLR research missions. Therefore, a large portion of our work focuses on spacecraft and landers for the exploration of the solar system. Notable examples are “Philae”, which landed on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko and the space probe “MASCOT” about to land on the asteroid Ryugu. Tailored design concepts and new production processes are routinely developed to yield the structures required for satellites and interplanetary missions. The second major field of work is the development of ultralight deployable structures such as very large solar generators, solar sails, and large deployable antennas. In fact, the institute is a worldwide leader in the design of unique and innovative deployable structures. Thirdly, in the field of space transport, the institute is conducting research on a number of levels from hybrid connections to high-performance load-bearing structures for new vehicles. In the future, the space structures will be intelligent with qualities such as “sensitive”, “reactive” and “healing”. The ultimate goal is a set of structures that are aware of their state and react autonomously to external influences.



Geschäftsfeld Verkehr

Business area Transport

Summary

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



Geschäftsfeldleiterin:
Dr.-Ing. Caroline Lüders

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

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

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

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

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

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



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

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



Geschäftsfeldleiterin:
Wibke Exner, 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.

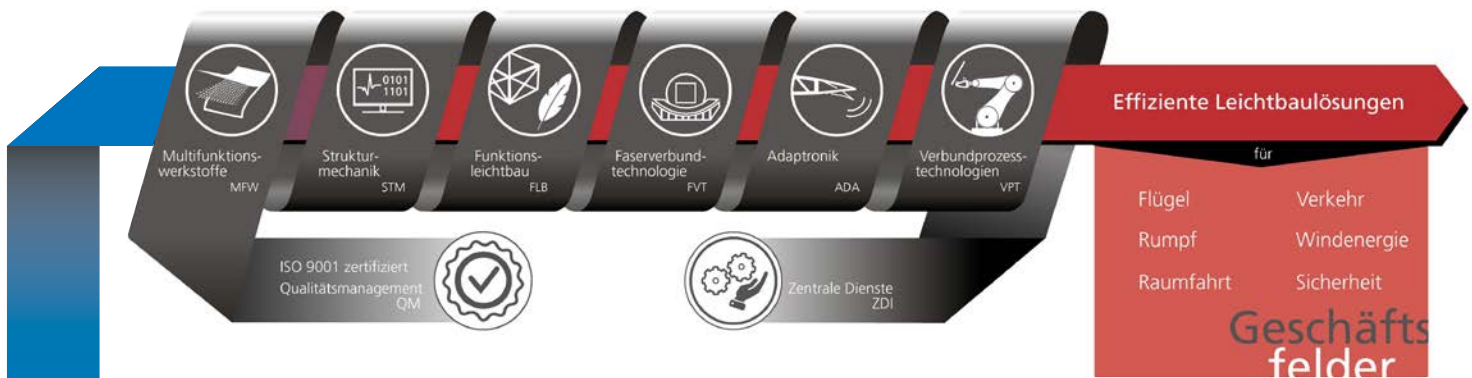
The project topics of the business area range from the investigation of fatigue-optimised and functional materials via design, sizing and quality-controlled production to research on systems for load alleviation or structure monitoring. Aspects like recycling and life cycle analysis complete the portfolio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

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

Laboraufbau aus dem Projekt ENDLOSEFFEKT
Laboratory setup from the project ENDLOSEFFEKT

Strategiefelder

Strategic fields



Für die Erschließung neuer und gesellschaftlich relevanter Forschungsthemen auf allen TRL*-Ebenen investiert unser Institut in vier Strategiefelder, aus denen sowohl Basisinnovationen als auch Querschnittsanwendungen hervorgehen. Die Strategiefelder identifizieren die wichtigsten Entwicklungsbedarfe, indem sie die großen Strömungen der wirtschaftlichen Entwicklung und gesellschaftlichen Anforderungen erfassen und analysieren. Sie entwerfen Strategien für die wissenschaftliche Fähigkeitsentwicklung in Themengebieten, die für das Institut von Bedeutung sind. Es erfolgen die Clusterrung dieser Themengebiete und letztlich eine langfristige Ausrichtung der Forschung. Die Strategiefelder sind daher sowohl Initiatoren für Projekte in den Abteilungen und Geschäftsfeldern als auch Motoren zur Weiterentwicklung der Institutskompetenzen, wodurch sie einen maßgeblichen Einfluss auf große Investitionen des Instituts haben.

Die Entwicklung der Strategiefelder ist ein partizipativer Prozess, an dem unsere MitarbeiterInnen aus allen Abteilungen beteiligt sind. Koordiniert werden die Strategiefelder durch Strategiefeld-Paten aus dem Kreis der Abteilungsleiter.

