

Innovationsbericht 2005

Institut für
Faserverbundleichtbau
und Adaptronik



Inhalt

Elektrodenstruktur eines piezokeramischen
Flächenaktuators.



Vorwort

Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach, Prof. Dr. Michael Sinapius4

Innovationsbeiträge

Carbon-Nanotube-Aktuatoren

Johannes Riemenschneider, Dr. Thorsten Mahrholz, Dr. Jörg Melcher,
Dr. Hans Peter Monner, Jürgen Mosch, Dr. Hubert Temmen6

Faserverstärkte Nanocomposites

Dr. Ulrich Riedel, Björn Köhnke, Dr. Thorsten Mahrholz, Jürgen Mosch,
Dirk Röstermundt8

Schadensanalyse von doppelschaligen Strukturen

Luise Kärger, Uwe Pfeiffer, Anja Wetzel10

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe: verbesserte NCF-Werkstoffe für die Nasstechnologie

Anatole Gilliot, Simon Wohlfahrt12

Mikrowellenprozessierung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen

Matthias Meyer14

Integrale CFK-Fertigungsverfahren mit kombinierten Halbzeugvarianten

Robert Kaps, Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach16

Lokale Metalllaminat: effiziente mechanische Kopplung von Faserverbundlaminaten

Axel Fink, Dr. Boris Kolesnikov, Dr. Lars Herbeck18

Active Twist Blade

Peter Wierach, Johannes Riemenschneider20

Health-Monitoring mit Ultraschall-Lamb-Wellen zur Detektion von Schäden in Composites

Dr. Wolfgang Hillger22

Effiziente Thermalanalyse

Tom Sprowitz, Dr. Jan Teßmer24

Materialien und Strukturen für Energie- und Thermalsysteme

Dr. Franz Lura, Horst-Georg Lötzke26

Impressum29

Vorwort

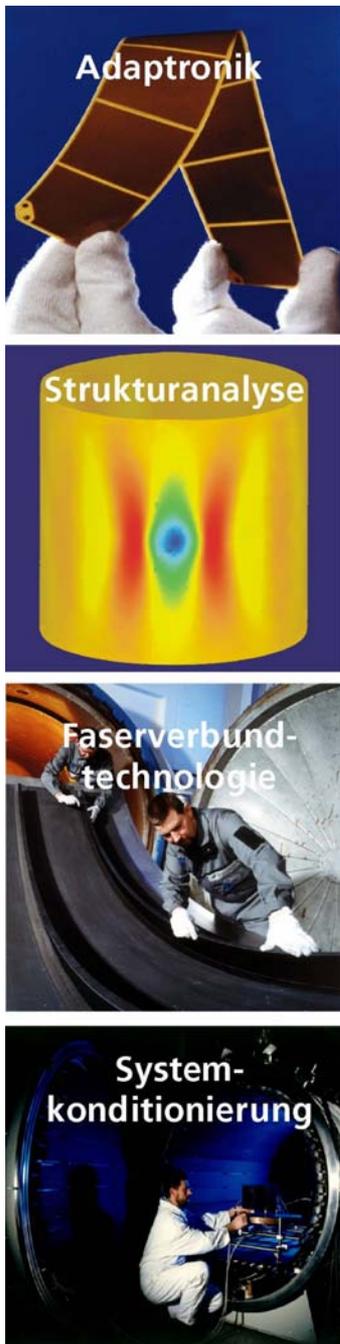


Bild 1:
Fachkompetenzen des Instituts.

Neue Werkstoffe, Materialsysteme und die Umsetzung ihrer Eigenschaften in Strukturen und Bauteile sind seit jeher maßgebliche Motoren für Innovationen. Heute sind es „intelligente“, multifunktionale Hochleistungsmaterialien und -strukturen, die die Forschung vor allem in den Technologiebereichen Luft- und Raumfahrt dominieren. Bereits in der Materialentwicklung lassen sich gezielt neue Funktionen generieren, die später in Halbzeugen und Bauteilen nutzbar sind. Für die Entwicklung von Bauteilen und Systemen bedarf es schneller Berechnungswerkzeuge. In der Fertigung sind zunehmend kostengünstige Verfahren gefragt, die von einer Prozesssimulation vorbereitet und begleitet werden.

