

Innovationsbericht 2007

Institut für
Faserverbundleichtbau
und Adaptronik



Inhalt

Einrichtung zur Dehnungsmessung von
CNT-Schichten in Dickenrichtung



Vorwort	
Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach, Prof. Dr. Michael Sinapius	4
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik	6
Schnelle Berechnung der Impactresistenz von Sandwichschalen	
Dipl.-Ing. Luise Kärger	8
Induktives Preformen	
Dipl.-Ing. Tobias Ströhlein, Dipl.-Ing. Markus Kleineberg, Dipl.-Ing. Michael Frauenhofer (IFS/TU-Braunschweig)	10
Kombination der Prepreg- und Harzinjektionstechnologie	
Dipl.-Ing. Robert Kaps	12
Piezokeramische Wabenaktuatoren	
Dr. Jörg Melcher et.al.	14
Belastungsprobe für ein aktives Hubschrauberrotorblatt	
Dipl.-Ing. Peter Wierach	15
Structural Health Monitoring mit Ultraschall-Lambwellen an einem Hubschrauberheckteil	
Dr. Wolfgang Hillger	16
Modellbildung von CNT basierten Aktuatoren	
Dipl.-Ing. Johannes Riemenschneider, Dipl.-Ing. Steffen Opitz	18
Leistungssteigerung durch Nanokomposite	
M.Sc. Christine Arlt, Dipl.-Ing. Dirk Röstermundt, Dr. Thorsten Mahrholz, Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Mosch, Dipl.-Ing. Alexandra Fischer, Dr. Ulrich Riedel	20
Mikrowellengestützte Autoklavprozessierung	
Dipl.-Ing. Maksim Podkorytov	22
Lokale Hybridwerkstoffe: die starken Sehnen des Faserverbundleichtbaus	
Dipl.-Ing. Axel Fink, Dr. Boris Kolesnikov, Dr. Lars Herbeck	23
Entfaltbare, ultraleichte Membranantennen	
Dipl.-Ing. Christoph Sickinger	24
GEP-Strukturen für die ExoMars-Mission	
Dr. Joachim Block	26
Experimentelle Validierung von 3-D-Versagenskriterien	
Dipl.-Ing. Daniel Hartung, Dipl.-Phys. Hans Christian Goetting	27
Robuste Regelung von Leichtbaurobotern mit adaptiven Komponenten	
Dipl.-Ing. Stephan Algermisen	28
Publikationen und Patente 2006 - 2007	29
Impressum	31

Vorwort

Der Wissenschaftstag 2007 des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik setzt seinen Schwerpunkt in diesem Jahr auf Verfahren für die Produktion von luftfahrttauglichen Bauteilen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen von der Manufaktur bis zur Serienproduktion. Hierzu finden Sie neue Ansätze auch in diesem Innovationsbericht, z. B. zu den Themen Induktives Preforming, Hybride Fertigungstechnologien oder Mikrowellenprozessierung von Faserverbunden. Insbesondere zum letztgenannten Thema setzte das Institut im zurückliegenden Jahr mit der Aufstellung des weltweit ersten Mikrowellenautoklaven einen wichtigen Meilenstein.

Genießen Sie mit mir weitere in unserem Innovationsbericht zusammengestellte Neuigkeiten aus den Bereichen der Faserverbundtechnologie, der Strukturmechanik der Faserverbunde und der Adaptronik. So berichten wir über unsere neuesten Entdeckungen im Bereich der Nanotechnologie mit wichtigen Erkenntnissen bei der Erforschung der Aktivierbarkeit von Carbon-Nanotubes, sowie zu den Wirkungsmechanismen nanoskaliger Matrixadditive in Faserverbunden. In diesem Jahr starteten wir ein Projekt mit der TU Clausthal zur Herstellung wabenförmiger piezokeramischer Aktuatoren, erstmals unter Nutzung eines selbstorganisierten Prozesses. Von den Projektergebnissen erhoffen wir uns wichtige Erkenntnisse für strukturkonforme Flächenaktuatoren in Anwendungen der Adaptronik. Der Bericht zeigt hierzu erste Ergebnisse. Die grundlegenden Arbeiten wurden im BMBF-Ideenwettbewerb "Bionik - Innovationen aus der Natur" in diesem Jahr mit einem Forschungspreis von 500 T € ausgezeichnet.

Außerdem berichten wir über Fortschritte in der Forschung zur integrierten Bauteilüberwachung mit Hilfe der Lambwellenanalyse. Im EU-Projekt AISHA realisierten wir mit unseren Partnern erstmals ein solches System für den Heckausleger einer EC135.

Das mittels neuer Flächenaktuatoren aktiv verwindbare Rotorblatt wurde in diesem Jahr in Schleudertests qualifiziert, die aktive Verwindung auch bei Nenn Drehzahlen nachgewiesen. Dieses ist ein wichtiger Meilenstein zur Schwingungs- und Lärmunterdrückung von Hubschraubern mit Hilfe der Adaptronik.

Aus den Fortschritten im Sonderforschungsbereich 562 der Deutschen Forschungsgemeinschaft, an dem unser Institut in drei Teilprojekten beteiligt ist, berichten wir über neuartige adaptive Regelungskonzepte zur Schwingungsunterdrückung von hochbeschleunigten Komponenten von Parallelrobotern.

Schließlich präsentieren wir unsere aktuellen Beiträge zum Raumfahrtprogramm des DLR: die im letzten Jahr entwickelten Mechanismen zu ultraleichten, entfaltbaren Membranantennen und das Konzept für die Trägerstruktur für die geophysikalischen Experimente im Rahmen der geplanten europäischen Marsmission ExoMars.

Ich wünsche Ihnen beim Durchblättern und Lesen viel Vergnügen und danke an dieser Stelle ganz besonders allen Autoren



Prof. Dr.-Ing. habil. E. Breitbach

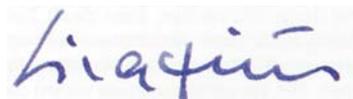
Widmung

Der Innovationsbericht 2007 des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik ist dem Leiter des Instituts, Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Elmar Breitbach gewidmet. Nach 15 Jahren als Spiritus Rector, als Motor, als Ideengeber, als Förderer des wissenschaftlichen Nachwuchses verabschiedet er sich in diesem Jahr als Direktor des Instituts.

In seinem langen Wirken im DLR hat Prof. Breitbach die wissenschaftliche Arbeit der Forschungseinrichtung mitgestaltet und die Unternehmenskultur ganz wesentlich geprägt. Sehr frühzeitig hat er die Ausrichtung der Forschung auf gesellschaftlich relevante Fragestellungen und industrielle Anforderungen betrieben, was an einem hohen Drittmittelaufkommen seines Instituts einerseits und an dem Aufgreifen aktueller und neuer Forschungsthemen andererseits abzulesen ist. Prof. Breitbach hat Forschungsschwerpunkte wie die strukturdynamische Qualifikation großer Raumfahrtstrukturen und die Adaptronik ins DLR geholt und etabliert. Er hat es darüber hinaus verstanden, die wertvollen Erkenntnisse und Erfahrungen auf den traditionellen Forschungsgebieten des Instituts zur pflegen und anwendungsbezogen weiterzuentwickeln. Prof. Breitbach gelang es, die verstärkte Drittmittelinwerbung mit einem hohen Anspruch an die wissenschaftliche Qualität der Arbeiten zu verbinden. Das zeigt die große Zahl an Doktoranden, die er in seiner Zeit als Direktor des Instituts betreut und zum erfolgreichen Abschluss geführt hat. Von der wissenschaftlichen Exzellenz des von Prof. Breitbach geführten Instituts zeugen auch die vielen Berufungen aus dem Institut auf Lehrstühle an deutschen Hochschulen und die Lehrtätigkeit zahlreicher führender Wissenschaftler an bundesdeutschen Hochschulen.

Die in diesem Bericht zusammengestellten Forschungsergebnisse belegen die Kreativität, den Ideenreichtum, die Vielfalt der wissenschaftlichen Themen und die hohe Motivation des Instituts. Die Beiträge dieses Innovationsberichtes drücken den Dank der Mitarbeiter für die von ihm geleistete Arbeit aus. Sie zeigen die Vielfalt der von ihm angestoßenen, laufenden und zukünftigen Projekte aus Faserverbundleichtbau und Adaptronik. Sie zeigen auch, dass Prof. Breitbach mit dem Institut beides intensiv vorangetrieben hat, Forschung an den wissenschaftlichen Grundlagen und deren Anwendung in die Praxis.

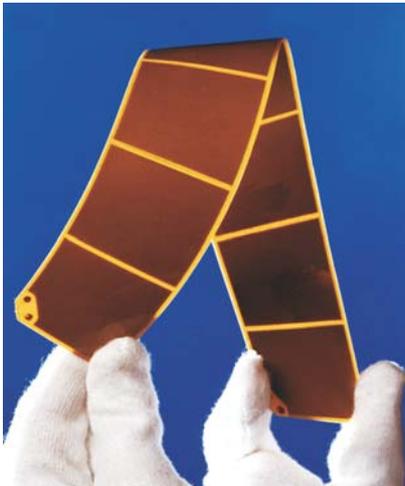
Prof. Breitbach wird zwar die Führung des Instituts übergeben, steht dem Institut jedoch mit seinem unschätzbaren Erfahrungsschatz nach wie vor zur Verfügung. Er wird sich schwerpunktmäßig für das Institut beim Aufbau des Europäischen Zentrums für adaptive Systeme (ECAS) und in der Ausbildung für den Forschungsschwerpunkt Adaptronik engagieren. Dafür gebührt ihm ganz besondere Anerkennung und Dank.



Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik



Hochleistungsleichtbau anpassungsfähig effizient tolerant

Wir sind die Experten für Entwurf und Realisierung innovativer Leichtbausysteme.

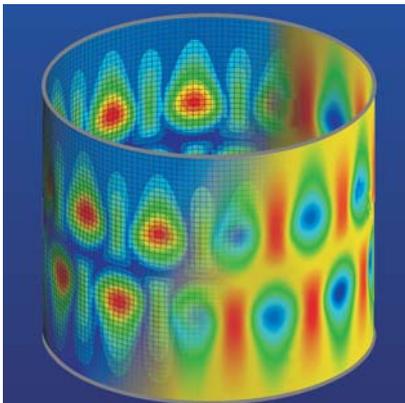
Unsere Forschung dient der Verbesserung von:

- Sicherheit
- Kosteneffizienz
- Funktionalität
- Komfort
- Umweltverträglichkeit

Wir schlagen die Brücke zwischen Grundlagenforschung und industrieller Anwendung.

Mit seinen Fachkompetenzen in

- Adaptronik
- Strukturmechanik
- Faserverbundtechnologie



ist das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Partner für Industrie, Hochschulen, DFG, Forschungseinrichtungen, Ministerien und Zulassungsbehörden in allen Fragen der Entwicklung, Berechnung, experimentellen Erprobung, Fertigung und Qualifikation von Leichtbaustrukturen für die Luft- und Raumfahrt und darüber hinaus.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Materialsystemen und Strukturen im Leichtbau zielen auf

- die Erhöhung der Sicherheit durch Verbesserung der Steifigkeiten und Festigkeiten von Leichtbaustrukturen mit neuen Materialsystemen und verbesserten Strukturanalysen
- Kostenreduktion in der Fertigung und durch optimierte Entwurfs- und Fertigungsabläufe zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit
- Erweiterung der Funktionalitäten von Materialien, Strukturen und Systemen zur Steigerung ihrer Leistungsfähigkeit; aktive Konturanpassung von Strukturen ersetzt aufwändige Stellantriebe,
- Erhöhung des Komforts von Luftfahrtsystemen und bodengebundenen Verkehrsträgern durch aktive Schall- und Schwingungsminderung
- Erhöhung der Umweltverträglichkeit vor allem durch verminderten Treibstoffverbrauch über Gewichtsreduktion.



Zur Klärung von Fragen der Stabilität, Festigkeit und der Thermalanalyse betreiben wir einzigartige Versuchs- und Fertigungseinrichtungen wie thermomechanische Prüfstände, Beulanlage für dynamische Bauteilbelastungen sowie einen Mikrowellenautoklaven.

Wir setzen unsere wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisse in Faserverbundleichtbau und Adaptronik in einem internationalen Netzwerk von Forschung und Industrie prototypisch um.

Unseren Partnern und Kunden bieten wir unsere Leistungen in vier Forschungsfeldern an:

1. Materialien und Fertigungsprozesse

- Multifunktionale Materialsysteme
- Verbunde aus nachwachsenden Rohstoffen
- Nano – Materialien
- Prozesssimulation
- Fertigungsprozesse: Analyse, Bewertung und Entwicklung
- Kennwertermittlung für Faserverbunde

2. Faserverbund-Leichtbaustrukturen

- Bauteilentwicklung für Faserverbunde
- Strukturberechnung, -bewertung, -simulation
- Integrierte Bauteilüberwachung (SHM)
- Machbarkeitsstudien und Bauweisenkonzepte
- Komplettentwicklung von Raumfahrtstrukturen
- Qualitätskontrolle von Faserverbundbauteilen

3. Simulationswerkzeuge und Testfeld

- Schnelle Berechnungswerkzeuge
- Design Rules für den Flugzeugbau
- Modelle für textile Verbunde
- Modellierung aktiver Systeme
- Virtuelle Versuchsstände
- Thermische und mechanische Tests zur Validierung und Qualifikation

4. Aktive Leichtbausysteme

- Aktive Lärm - und Vibrationsminderung
- Aktive Sicherung der Kontur und Präzision
- Strukturintegrierte Aktuatoren und Sensoren
- Adaptive Regler

Die über 100 Mitarbeiter des Instituts arbeiten in diesen Forschungsfeldern mit einem Jahresbudget von über 11 M€, von dem die Hälfte als Drittmittel aus Aufträgen der Industrie und aus nationalen und internationalen Forschungsprojekten stammen. Das Institut ist als Forschungseinrichtung maßgeblich im 4. nationalen Luftfahrtforschungsprogramm beteiligt. Wir koordinieren dabei SMARTLED, ein Projekt zur Erforschung adaptiver Hochauftriebssysteme. Im 6. Rahmenprogramm der EU arbeiten wir an 10 großen internationalen Projekten in Bereich Leichtbau und Adaptronik mit, darunter die Integrated Projects (IP) NACRE, ALCAS, FRIENDCOPTER und INMAR. Das Projekt COCOMAT wird von uns koordiniert. Wir sind mit Hochschulen gemeinsam in Forschungsprogrammen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) beteiligt, beispielhaft sei hier der SFB 562 der TU Braunschweig "Robotersysteme für Handhabung und Montage" genannt.

Wir bilden aus: 9 Auszubildende sind in unserem IT-Bereich tätig. Wir betreuen jährlich etwa 25 Diplomarbeiten und eine Vielzahl von Praktika und Studienarbeiten. Weit über 20 Doktoranden arbeiten im Institut.



Schnelle Berechnung der Impactresistenz von Sandwichschalen

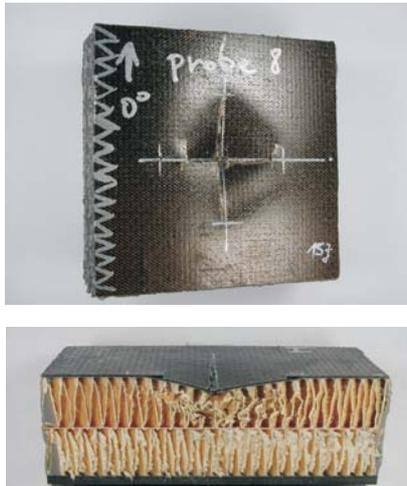


Bild 1:
Impactschaden in einer Sandwichprobe mit Faserverbunddeckschichten und einem doppellagigen Faltenkern.