- Vom Gesamtentwurf bis zur Zertifizierung
- Digitalisierung und Industrie 4.0
- Kreislaufwirtschaft im Leichtbau
- Additive Composite Structures – AddCompS™

Diese vier Strategiefelder sind an der Luftfahrt- und der Gesamtstrategie des DLR ausgerichtet, die mit ihren Leitkonzepten und Programmthemen eine umweltschonende und effiziente Luftfahrtforschung vorantreiben – unterstützt durch den Systemleichtbau unseres Instituts.

For the development of new and socially relevant research topics at all technology readiness levels, our institute invests in four strategic fields, from which both basic innovations as well as cross-sectional applications emerge. The strategy fields identify the most important development needs by recording and analysing the major trends in economic development and social requirements. They design strategies for the development of scientific skills in subject areas that are important to the institute. These subject areas are clustered and, ultimately, research is geared towards the long term. The strategic fields are therefore both initiators for projects in the departments and business areas as well as drivers for the further development of the institute's competencies, which means that they have a significant influence on large investments by the institute.

*TRL: Technology Readiness Level (Technologie-Reifegrad)

Strategiefelder

Kreislaufwirtschaft im Leichtbau

Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach

Eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen und die Vermeidung von Umweltschäden ist eine der größten Herausforderungen, denen sich unsere Gesellschaft gegenüber sieht. In der Nutzungsphase leisten Leichtbaustrukturen einen entscheidenden Beitrag, den Treibstoffverbrauch in allen Mobilitätsbereichen, insbesondere in der Luftfahrt, zu senken. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft adressiert darüber hinaus den gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Faserverbundstrukturen sind derzeit vorwiegend für eine einmalige Nutzung vorgesehen. Das Ziel unserer Forschung in diesem Strategiefeld ist daher, Technologien zu entwickeln und zu bewerten, die vom Werkstoff über die Konstruktion und Produktion bis zur Wiederverwertung neue Wege ohne Abfälle und Emissionen aufzeigen.

Closed-loop economy in lightweight construction

Sustainable use of resources and the avoidance of environmental damage is one of the biggest challenges facing our society. In the operational phase, lightweight structures make a key contribution to lowering fuel consumption in all fields of mobility, particularly in aviation. Furthermore, the concept of a closed-loop economy addresses the entire life cycle of a product. At present, fibre composite structures are mainly intended for onetime use. Therefore, our research in this strategic field aims at developing and assessing technologies that break new ground without waste and emissions from material to construction and production through to recycling.



Vom Gesamtentwurf bis zur Zertifizierung

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Tobias Wille

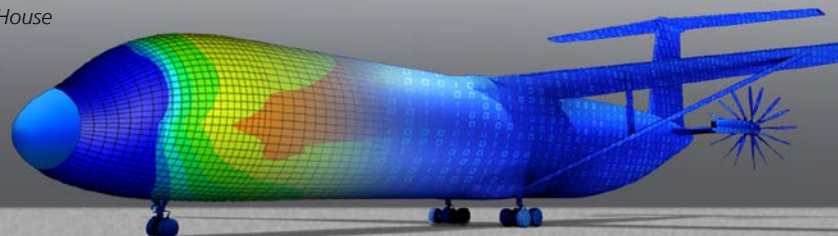
Die Fähigkeit zur ganzheitlichen Simulation und Zulassung von Komponenten und Technologien sowie deren Integration in das Gesamtflugzeug ist ein strategisches Ziel des DLR. Der Anspruch dabei ist hoch, denn der multidisziplinäre Forschungsweg muss verschiedene Themenfelder integrieren und den gesamten Lebenszyklus einschließlich Produktion, Wartung, Reparatur und Betrieb von Beginn an berücksichtigen.

Unser Institut unterstützt dieses strategische Ziel aktiv mit einem Strategiefeld, in dem der Systemleichtbau vom Gesamtentwurf des Flugzeugs bis zu dessen Zertifizierung erforscht wird. Mit seinen Kernkompetenzen stellt es neue Methoden und Werkzeuge für eine effiziente Strukturentwicklung und Bewertung bereit, wie beispielsweise im Virtuellen Produkt Haus (VPH) in Bremen.

From overall design to certification

To be capable of holistic simulation and approval of components and technologies as well as their integration in the overall aircraft is a strategic goal of DLR. This is an ambitious goal since the multidisciplinary research approach must integrate different topic areas and take into consideration the entire life cycle including production, maintenance, repair and operation from the very beginning.