Die zukünftigen Innovationen im Faserverbundleichtbau und Adaptronik finden vom Material bis zum System statt. Das DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik hat 2004 fünf Themenbereiche zukünftiger Innovationen formuliert:

- > **Nanobasierte Werkstoffsysteme,**
- > **Entwurf und Fertigung imperfektionstoleranter Strukturen,**
- > **Fertigungsprozess - Entwicklung und Simulation,**
- > **Adaptiver Leichtbau,**
- > **Materialien und Strukturen für Energie und Thermalsysteme.**

Daneben arbeitet das Institut in vielen nationalen und internationalen Forschungsprogrammen mit, in denen neue Ideen aus Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Produkte umgesetzt werden. Dieser Bericht stellt 11 Innovationen vor, die stellvertretend für die Kreativität der über 120 Mitarbeiter des Instituts stehen.

Aus den Forschungen zur Nanotechnologie berichten zwei Beiträge. Wichtige Fortschritte wurden im Verständnis der Arbeitsweise der aktivierbaren Carbon-Nanotubes erzielt. Außerdem wurden neue Nanopartikel zur Konditionierung der Matrixwerkstoffe in polymerbasierten Faserverbunden untersucht.

Zur Schadensanalyse von Doppelschalen – Rumpfen veröffentlichte das Institut neue, schnelle Berechnungsmethoden und stellte neue experimentelle Prüfmethode vor. Der Einsatz von Faserverbunden verzeichnet gerade in der Luftfahrtindustrie ein stürmisches Wachstum. Konsequenterweise fokussiert sich das Institut auf kostengünstige Herstellungsverfahren, bei denen durch verbesserte Laminatmodellierung und neue Harzsysteme die Leistungsfähigkeit der Verbunde aus Nanstechnologie deutlich gesteigert werden kann. Aus den laufenden Arbeiten wird dazu aus dem Kundenzentrum des DLR bei Airbus Bremen berichtet.

Die Fortschritte in der Mikrowellenfertigung lassen sich bereits in der Serienproduktion durch den Einsatz bei der Harzvorwärmung im Rahmen von Harzinfusionstechniken sehen. Über den aktuellen Stand der Forschungen und Entwicklung der Mikrowellentechnologie für die Faserverbundfertigung gibt der Innovationsbericht Auskunft. Anfang 2006 wird der erste Mikrowellenautoklav im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik aufgestellt und in Betrieb genommen werden.

Auch die Entwicklung hybrider Fertigungsmethoden hat im letzten Jahr große Fortschritte gemacht. Dabei geht es u.a. um die Kombination von leistungsstarken UD-Prepregs für einfache Geometrien mit trockenen, kostengünstigen und textilisch optimierten Preformstrukturen zur Realisierung hoher Integrationsgrade. Geht es hierbei vor allem um Kostensenkung bei gleichzeitiger Eigenschaftsverbesserung, eröffnen im Institut untersuchte Titan-CFK-Verbunde neue Anwendungsfelder von Faserverbunden besonders im Bereich kritischer Lasteinleitungsbereriche. Eine lokale Verstärkungstechnik

mittels Metallhybridisierung führt zu deutlichen strukturmechanischen Vorteilen und zu einer ausschlaggebenden Verbesserung des Leichtbaupotentials auch von Niet- und Bolzenverbindungen für hochbeanspruchte Faserverbundbauteile.

Beispielhaft für adaptiven Leichtbau sind die höchst vielversprechenden Neuentwicklungen zum adaptiven Rotor, bei denen ein Modellrotorblatt mit integrierten Piezokeramiken, die eine aktive Verwindung des Rotorblattes ermöglichen, ausgelegt und gefertigt wurde.

Mit Spannung erwarten die Flugzeughersteller Systeme für integrierte Bauteilüberwachung. Boeing kündigt für den 787 bereits erste serienreife Entwicklungen an. Das Institut stellt seine Entwicklungen des Ultraschall-Health-Monitoring zur Detektierung von Schädigungen in Faserverbunden vor. Sie basieren auf der Analyse der Ausbreitung von induzierten Lamb-Wellen.