Motivation

Sandwichschalen, die aus zwei dünnen, steifen Faserverbunddeckschichten und einem dazwischenliegenden, besonders leichten Kern bestehen, bieten eine sehr hohe gewichtsspezifische Tragfähigkeit. Der Sandwichkern sorgt außerdem für eine thermische und akustische Dämmung, und die außenliegende Deckschicht kann als Anzeiger für Impactschäden dienen. Aufgrund der Leichtgewichtigkeit und Funktionsintegration werden Sandwichstrukturen von der Luftfahrtindustrie zunehmend auch für primäre Tragstrukturen in Erwägung gezogen. Derzeit hemmt jedoch die geringe Impactresistenz, d. h. die große Empfindlichkeit gegenüber Schlagschädigung, noch den Einsatz. Bild 1 zeigt beispielhaft den Schaden einer Sandwichschale, der durch den Schlag einer 5kg-Stahlkugel entstanden ist, die mit nur 2,5 m/s auftraf. Mit bloßem Auge unsichtbare Impactschäden können die Resttragfähigkeit der Verbundstruktur bereits erheblich herabsetzen und werden daher zurecht sehr kritisch betrachtet. Um eine Sandwichstruktur hinsichtlich ihrer Impactresistenz zu optimieren, sind zuverlässige Berechnungsmethoden erforderlich, die das Versagensverhalten richtig erfassen. Dabei sollen für die Entwurfsphase auch schnelle Simulationsverfahren zur Verfügung stehen, die das Impactverhalten innerhalb kurzer Zeit für viele Konfigurationen zuverlässig abschätzen können. Zur Erfüllung dieser Forderung wurde das Impactsimulationsprogramm CODAC für Sandwichstrukturen weiterentwickelt.

Verformungs- und Spannungsanalyse

Voraussetzung für eine effiziente Impactsimulation ist eine schnelle und ausreichend genaue Berechnung der Verformungen und Spannungen. Für die Erweiterung des Finite-Element-Programms CODAC auf doppelschalige Strukturen stehen jetzt zwei neue, dreischichtige Schalenelemente S89 und S815 zur Verfügung. Element S89 beruht auf der Annahme eines ebenen Spannungszustandes und ist für die Spannungsermittlung bei gleichmäßiger out-of-plane Belastungen gut geeignet. Element S815 berücksichtigt auch die Kompressibilität der doppelschaligen Struktur in Dickenrichtung und ist mit 15 gegenüber 9 Freiheitsgraden pro Knoten rechentechnisch aufwendiger als Element S89. Es liefert jedoch bei konzentrierten Lasten deutlich zuverlässigere Ergebnisse als Element S89 und wird daher bei Impactberechnungen bevorzugt eingesetzt.

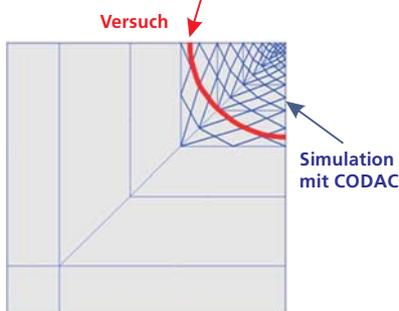
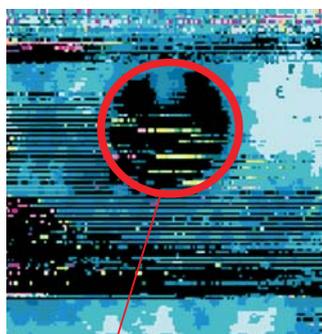


Bild 2:
Größe des Kernschadens im Vergleich: Geschädigte finite Elemente aus der Simulation und Ultraschall-Bild vom Versuch.

Versagensanalyse

Der Sandwichkern versagt infolge einer Kombination aus transversalem Druck und transversalem Schub. Das Versagen der Faserverbunddeckschichten wird maßgeblich von Faserbrüchen bestimmt, Matrixbrüche und Delaminationen sind für den Impactverlauf kaum relevant. Anhand experimenteller Untersuchungen wurden makroskopische Versagensmodelle für Schadensentstehung und Schadensfortschritt entwickelt. Die Schadensdetektion erfolgt durch spannungsbasierte Versagenskriterien, die alle belastungsrelevanten Spannungskomponenten berücksichtigen. Wird ein Schaden festgestellt, so werden die Materialeigenschaften durch schrittweise lineare, elastoplastische Materialmodelle degradiert. Das Versagensverhalten des Kerns kann somit vollständig beschrieben werden. Das Versagen der Deckschicht wird bis zu dem Punkt modelliert, an dem sie zu reißen beginnt. Somit kann die Größe eines nicht bzw. kaum sichtbaren Schadens sowie der Zeitpunkt des Durchreißen der Deckschicht vorhergesagt werden.

Transiente Impactanalyse

Um eine schnelle Impactsimulation zu ermöglichen, wird im Entwurfswerkzeug CODAC der Impactor als Punktmasse modelliert und der Kontakt zwischen Impactor und Sandwich-Deckschicht wird durch das Hertz'sche Kontaktgesetz beschrieben. Die resultierende Kontaktkraft wird als Flächenlast aufgebracht und parabolisch auf der Hertz'schen Kontaktfläche verteilt. Zur Simulation des transienten Impactvorgangs wird die Newmark-Methode verwendet. Da finite Elemente hoher Ordnung zum Einsatz kommen und nur ein geringer Grad an Nichtlinearität vorliegt, eignet sich die implizite Newmark-Methode für das entwickelte Impactsimulationsverfahren besser als die explizite Differenzenmethode. Konvergenzbetrachtungen und numerische Beispiele haben die Vorzüge des impliziten Verfahrens bestätigt.

Experimentelle Validierung

Eine Impactversuchsreihe, die am Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Dresden an Sandwichpaneelen mit Honigwabenkernen durchgeführt wurde, dient als Referenz für die Validierung der Modelle und Methoden, die im Programm CODAC für eine effiziente Impactsimulation implementiert sind. Versuchsergebnisse in Form von Kontaktkraft-Zeit-Verläufen und Ultraschall-Schadensbildern lassen sich so mit den Simulationsergebnissen vergleichen. In Bild 3 sind die Kontaktkraft-Zeit-Verläufe eines 1J-Impacts dargestellt, durch den ein kaum sichtbarer Schaden entsteht. Die anfänglichen Anstiege der Kurven zeigen, dass die Steifigkeit der ungeschädigten Sandwichplatte durch die neuen dreischichtigen Schalenelemente korrekt modelliert wird. Im Moment des ersten Kontaktkraft-Einbruchs wird der Eintritt des ersten Kernschadens von der Simulation richtig erkannt. Das weitere Verformungsverhalten mit geschädigtem Kern wird durch die entwickelten Materialdegradationsmodelle ebenfalls geeignet beschrieben. Bild 2 zeigt, dass die Berechnung der endgültigen Größe des Kernschadens ein konservatives Ergebnis liefert, welches dem Versuchsergebnis ausreichend nah kommt. Impactvorgänge mit nicht sichtbarem Schaden können somit vollständig simuliert und die Kernschadensgröße kann zuverlässig bestimmt werden. Ergebnisse aus Simulationen mit höheren Impactenergien haben gezeigt, dass das Verhalten einer leicht geschädigten Deckschicht geeignet erfasst und dass das Aufreißen der Deckschicht zum richtigen Zeitpunkt festgestellt wird, vgl. Krafteinbrüche bei den Kontaktkraft-Zeit-Verläufen in Bild 4. Durch die Simulation lässt sich also vorhersagen, ob ein Impactereignis einen extrem starken Tragfähigkeitsverlust hervorruft (bei gerissener Deckschicht) oder ob nur eine leichte Deckschichtschädigung und ein Kernschaden entstehen. Zusätzlich kann für diese letztgenannten, nicht oder kaum sichtbaren Schäden eine zuverlässige Abschätzung der Schadensgröße erfolgen.

Impactsimulationen mit verschiedenen fein vernetzten Finite-Elemente-Modelle liefern weitgehend netzunabhängige Ergebnisse. Folglich konnten relativ grobe Netze bereits sehr gute Ergebnisse erzielen, was die Simulation ausgesprochen effizient macht. Kurze Rechenzeiten in Bereichen von 30 s bis 2 min für grobe und 2 min bis 8 min für feine Netze demonstrieren den geringen numerischen Aufwand des Simulationsverfahrens und empfehlen es für den Einsatz im Entwurfsprozess.

> **Dipl.-Ing. Luise Kärger**

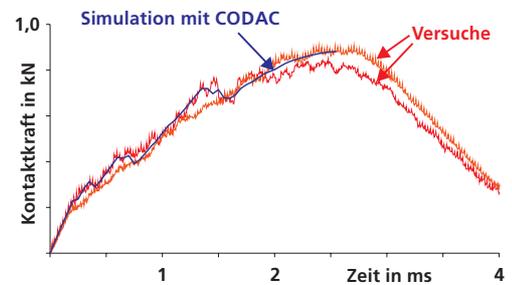


Bild 3: Kontaktkraft-Zeit-Verläufe eines Impacts mit kaum sichtbarem Schaden.

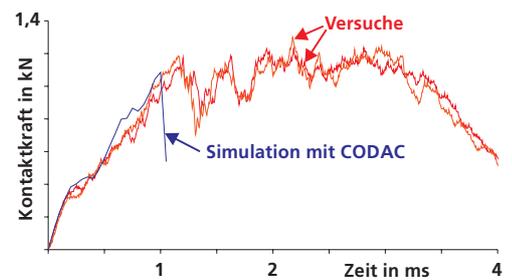


Bild 4: Kontaktkraft-Zeit-Verläufe eines Impacts mit gerissener Deckschicht.



Induktives Preformen



Bild 1:
Manuelles Preformen.

In der Faserverbundtechnologie erfolgt ein Wandel von der Manufaktur zur industriellen Fertigung. Dieser Wandel erfordert die Einführung neuer technischer Ansätze zur Steigerung der Produktivität der gesamten Fertigungsprozesskette. Dazu gilt es geeignete physikalische Effekte zu identifizieren und technisch nutzbar zu machen. Für das Preforming verspricht die induktive Erwärmung eine deutliche Prozessbeschleunigung und neue Möglichkeiten der Automatisierung. Der hierbei genutzte physikalische Effekt besteht in der selektiven, volumetrischen Erwärmung von elektrisch leitfähigen Materialien in einem Wechselstrommagnetfeld durch die Induktion von Wirbelströmen zur Aktivierung eines Binders.

Prinzip des induktiven Preformens

Ein noch nicht mit Harz infiltriertes Vorprodukt für Faserverbundbauteile wird als Preform bezeichnet. Im zugehörigen Prozessschritt werden Faserhalbzeuge einzeln als Bündel (Roving) oder in Form von Gelegen oder Geweben aufeinander geschichtet und der späteren Bauteilkontur angepasst. Nach jeder Umformung ist es erforderlich die Faserlagen in der entsprechenden Form zu fixieren. Hierbei stehen zwei unterschiedliche Technologien zur Verfügung: Mithilfe der Nähetechnik wird eine überwiegend formschlüssige Verbindung der Lagen miteinander hergestellt. Alternativ kann auf die Grenzschicht zwischen den Lagen ein Klebstoff (Binder) aufgebracht werden, der typischerweise über eine Temperaturerhöhung aktiviert wird. Stand der Technik ist die Erwärmung über spezielle Bügeleisen oder Öfen. Hierbei wird die Energie über die Oberfläche eingebracht und innerhalb der Preform über Wärmeleitung weitertransportiert. Die relativ schlechte Wärmeleitfähigkeit der Preform verursacht dabei die anfangs erwähnten langen Zykluszeiten.

Beim induktiven Preformen (Bild 1) wird die erforderliche Energie über ein Wechselstrommagnetfeld bereitgestellt, das in der Lage ist, das Preformvolumen zu durchdringen. Die vom Wechselstrommagnetfeld in den leitenden Kohlenstofffasern induzierten Wirbelströme werden durch den elektrischen Leitungswiderstand in die notwendige Aktivierungswärme umgewandelt.

Die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie, das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik gemeinsam mit dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU-Braunschweig im Auftrag von Airbus Deutschland eine erste Machbarkeitsstudie durchgeführte, stellen gleich mehrere potentielle Anwendungsgebiete heraus:

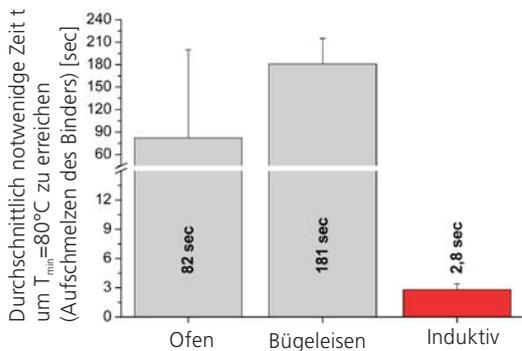
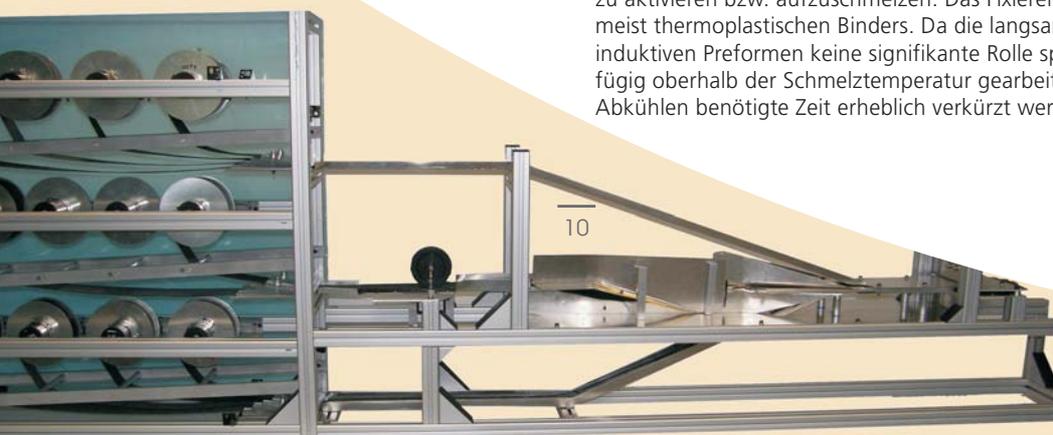


Bild 2:
Vergleich der Bearbeitungszeiten.

Prototypenbau

Mithilfe von marktüblichen Frequenzgeneratoren und Induktorspulen kann das Bügeleisen im Bereich des manuellen Preformens bereits kurzfristig ersetzt werden. Hierbei wird der Induktor als Handgerät ausgeführt. Um eine Stelle zu fixieren wird er per Hand aufgesetzt und kurz angeschaltet. Versuche haben gezeigt, dass Impulse von etwa einer Sekunde ausreichen, um den Binder in allen Lagen unterhalb des Induktors zu aktivieren bzw. aufzuschmelzen. Das Fixieren erfolgt während der Erstarrung des meist thermoplastischen Binders. Da die langsame Wärmeleitung beim volumetrischen, induktiven Preformen keine signifikante Rolle spielt, kann mit Temperaturen geringfügig oberhalb der Schmelztemperatur gearbeitet werden, wodurch auch die für das Abkühlen benötigte Zeit erheblich verkürzt werden kann (Bild 2).

Bild 3:
Erste vollautomatische Preforminganlage mit induktiver Erwärmung.



Vollautomatisierte Fertigung

Ein wesentlich größeres Anwendungspotenzial bietet die automatisierte Preformherstellung. Das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat eine erste vollautomatische Preformanlage (Bild 3) konzipiert, realisiert und erfolgreich erprobt. Mit dieser Anlage werden kontinuierlich einzelne Lagen umgeformt, geschichtet und per Induktion fixiert. Das Resultat der derzeit aufgebauten Anlage ist ein kontinuierlicher, H-förmiger Preformstrang. Die so hergestellte Preform wird bei Projektpartnern aus Frankreich und Österreich sowohl im RTM-Verfahren als auch im Pultrusionsverfahren zu einem Bauteil weiterverarbeitet und anschließend getestet.

Die erste beim DLR aufgebaute Prototyp-Anlage ist ein wichtiger Meilenstein um zukünftig auch Bauteile mit hoher Komplexität kostengünstig und in hoher Stückzahl fertigen zu können. Die modular aufgebaute Anlage wird im nächsten Schritt so erweitert, dass in der nächsten Ausbaustufe einfach gekrümmte mit konstantem Radius und später sogar gekrümmte Profile mit veränderlichem Radius (z.B. Spante für Flugzeuge) hergestellt werden können (Bild 4). Bei der zuvor beschriebenen Anlage werden die Halbzeuge in Form von Multiaxialgelegebändern zugeführt und über Leitbleche umgeformt. Zum Kompaktieren und Fixieren werden entweder Induktoren mit gegenüberliegenden Andruckrollen verwendet, oder es werden Werkzeuge mit integrierten, umlaufenden Spulen eingesetzt.