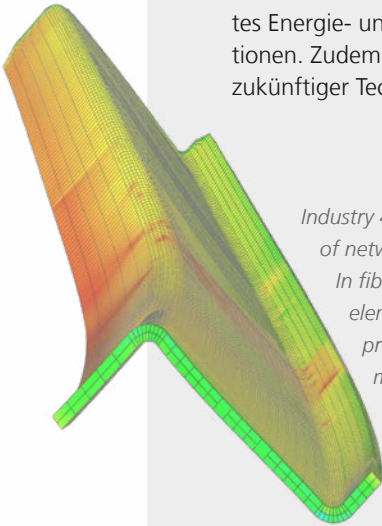
Our institute actively supports this strategic goal with a strategic field researching on system lightweight construction from the overall design of the aircraft up to its certification. With its core competencies, the institute provides new methods and tools for efficient structural development and assessment like, for example, in the Virtual Product House (VPH) in Bremen.



Industrie 4.0 ist die Digitalisierung der Produktion und die Digitalisierung bezeichnet den zunehmenden Einsatz vernetzter, digitaler Technologien in unserer Gesellschaft. Im Faserverbundleichtbau und in der Adaptronik ist die Digitalisierung das entscheidende Kernelement bei der ganzheitlichen Verknüpfung von Entwicklung, Produktion, Betrieb und Verwertung. Unser Institut hat daher ein Strategiefeld eingerichtet, das KI-basierte Methoden zur intelligenten und statistischen Auswertung von Simulations- und Messdaten entwickelt. Neue Zusammenhänge werden dadurch identifiziert und Potenziale zur Effizienzsteigerung aufgezeigt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wächst die Wissensdatenbank in unserem Institut dadurch kontinuierlich an. Dieses Strategiefeld unterstützt den effizienten Systemleichtbau nachhaltig:

Für die Produktion ergeben sich verkürzte Taktzeiten, hohe Reproduzierbarkeiten, ein effizientes Energie- und Ressourcenmanagement sowie detaillierte und automatisierte Dokumentationen. Zudem dient dieses Strategiefeld darüber hinaus der Qualifikation und Zertifizierung zukünftiger Technologien.

Digitalisation and Industry 4.0



Industry 4.0 stands for the digitalisation of production, and digitalisation means the increasing use of networked digital technologies in our society.

In fibre composite lightweight construction and adaptive systems, digitalisation is the key element in the holistic conjunction of development, production, operation, and further processing. Therefore, our institute has established a strategic field that develops AI-based methods for intelligent and statistical evaluation of simulation and measurement data. This serves to identify new correlations and reveals potentials for increasing efficiency. With the insights gained, the knowledge database in our institute keeps continuously growing. This strategic field sustainably supports efficient system lightweight construction:

The effects on production are shortened cycle times, high reproducibility, efficient energy and resources management as well as detailed and automated documentation. Moreover, this strategic field enables the qualification and certification of future technologies.

Additive Composite Structures – AddCompS™

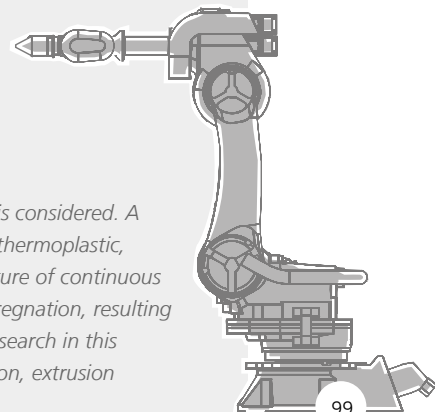
Das Ziel dieses Strategiefelds ist die Steigerung von Fertigungseffizienz durch Kombination von herkömmlichen Faserverbund-Fertigungsverfahren mit additiver Fertigung - insbesondere der additiven Extrusion.

Dabei wird die gesamte Prozesskette vom Design bis hin zur qualitätsgesicherten Fertigung betrachtet. Besondere Beachtung erfahren hierbei die Funktionalisierung von Materialien und die additive Generierung von thermoplastischen, endlosfaserverstärkten Strukturen mittels additiver Extrusion sowie die Erzeugung von endlosfaserverstärkten Halbzeugen oder Freiformstrukturen auf Grundlage einer In-situ-Imprägnierung, wodurch Hochleistungsbauteile aus kostengünstigen Halbzeugen entstehen. Die Forschungsarbeiten dieses Strategiefelds schließen die Themengebiete Prozessintegration, Materialentwicklung und -charakterisierung, Extrusionstechnologie, Qualitätssicherung, Simulations- und Konstruktionsmethodik ein.

Additive Composite Structures – AddCompS™

The goal of this strategic field is to increase production efficiency by combining conventional composite structure manufacturing processes with additive manufacturing – particularly additive extrusion.