Die sich stürmisch entwickelnden Kapazitätsanforderungen an die Satelliten-Kommunikation gehen mit steigenden Ansprüchen an die Sende- und Empfangsqualität einher und führen zur Forderung nach geometrischer Stabilität. Eine Steifigkeitserhöhung führt bei thermischer Belastung nicht zwingend zu geringeren Deformationen. Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik wurden deshalb neue Homogenisierungsverfahren entwickelt, mit deren Hilfe die Thermallasten von Satellitenreflektoren aus Sandwichbauweisen berechnet werden können.

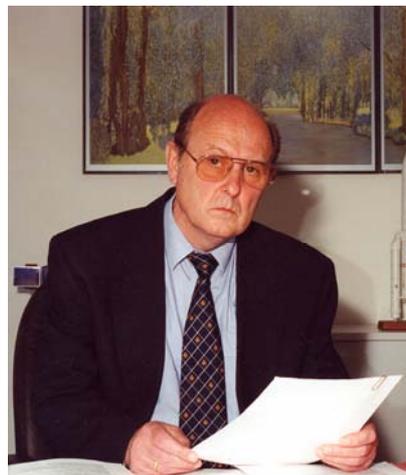
Aus dem Wissen und der Analyse des Thermalhaushaltes können adaptive Konzepte oder auch Konzepte des Thermalmanagements erarbeitet werden. Patentierte Lösungen des Instituts zum Thermalmanagement thermisch hoch belasteter Strukturen werden im Innovationsbericht vorgestellt.

Der Innovationsbericht 2005 des Instituts möchte Standortbestimmung sein für die laufende Forschung und Schlaglichter werfen auf zukünftige Problemfelder und mögliche Lösungsansätze. Dabei geht es nicht um einen umfassenden Bericht sondern um spannende, vielfältige Neuerungen im Bereich des Faserverbundleichtbaus und der Adaptronik.

Viel Freude beim Lesen

Prof. Dr.-Ing. habil. Elmar Breitbach
Institutsleiter

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius
Stellvertretender Institutsleiter



Carbon-Nanotube-Aktuatoren

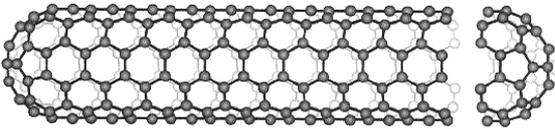


Bild 1:
Atomarer Aufbau eines CNTs.

Aktuatoren mit niedriger Ansteuerspannung und hohen Kräften

Eine Grenze bei der Entwicklung von adaptiven Systemen ist häufig die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Aktuatorik. Dabei wäre insbesondere ein größerer Weg/Dehnung als bei derzeitigen piezokeramischen Standardlösungen ($\epsilon=0,1\%$), bei mindestens entsprechender Steifigkeit, wünschenswert. Eine möglichst geringe Dichte ist für die optimale Integration in moderne Leichtbaustrukturen nützlich. Niedrige elektrische Versorgungsspannungen der Aktuatorik wären ebenso vorteilhaft. All diesen Anforderungen werden Aktuatoren auf Basis von Carbon-Nanotubes (CNTs), Bild 1, gerecht.

Einzelne Tubes, die einen Durchmesser von ein bis fünfzig Nanometern und eine Länge von mehreren Mikrometern aufweisen, haben beachtliche Eigenschaften: E-Modul 600 GPa; Aktive Dehnung (in Kombination mit einem Elektrolyten) über 0,8 %, Dichte von 1,33 g/cm³. Daher scheint dieser Werkstoff hervorragend für zukünftige Aktuatoren geeignet zu sein. Im Institut FA laufen Forschungsaktivitäten mit dem Ziel, die Grundlagen für die Entwicklung derartiger Aktuatoren aufzubauen.

Das Grundprinzip von CNT basierten Aktuatoren

Um eine aktive Dehnung von CNTs zu erreichen, ist eine CNT Struktur sowie eine zusätzliche Elektrode in einen Elektrolyten einzubringen und wie die Platten eines Kondensators zu verschalten. Bei der aktuatorischen Wirkung von CNTs handelt es sich um eine Interaktion zwischen beweglichen Ionen, die sich je nach elektischem Potenzial der Nanotube-Oberfläche mehr oder weniger zahlreich an derselben anlagern. Durch eine solche Anlagerung und die damit verbundenen Effekte, dehnen sich die Nanotubes aus.