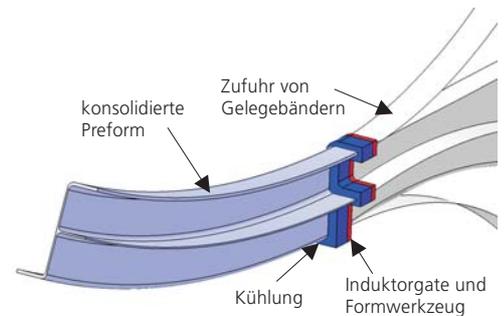


Bild 4:
Automatisiertes kontinuierliches 3D-Preformen.

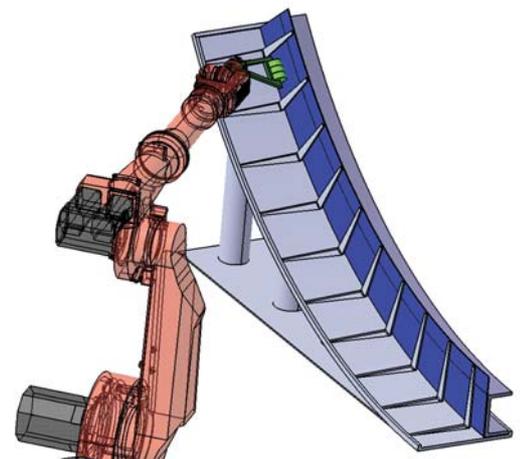


Bild 5:
Automatisiertes 3D-Preformen komplexer Strukturen.

Automatisiertes 3D-Preformen

Für das diskontinuierliche Herstellen von noch komplexeren Bauteilen mit veränderlichen Wandstärken und Abmaßen kann auf bekannte Handhabungsroboter aus der Textilindustrie zurückgegriffen werden (Bild 5). Hierbei muss lediglich der Nähkopf durch einen Induktor ersetzt werden. Durch den Verzicht des Nähfadens ergeben sich geringere Störungen im Laminat und somit höhere Festigkeiten.

Randbedingungen

Zu den Vorteilen der Induktionstechnik zählen außerdem die geringen Sicherheitsanforderungen, die während des Betriebs zu beachten sind und der geringe Investitionsbedarf. Sicherheitseinschränkungen im Betrieb bestehen nur bei Personen mit Herzschrittmachern oder anderen, insbesondere metallischen, Implantaten, da eine hohe Feldstärke nur direkt im Fokus des Induktors erreicht wird. Der geringe Investitionsbedarf resultiert daraus, dass vergleichbare Induktionsanlagen in Kombination mit Robotern bereits intensiv für industrielle Schweiß- und Klebaktivitäten zum Beispiel im Automobilbau genutzt werden.

Dies ist auch ein Indiz dafür, dass die Induktionstechnik geeignet ist, neue Märkte für die Faserverbundtechnologie zu erschließen.

- > **Dipl.-Ing. Tobias Ströhlein (im Bild),**
Dipl.-Ing. Markus Kleineberg,
Dipl.-Ing. Michael Frauenhofer (IFS/ TU-Braunschweig)



Kombination der Prepreg- und Harzinjektions-technologie

Kostengünstiger Faserverbundleichtbau

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen findet immer größere Verwendung in der Herstellung von hochbelastbaren Strukturbauteilen. Im Flugzeugbau wird der CFK-Einsatz für größere Stückzahlen vor allem über die Fertigungskosten entschieden werden. Um neben den Vorteilen wie hohe Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig niedrigem Gewicht auch einen Kostenvorteil bei der Herstellung von CFK-Komponenten zu erzielen, ist die Entwicklung und Erforschung kostengünstiger, hochintegraler Herstellungsverfahren notwendig. Ein Ansatz für solche Verfahren ist die Kombination der Prepreg- und der Harzinjektionstechnologie (Combined Prepreg Injection (CPI)).

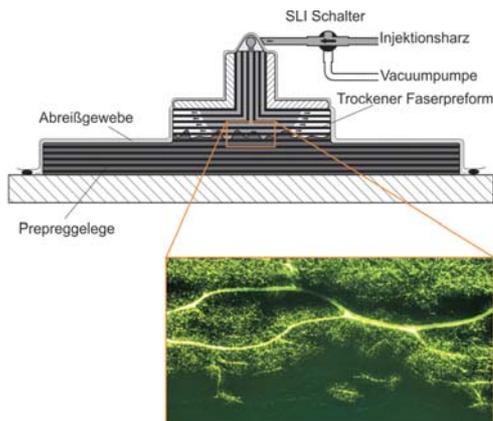


Bild 1: Prinzipielle Darstellung der Herstellung einer stringerverstärkten Prepregplatte im CPI-Verfahren.

Kombinierte Fertigungsverfahren

Eine besonders vorteilhafte Anwendung der CPI-Technologie sind schalenförmige Bauteile mit integrierten Verstärkungen, Verstärkungen oder Krafteinleitungen, wie zum Beispiel Flügel- oder Rumpfschalen. Die primären Lasten werden in solchen Bauteilen vom Schalenelement übertragen, das vorzugsweise aus CFK-Prepreg hergestellt wird. Dieses Halbzeug besteht aus unidirektionalen, mit Harz vorimprägnierten Fasern und kann bei ebenen oder leicht gekrümmten Werkzeugformen kostengünstig maschinell abgelegt werden. Gegenüber geeigneter Harzinjektionsverfahren bieten Prepregwerkstoffe die besseren mechanischen Kennwerte und damit bei einer gegebenen Konstruktion das geringst mögliche Bauteilgewicht. Ein Grund für die bislang besseren mechanischen Eigenschaften der Prepregs sind die speziell modifizierten Harzsysteme. Dadurch wird eine Verbesserung der Schlagzähigkeit und eine Verringerung der Eigenspannungen nach der Aushärtung erreicht.

Komplexe Geometrien lassen sich wesentlich effizienter mit trockenen Fasermaterialien zu einem Faserpreform herstellen, der anschließend mit Harz injiziert wird. Um eine genügend große Menge an trockenen Fasern innerhalb des verfügbaren Prozesszeitfensters tränken zu können, werden Harzsysteme mit ausreichend niedriger Viskosität verwendet. Die geringe Viskosität der Injektionsharze wird allerdings durch eine höhere Sprödigkeit und höhere Harzschumpfraten bei der Aushärtung erkauft. Dieses führt zu geringeren Bruchfestigkeiten, besonders bei Druckbeanspruchung, und damit zu einem erhöhten Bauteilgewicht in den Anwendungskonstruktionen.

Die CPI-Technologie bietet die Möglichkeit, beide Verfahren in einem gemeinsamen Prozess bei der Herstellung einer integralen Baugruppe anzuwenden, um so die Vorteile beider Verfahren unter Umgehung ihrer Nachteile nutzen zu können (Bild 1). Die Arbeiten zur Charakterisierung und Eignungsprüfung dieser Technologiekombination beinhalten die Untersuchung des Überganges vom Prepreg- zum Injektionsbereich und des Einflusses der Prozessparameter auf die Verbindungsfestigkeit der zusammengefügt Prepreg- und Injektionsbauteile. Im Gegensatz zur Klebtechnik arbeitet die CPI-Technologie mit den noch flexiblen Einzelkomponenten, so dass eine toleranzfreie Verbindung entsteht.

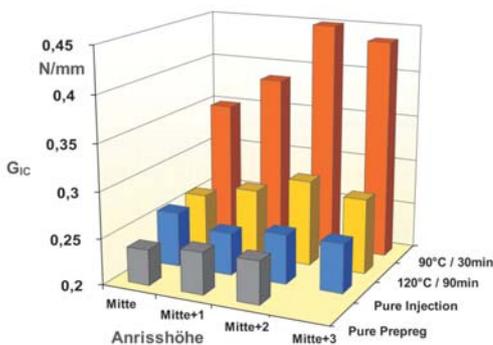


Bild 2: Vergleich der Risszähigkeiten von CPI-Proben unter Variation der Prozessparameter bei der Herstellung und der Anrisshöhe im Schälversuch.

Schnittstellenanalyse

Ein wesentliches Werkzeug zur Beurteilung der mechanischen Belastbarkeit des Fügebereiches von Prepregbauteil zu Injektionsbauteil ist die Durchführung von Schälversuchen zur Ermittlung der Risszähigkeit G_{IC} unter Variation der Prozessparameter. Gleichzeitig wurden mit dem Verfahren der Harzfärbung mit einem fluoreszierenden Farbstoff Art und Umfang der Verteilung der Matrixharze beurteilt. Als grundsätzliches Ergebnis dieser Untersuchungen ist zu werten, dass der Fügebereich zweier im CPI-Verfahren hergestellten Bauteile keine Schwächung in der Gesamtbaugruppe darstellt und mindestens auf dem Niveau von rein injiziert hergestellten Baugruppen liegt (Bild 2). Darüber hinaus wirkt sich der geringe Anteil an Harzüberschuss vorteilhaft aus, der während der Heizphase auf Injektionstemperatur aus dem Prepreg in das trockene Fasermaterial fließt. Die eigentliche Fügefläche, an der die beiden Bauteilbereiche aneinander angrenzen, ist so mit dem schlagzäheren Prepregharz benetzt.

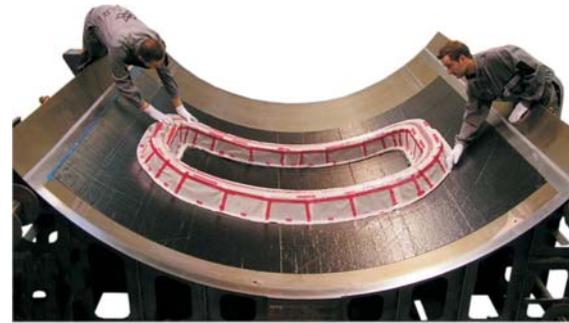


Bild 3:
Positionierung des trockenen Faserpreforms mit fertig installierten Injektionsleitungen auf der Prepregschale.

Türrahmendemonstrator

Zur Herstellung eines produktionsnahen Testbauteils in CPI-Technologie wurde der Türrahmendemonstrator entworfen und in Zusammenarbeit mit dem Composite Technology Center CTC in Stade hergestellt. Der Demonstrator stellt eine stark vereinfachte Konstruktion einer Türausschnittsversteifung eines Rumpfschalensegmentes dar. Es entspricht im Radius dem eines Airbus A320. Das Schalensegment wurde mit Hilfe eines CNC-Legeroboters aus CFK-Prepreg abgelegt und anschließend in eine entsprechend gebogene Werkzeugform eingelegt. Diese Werkzeugform wurde zuvor verwendet, um den trockenen Ringpreform aus einem Schaumkern mit aufgebrachtten trockenen Kohlenstofffasergeweben herzustellen (Bild 3).

Die erfolgreiche Herstellung des Türrahmendemonstrators zeigt eindrucksvoll die Anwendbarkeit der kombinierten Prepreg- Nasstechnologie auf große Bauteile im industriellen Maßstab (Bild 4). Der Schritt in den industriellen Maßstab führte auch zu wertvollen Hinweisen auf weitere Optimierungsmöglichkeiten des Verfahrens in Hinblick auf die einfache Handhabung und Prozessierung großflächiger Prepregstrukturen im Rahmen der CPI-Technologie.



Bild 4:
Türrahmendemonstrator mit dem Autor.

Matrixverbindung mit Barriere

In aktuellen Arbeiten wird die Verwendung eines Barrierefilms aus Thermoplastfolie untersucht, der nicht nur die beiden verwendeten Harzsysteme voneinander trennt, sondern gleichzeitig als Siegelfolie einen der beiden Fügepartner vakuumdicht abschließen kann. Amorphe Hochtemperaturthermoplaste lassen sich von Epoxydharzen im flüssigen Zustand so auflösen, dass nach der Aushärtung Harz und Thermoplastfilm hochbelastbar miteinander verbunden sind.

Diese Eigenschaften sollen genutzt werden, um das CPI-Verfahren in seinem Anwendungsspektrum zu erweitern und die wirtschaftliche Effizienz in weiten Bereichen zu steigern.

> **Dipl.-Ing. Robert Kaps**

Piezokeramische Wabenaktuatoren

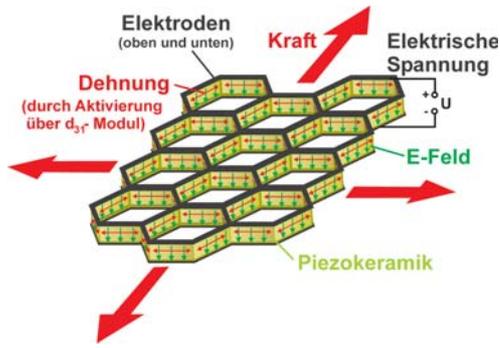


Bild 1:
Prinzip des neuen Flächenaktuators.

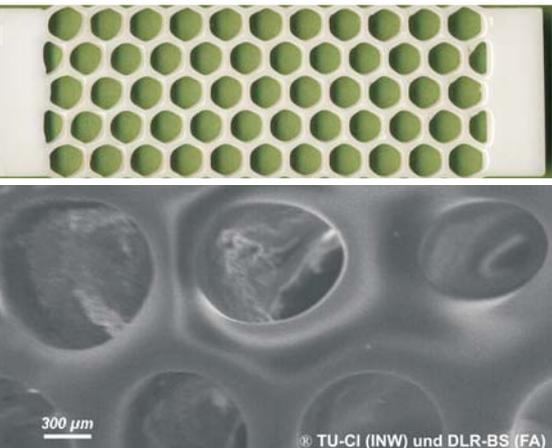


Bild 2:
Wabenpatch (oben) und gesinterte Wabe unter dem Mikroskop.



Im diesjährigen Wettbewerb des BMBF "Bionik - Innovationen aus der Natur" wurde dieser Beitrag mit einem ersten Platz ausgezeichnet.

Eine innovative Aktuatorbauweise

In vielen technischen Bereichen besitzen die unerwünschten Schwingungen und die störenden Lärmpegel sehr große Amplituden bzw. Pegel mit sehr schmalbandigen Frequenzspektren. In einem Forschungsverbund zusammen mit der TU Clausthal, der Universität Würzburg und mit DLR-Kollegen des Instituts für Werkstoff-Forschung hat das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik daher ein Projekt begonnen, spezielle Piezoaktuatoren zu entwickeln. Ziele dieser Forschungsarbeiten sind

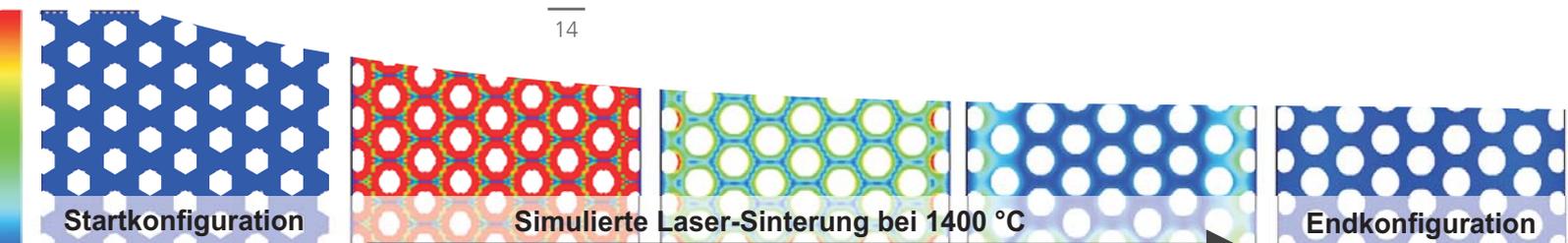
- > die Konzeption eines piezokeramischen Aktuatorsystems
 - für große dynamische Auslenkungen,
 - das Kräfte rückwirkungsarm und effizient in eine Struktur einleitet, und
 - das eine nur sehr geringe elektrische Leistung benötigt, und
- > die Entwicklung eines neuen Herstellungsverfahrens für keramische Bauteile auf der Basis einer kontrollierten Selbstorganisation, die eine nano- und mikrostrukturelle Formgebung ("fully stressed design") ermöglicht.