In doing so, the entire process chain from design to quality-assured manufacturing is considered. A special focus is on the functionalisation of materials and the additive generation of thermoplastic, continuous fibre-reinforced structures by means of additive extrusion, the manufacture of continuous fibre-reinforced semi-finished products or free form structures based on in-situ impregnation, resulting in high-performance components made of cost-effective semi-finished products. Research in this strategic field includes process integration, material development and characterisation, extrusion technology, quality assurance as well as simulation and construction methods.



VERÖFFENTLICHUNGEN 2019/2020

Publications 2019/2020

Ausgewählte Veröffentlichungen

Koord, Josef und Stüven, Jan-Lukas und Petersen, Enno und Völkerink, Oliver und Hühne, Christian (2020) *Investigation of exact analytical solutions for circular notched composite laminates under tensile loading.* Composite Structures. Elsevier. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112180 ISSN 0263-8223

Petersen, Enno und Kappel, Erik und Koord, Josef und Völkerink, Oliver und Hühne, Christian (2020) *Determination of stresses, strains and failure types in multidirectional laminates under pure bending.* Journal of Composite Materials, 002199832093230. Sage Publications. DOI: 10.1177/0021998320932301 ISSN 0021-9983

Völkerink, Oliver und Petersen, Enno und Koord, Josef und Hühne, Christian (2020) *A pragmatic approach for a 3D material model considering elasto-plastic behaviour, damage initiation by Puck or Cuntze and progressive failure of fibre-reinforced plastics.* Computers & Structures, 236 (106280). Elsevier. DOI: 10.1016/j.compstruc.2020.106280 ISSN 0045-7949

Bogenfeld, Raffael Marius und Schnmiedel, Patrik und Kuruvadi, Naren und Wille, Tobias und Kreikemeier, Jan-ko (2020) *An experimental study of the damage growth in composite laminates under tension-fatigue after impact.* Composites Science and Technology (191). Elsevier. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108082 ISSN 0266-3538

Lüders, Caroline (2020) *Nonlinear-elastic orthotropic material modeling of an epoxy-based polymer for predicting the material behavior of transversely loaded fiber-reinforced composites.* Journal of Composites Science, 4 (46). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). DOI: 10.3390/jcs4020046 ISSN 2504-477X

Lüders, Caroline und Kalinka, Gerhard und Li, Wei und Wille, Tobias und Sinapius, Michael (2020) *Experimental and numerical multiscale approach to thermally cycled FRP.* Composite Structures, 244. Elsevier. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112303 ISSN 0263-8223

Rohwer, Klaus (2020) *Insight from a NAFEMS*

technical fellow. BENCHMARK - the International Magazine for Engineering Designers & Analysts (1), Seiten 70-71. ISSN 0951 6859

Düring, Denise und Petersen, Enno und Stefaniak, Daniel und Hühne, Christian (2020) *Damage resistance and low-velocity impact behaviour of hybrid composite laminates with multiple thin steel and elastomer layers.* Composite Structures, 238. Elsevier. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111851 ISSN 0263-8223

Kappel, Erik und Prussak, Robert (2019) *On abnormal thermal-expansion properties of more orthotropic M21E/IMA carbon-fiber-epoxy laminates.* Composites Communications, 17, Seiten 129-133. Elsevier. DOI: 10.1016/S2452213919301792 ISSN 2452-2139

Hindersmann, Arne (2019) *Experimental investigation of a method to avoid channel marks during vacuum infusion.* Journal of Composite Materials. Sage Publications. DOI: 10.1177/0021998319889120 ISSN 0021-9983

Beyland, Lutz (2019) *Innovativer Blattanschluss für extrem lange Rotorblätter.* Ingenieurspiegel, 2019 (4), Seiten 26-28. Hanse-Aerospace Wirtschaftsdienst GmbH. ISSN 1868-5919

Delovski, Toni und Düvel, Catherin Fiona und Greif, Fabian und Heidecker, Ansgar und Kottmeier, Sebastian und Mierheim, Olaf und Nohka, Falk und Orlowski-Feldhussen, Fabian (2019) *EU:CROPIS AIV program: challenges and solutions for a spin-stabilized satellite containing biology.* International Journal of Aerospace Engineering, 2019. Hindawi Publishing Corporation. DOI: 10.1155/2019/9190329 ISSN 1687-5974

Sloan, Jeff und Sämman, Philipp und Delisle, Dominik Peter Patrick und Krombholz, Christian (2019) *Modular, mobile, multiple robotics poised to change the AFPIATL paradigm.* CompositesWorld. Gardner Business Media, Inc.. ISSN 2376-5232