Dieser grundsätzliche Effekt wurde bereits von verschiedenen Forschergruppen nachgewiesen. Bisher konnten die Zusammenhänge zwischen den elektrischen (Spannung, Strom und Ladung) und den mechanischen (Dehnung) Größen jedoch nicht hinreichend dargestellt werden. Eben dieser Zusammenhang ist jedoch die Basis für die Entwicklung zukünftiger Aktuatoren. Deswegen wurde das System im Institut intensiv experimentell untersucht und simultan mit der Modellierung der Zusammenhänge begonnen. Die Versuchsergebnisse zeigen dabei einzelne Bereiche der Ansteuerspannung, die unterschiedliches Übertragungsverhalten aufweisen. Dies trifft für das quasi-statische Antwortverhalten und die transiente Dynamik genauso zu wie für die dynamische Systemantwort.

Die Basis für alle experimentellen Untersuchungen ist die Herstellung von makroskopischen CNT-Strukturen, welche eine Charakterisierung des Effektes erlauben. Die Herstellung dieser Strukturen geschieht mittels Vakuumfiltration von Nanotube-Dispersionen. Dabei haben das Dispersionsmittel und die Dispersionsqualität einen großen Einfluss auf die Qualität des Filtrats. Je besser die Nanotubes dispergiert sind, desto homogener der Filterkuchen (Nanotube-Papier, Bild 2). Im Rahmen von Dispersions- und Filtrationsversuchen werden unterschiedliche Nanotubes (singlewalled, multiwalled, NH₂-funktionalisiert) verwendet, um Vor- und Nachteile dieser Materialien bei der Herstellung makroskopischer Strukturen festzustellen. Danach sind funktionalisierte Nanotubes nicht gut für den Aufbau von Nanotube-Papier verwendbar. Detaillierte mecha-

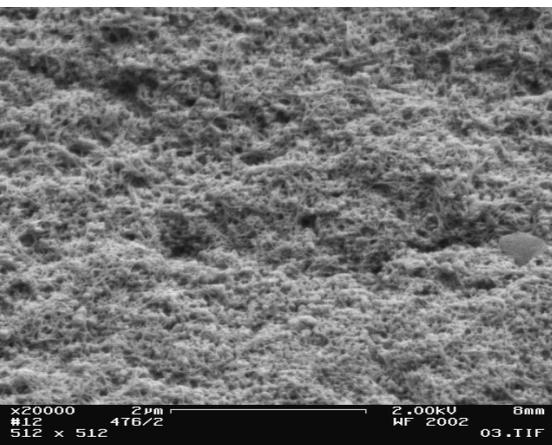


Bild 2:
SEM Aufnahme eines Nanotube Papiers.

nische, mikroskopische und elektrische Analysen der unterschiedlichen Papiere wurden durchgeführt. Darüber hinaus stellt die Untersuchung der aktuatorischen Eigenschaften den zentralen Schwerpunkt der Arbeiten dar. Dazu werden die Nanotube-Papiere in einem speziell für in-plane Dehnungsmessungen konzipierten Prüfstand (siehe Bild 3) eingespannt, kontaktiert, geringfügig vorgespannt und mit einem Elektrolyten umgeben. Als Elektrolyt werden in diesem Prüfstand unterschiedliche wässrige Salzlösungen verwendet. Zwischen dem Nanotube-Papier und einer Gegenelektrode, die sich auch im Elektrolyten befindet, wird eine Spannung angelegt, wodurch sich das Papier wie eine Kondensatorplatte auflädt und dadurch ausdehnt. Auf diese Weise kann die aktive Dehnung in der Papierebene gemessen werden. Bisher wurden die folgenden maximalen Dehnungen gemessen: 0,5 % (bei 1 V Ansteuerspannung) und sogar über 0,8 % (2 V). Der Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung (siehe Bild 4) auf den Nanotube-Papieren ist reproduzierbar nicht linear. So ergibt sich sowohl bei hohen, als auch bei niedrigen (negativen) Spannungen eine positive Dehnung.