Aus der Biologie und aus dem Leichtbau ist bekannt, dass Waben mit hexagonalen Zellen aufgrund der 120°-Winkel die Eigenschaft besitzen, Kräfte gleichmäßig in die Struktur weiterzuleiten. Darauf basiert die Idee, diesen in der Wabenbauweise begründeten Mechanismus für ein innovatives, vom DLR patentiertes Aktuatorssystem zu verwenden (Bild 1) und für technische Anwendungen der Adaptronik nutzbar zu machen. Durch die Wabenbauweise wird das physikalische Prinzip der Impedanzanpassung für den relevanten spektralen Arbeitsbereich in hervorragender Weise erfüllt, so dass der Wabenaktuator nun in der Lage ist, seine mechanische Leistung optimal auf die zu beruhigende Struktur zu übertragen.

Die Herstellung piezokeramischer Waben wird mit einem ebenfalls vom DLR patentierten Verfahren angestrebt, das das physikalische Phänomen der Selbstorganisation nutzt. Erste Labormuster wurden zunächst mit nichtaktivierbaren Mischkeramiken ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) gefertigt (Bild 2). Dazu wurden Grünkörper mit einer Dichte von ca. 70 Vol.-% im Schlickergussverfahren hergestellt, getrocknet und mit einer Fräseinheit grob wabenförmig vorstrukturiert. Die Sinterung erfolgte anschließend mit einem 18 Watt-Laser bei ca. 1400 °C.

Der Schrumpfungsprozess, der während der Sinterung zu der optimalen, minimalflächigen Formgebung führt, kann mit Hilfe eines entwickelten potenzialbasierten Algorithmus modelliert werden. Die Endkonfigurationen sind somit vollständig berechen- bzw. vorhersagbar. Die untere Bildleiste zeigt die Sequenz der Zustände während der Laser-Sinterung. Die mechanischen Spannungen (farbig dargestellt) erreichen in diesem selbstorganisierten Prozess ein Minimum.

- > **Dr. Jörg Melcher (im Bild), Eyleen Mund, Meinhard Gillhoff und Daniel Fingerhut sowie Dr. Wolfgang Braue, Dr. Bernd Hildmann, DLR-Institut für Werkstoff-Forschung, Prof. Dr. Jürgen G. Heinrich und Dr. Jens Günster, Institut für Nichtmetallische Werkstoffe der TU Clausthal und Prof. Dr. Jürgen Tautz, Biozentrum der Universität Würzburg**



Belastungsprobe für ein aktives Hubschrauberrotorblatt

Reduzierung von Lärm und Vibration durch aktive Rotorverwindung

Die Reduzierung von Lärm und Vibrationen ist ein aktuelles Forschungsziel in der Hubschraubertechnologie. Um dieses Ziel zu erreichen werden derzeit unterschiedliche technische Möglichkeiten zur Realisierung einer individuellen Rotorblattsteuerung untersucht. Einen vielversprechenden Ansatz stellt die Technik des aktiven Verwindungsrotors (Active Twist) dar. Über in die Rotorblatthaut integrierte und flächig verteilte piezokeramische Aktuatoren werden Kräfte in die Struktur eingeleitet, die eine dynamische Torsionsverformung des Rotorblattes ermöglichen. Aerodynamische Effekte, wie z.B. Blatt Wirbel Interaktionen (BVI), die zu Vibrationen und Lärm führen, können so effektiv bekämpft werden.

Eine wichtige Hürde in Richtung eines Windkanalversuches mit einem aktiven Verwindungsrotor ist nun erfolgreich genommen. Die höchsten Belastungen für das Rotorblatt erzeugen die auftretenden Zentrifugalkräfte. Zur korrekten Abbildung aerodynamischer Effekte im Windkanalversuch, muss das Modellrotorblatt mit deutlich höheren Drehzahlen betrieben werden als ein entsprechendes Rotorblatt im Originalmaßstab. Der Test des Rotorblattes erfolgte deshalb mit einer Drehzahl von 1043 U/min. Auf die Blattwurzel wirken dabei Kräfte von über 30 kN. Ziel war es nachzuweisen, dass die Aktuatorik auch unter diesen hohen Lasten in der Lage ist, das Rotorblatt ausreichend zu verwinden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugsystemtechnik entstand ein Versuchstand, der zur Versorgung der Aktuatorik eine Energieübertragung in das rotierende System ermöglicht und über eine Telemetrie verfügt, die Messdaten wie Beschleunigungen und Dehnungen, in den Kontrollraum überträgt. Basierend auf einer Hochgeschwindigkeitskamera wurde ein kostengünstiges optisches Verfahren entwickelt, das eine Messung der Rotorblattverwindung bei hohen Drehzahlen erlaubt.

Erfolgreicher Nachweis der Leistungsfähigkeit

Die bei der Nenndrehzahl gemessenen Blattspitzenwinkel sind in Bild 2 dargestellt. In dem Diagramm sind für verschiedene Ansteuerfrequenzen die maximalen Torsionswinkel aufgetragen. Bei einer Ansteuerfrequenz von 35 Hz, was dem Zweifachen der Drehfrequenz entspricht, erreicht der aktive Rotor unter Zentrifugalbelastung eine Verwindung von 2,8°. Dieser Wert stimmt mit der im Laborversuch gemessenen statischen Verwindung ohne Last überein, wodurch die Leistungsfähigkeit der Aktuatorik erfolgreich nachgewiesen ist. Nähert sich die Ansteuerfrequenz der ersten Torsions-eigenfrequenz, die zwischen 50 Hz und 60 Hz liegt, so führt dies zu einer dynamischen Überhöhung der Verwindungsamplitude von über 7°. Bei einer weiteren Erhöhung der Ansteuerfrequenz dominieren höhere Eigenformen des Rotorblattes, was zu einer Absenkung des Blattspitzenwinkels führt. Aktuelle Arbeiten konzentrieren sich daher auf die Entwicklung eines Rotorblattes mit einer in Spannweitenrichtung segmentierten Aktuatorik, um eine den Eigenformen des Rotorblattes angepasste Ansteuerung zu realisieren.

> **Dipl.-Ing. Peter Wierach**

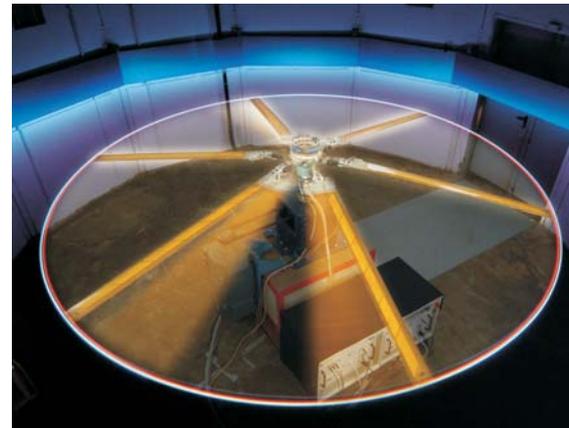


Bild 1:
Zentrifugalbelastung des aktiven Verwindungsrotors im Prüfstand.

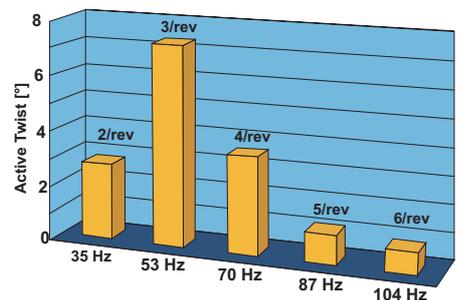


Bild 2:
Gemessener Blattspitzenwinkel bei 1043 U/min und verschiedenen Ansteuerfrequenzen.



Structural Health Monitoring mit Ultraschall-Lambwellen an einem Hubschrauberheckteil

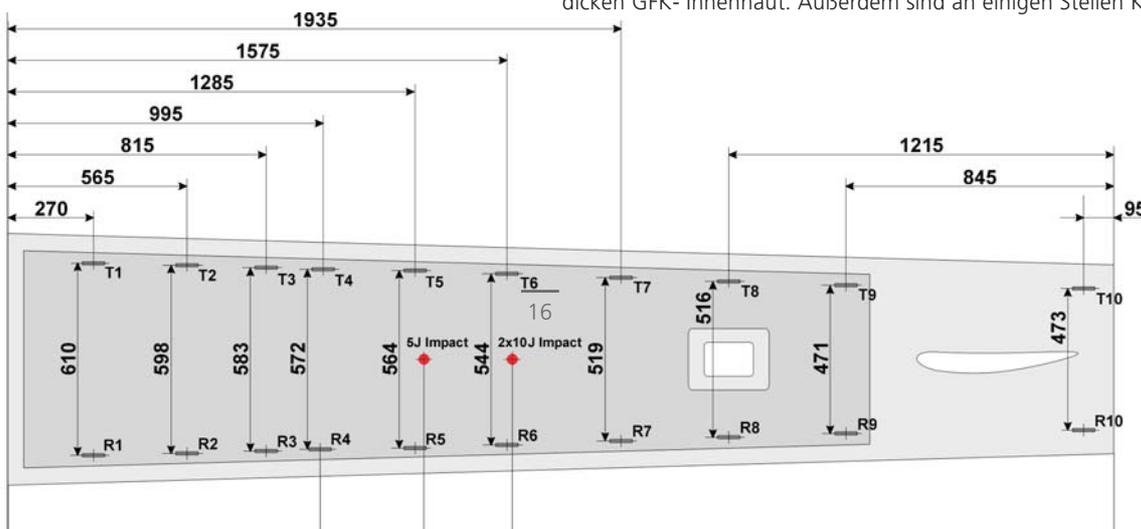


Bild 1:
Heckteil des Hubschraubers EC 135.



Bild 2:
Heckteil mit applizierten Piezoelementen.

Bild 3:
Position der applizierten Piezoelemente des Heckteils.



Mehr Sicherheit und geringere Wartungskosten durch integrierte Selbstüberwachung

Erst durch optimale Ausnutzung der anisotropen Werkstoffeigenschaften können die Gewichtsvorteile der Faserverbundwerkstoffe vollständig zur Geltung gebracht werden. Dies setzt unmittelbar die Sicherung der Materialeigenschaften auf hohem Niveau mit Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung nach der Fertigung und im Betrieb voraus. Die bildgebende Ultraschallprüftechnik ist ein etabliertes Verfahren, um innenliegende, von außen nicht sichtbare Fehlstellen mit hoher Genauigkeit nachzuweisen. Allerdings erfolgt die Prüfung mehr oder weniger punktförmig, so dass ein zeitaufwändiges Scannen erforderlich ist. Bei zukünftigen doppelschaligen Bauteilen kann im eingebauten Zustand keine Prüfung mit klassischen Verfahren durchgeführt werden. Um die Kosten zu reduzieren, beziehungsweise Prüfungen überhaupt möglich zu machen, sind völlig neue Ansätze notwendig.

Im Gegensatz zu Longitudinalwellen, die bei den bewährten Ultraschallprüfungen eingesetzt werden, breiten sich Lamb-Wellen (Plattenwellen) großflächig aus und reagieren mit innenliegenden Fehlstellen. Sie lassen sich leicht über fest mit der Struktur verbundenen piezoelektrischen Aktuatoren und Sensoren anregen und wieder empfangen. Structural Health Monitoring (SHM) mit Lamb-Wellen verspricht eine hohe Kostenersparnis im Luft- und Raumfahrtbereich, da sich damit prinzipiell komplexe Bauteile ohne Zeitaufwand prüfen lassen. Allerdings gibt es für jede Frequenz mindestens einen symmetrischen und einen asymmetrischen Lamb-Wellenmode. Die Moden sind dispersiv, d. h. die Phasengeschwindigkeit ist frequenzabhängig. Bei höheren Frequenzen ist gleichzeitig mit mehreren Moden zu rechnen, die im Empfangssignal unterschieden werden müssen. Darüber hinaus treten wegen der flächigen Ausbreitung an Bauteilrändern und bei Strukturänderungen Reflexionen auf, die hohe Anforderungen an die Auswertung stellen.

Das Prüfobjekt: Heckteil eines Hubschraubers

Im Rahmen des EU-Programms AISHA soll erstmals an einem von dem Projektpartner Eurocopter Frankreich zur Verfügung gestellten Heckteil des Hubschraubers EC 135 (Bild 1) ein SHM-System aufgebaut und untersucht werden, um Erkenntnisse über die Lambwellenausbreitung in komplexen Bauteilen zu gewinnen. Das etwa 3,50 m lange und 60 cm breite Heckteil besteht aus einer 1 mm dicken Außenhaut aus CFK, GFK und einem Bronzegitter, einem 15 mm dicken Honigwabenkern und einer 0,5 mm dicken GFK-Innenhaut. Außerdem sind an einigen Stellen Kupferfolien, Inserts und

Ausschnitte vorhanden. Wegen der Komplexität des Bauteils im Vergleich zu den sonst in der Literatur beschriebenen ebenen und symmetrisch aufgebauten Testkörpern stellt dieses Bauteil eine Herausforderung für SHM mit Lambwellen dar. Eurocopter hat großes Interesse, Impact-Schäden ab 5 J mit SHM feststellen zu können.

Zunächst wurden an einem etwa 50 cm langen Abschnitt des Heckteils Optimierungen der Impuls-Parameter vorgenommen und die Piezo-Sensoren getestet und ausgewählt. Die bildgebende Ultraschallprüftechnik mit der Mobile Ultraschall-Einrichtung (MUSE) des DLR dient in den Untersuchungen als komplementäres Verfahren zur Schadensdetektion und zur Visualisierung der Wellenausbreitung. Die Versuchen am Bauteil-ausschnitt zeigten, dass einige Wellenmoden sich nur durch die äußere Haut, andere sich nur durch die innere und nur wenige sich über die gesamte Bauteildicke ausbreiten. Da Schäden wie Impacts sowohl einen Haut- als auch Kernschaden verursachen, ist eine Prüfung über die gesamte Dicke erforderlich.

Die Erfahrungen mit dem Heckteilabschnitt wurden für die Konfiguration des SHM-Systems des gesamten Heckauslegers genutzt. Das entwickelte System besteht aus Piezoelementen mit Umkontakt, die innen am Heckteil an gegenüberliegenden Seiten appliziert sind (T1 bis T10 und R1 bis R 10 in Bild 2). Es entstehen so Schallwege von 470 bis 610 mm. Vor und nach dem gezielten Einbringen von Impactschaden wurden Untersuchungen zur Schadensdetektion mit bildgebender Ultraschallprüftechnik (System MUSE) und mit Lambwellen durchgeführt. Beispielhaft stellt Bild 3 zwei Lambwellen- Empfangssignale (oben ohne Impact, unten mit Impactschaden) dar. Die Empfangsamplitude fällt von 94% Bildschirmhöhe auf 52% bei einem Impact ab.

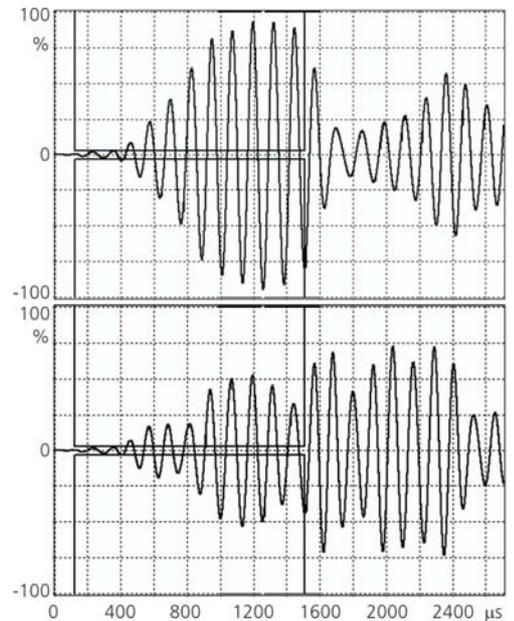
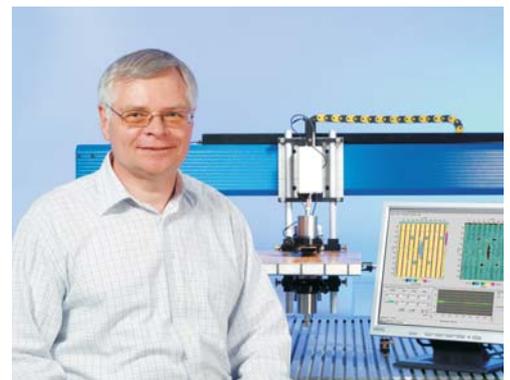


Bild 3:
Empfangssignal an einer fehlerfreien Position (oben)
und an der Position mit 20 J Impact (unten).