Ecker, Tobias und Karl, Sebastian und Dumont, Etienne und Stappert, Sven und Krause, Daniel (2019) *Numerical study on the thermal loads during a supersonic rocket retropropulsion maneuver.* Journal of Spacecraft and Rockets, Seiten 1-16. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). DOI: 10.2514/1.A34486 ISSN 0022-4650

Zocca, Andrea und Lüchtenborg, Jörg

und Mühler, Thomas und Wilbig, Janka und Mohr, Gunther und Villatte, Thomas und Léonard, Fabien und Nolze, Gert und Sparenberg, Marc und Melcher, Jörg und Hilgenberg, Kai und Günster, Jens (2019) *Enabling the 3D printing of metal components in μ gravity.* Advanced Materials Technologies, 4 (10). Wiley. DOI: 10.1002/admt.201900506 ISSN 2365-709X

Vasista, Srinivas und Riemenschneider, Johannes und Keimer, Ralf und Monner, Hans Peter und Nolte, Felix und Horst, Peter (2019) *Morphing wing droop nose with large deformation: Ground tests and lessons learned.* aerospace, 6 (10), Seite 111. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). DOI: 10.3390/aerospace6100111 ISSN 2226-4310

Ucan, Hakan; et al. (2019) *Automated, quality assured and high volume oriented production of fiber metal laminates (FML) for the next generation of passenger aircraft fuselage shells.* Science and Engineering of Composite Materials, 2019 (26), Seiten 1-7. de Gruyter. DOI: 10.1515/secm-2019-0031 ISSN 0792-1233

Sprowitz, Tom und Banik, Udayan und Grundmann, Jan Thimo und Haack, Frederik und Hillebrandt, Martin und Martens, Hauke und Meyer, Sebastian und Reershemius, Siebo und Reininghaus, Nies und Sasaki, Kaname und Seefeldt, Patric und Sergeev, Oleg und Spietz, Peter und Sznajder, Maciej und Toth, Norbert und Vehse, Martin und Wippermann, Torben und Zander, Martin E. (2019) *Concept for a Gossamer solar power array using thin-film photovoltaics.* CEAS Space Journal. Springer. DOI: 10.1007/s12567-019-00276-6 ISSN 1868-2502

Kappel, Erik und Albrecht, Michael (2019) *A controlled recipient evacuation process to form composite profiles from flat multi-angle prepreg stacks – Infrastructure and C-profile verification.* Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science, Seiten 1-15. Taylor & Francis. DOI: 10.1080/20550340.2019.1660455 ISSN 2055-0340

Ausgesuchte Konferenzbeiträge

Liebers, Nico und Opitz, Mark und Bertling, Dominic (2020) *Towards smart production: Sensors, information flow, architecture and analysis*. LightCon Preview Week, 26. Jun. 2020, Deutschland

Wunderlich, Tobias und Dähne, Sascha und Reimer, Lars und Schuster, Andreas und Brodersen, Olaf (2020) *Global aero-structural design optimization of more flexible wings for commercial aircraft*. AIAA AVIATION 2020 Forum, Virtual Event, 2020, 15.-19. Juni 2020, Virtuelle Konferenz.
DOI: 10.2514/6.2020-3170

Liebers, Nico und Bertling, Dominic (2020) *Auf dem Weg zur smarten Fertigung - Sensoren, Datenfluss, Architektur und Auswertung*. Bitkom & BDL: „Smart Factory – Wie verändern IoT und Sensorik die Produktion und Logistik in der Luftfahrt?“, 13. Mai 2020, Deutschland

Hölscher, Bernd-Christian und Algermissen, Stephan und Hesse, Christian und Sinapius, Michael (2020) *Versuchsträger zur experimentellen aktiven Minderung der Schalleinstrahlung zylindrischer Strukturen*. DAGA 2020, 16. - 19. März 2020, Hannover, Deutschland.

Kokott, Alexander und Haase, Thomas und Monner, Hans Peter (2020) *Numerical investigation towards the control of flexural waves using structural intensity for an active barrier of structure-borne sound*. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 11376. SPIE - The International Society for Optical Engineering. SPIE Smart Structures and NDE 2020, 27. Apr. - 01. Mai 2020, Anaheim, CA, USA. DOI: 10.1117/12.2558100 ISBN 978-151063529-6 ISSN 0277-786X

Schollerer, Martin und Kosmann, Jens und Holzhüter, Dirk und Bello-Larroche, Carlos und Hühne, Christian (2020) *Surface toughening – An industrial approach to increase the robustness of pure adhesive joints with film adhesives*. 1st International Conference on Industrial Applications of Adhesives 2020, 05.-06.03.2020, Madeira, Portugal.
ISBN 978-989-9017-17-7

Trampe, Lars und Wierach, Peter und Moix-

Bonet, Maria und Schmidt, Daniel (2020) *Structural-health-monitoring System für den Einsatz in Faserverbundstrukturen in Schienenfahrzeugen*. 17. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, Dresden, Deutschland.