Weiterführende Untersuchungen

Die zukünftigen Arbeiten lassen sich in vier Arbeitspakete zusammenfassen:

> Weitere Untersuchung der Aktivierung:

Weitere Analyse des elektro-mechanischen Effektes und dessen empirische Modellierung; Aufbau eines weiteren Prüfstandes zur Messung der Dehnung in Dickenrichtung.

> Optimierung des Elektrolyts:

Weitere Untersuchung des Einflusses der Ionen Größe, Ladung und Konzentration auf die Dehnung, sowie Auswahl eines geeigneten Festkörperelektrolyten und Entwicklung von Fertigungstechnologien dafür.

> Makroskopische CNT Struktur:

Entwicklung von makroskopischen CNT Strukturen mit verbesserten mechanischen Eigenschaften.

> Systemintegration:

Entwicklung von gekapselten Modulen, durch die eine Strukturintegration ermöglicht wird; Entwicklung angepasster Ansteueralgorithmen.

Das erwartete Ergebnis des Projektes ist ein modular einsetzbarer Nanotubebeaktor, der bei sehr geringer Dichte mit niedrigen Ansteuerspannungen hohe Kräfte generiert.

> **Dip.-Ing. Johannes Riemenschneider, Dr. Thorsten Mahrholz, Dr. Jörg Melcher, Dr. Hans Peter Monner, Dipl.-Ing. Jürgen Mosch, Dr. Hubert Temmen, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik**

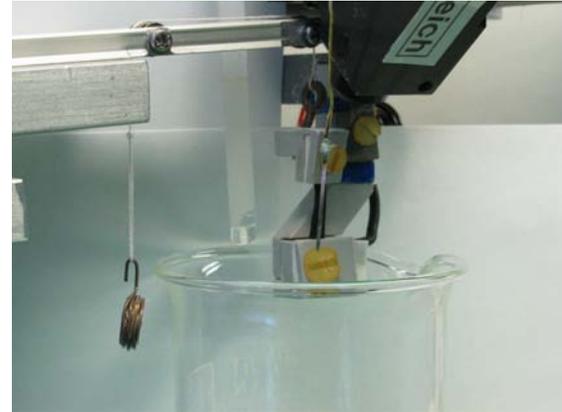


Bild 3:
Prüfstand zur Messung von aktiven Dehnungen von CNTs in in-plane Richtung.

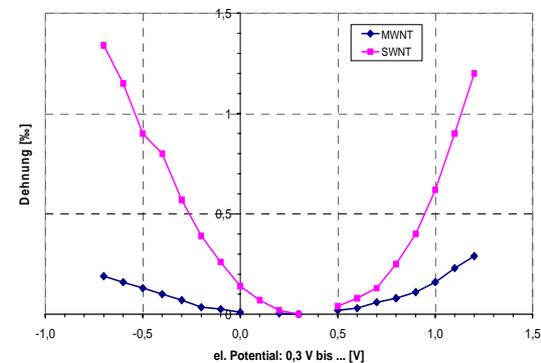


Bild 4:
Dehnung über elektrischer Spannung bei
> Multi-wall Nanotubes (MWNT) und
> Single-wall Nanotubes (SWNT).

Faserverstärkte Nanocomposites

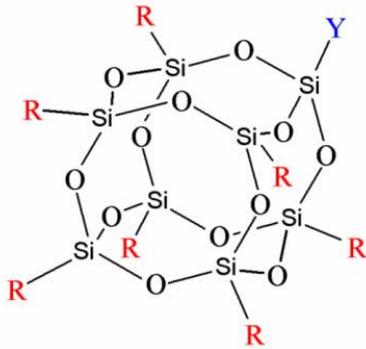


Bild 1:
R: nichtreaktive Gruppen (z.B. Alkyl, Aryl, Cyclohexyl etc.); Y: reaktive Gruppen (z.B. Amin, Epoxid, Isocyanat etc.); x (Si-Si) = 0.5 nm, x (R-R) = 1.5 nm.