Fazit

Erste interessante Einsichten der Lambwellenanalyse an einem luftfahrttypischen Bauteil liefern die vergleichenden Untersuchungen mit klassischer Ultraschallprüftechnik und Lambwellenanalyse vor und nach dem gezielten Einbringen von Schäden. Mit Lambwellen lassen sich prinzipiell Fehlstellen wie Delaminationen auch in komplexen Bauteilen nachweisen. Allerdings sind die auftretenden Amplitudenunterschiede im Vergleich zu denen bei der "klassischen" Ultraschallprüftechnik relativ klein. Für einen Praxiseinsatz eines Selbstüberwachungssystems ist intensive Forschung erforderlich. Schließlich soll außer einer zuverlässigen und robusten Fehlerdetektion auch die Zuverlässigkeit der Aktuatorik und Sensorik, deren akustischen Ankopplung an das Bauteil sowie die der Elektronik von mehreren Jahrzehnten gewährleistet werden. Hierzu wird vom Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik ein SHM-Labor aufgebaut und damit in nationalen und internationalen Forschungsprojekten das SHM durch Ultraschall-Lambwellenanalyse weiter voranbringen.

> **Dr. Wolfgang Hillger**



Modellbildung von CNT basierten Aktuatoren

CNT basierte Aktuatoren

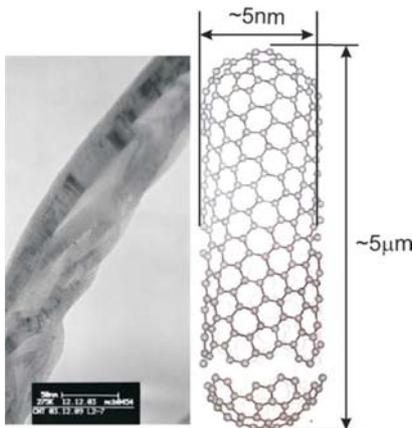


Bild 1:
Aufbau eines Carbon Nanotubes (CNT).
 (Aufnahme links mit freundlicher Genehmigung von Prof. M. Wienecke, Hochschule Wismar)

Die Eigenschaften von Carbon Nanotubes (CNT) versprechen die Erschließung einer neuen Klasse von elektromechanischen Wandlern. Die hervorragenden, bereits gemessenen mechanischen Eigenschaften von Nanotubes lassen zusammen mit den aktiven Dehnungen des Materials in einem Elektrolyten Aktuatorkräfte erwarten, die um mehrere Größenordnungen über Aktuatoren auf der Basis von Piezokeramiken liegen. Wegen der geringen Dichte der CNTs ergeben sich sehr hohe spezifische Energiedichten, die das Potential dieser Aktuatorik begründen. Hauptarbeitsfelder auf dem Weg zu derartigen Aktuatoren sind die Herstellung von makroskopischen CNT-Strukturen, deren Integration in Festkörperelektrolyten und die Untersuchung des Aktuatorverhaltens. Diese Untersuchungen des Systemverhaltens bilden gegenwärtig die Schwerpunkte der CNT-Forschung im Institut.

Einen Ansatz zur Herstellung makroskopischer CNT-Strukturen ist die Verarbeitung von CNTs zu Bucky-Paper. Wie der Name bereits erkennen lässt, sind die einzelnen Röhrchen ähnlich angeordnet wie die Zellulosefasern in Papier. Die Herstellung der Bucky-Paper erfolgt durch Vakuumfiltration einer CNT-Dispersion und gleicht damit ebenfalls der Papierherstellung. Die Prozessparameter dieser Filtration wurden am Institut optimiert, um Bucky-Paper von höchster Qualität für die weiteren Untersuchungen erhalten. Die entstehende stochastische Anordnung der einzelnen CNTs resultiert in einem quasi-isotropen Materialverhalten des Bucky-Papers. Für ein vertieftes Verständnis der aktuatorischen Wirkweise ist eine modellhafte Beschreibung unerlässlich. Daher werden analytische Modelle zur Beschreibung des aktuatorischen Verhaltens von Bucky-Paper näher untersucht. Unter Berücksichtigung experimentell ermittelter Kenndaten wird dann überprüft, ob die Modelle das reale Systemverhalten wiedergeben.

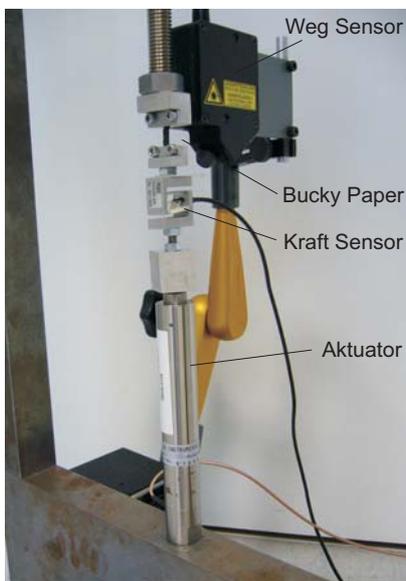


Bild 2:
Messanordnung zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Bucky-Paper.

Entwicklung eines analytischen Aktuatormodells

Die analytische Beschreibung basiert auf der energetischen Betrachtung des Aktuatorsystems. Dabei werden mechanische Größen wie die potentielle Energie, die über die Steifigkeit im System gespeichert wird genauso berücksichtigt, wie die elektrischen Größen, welche den dominanten kapazitiven Effekt wiedergeben. Des Weiteren werden dissipative Anteile wie Dämpfung und Widerstände abgebildet. Die Kopplung zwischen elektrischen und mechanischen Größen wird formal über eine Kopplung der Ladung Q mit der Dehnung s eingeführt. Dieser Ansatzes führt auf ein Gleichungssystem, welches das Aktuatorssystem beschreibt. Es besteht aus gekoppelten Gleichungen mit elektrischen und mechanischen Parametern wie Steifigkeit κ , Materialdämpfung γ , Leitfähigkeit σ , Kapazität C_0 , sowie einem elektromechanischen Kopplungsfaktor α .

$$\dot{s} = -\gamma \left(\kappa \cdot s - F_e - \alpha \frac{Q^2}{2} \right)$$

$$\dot{Q} = -\sigma \left(\frac{Q}{C_0} - \alpha \cdot Q \cdot s - U_e \right)$$

Die entsprechenden Koeffizienten lassen sich experimentell bestimmen und ermöglichen damit die Simulation des Aktuatorverhaltens. F_e ist die von außen wirkende Kraft, U_e die angelegte Spannung.

Parametrisierung des Modells

Zunächst werden die mechanischen Eigenschaften des Bucky-Papers und die elektrischen Eigenschaften der Bucky-Paper Elektrolyt Anordnung bestimmt. Die mechanischen Kennwerte werden in einem dynamischen Zugversuch (siehe Bild 2) ermittelt, wobei die Sprödigkeit des Bucky-Papers eine besondere Herausforderung bei der Probenpräparation und Prüfungsdurchführung darstellt. Bei der Bestimmung der Modellparameter wird auch die Frequenzabhängigkeit derselben untersucht. Damit kann sichergestellt werden, dass das analytische Modell auch dynamische Vorgänge abbilden kann.

Zur Messung der elektrischen und der elektromechanischen Parameter ist eine Anordnung des kompletten Aktuators notwendig, wobei auch der Elektrolyt vorhanden sein muss. Am einfachsten ist diese Voraussetzung zu erfüllen, wenn das Bucky-Paper in einen flüssigen Elektrolyten getaucht wird. Der zur Validierung der Modelle verwendete Versuchstand (siehe Bild 3) bedient sich dieser bereits vielfach experimentell erprobten Methodik zur Bereitstellung der frei beweglichen Ionen.

Bei den Untersuchungen neu gewonnene Erkenntnisse über die Systemcharakteristiken dienen zur ständigen Verbesserung des Modells. Im Laufe der Parametrisierung wurden beispielsweise Frequenzabhängigkeiten der elektrischen Kenngrößen im ursprünglichen Modell aufgedeckt. Um das System dennoch angemessen beschreiben zu können, wurde das elektrische Modell in mehreren Stufen erfolgreich modifiziert.

Die Untersuchung verschiedener im Modell berücksichtigter Aktuatoreffekte identifiziert den Coulomb-Effekt als dominant. Bei diesem Effekt sind die entstehenden Dehnungen proportional zum Quadrat der am Bucky-Paper angelagerten Ladungen.

Das im Frequenzbereich parametrisierte Modell wird anschließend im Zeitbereich mit verschiedenen Anregungssignalen validiert. Diese Überprüfung zeigt, dass das Modell mit korrekt bestimmten Parametern schon in seiner ursprünglichen Formulierung und nochmals besser in der modifizierten Form in der Lage ist das Systemverhalten qualitativ und quantitativ vorherzusagen (Bild 4).

Weiterführende Untersuchungen

Das erfolgreich validierte Aktuatormodell soll zukünftig auf seine Anwendbarkeit in anderen Arbeitsbereichen des Aktuators untersucht werden. Als zentraler Punkt wird intensiv an der Integration von Festkörperelektrolyten in die Bucky-Paper Struktur gearbeitet. Auch für diese Aktuatorkonfiguration ist eine analytische Modellierung mit experimenteller Bestimmung der elektrischen und mechanischen Parameter notwendig.

> **Dipl.-Ing. Johannes Riemenschneider (im Bild),
Dipl.-Ing. Steffen Opitz**

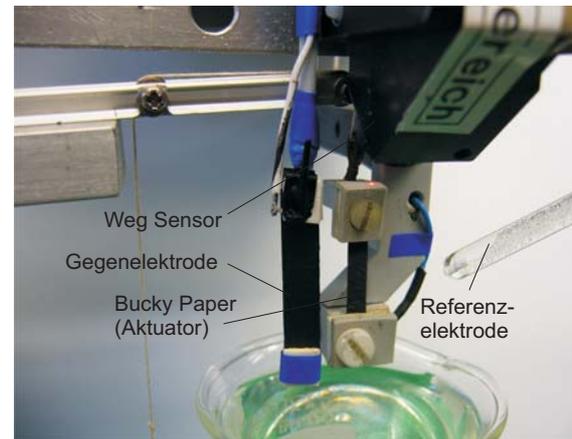


Bild 3:
Messanordnung des Aktuatorversuchsstandes.

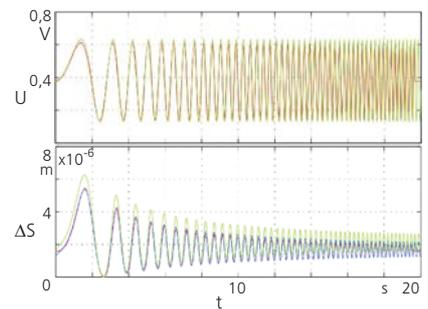
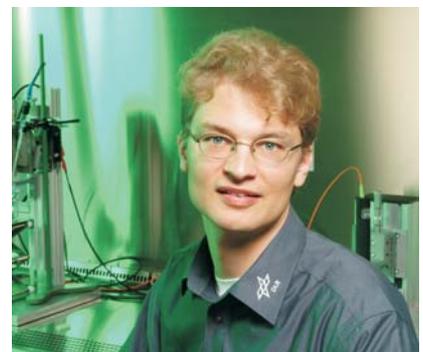


Bild 4:
Vergleich der Simulationsergebnisse für Spannung und Auslenkung des Ausgangsmodells (grün), des modifizierten Modells (blau) und der Messung (rot).



Leistungssteigerung durch Nanokomposite

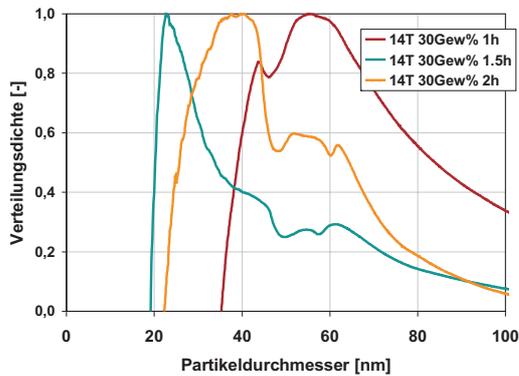


Bild 1:
Partikelgrößenverteilung nach unterschiedlichen Mahlzeiten.

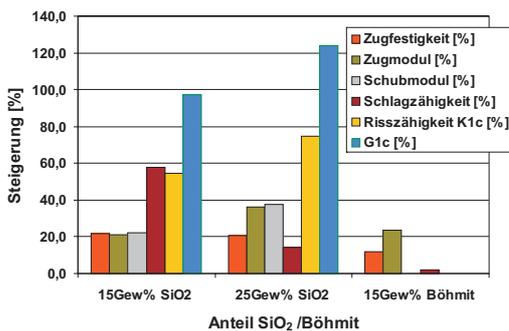


Bild 2:
Steigerungen mechanischer Kennwerte von SiO₂- und Böhmit- Nanocomposites.

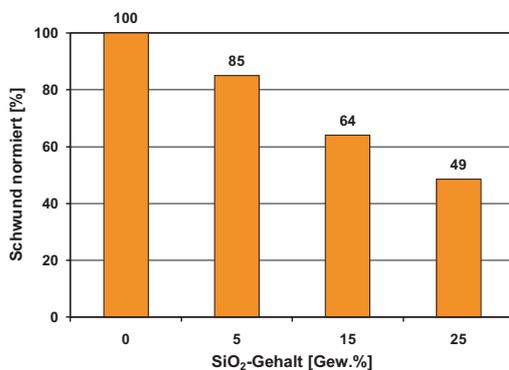


Bild 3:
Schwundreduktion durch Nanopartikel.

Wirkungsmechanismen nanoskaliger Matrixadditive in Faserverbunden

Neben der etablierten Prepregtechnologie als eine Fertigungstechnologie für Hochleistungsfaserverbundbauteile hat der Wunsch nach kostengünstigeren und schnelleren Verfahren zu den bekannten Injektionstechnologien geführt. Die so hergestellten Laminaten zeichnen sich durch gute mechanische Eigenschaften aus, weisen allerdings derzeit noch geringere Druckfestigkeiten im Vergleich mit entsprechenden Prepreglaminaten auf. Bisherige Ergebnisse stützen die Hypothese, dass dieses Defizit im Wesentlichen auf eine geringere Quersugfestigkeit im Vergleich mit entsprechenden Prepreglaminaten und einen hohen Reaktionsschwind der Injektionsharze zurückzuführen ist. Besonders bei Laminaten mit hohen Orientierungswechseln macht sich dies bemerkbar. Deshalb soll mittels Nanopartikeln, die die Reinharzfestigkeit steigern und gleichzeitig den Schwind verringern, Abhilfe geschaffen werden mit nur geringer Viskositätssteigerung der Injektionsharze. Gegenwärtig sind Nanocomposites, d. h. mit nanoskaligen Partikeln (1-100 nm) gefüllte thermoplastische und duroplastische Polymermatrices, Gegenstand aktueller internationaler Forschungsaktivitäten. Als neue Materialklasse zeigen Nanocomposites im Vergleich zu den traditionell gefüllten Verbundwerkstoffen (Mikrocomposites) und den Reinharzen enorme Verbesserungen im Bereich der mechanischen, thermischen, optischen und elektromagnetischen Eigenschaften. Zusätzlich bietet sich durch diese Art der Harzmodifikation die interessante Möglichkeit, die Reaktionszeit des Aushärtvorgangs zu verringern.

Das Ausmaß der Materialverbesserungen durch die Zugabe von Nanopartikeln wird entscheidend durch den Dispersionsgrad der Nanopartikel sowie deren Aspekt-Verhältnis, Orientierung und chemischem Funktionalisierungsgrad in der Polymermatrix bestimmt. Gelingt eine effiziente Dispergierung und Netzwerkerzeugung, werden die Polymermatrices wirkungsvoll verstärkt.

Dispergiertechnologie

Die bisherigen Arbeiten konzentrieren sich im Wesentlichen auf Untersuchungen von nanoskaligen sphärischen Siliziumdioxid-Partikeln und Böhmiten (AlO(OH)). Die SiO₂-Nanopartikel sind in Form einer vordispersierten Harzformulierung kommerziell erhältlich und werden daher als standardisiertes System genutzt.