Voß, Arne und Handojo, Vega und Weiser, Christian und Niemann, Steffen (2020) *Preparation of loads and aeroelastic analyses of a high altitude, long endurance, solar electric aircraft*. AEC2020 Aerospace Europe Conference, 25-28 February 2020, Bordeaux, France.

Haase, Thomas und Toso, Yves und Garbade, Marc und Adam, Till Julian und Kolbe, Andreas und Nguyen, Duy Chinh und Bäns, Constantin und Ortiz, Roland (2019) *Manufacturing and reinforcement technologies for the next generation aircraft rear-end*. Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress, 30. Sept - 02. Okt. 2019, Darmstadt.

Stüve, Jan und Kleineberg, Markus (2019) *Trends in the manufacturing of composite aerospace components and resulting demands for machining technologies*. 19th Machining Innovations Conference 2019 for Aerospace Industry, 27.-28.11.2019, Hannover.

Petersen, Jan und Geier, Sebastian (2019) *Structural energy storage for space application*. SCON 2nd International Conference on Materials Science and Engineering, 18.-19. Nov. 2019, Amsterdam, Niederlande.

Bachmann, Jens und Yi, Xiaosu (2019) *EU/China research on ECO-COMPOSITES for aviation interior and secondary structures*. SCON 2nd International Conference on Materials Science and Engineering, 18.-19. November 2019, Amsterdam, Niederlande.

Stüve, Jan und Kleineberg, Markus (2019) *Human aided automation – A game changing chance for the aerospace industry*. JEC ASIA Conference 2019, 13.-15.11.2019, Seoul, Südkorea.

Liebers, Nico und Bertling, Dominic (2019) *Reducing NDT effort by coupled monitoring and simulation of liquid composite molding*

processes. In: NDT & E INTERNATIONAL. 11TH SYMPOSIUM ON NDT IN AEROSPACE, 13.-15. Nov. 2019, Paris, Frankreich.

Stüve, Jan und Kühn, Michael und Brohme, Lars und Zapp, Philipp (2019) *Projekt Smart-Blade2 – Ein innovatives DLR-Rotorblatt*. AG Faserverbund in der Windenergie, 24.10.2019, Aalen-Ebnat.

Hein, Robert und Monkiewitsch, Monika (2019) *Charakterisierung eines Harzsystemes am Beispiel RTM6 mittels DSC und DMA*. 3. Klebstoffseminar- Materialcharakterisierung und Prozessüberwachung, 22.10.-23.10.19, Jena.

Rose, Michael und Kokott, Alexander (2019) *On the calculation and control of structural intensities to reduce sound transmission through thin walled structures*. 30th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST2019), 07.-11. Okt. 2019, Montréal, Kanada.

PATENTE 2019/2020

Patents 2019/2020

Peinke, Joachim;

Riemenschneider, Johannes:

Rotorblatt mit adaptivem Vorflügel für eine Windenergieanlage,
DE 102012102746, 22.06.2020

Sinapius, Michael;

van der Wall, Berend Gerdes;

Riemenschneider, Johannes;
Keßler, Christoph; Radespiel, Rolf;
Scholz, Peter:

Aerodynamischer Profilkörper,
DE 102013104695, 27.02.2020

Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:

Faserhalbzeug-Ablegekopf,
EP 2821198, 13.05.2020,
[FR], [GB], [DE]

Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:

Faserhalbzeug-Temperiervorrichtung,
DE 102013107105, 02.07.2020

Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:

Faserhalbzeug-Fördervorrichtung,
DE 102013107106, 24.12.2019,
US 10632695, 28.04.2020

Unruh, Oliver; Haase, Thomas; Monner, Hans Peter; Pohl, Martin:

Aktives akustisches Schwarzes Loch zur Schwingungs- und Lärmreduktion,
DE 102015100442, 14.08.2020

Ückert, Christian; Steffen, Olaf:

Procédé et agencement d'assemblage pour relier un constituant de corps d'écoulement avec un ou plusieurs composants,
FR 3017668, 18.10.2019

Schmidt, Jochen; Kleineberg, Markus:

Faserverbundbauteil sowie Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,
FR 3025452, 27.09.2019

Knippschild, Lothar; Elsken, Thomas; Van de Kamp, Bram; Zollenkopf, Michael; Danneberg, Kai; Büchler, Dirk; Kintscher, Markus; Opitz, Steffen; Pohl, Martin; Geier, Sebastian; Bubbers, Andreas; Siebrecht, Thomas; Spardel, Holger; Thieme, Christian:

Flossenstabilisator und Wasserfahrzeug,
EP 2993118, 17.06.2020,
[FR], [GB], [IT], [DE], [NL]

Bock, Matthias; Kleineberg, Markus; Röstermundt, Dirk:

Harz imprägnierung trocken ummantelter Faserverbundkörper mittels hoher Drücke im vakuumunterstützten RTM-Prozess,
FR 1557968, 27.08.2015

Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:

Dipositif de préhension,
FR 3024066, 18.10.2019

Mendig, Christian:

Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen von Vereisung einer von einer Luftströmung angeströmten Oberfläche,
FR 3031499, 05.06.2020

Mahrholz, Thorsten; Geier, Sebastian:

Superkondensatoren mit ausgerichteten Kohlenstoffnanoröhren und Verfahren zu deren Herstellung,
US 10510494, 17.12.2019

Riemenschneider, Johannes;

Mendig, Christian; Sinapius, Michael;

Schulz, Martin; Endres, Matthias:
Vorrichtung zum Enteisen einer Oberfläche eines aerodynamischen Körpers,
DE 102015107275, 20.02.2020

Bach, Tobias; Steffen, Olaf; Kaps, Robert; Kleineberg, Markus; Düring, Denise; Hühne, Christian; Ückert, Christian:

Flügelstruktur für Flugobjekte,
US 10661886, 26.05.2020

Grohmann, Yannis; Zacharias, Fabian:

Fasertemperiereinrichtung, Faserapplizier-
vorrichtung, Faserlegeanlage sowie Verfahren
zum Temperieren,
DE 102016110323, 20.02.2020

Ückert, Christian; Steffen, Olaf:

Dispositif de mesure pour déterminer des angles de réglage, dispositif de réglage pour régler des angles de réglage, ainsi que procédé d'assemblage et procédé d'ajustement s'y rapportant,
FR 3043770, 22.11.2019

Bertling, Dominic:

Verfahren und Anlage zum Herstellen eines Faserverbundbauteils,
FR 3045449, 08.11.2019,
DE 102015122376, 21.11.2019

Krombholz, Christian; Nguyen, Duy Chinh:

Faserlegekopf und Faserlegeanlage sowie Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,
DE 102015121428, 31.10.2019

Steffen, Olaf; Kolbe, Andreas:

Verfahren zur Unterstützung der Montage eines Bauteils und Montageunterstützungssystem hierzu,
DE 102016106010, 13.08.2020

Pototzky, Alexander:

Kabelbaum für Fahrzeuge sowie Verfahren zu dessen Herstellung,
FR 3043832, 11.10.2019

Rudenko, Anton:

Fahrzeug mit einer im Bedarfsfall ausbildbaren Strömungsabrisskante,
FR 3054195, 25.10.2019

Nguyen, Duy Chinh; Krombholz, Christian:

Dispositif de pose de fibres,
FR 3044954, 25.10.2019

Forßbohm, Tobias; Kleineberg, Markus;

Buggisch, Manuel; Froese, Sarah:

Aerodynamischer Profilkörper für Flugobjekte,
DE 102016109026, 19.03.2020

Misol, Malte:

Wand mit einer durch rückwärtige Stege in Gitterfelder unterteilten Außenhaut und Flugobjekt,

[DE 102016115994](#), 10.06.2020

Grohmann, Yannis; Riederer, Pascal:

Tête de pose de fibres et procédé pour poser du matériau à base de fibres,

[FR 3050681](#), 08.11.2019

Liebers, Nico:

Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,

[DE 102016112263](#), 17.10.2019

Kintscher, Markus; Monner, Hans Peter:

Tragflügel mit Droop Nose und hybrider Laminarisierung der Strömung durch Absaugung sowie Verkehrsflugzeug mit einem Paar solcher Tragflügel,

[DE 102016121507](#), 02.07.2020,

[FR 3058387](#), 15.11.2019

Pohl, Martin:

Fertigungsanlage und Verfahren zur Herstellung eines Bauteils,

[EP 3345745](#), 15.01.2020, [FR], [DE],

[DE 102016123344](#), 23.07.2020

Kleineberg, Markus; Schmidt, Jochen;**Hühne, Christian:**

Bauteilstruktur und Verfahren zur Herstellung derselben,

[DE 102016124966](#), 24.09.2020

Algermissen, Stephan:

Plattenförmige Struktur und Verfahren zur Reduzierung der Schallabstrahlung,

[DE 102018102141](#), 26.09.2019

Al-Lami, Ali; Haschenburger, Anja:

Verfahren und Vorrichtung zum Erkennen einer Leckage,

[DE 102018105889](#), 10.10.2019

Hillebrandt, Martin; Zander, Martin;**Hühne, Christian:**

Vorrichtung zum Entfalten eines Mastes,

[US 10717628](#), 21.07.2020

Mahrholz, Thorsten;**Hauerding, Johannes:**

Faserverbundbauteil mit Zwischenlagen und Verfahren zu seiner Herstellung,

[EP 3552813](#), 01.07.2020,

[DK], [DE], [FR], [GB]

Misol, Malte; Titze, Maik;**Lehn, Andreas:**

Wand mit einer durch rückwärtige Rippen versteiften Außenhaut und Flugobjekt mit einer solchen Wand,

[DE 102018104542](#), 17.09.2020

Kolbe, Andreas:

Faserlegekopf, Faserlegeanlage sowie Verfahren zum Ablegen von Fasermaterial,

[DE 202019102097](#), 20.08.2020

Zapp, Philipp; Ucan, Hakan;**Grasse, Fabian; Grimm, Mathias:**

Vorrichtung zum Überwachen eines Herstellungsprozesses zur Herstellung eines Faserverbundbauteils,

[DE 202019101206](#), 16.07.2020

Völkerink, Oliver; Prussak, Robert;**Pototzky, Alexander; Hühne, Christian:**

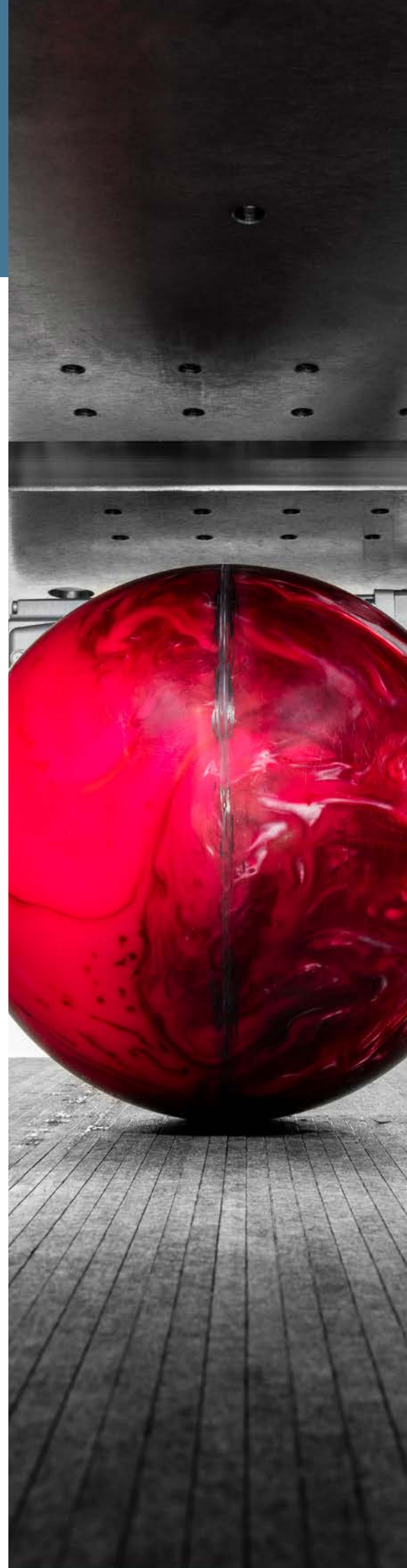
Faserverbundbauteil, Adaptereinheit, faseroptische Sensoreinrichtung und Herstellungsverfahren hierzu,

[DE 102019112876](#), 27.08.2020

Heilmann, Lennert:

Verfahren zur Herstellung eines Bauteils sowie Bauteil hierzu,

[DE 102019121592](#), 27.08.2020



Das DLR im Überblick

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

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

DLR at a glance

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

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

Impressum | Imprint

Herausgeber | *Publisher:*

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (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, Janina Schuster, Jörg Nickel, Malte Misol,
 Mark Opitz, Jens Bachmann, Christian Bülow, Christian Willberg

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, Marvin Diegeler, David Senkic, Marcel Soppa,
 Ulrich Natge | *Copyright:* DLR (CC-BY 3.0),
 soweit nicht anders angegeben | *unless otherwise stated*

Titelbild | *Cover image:*

Blick auf die Faser – Projekt ENDLOSEFFEKT, S. 44

View of the fibre – project ENDLOSEFFEKT, p. 44



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

Supported by:



Federal Ministry
 for Economic Affairs
 and Energy

on the basis of a decision
 by the German Bundestag

Projects supported by:



Federal Ministry
 for Economic Affairs
 and Energy



Federal Ministry
 of Defence