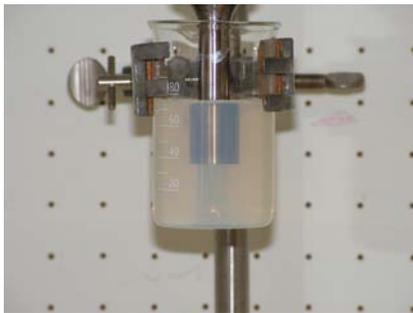


Bild 2:
Dispergieren mittels Ultraschall.

Nanopartikel für Hochleistungsfaserverbunde

Zur Fertigung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen hat sich die Prepregtechnologie fest etabliert. Der Kostendruck und vor allem die Anforderungen an die Technologie bzgl. Serienfertigung großer und komplexer Bauteile in luftfahrttauglicher Qualität hat zu den bekannten Injektionsverfahren geführt. Hierbei sind besonders die am DLR entwickelten Differential-Pressure-Resin-Transfer-Molding- und der Single-Line-Injection-Technologien zu nennen. Im Unterschied zur Prepreg-Technologie werden für das DP-RTM- und das SLI-Verfahren trockene textile Faserhalbzeuge in einer Werkzeugform abgelegt und anschließend mit niedrig viskosen Harzsystemen imprägniert. Die so hergestellten Lamine weisen erhebliche Fertigungs- und Kostenvorteile auf. Allerdings müssen verfahrensbedingte Performanceeinbußen gegenüber den Prepreglaminaten durch Auswahl und Entwicklung geeigneter Harzsysteme (Schrumpfverhalten, Duktilität) ausgeglichen werden.

Die Ergebnisse experimenteller und analytischer Untersuchungen führen die verfahrensbedingten Defizite – Einflussparameter wie Faser-Matrix-Haftung, Gelege- oder Gewebequalität etc. ausgenommen - im Wesentlichen auf eine geringere Querkzugfestigkeit im Vergleich mit entsprechenden Prepreglaminaten und einen hohen Reaktions-schrumpf der Injektionsharze zurück. Besonders bei Laminaten mit großen Schichtwechselwinkeln (z.B. bei 90 °-Orientierungswechsel) sind hohe Eigenspannungen nachweisbar. Deshalb soll mittels zäh wirksamer, steifigkeits- und festigkeitssteigernder Nanopartikel, die gleichzeitig den Schrumpf verringern, Abhilfe geschaffen werden. Die Ergebnisse der Fertigungsversuche zeigen, dass Nanopartikel gefüllte Injektionsharzsysteme bei leichter Erhöhung der Anfangsviskosität ihre Injektionsfähigkeit nicht verlieren. Durch Zugabe geeigneter Nanopartikel sollen die Risszähigkeit, Bruchdehnung und das Schwindungsverhalten von Epoxidharzen verbessert werden. Dabei müssen andere Eigenschaften wie Wärmeformbeständigkeit, Festigkeit und E-Modul zumindest gleiche Werte gegenüber den ungefüllten Harzsystemen aufweisen. Voruntersuchungen belegen signifikante Steigerungen. Ziel ist, durch Modifikation der Harzsysteme die Querbelastbarkeit der Lamine und damit die bisher vergleichsweise niedrige Druckfestigkeit multiaxialer Kohlenstofffaserverbunde im Vergleich zur unmodifizierten Variante wesentlich zu steigern, um besonders hier qualitativ mit den Prepreglaminaten konkurrieren zu können. Dazu sollen quantifizierende Beziehungen zwischen

- > Partikelgröße und mechanischen Eigenschaften,
- > Partikelvolumengehalt und mechanischen Eigenschaften,
- > Dispersionsqualität und mechanischen Eigenschaften,
- > Partikel und rheologischen Eigenschaften,
- > Spezifischer Oberfläche und mechanischen Eigenschaften,
- > Spacerlänge und mechanischen Eigenschaften,
- > Funktionalität und mechanischen Eigenschaften

experimentell erarbeitet werden. Aus den Erkenntnissen sollen Anforderungen an die Grenzflächenbeschaffenheit zwischen Partikel und Matrix formuliert werden. Die Wirkungsweise der Nanopartikel soll analysiert werden, um Grundlagen für ein gezieltes Design der Partikel zur Verfügung stellen zu können. Die bekannten Mischungsregeln für Verbundwerkstoffe werden für nanopartikelverstärkte Faserverbunde überprüft und gegebenenfalls angepasst. Die zu erarbeitenden Erkenntnisse können die Grundlage für eine weitere Verbreitung der CFK-Werkstoffe sein, um damit durch Leichtbau zur Ressourcenschonung in den Bereichen des Luft- und bodengebundenen Verkehrs beizutragen.