Böhmit-Nanopartikel liegen in Form mikroskaliger Pulver (Agglomerate der nanoskaligen Primärpartikel vor und sind in unterschiedlicher Form und Oberflächenfunktionalität erhältlich. Anhand dieser Nanopartikel lassen sich Einflussfaktoren, wie Größe, Form und Funktionalität der Partikel auf die Dispersion und auf mechanische bzw. thermische Eigenschaften untersuchen. Ziele der Oberflächenmodifikationen sind eine leichte Dispergierbarkeit und Stabilisierung der nanopartikelverstärkten Epoxidharzdispersionen sowie die Generierung einer optimalen Partikel-Matrix Anbindung (kovalente Bindung). In Abhängigkeit der Funktionalisierung entstehen unterschiedlich starke Haftkräfte zwischen den Primärpartikeln. Zur Überwindung dieser interpartikulären Haftkräfte und damit zur Desagglomeration der Nanopartikel sind hohe Scherkräfte nötig. Für die Einbringung dieser Scherkräfte wurde eine geeignete Dispergiertechnologie entwickelt, die aus der Kombination von den beiden Dispergiergeräten Dissolver und Perlmühle besteht und das Anforderungsprofil gut erfüllt.

Mittels der entwickelten Methodik können homogene nanoskalige Dispersionen hergestellt werden, die eine sehr enge, monodisperse Partikelgrößenverteilung aufweisen. Die Partikelgrößenverteilungen können mit der Scheibenzentrifuge am Institut vermessen werden (Bild 1).

Es wurden von den nanopartikelmodifizierten Harzen (SiO₂, Böhmit) Versuchsplatten, sogenannte Nanocomposites, mit variierendem Füllstoffgehalt gefertigt und einer umfangreichen mechanischen sowie thermischen Analyse unterzogen. Die bisherigen Ergebnisse zeigen für gut dispergierte Nanocomposites bemerkenswerte Verbesserungen für die Festigkeit, Steifigkeit und Schlagzähigkeit. Zudem weisen die nanopartikelverstärkten Harze nur marginal höhere Viskositäten auf und stellen somit den Ausgangspunkt für die Arbeiten im faserverstärkten Verbund dar. Schlecht dispergierte Matrices mit Agglomeraten in der Größe mehrerer Mikrometer weisen geringere Festigkeiten als das reine Harz auf. Erste Risszähigkeitsversuche an SiO₂-Nanocomposites im Vergleich zur unmodifizierten Referenz zeigen enorme Steigerungen im Vergleich mit ungefüllten Epoxidharze (Bild 2). Schwundmessungen der SiO₂-gefüllten Nanocomposites lassen signifikante Reduktionen des Harzschwunds erkennen (Bild 3), was zu einer erheblichen Minimierung von Eigenspannungen im faserverstärkten Verbundwerkstoff führen sollte.

Nanopartikelverstärkte Faserverbunde

Auf Grundlage der Ergebnisse der Reinharzversuche wurden ausgewählte nanopartikelgefüllte kohlenstoffaserverstärkte unidirektionale Verbunde hergestellt, an denen Druckversuche nach Celanese (Bild 4) durchgeführt wurden.

SiO₂-verstärkte Faserverbunde zeigen enorme Festigkeitssteigerungen (32 %) und Erhöhungen der Bruchdehnung (31 %). Verbunde mit funktionalisierten Böhmitpartikeln konnten neben herausragenden Festigkeits- und Bruchdehnungszunahmen (über 30 %) auch die Steifigkeiten weiter steigern. Durchschnittlich werden Steigerungen sowohl der Druckfestigkeiten als auch der Bruchdehnungen von über 20 % mit Hilfe von Nanopartikeln erzielt (Bild 5).

Folglich können mit Nanopartikeln überproportionale Kennwertsteigerungen im Faserverbund erreicht werden. Dieser Effekt wird darauf zurückgeführt, dass die durch Nanopartikel erhöhte Matrixsteifigkeit die Fasern über einen größeren Dehnungsbereich am Ausknicken hindert. Dieser Mechanismus kommt umso stärker zum Tragen, je besser die Faser-Matrix-Haftung ist. Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass mit erhöhten Matrixsteifigkeiten und geringerem Harzschwund ein erheblich verbesserter Verbundwerkstoff mit herausragenden Druckfestigkeiten erreicht werden kann, der mittels Injektionstechnologie gefertigt wird.

Weiterführende Untersuchungen zu Partikelformen und Größen sowie zum Einfluss der Oberflächenmodifikation auch auf die Anbindung des partikelverstärkten Harzes an die Fasern und den resultierenden Einfluss auf die Druckfestigkeiten sind entscheidende Schritte für das Verständnis nanopartikelverstärkter Verbunde.

- > **M.Sc. Christine Arlt (im Bild), Dipl.-Ing. Dirk Röstermundt, Dr. Thorsten Mahrholz, Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Mosch, Dipl.-Ing. Alexandra Fischer, Dr. Ulrich Riedel (im Bild)**

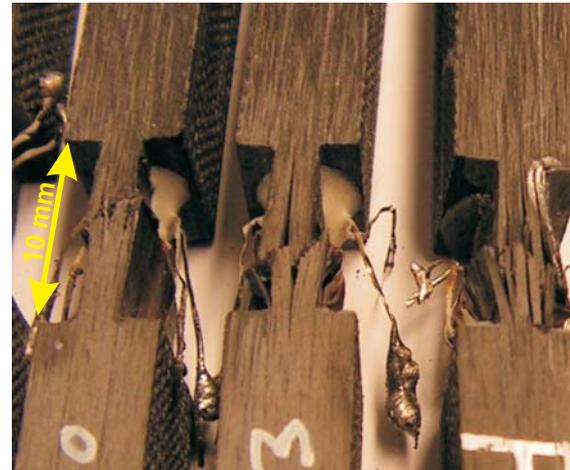


Bild 4: Celanese Druckproben verschiedener nanopartikelverstärkter CFK UD-Laminat.

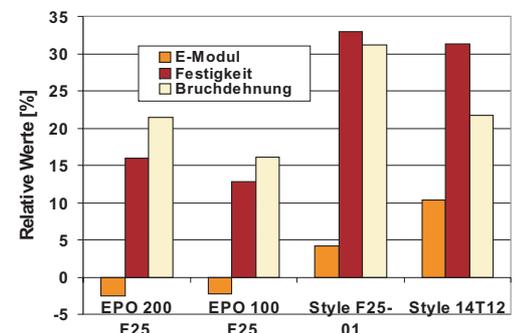


Bild 5: Übersicht der Druckfestigkeiten ausgewählter CFK UD-Laminat.



Mikrowellengestützte Autoklavprozessierung



Bild 1:
Mikrowellenautoklav, Innenansicht.



Bild 2:
Mikrowellenautoklav, Leistungselektronik.



Entsprechend des aktuellen Standes der Technik für die Fertigung von Hochleistungsverbundbauteilen werden Prepregs in einem Autoklaven unter hohem Umgebungsdruck kompaktiert und anschließend mittels Umlufterwärmung über einen definierten Temperaturzyklus ausgehärtet. Bedingt durch einen steigenden Bedarf an immer größeren faserverstärkten Kunststoffbauteilen, nehmen die Abmessungen von Autoklavanlagen zu und stoßen gleichzeitig an physikalische Grenzen hinsichtlich einer gleichmäßigen Temperierung von Produkten. Ein Lösungsansatz zur homogenen und trägheitslosen Erwärmung von Kunststoffen ist die in einem Autoklaven integrierte Mikrowellentechnik in der Ausführung als Mikrowellenautoklav. Im Laufe der Voruntersuchungen wurde belegt, dass die Qualität der mit Mikrowellen ausgehärteten Bauteile mindestens die Qualität der bereits qualifizierten Bauteile erreicht.

Inbetriebnahme im Oktober 2007

In einer Kooperation zwischen dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaption und der Industrie, vertreten von Fa. Scholz Maschinenbau GmbH und Fa. Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH, wurde ein Mikrowellenautoklav konstruiert, gebaut und ausgerüstet. Neben der Mikrowellenheizung von 96 kW ist der Autoklav in Referenz dazu mit einem konventionellen Heizregister von 231 kW ausgerüstet. Durch die Beschickungslänge von 4000 mm und den Durchmesser von ca. 1500 mm entsteht ein Prozessvolumen von ca. 7 m³. Die Einkopplung der Mikrowellen erfolgt über radial ausgerichtete Quellen, die gleichmäßig auf der Kesselwand verteilt sind und dementsprechend eine homogene Verteilung des Mikrowellenfeldes im Prozessraum gewährleisten sollen. Durch eine darauf aufbauende homogene Erwärmung wird vor allem die Neigung zum Bilden von thermisch bedingten Eigenspannungen in den Kunststoffbauteilen reduziert. Mikrowellenprozesse sind temperaturgeregelt und damit auf die genaue Erfassung der Prozesstemperatur angewiesen. Die Messwertaufnahme der Prozesstemperaturen erfolgt im DLR-Konzept mit angepassten Stahlthermoelementen. Im Vergleich zur früheren Methode - Temperaturmessung mittels faseroptischen Thermoelementen - sind metallische Sensoren robuster und kostengünstiger. Die Verarbeitung der gewonnenen Daten erfolgt mittels einer SPS. Im Gegensatz zu früheren Anlagen, bei denen die Regelung auf der Basis der maximalen ermittelten Temperatur aufbaute, können mit der Speicherprogrammierbaren Steuerung komplexe und flexible Temperatur- und Druckverläufe realisiert werden. Die offizielle Inbetriebnahme findet am 11. Oktober 2007 statt. Das primäre Ziel der anstehenden Arbeiten ist die Erforschung der innovativen druckunterstützten Mikrowellenfertigungsverfahren. Als Anwendungsgebiete sind die Fertigung eines CFK-Rumpfsegments, sowie die Aushärtung einer Schale mit stark variierender Wandstärke anvisiert. Anschließend wird die Möglichkeit untersucht, die Verfahren anhand der Simulation einer Kleinserienfertigung (ca. 100 Stück pro Jahr) für den Industrieinsatz zu qualifizieren. Der Mikrowellenautoklav ist als eine duale Anlage ausgeführt. Er kann entweder mit Überdruck (bis 12 bar) oder als Ofen betrieben werden, mit Mikrowellenheizung oder mit konvektionsbasierter Erwärmung. Dadurch entsteht die Möglichkeit den Mikrowellenautoklaven vielfältig zu nutzen.

Im bundesweiten und weltweiten Vergleich entsteht mit dem Mikrowellenautoklaven erstmals die qualifizierte und auch derzeit einzigartige Möglichkeit, Bauteile aus CFK-Bauteile in einem Mikrowellenfeld druckunterstützt auszuhärten. Das zukünftige Potential der Anlagentechnik ist als besonders hoch einzuschätzen, da Energiekosten für große, konventionell betriebene Autoklaven einen erheblichen Anteil der Produktionskosten ausmachen.

> **Dipl.-Ing. Maksim Podkorytov**

Lokale Hybridwerkstoffe: die starken Sehnen des Faserverbundleichtbaus

Jedes Gebilde ist so tragfähig wie das schwächste Glied. Dieses elementare Prinzip der Natur hat z. B. anatomische Hochleistungswerkstoffe hervorgebracht. Muskulatur und Endoskelett werden durch effiziente und sichere Elemente mit extremer Zugfestigkeit biomechanisch verbunden: durch Sehnen.

Der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe für höchste Beanspruchung in Bereichen von Bauteilverbindungen wird durch die Effizienz der Strukturkopplungen bestimmt. Sie erfordert, in Analogie zum anatomischen Pendant, eine durch hohe Festigkeit und hohe Steifigkeit gekennzeichnete optimale Anschlussgüte. Dieses Ziel mit konventionellen mechanischen Fügungen zu erreichen, gestaltet sich jedoch gerade bei faserverstärkten Werkstoffen häufig schwierig und ineffizient, weil sich dabei Fasertrennung, die besondere Kerbempfindlichkeit und der niedrigen Lochleibungs- und Scherfestigkeiten dieser Werkstoffe besonders auswirken.

Lokale Laminathybridisierung

Eine Maßnahme zur Verbesserung der Belastungsfähigkeit mechanischer Fügungen und damit des Leichtbaupotenzials besteht in der lokalen Hybridisierung des Faserverbundlaminats im hochbeanspruchten Kopplungsbereich. Die lokale Hybridisierung entsteht durch Schichtersatztechniken schrittweise eingebetteter, hochfester metallischer Schichten. So entsteht ein Gradientenwerkstoff mit Materialeigenschaften, der die Leistungsfähigkeit des Faserverbundlaminats optimal ausschöpft: die Sehne des Faserverbundleichtbaus.

Potenzial

Der Einsatz von speziellen hochfesten Titan- und Stahllegierungen als Verstärkungswerkstoffe führt zu einer deutlichen Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit des Laminats. Ein Titanhybrid steigert die Lochleibungsfestigkeit eines konventionellen CFK-Laminats auf 180 % bis 211 %, ein Stahlhybrid mit einem maximalem Metallgehalt von 50 % sogar auf bis zu 259 %. Höhere Lochleibungsfestigkeiten in Kombination mit geringeren Randabständen zur Gewährleistung der maximalen Lochleibungskapazität erlauben eine effizientere Gestaltung von einreihigen Bolzenverbindungen in hochbelasteten CFK-Strukturen. Mehrreihige Bolzenverbindungen (Bild 2) sind nicht nur durch höhere absolute Festigkeiten gekennzeichnet, die schon bei geringen Metallgehalten von 30 % bis zu 261 % der Festigkeit eines konventionellen Flugzeuglaminates für CFK/St betragen, sondern ebenso durch höhere spezifische Festigkeiten (Bild 3).

Die Gestaltung des Überganges vom CFK-Laminat zum Hybridlaminat ist entscheidend für die Kopplungseffizienz dieser Verstärkungstechnik. Experimentelle Untersuchungen ergeben statische Anschlussgütegrade zwischen 80 % und 100 % und bemerkenswerte dynamische Lebensdauern, die fünf Flugzeugleben schadensfrei überdauern.

Unabhängbare Voraussetzungen für den industriellen Einsatz dieser Technologie sind die Integrierbarkeit in industrielle Fertigungsprozesse, die mechanische Bearbeitbarkeit, die zerstörungsfreie Prüfbarkeit, die zuverlässige Berechenbarkeit und robuste Design-Rules. Diese Voraussetzungen werden jetzt im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Institut erarbeitet.

> **Dipl.-Ing. Axel Fink (im Bild), Dr. Boris Kolesnikov, Dr. Lars Herbeck**



Bild 1:
Hybridlaminat im Kopplungsbereich.

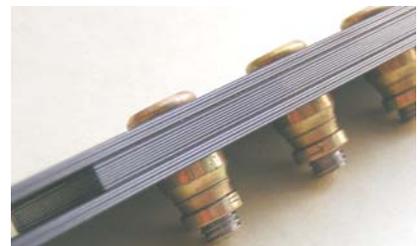


Bild 2:
Dreireihige Bolzenverbindung.

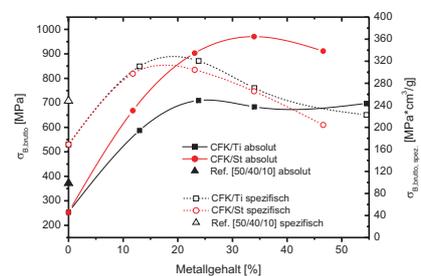


Bild 3:
Absolute und spezifische Festigkeiten von 3-reihigen Bolzenverbindungen.



Entfaltbare, ultraleichte Membranantennen

Strategische Allianz ESA-DLR-CSA

Das Institut entwickelt bereits seit 1997 kritische Sub-Systeme für extrem große, entfaltbare Gossamer-Raumfahrtstrukturen. Seit 2002 wurden die Bemühungen intensiviert, die ursprünglich für treibstofflose Solar Sail-Antriebe konzeptionierten Schlüsseltechnologien für eine Reihe weiterer Anwendungen zu etablieren. Als attraktivstes Gebiet wurden dabei entfaltbare L- und P-Band Membranantennen für Fernerkundungsmissionen identifiziert, deren zukünftiger Bedarf von der ESA im Rahmen von Technologieharmonisierungen adressiert wird.

Der unter maßgeblicher Beteiligung des DLR im Juni 2007 gestartete TerraSAR-X und der kanadische RADARSAT-II, dessen Start noch für dieses Jahr vorgesehen ist, sind die aktuell leistungsfähigsten Radarsatelliten. Deutschland und Kanada gehören auf dem Gebiet der satellitengestützten Fernerkundung zu den weltweit führenden Nationen. Die Bereitstellung einer zuverlässigen und kosteneffizienten Antennentechnologie nimmt dabei eine Schlüsselfunktion für gegenwärtige und zukünftige Missionen ein. Auf der Grundlage eines bestehenden Rahmenabkommens zwischen dem DLR Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme und der Canadian Space Agency (CSA) wurde daher durch das DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik eine agenturübergreifende Allianz angeregt, die für mittelfristige Antennenentwicklungen die bedarfsorientierte und abgestimmte Forschung gewährleisten soll.