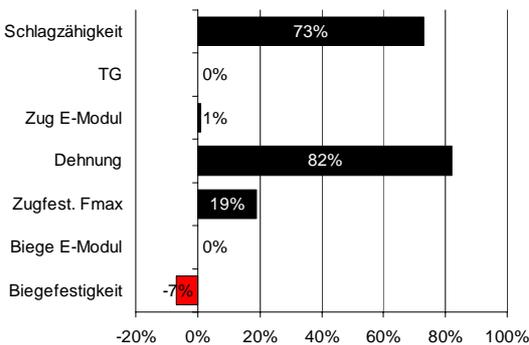


Bild 3:
Relativwerte für mech. und therm. Eigenschaften von Bariumsulfat Nanocomposites im Vergleich mit ungefüllten Epoxidharzen (0: Referenzprobe).

Nanocomposites

Hierbei handelt es sich um Nanopartikel gefüllte Duroplaste, vorzugsweise Epoxidharze. Die charakteristischen Stoffkenngößen wurden mittels experimenteller Verfahren ermittelt. Dazu wurden unterschiedliche Klassen (SiO_2 , BaSO_4 , CNT, POSS etc.) von Nanopartikeln in unterschiedlichen Konzentrationen eingesetzt. Neben den fertig dispergierten Siliziumdioxid-Epoxidharzsystemen sind auch neue Systeme untersucht worden. Zu nennen sind hier insbesondere Bariumsulfate und Aluminiumoxide (Boehmite), sowie Polyhedral oligomeric Silsesquioxanes (POSS). Alle bisher untersuchten POSS-Systeme enthalten chemische Funktionalitäten, die mit der Epoxidharzchemie kompatibel sind (Bild 1). Auch ohne funktionalisierte Nanopartikel sind bezüglich der Schlagzähigkeit, der Steifigkeit und der Festigkeit im unverstärktem und faserverstärktem Kunststoff spezifisch hohe Performancesteigerungen festgestellt worden, ohne Einbußen bei anderen Stoffkenngößen hinnehmen zu müssen.

Herstellung und Ergebnisse

Für die Aluminiumoxide, die zumeist als trockene Pulver vorliegen, sind eine Reihe verschiedener Dispergiertechnologien untersucht worden. Neben rein mechanischen Verfahren wie Rühren mittels Magnetrührer oder mittels Rotor-Stator-Gerät wurden auch Lösemittel eingesetzt und schließlich die Partikel mittels Ultraschalltechnik eingebracht (Bild 2). Bei den durchgeführten Versuchen zeigen sich die Bariumsulfatpartikel (Bild 3) als auch ein Boehmite-System (Bild 4) als besonders geeignet. Trotz der ausgezeichneten Verbesserungen im Reinharz zeigen entsprechende Laminat mit Kohlenstoffasergewebe in den matrixdominierten Kennwerten keine vergleichbar ausgeprägten Trends (Bilder 5 und 6). Daher wird vermutet, dass hier andere Einflussgrößen dominieren. Hier ist insbesondere die Faser-Matrix-Haftung zu nennen. Entsprechende experimentelle Untersuchungen (Fibre-push-out-Versuche) zeigen, dass faserspezifisch große Unterschiede feststellbar sind, so dass hier grundlegendere Untersuchungen zwingend erforderlich sind, um die zu untersuchenden Parametereinflüsse durch Modifikation der Harzsysteme von den störenden Einflüssen wie z. B. Laminataufbau und eingesetzte Faser separieren zu können.