Die Verleihung des DLR Forschungssemesters 2007 durch den Vorstand des DLR ermöglichte einen dreimonatigen Aufenthalt eines Wissenschaftlers des Instituts bei der CSA in Kanada. Zeitgleich startete im Frühjahr eine zwischen der ESA und dem DLR vereinbarte PhD-Patenschaft zur Erforschung und Entwicklung innovativer Membranantennenkonfigurationen für zukünftige Fernerkundungsmissionen. Auf Basis dieser Initiativen soll in Zukunft die internationale Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Agenturen auf dem Forschungsgebiet der ultraleichten, entfaltbaren Raumfahrtsysteme intensiviert werden.

Anforderungen und Design

Hochauflösende Radarantennen, die im niedrigfrequenten L- oder P-Band operieren, benötigen je nach Missionsprofil Antennendimensionen von bis zu einigen zehn Metern. Auf Grund der Gewichts- und Volumenbeschränkungen der Trägersysteme sind deshalb ultraleichte Membrankonfigurationen, die sich für den Start platzsparend transportieren lassen und erst im Erdorbit entfaltet werden, eine attraktive und kosteneffiziente Option. Die Qualität einer Planarantenne hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Kritische Aspekte sind zum Beispiel thermoelastische Verformungen infolge der solaren Bestrahlung oder inhomogene Spannungszustände, die zu Falten in der Membran führen.

In Bild 1 ist das Finite Elemente Modell einer 25 m x 6 m großen Antennenkonfiguration dargestellt. Sie besteht aus einem umlaufenden Faserverbundrahmen und einer allseitig gespannten Membran. Neben leichtbauspezifischen Gründen zielt der Einsatz von Composite-Werkstoffen für den Supportrahmen im Wesentlichen darauf ab, die thermomechanischen Verformungen durch einen geeigneten Laminataufbau zu minimieren. Die Einleitung der Spannkraft an verschiedenen Punkten am Umfang

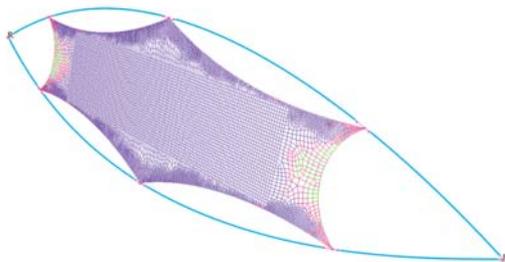


Bild 1:
Konzept einer 25mx6m großen entfaltbaren, Membranantenne mit einem ultraleichten Compositerrahmen.



Funktionstest an einem Sub-scale Modell im Labor. Vermessung der Membranoberfläche mit einem berührungslosen, laserbasierten Messverfahren.

der Membran gewährleistet eine sehr homogene Spannungsverteilung, sodass der Entstehung von Knittermustern vorgebeugt wird. In Bild 2 ist die Vermessung der Oberflächenqualität eines Sub-scale Modells dargestellt. Da die Struktur sehr empfindlich auf Störungen reagiert, wurde für die Tests eine berührungslose Messtechnik auf Basis der Laser-Triangulation eingesetzt. Für das dargestellte Modell konnte auf diese Weise ein sehr niedriger RMS-Wert (Root Mean Square) in Höhe von 0,41 mm ermittelt werden.

Das Aufspannverfahren in Bild 2 sieht die Entfaltung in zwei Schritten vor. Zunächst werden zwei gerade Composite-Booms parallel entfaltet. Anschließend biegen zwei Mechanismen die Masten in eine definierte Rahmengemetrie. Da die Membran zwischen den Booms angeordnet ist, wird die Folie automatisch beim Aufspreizen der Masten gespannt. Das entwickelte Verfahren wurde erfolgreich durch Sub-scale Funktionstests demonstriert, Anfang 2007 zum Patent angemeldet und schließlich im Rahmen des "29th ESA Workshop on Multiple Beams and Reconfigurable Antennas" im April 2007 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Verifikation von Entfaltungskonzepten

Für extrem große Antennendimensionen ist die Etablierung einer geeigneten Verifikationsstrategie für den Entfaltungsprozess besonders wichtig, da Tests unter dem Einfluss der Gravitation und der umgebenden Atmosphäre nur schwierig oder gar nicht möglich sind. Dies trifft insbesondere auf die Entfaltung von so genannten "Spring-Back"-Strukturen zu. Es handelt sich dabei um Systeme, die durch Freisetzung gespeicherter Formänderungsenergie praktisch selbstständig exo-energetisch entfalten; unter den Aspekten des Leichtbaus, der Systemkomplexität und auch der Kosten eine besonders attraktive Methode. Allerdings sind mit exo-energetischen Selbstentfaltungen erhebliche technische Risiken verbunden, da der Prozess weitestgehend unkontrolliert abläuft. Simulationsverfahren sind daher ein wichtiges Mittel der Designverifikation und -verbesserung, die Funktionstests ergänzen oder ersetzen könnten.

In Bild 3 ist die Querschnittsgeometrie eines entfaltbaren CFK-Booms dargestellt, der am Institut bereits in verschiedenen Längen gefertigt wurde. Der Mast kann unter Speicherung von Formänderungsenergie flach gedrückt und aufgewickelt werden. Unter 1g-Bedingungen zeigten Funktionstests, dass er sich selbstständig und unkritisch entfaltet. Um zu klären, ob es auch unter Schwerelosigkeit im Weltall zu einer erfolgreichen Selbstentfaltung kommt, wurden numerische Simulationsverfahren auf Basis der Finite Elemente Methode entwickelt und mit den Erfahrungen korreliert. In Bild 4 ist das Analyseresultat der Entfaltung unter Zero-g für einen 5,25 m langen Boom dargestellt. Auf Grundlage der Simulation konnte nachgewiesen werden, dass sich das Verhalten stark von den Beobachtungen unter Erdgravitation unterscheidet. Zunächst verläuft die Entfaltung chaotisch und unkontrolliert ab. Allerdings ordnet sich die Struktur selbstständig und strebt schließlich ihrem energetischen Minimum entgegen: Nach einer Simulationszeit von 18 Sekunden ist der Mast erfolgreich unter Schwerelosigkeit entfaltet.

> **Dipl.-Ing. Christoph Sickinger**

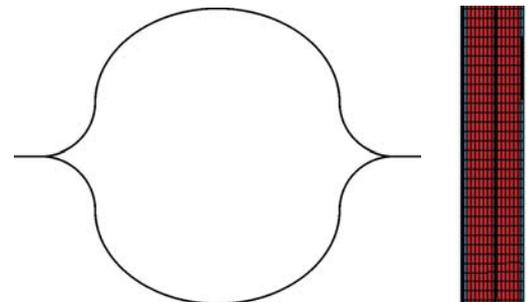


Bild 3:
Querschnitt eines entfaltbaren Booms.



Bild 4:
Finite Elemente Analyse der Selbst-Entfaltung eines 5,25 m langen Booms.



GEP-Strukturen für die ExoMars-Mission

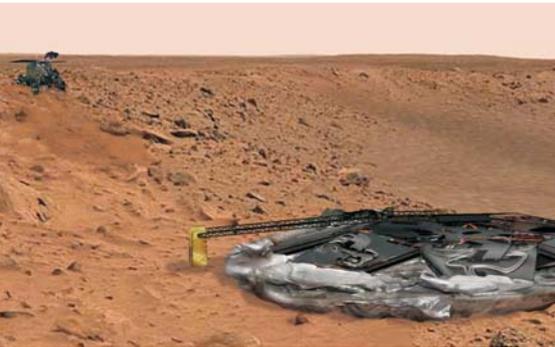


Bild 1:
Instrumenten-Positionierung auf dem Marsboden mittels eines gliedweise abrollbaren CFK-Booms.

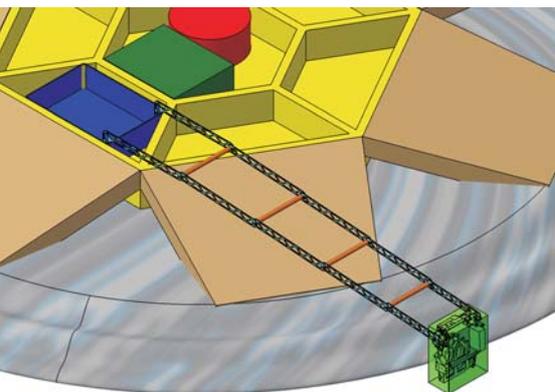


Bild 2:
Konzept des abrollbaren CFK-Booms.



Die geplante ExoMars-Mission der ESA zur Exploration des Planeten Mars wird im kommenden Jahrzehnt einen der Höhepunkte der europäischen Raumfahrt bilden. Der ExoMars-Lander wird ein Landefahrzeug (Rover) mit primär exobiologischer Nutzlast mitführen, daneben aber auch ein geophysikalisch ausgerichtetes Instrumentenpaket (Geophysical Package, GEP) für diejenigen Experimente, die stationäre Bedingungen erfordern (Seismometer, in den Boden eindringende Sonden usw.).

Die „Systemarchitektur“ des GEP war längere Zeit Gegenstand heftiger Debatten und ist auch gegenwärtig noch nicht vollständig geklärt. Innerhalb des GEP-Konsortiums, das vom DLR-Institut für Planetenforschung koordiniert wird, war es Aufgabe des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Strukturkonzepte sowohl für die in den Lander integrierten Einheiten (Batterie, Elektronikboxen usw.) als auch für einige „Deployables“ (Instrumente an ausklappbaren Booms) zu entwickeln und in die Diskussion einzubringen.

Für die Akkommodation der ortsfest innerhalb der Landerstruktur unterzubringenden Einheiten wurde ein Konzept vorgeschlagen, dessen Grundzüge auf das NetLander-Projekt zurückgehen und das dort allen thermischen und mechanischen Tests erfolgreich widerstanden hatte. Die Einheiten werden auf einer mit Kupfer beschichteten CFK-Platte montiert, die ihrerseits über ein Netzwerk aus GFK-Röhren und -Schubwänden an der Außenstruktur befestigt ist. Diese Röhren und Schubwände erlauben eine optimale Funktionstrennung nach Zug-, Druck- und Schubbelastungen, da ihre Gewindekappen mit ausgehärteten Kevlarfäden vernäht sind. Dadurch ergeben sich sehr gute Möglichkeiten der Thermalisolierung, und die ganze Anordnung kann mit MLI (multi-layer insulation) umhüllt werden. Im Rahmen des NetLander-Projekts waren mit dem gleichen Strukturkonzept bereits Landestöße bis 180 g ausgehalten worden; außerdem wurde es in einer Simulationskammer unter Marsbedingungen erfolgreich getestet. Die Adaption dieses Konzepts für die Zentraleinheit des ExoMars-GEP kann daher empfohlen werden.

Die auf dem Marsboden zu positionierenden Instrumente müssen, sofern sie nicht durch Löcher in der unter dem Lander liegenden leeren Airbag-Hülle hindurch sicher in Bodenkontakt gebracht werden können, aus ihrem Stauvolumen herausgehoben und über den Rand des Airbags hinweg transportiert werden (Bild 2). Roboterarme erfüllen diese Aufgabe zweifellos; nur erschien der Aufwand (Masse, Steuerelektronik und -software, Energieverbrauch eines Roboterarms) als vermutlich zu hoch für einen einmaligen Aussetzvorgang.

Darum wurde das in Bild 3 gezeigte Konzept eines gliedweise abrollenden CFK-Booms entwickelt, das statt der Beherrschung von mindestens sechs Freiheitsgraden (3 translatorische, 3 rotatorische, zuzüglich zu einer Greiffunktion) lediglich einen einzigen Rotationsfreiheitsgrad n-fach parallel wiederholt und am Ende die Nutzlast entriegelt. Der Antrieb kann entweder durch Motore mit Planetengetriebe in den einzelnen Drehachsen oder über eine Seilzugmechanik erfolgen. Die Kinematik dieser Seilzugmechanik wurde gründlich untersucht.

Die vorgeschlagenen Konzepte können in dieser (oder in einer vergleichbar ähnlichen) Form in die Entwicklung des GEP für die ExoMars-Mission eingebracht werden.

> **Dr.-Ing. Joachim Block**

Experimentelle Validierung von 3-D-Versagenskriterien

Im Rahmen der Entwicklung von Analyse- und Simulationswerkzeugen hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften insbesondere 3D-verstärkter textiler Faserverbunde sowie der Stabilitätseigenschaften versteifter dünnwandiger Tragschalen stehen seit neuestem spezielle geeignete Mess- und Versuchstechniken zur Verfügung, die zur Validierung dieser Berechnungswerkzeuge erforderlich sind.

Arcan-Testvorrichtung zur Validierung von 3D-Versagenskriterien

Das Festigkeitsverhalten von Verbundwerkstoffen, die in der Materialdickenrichtung verstärkt sind, unterscheidet sich insbesondere durch die Eigenschaften in dieser Richtung signifikant von unidirektionalen Verbunden. Das Leichtbaupotential textiler Verbundwerkstoffe kann durch eine 3D-Verstärkung erheblich erhöht werden, wenn die verbesserten Materialeigenschaften experimentell erfasst und in der Vordimensionierung berücksichtigt werden. Die besonderen Material- und Versagenseigenschaften 3D-verstärkter Verbunde sollen daher mit einem neu entwickelten Prüfverfahren in der Materialdickenrichtung mit dem Ziel analysiert werden, die Vorhersagequalität von 3D-Versagenskriterien besser zu beurteilen.

Zu diesem Zweck wurde eine sogenannte Arcan Testvorrichtung entwickelt und vom DLR zum Patent angemeldet. Bei dieser Vorrichtung werden einfache, taillierte Probekörper aus Prüfplatten mit einer moderaten Dicke (15 mm – 30 mm) unter Belastungen in der Plattendickenrichtung geprüft. Dazu wird ein Probekörper in der Mitte zweier Halbscheiben installiert und unter unterschiedlichen Winkeln belastet.

Prinzipiell ist es möglich einzelne Druck-, Zug- und interlaminare Schubbelastungen sowie definierte Belastungskombinationen zu prüfen. Auf diese Weise können die maßgeblichen 3D-Materialeigenschaften bestimmt und über die kombinierten Belastungen Versagenskriterien validiert werden. Im Gegensatz zu anderen Prüfmethoden wird für dieses Verfahren lediglich eine uni-axiale Prüfmaschine benötigt (s. Bild 1). Weiterhin werden nur einfache und preiswert zu fertigende Prüfkörper für verschiedene Belastungskombinationen verwendet und dadurch vergleichbare Ergebnisse erzielt.

Testergebnisse und Materialeigenschaften für dreidimensional verstärkte Verbunde sind in der Literatur kaum zu finden. Erste Ergebnisse mit Glasfaser- und Kohlenstofffaserlaminaten ohne dreidimensionale Verstärkungen zeigen aber vergleichsweise gute und vielversprechende Resultate. Die Laminatfestigkeiten in der Materialdickenrichtung unterscheiden sich maßgeblich von den zweidimensionalen Eigenschaften einer Einzelschicht. Dabei wird das Festigkeitsverhalten von Verbunden in der Materialdickenrichtung von lokalen Versagensmechanismen mehrerer Einzelschichten geprägt und nicht nur von einer Einzelschicht bestimmt. Dennoch lassen sich die Festigkeiten unter kombinierten interlaminaren Schub- und Zugbelastungen in der Materialdickenrichtung recht gut mit zum Teil einfachen Versagungskörpern, wie zum Beispiel dem Tsai-Wu-Kriterium, darstellen (s. Bild 2). Damit bietet diese Prüfvorrichtung insgesamt ein großes Potenzial, um die Material- und Versagenseigenschaften von Verbunden in der Materialdickenrichtung genauer zu untersuchen.

> **Dipl.-Ing. Daniel Hartung, Dipl.-Phys. Hans Christian Goetting (links)**



Bild 1:
Links: Prüfmaschine mit Arcan-Testvorrichtung. Rechts: Einspannung eines GFK-Prüfkörpers mit applizierten Dehnungsmessstreifen.

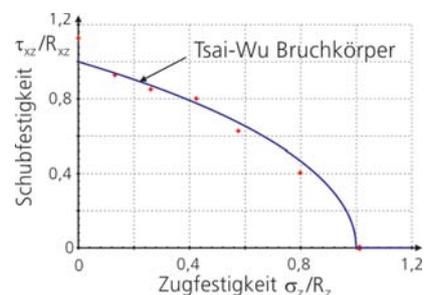
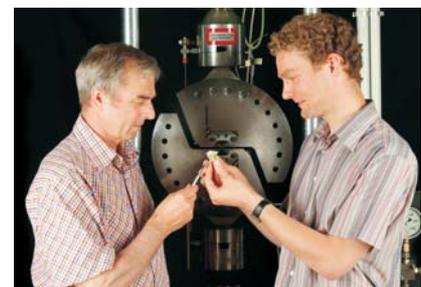


Bild 2:
Gemessene interlaminare Schub- und Zugfestigkeiten im Vergleich zu einem 3D-Versagungskörper nach Tsai-Wu.



Robuste Regelung von Leichtbaurobotern mit adaptiven Komponenten

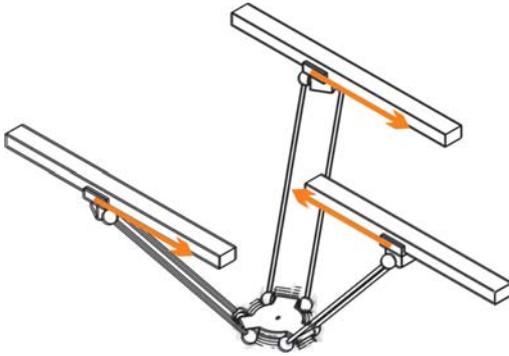


Bild 1:
Hohe Beschleunigungen während der
Verfahrenvorgänge des Parallelroboters regen
die Struktur zu Schwingungen an.



Bild 2:
Parallelroboter TRIGLIDE mit aktiver Struktur.



Hochdynamische Parallelroboter mit adaptiven Komponenten

Der Industrieroboter ist als zentrales Element der Automatisierungstechnik stetig steigenden Anforderungen in Bezug auf Schnelligkeit und Genauigkeit ausgesetzt. Das Steigerungspotenzial herkömmlicher serieller Roboter, deren Glieder und Gelenke in Reihe angeordnet sind, ist nahezu erschöpft. Im Gegensatz dazu eröffnet der Einsatz paralleler Roboterstrukturen den Zugang zu neuen Leistungsklassen, die Geschwindigkeit und Präzision in bisher unbekannter Art und Weise verknüpfen. Die maßgebliche Technologie zur Realisierung dieser neuen Klasse von Robotern ist die Adaptronik.

Die typischen Merkmale eines Parallelroboters, wie gestellfeste Antriebe und geschlossene kinematische Ketten, sind in der Prinzipskizze des TRIGLIDES in Bild 1 deutlich zu erkennen. Diese Eigenschaften reduzieren die bewegte Masse und erhöhen gleichzeitig die Steifigkeit der Struktur. Die dadurch realisierten hochdynamischen Fahrbewegungen von bis zu 10 g regen die Roboterstruktur zu Schwingungen an, deren Eigenschaften jedoch positionsabhängig sind. Diese Schwingungen werden von den Sensoren des adaptronischen Systems erfasst und an den Regler weitergereicht. Auf der Basis des bekannten Schwingungsverhaltens der Struktur berechnet er die zur Vermeidung der Schwingungen benötigten Steuersignale. Die aktiven Stäbe des Roboters werden mit den Steuersignalen beaufschlagt und arbeiten so den unerwünschten Schwingungen entgegen. Auf diese Weise wird die Präzision des Parallelroboters signifikant gesteigert.

Der Parallelroboter TRIGLIDE ist der Versuchsträger zur Erprobung dieser neuen Technologie im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 562 - "Robotersysteme für Handhabung und Montage". Seine im Bild 2 zu sehende aktive Struktur und die adaptronische Regelung basieren auf Forschungsergebnissen des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik. Die neuartigen aktiven Stäbe bestehen aus einem Kohlefaser-Rohr mit applizierten, die ganze Oberfläche bedeckenden Piezofolienaktuatoren. Sie sorgen dafür, dass Schwingungen in den Endeffektor, der Halterung des Greifers, eingeleitet werden und so unerwünschte Schwingungen destruktiv überlagern.

Die Regelung der Strukturschwingungen in den drei existierenden Raumrichtungen gewährleistet die wirksame Reduzierung aller auftretenden Störeinflüsse. Die Herausforderungen bei der Entwicklung der Regelung sind die sich mit der Position des Roboters ändernden Schwingungseigenschaften der Struktur und die unbekanntenen Lasten der zu handhabenden Bauteile. Durch den Einsatz mehrerer Regler, die jeweils auf bestimmte Positionen des Roboters abgestimmt sind, und die Verwendung des Ansatzes der Robusten Regelung kann der TRIGLIDE im gesamten Arbeitsraum eine zuverlässige Performance der Schwingungsunterdrückung aufweisen. Ferner ist die Systemidentifikation der Regelstrecke, die eine notwendige Basis zur Synthese eines Reglers ist, und die Synthese selbst in einem automatisierten Prozess auf dem Regelungsrechner implementiert. Dies erlaubt eine schnelle Rekalibrierung nach Wartungsarbeiten am Roboter.

> **Dipl.-Ing. Stephan Algermissen**

Publikationen und Patente 2006 - 2007

Patente:

Melcher, J., Baumbach, S.:

„Konstruktionselement (Kennwort: Traktroid)“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2007 002 127.7-24, Anmeldetag 15. 1. 2007.

Melcher, J., Junge, M., Gillhoff, M.:

„Verfahren einer passiven und/oder aktiven selbstorganisierenden Schwingungsbegrenzung“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2004 030 701.6, Anmeldetag 25.06.2004.

Melcher, J., Krämer, M., Heinrich, J., Günster, J., Tautz, J.:

„Method of Forming a Structure Having an Optimized Three-Dimensional Shape“, US Patent 11/443,781, 31.5.2006, Französisches Patent 06 04 427, 2006.

Melcher, J., Krämer, M., Lura, F., Niederstadt, T.:

Strukturen für das Adsorbieren chemischer Substanzen, insbesondere von Wasserstoff“, Europäisches Patent EP 05 020 633.3, 27.6.2006.

Melcher, J., Melcher, C.: „Verbundstein und Vorrichtung bestehend aus einer Vielzahl dieser Verbundsteine“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2007 002 126.9, Anmeldetag 15. 1. 2007.

Kleineberg, M., Ströhlein, T., Frauenhofer, M. et. al.:

„Induktionsgestütztes Fertigungsverfahren“, DE 10 2006 0400 49.6.

Ströhlein, T., Mosch, J., Kleineberg, M. et. al.:

„Verfahren und Vorrichtung zur Beurteilung der Qualität von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen und deren Vorformen“, DE 10 2007 006 702.1, 2007.

Mahrholz, T., Mosch, J., Ströhlein, T. et. al.:

„Verfahren und Vorrichtung zum Vorformen von Kohlenstoffaseralbzeugen für die Herstellung von Faserverbundbauteilen“, DE 10 2007 009 124.0.

Ströhlein, T., Ernst, G., Herbeck, L. et. al.:

„Mittragendes Element zur Vormontage von Systemen im Verkehrsflugzeug“ (angemeldet).

Sickinger, C.:

„ Verfahren und Vorrichtung zum Entfalten einer Membran im Weltraum, 16.04.2007 (Einreichung).

Podkorytov, M., Meyer, M., Herbeck, L., Gräber, R.:

„Richtlinie für Gestaltung der angepassten Formwerkzeuge für die Temperierung im Mikrowellenfeld“, 2007.

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und auf Konferenzen:

Melcher, J., Mund, E., et. al.:

„Bionische Aktuatoren für die Adaptrotechnik“, Bionik-Kongress in Bremen: Patente aus der Natur, 27.-28. Oktober 2006, Bremen, ISBN 978-3-00-022050-0, Bionik-Innovations-Centrum B-I-C-Bremen 2007, S. 108-119.

Melcher, J., Mund, E., et. al.:

„New Piezoceramic Actuators Using Self-Organizing Fabrication Methods“, 10th Int. Conf. and Exhibition of the Europ. Ceramic Soc., 17.-21. Juni 2007, Berlin.

Podkorytov, M., Stroehlein, T., Frauenhofer, M., et. al.:

„Electromagnetic Assisted Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastics“, CEAS-Kongress 2007; Berlin.

Stroehlein, T., Podkorytov, M. et. al.:

„Composite Technologies for Future Demands, Sampe“, April 2007, Paris.

Podkorytov, M., Meyer, M., Herbeck, L.:

„Produktion von Faserverbunden mittels Mikrowellenerwärmung“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2006, Braunschweig.

Kleineberg, M., Ströhlein, T., Hanke, M.:

„Advanced Equipment for Automated Infusion Technology“, ISCM 2006 - Noordostpolder, Mai 2006.

Ströhlein, T., Hanke, M., Kleineberg, M., Herbeck, L.:

„Automatisierte Injektionstechnologie“, Sampe – Braunschweig, Feb. 2006.

Ströhlein, T., Kleineberg, M., Hanke, M., Herbeck, L.:

„Infusion Technology for Automated Production of High-Performance CFRP-Parts“, ICAS – Hamburg, Aug. 2006.

Ströhlein, T., Kleineberg, M., Hanke, M., Herbeck, L.:

„Infusion Machines for the Quality

Publikationen und Patente 2006 - 2007

Assured Liquid Resin Infusion (LRI) Series Production", AVK – Essen, Sept. 2006.

Kleineberg, M., Herbeck, L., et. al.:
"High Potential Process Acceleration by Selective and Volumetric Heat Transfer Methods", CFK-Conv.,Stade, June 2007.

Podkorytov, M., Ströhlein, T., Frauenhofer, M. et. al.:
"Electromagnetic Assisted Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Plastics", CEAS, Berlin, 2007.

Block, J. Kreuser J.:
"Struktur und Mechanismen". In: W. Ley, K. Wittmann, W. Hallmann (Hrsg.): Handbuch der Raumfahrttechnik. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag, (Oktober 2007).

Ulamec, S., Biele, J., Block, J., et. al.:
"The Geophysics Environmental Package of the ExoMars Mission", 58th IAC Congress, Hyderabad, India, Sept. 2007.

Biele, J., Ulamec, S., Block, J., et. al.:
"The Geophysics and Environmental Package (GEP) of the ExoMars Mission", European Planetary Science Congress (EPSC), Potsdam, August 19-24, 2007.

Algermissen, S., Rose, M., et. al.:
"Automated Synthesis of Robust Controllers for Smart-Structure", AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, Honolulu, USA.

Algermissen, S., Keimer, R., et. al.:
"Robust Control for Vibration Suppression on Parallel Robot TRIGLIDE", in Adaptronic Congress, Göttingen, Germany.

Keimer, R., Algermissen, S., et. al.:
"Smart structures technologies for Parallel kinematics in handling and assembly", SPIE - Smart Structures & Materials/NDE, San Diego, California, USA.

Rose, M., Algermissen, S., et. al.:
"Position dependent linearized elastic models of parallel robot systems with embedded smart devices for vibration

suppression control algorithms", ICSV - International Congress on Sound and Vibration, Cairns, Australia.

Kärger, L., Wetzel, A., et. al.:
"A three-layered sandwich element with improved transverse shear stiffness and stresses based on FSDT", Computers and Structures 84: 843-854, 2006.

Kärger, L., Baaran, J., Teßmer, J.:
"Rapid simulation of impacts on composite sandwich panels inducing barely visible damage". Composite Structures 79: 527-534, 2007.

Kintscher, M., Kärger, L., et. al.:
"Stiffness and failure behaviour of folded sandwich cores under combined transverse shear and compression", Composites Part A 38: 1288-1295, 2007.

Kärger, L., Baaran, J., Teßmer, J.:
"Efficient simulation of low-velocity impacts on composite sandwich structures", Computers and Structures: in press, 2007.

Kärger, L., Baaran, J., Teßmer, J.:
"FE-Tool CODAC for an efficient simulation of low-velocity impacts on composite sandwich structures", Proc. of the 3rd Europ. Conf. on Computational Mechanics, Lissabon, 2006.

Baaran, J., Kärger, L., Wetzel, A.:
"Efficient prediction of composite damage tolerance", 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Hamburg, 2006.

Kärger, L., Baaran, J., Teßmer, J.:
"Experimental validation of efficient impact simulation methodologies of sandwich structures", 12th Australian International Aerospace Congress, Melbourne, 2007.

Kling, A., Kärger, L., Baaran, J., et.al.:
"Potentials and Limitation of FE-based Simulation Methods for Fibre Composite Structures", NAFEMS Seminar „Reliable Use of Numerical Methods in Upfront Simulations“, Wiesbaden, 2007.

Kärger, L., Baaran, J., Teßmer, J.:
"FE-Tool CODAC for an efficient simulation of low-velocity impacts on composite sandwich structures". 3rd European Conference on Computational Mechanics, Lissabon, June 2006.

Kärger, L., Baaran, J., Teßmer, J.:
"Experimental validation of efficient impact simulation methodologies of sandwich structures", 12th Australian International Aerospace Congress, Melbourne, March 2007.

Sickinger, C., Straubel, M., et. al.:
"Mechanical Concepts on Large Membrane Array Antenna Architectures", 29th ESA Antenna Workshop on Multiple Beams and Reconfigurable Antennas, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, April 2007.

Sickinger, C., Assing, H., et. al.:
"Verification Methodology for Self-Deploying Support Frames", 1st CEAS European Air and Space Conference, Berlin, Germany, Sept. 2007.

Straubel, M., Sickinger, C., Langlois, C.:
"Large Deployable Membrane Structures", 1st CEAS European Air and Space Conference, Berlin, Sept. 2007.

Riemenschneider, J., Mahrholz, T., et. al.:
"System Response of Nanotube based Actuators", Mechanics of Advanced Materials and Structures, vol. 14, no. 1, pp. 57-65, Jan.2007.

Riemenschneider, J., Temmen, H., Monner, H.P.:
"CNT based Actuators: Experimental and Theoretical investigation of the in-plane strain generation", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 7, no. 10, 2007.

Riemenschneider, J., Opitz, S. et. al.:
"Modelling of Nanotube Based Actuators and Experimental Validation", Ouro Preto, Brazil: NT 07, 2007.

Impressum

Herausgeber	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik
Titelmotiv	Schwerpunkte des Instituts für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik
Anschrift	Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
Redaktion	Prof. Dr. Michael Sinapius Dr. Jörg Melcher Brigitte Zell-Walczok
Druck	Documaxx Hessler Digitaldruck GmbH Braunschweig
Drucklegung	Braunschweig, im September 2007

Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung
nur nach vorheriger Absprache mit dem DLR gestattet.

www.DLR.de

Das DLR im Überblick

Das DLR ist das nationale Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt. Seine umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind in nationale und internationale Kooperationen eingebunden. Über die eigene Forschung hinaus ist das DLR als Raumfahrtagentur im Auftrag der Bundesregierung für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten sowie für die internationale Interessenswahrnehmung zuständig.

In 31 Instituten und Einrichtungen an den acht Standorten Köln-Porz, Berlin-Adlershof, Bonn-Oberkassel, Braunschweig, Göttingen, Lampoldshausen, Oberpfaffenhofen und Stuttgart beschäftigt das DLR ca. 5.100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Das DLR unterhält Außenbüros in Brüssel, Paris und Washington D.C.

Die Mission des DLR umfasst die Erforschung von Erde und Universum, Forschung für den Erhalt der Umwelt und umweltverträgliche Technologien zur Steigerung der Mobilität sowie für Kommunikation und Sicherheit. Das Forschungsportfolio des DLR reicht von der Grundlagenforschung zu innovativen Anwendungen und Produkten von morgen. So trägt das im DLR gewonnene wissenschaftliche und technische Know-how zur Stärkung des Industrie- und Technologie-Standortes Deutschland bei. Das DLR betreibt Großforschungsanlagen für eigene Projekte sowie als Dienstleistung für Kunden und Partner. Darüber hinaus fördert das DLR den wissenschaftlichen Nachwuchs, betreibt kompetente Politikberatung und ist eine treibende Kraft in den Regionen seiner Standorte.



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

www.DLR.de/fa