Weiterführende Untersuchungen

Daraus ergeben sich folgende Fragen und Ausblicke:

- > Wie ist die Wirkungsweise der Nanopartikel in den Harzen?
 - > Wie gut ist die Faser-Matrix-Haftung, d. h. wie wirkungsvoll können die Reinharzeigenschaften auf das Laminat übertragen werden?
 - > Welchen Einfluss hat die nichtoptimale Ausrichtung der Kohlenstoffaseroivings im Gewebe durch den Webprozess? Bzw. wie verhalten sich entsprechende unidirektionale Kohlenstoffasergewebe?
 - > Die Versuchstechnik ist zu verbessern (REM, Wickeltechnologie, K_{IC} -Messungen).
 - > Es sind nanopartikelhaltige funktionalisierte Faserschichten (Gehalte, Kombination unterschiedlicher Nanopartikel mit verschiedenen Eigenschaften) zu untersuchen.
 - > Das Versagensverhalten ist zu analysieren.
- > **Dr. Ulrich Riedel, Dipl.-Ing. (FH) Björn Köhnke, Dr. Thorsten Mahrholz, Dipl.-Ing. Jürgen Mosch, Dipl.-Ing. Dirk Röstermundt, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik**

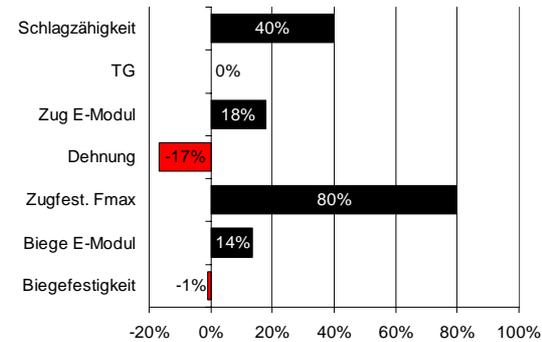


Bild 4: Relativwerte für mechanische und thermische Eigenschaften von Boehmite Nanocomposites im Vergleich mit ungefüllten Epoxidharzen.

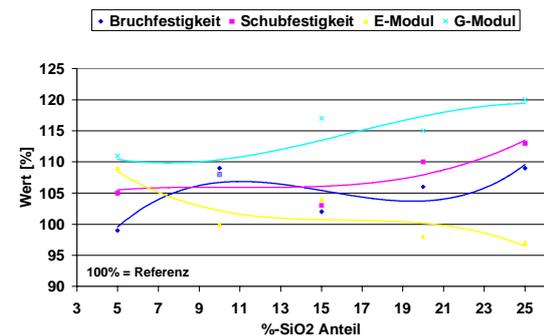


Bild 5: Relativwerte für mechanische Eigenschaften von CFK - Gewebelaminaten mit und ohne SiO_2 - Partikeln.

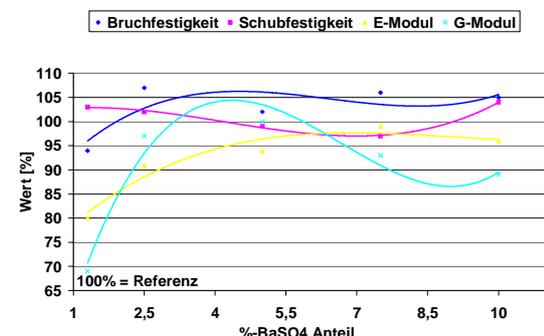


Bild 6: Relativwerte für mech. Eigenschaften von CFK - Gewebelaminaten mit und ohne Bariumsulfat - Partikeln.

Schadensanalyse von doppelschaligen Strukturen



Bild 1:
Impactschaden: Schnittbild durch doppelschalige Struktur mit Honigwabenkern.

Motivation

Doppelschalige Strukturen sind aus zwei steifen Deckschichten und einem dazwischen liegenden leichten Kern aufgebaut. Dadurch wird eine hohe Biegesteifigkeit bei geringer Masse erzielt. Um doppelschalige Strukturen im Flugzeugbau effizient einzusetzen, werden Schadensresistenz und -toleranz infolge von low-velocity Impacts untersucht. Das geschieht zum einen experimentell und zum anderen durch rechnergestützte Simulationen. Um kohlefaserverstärkte Kunststoffe hinsichtlich ihres Impactverhaltens auslegen zu können, wurde im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik das Finite-Element-Programm CODAC entwickelt.

Für die Validierung der in CODAC verwendeten Modelle sind Versuche und für deren Auswertung wiederum eine verlässliche Schadensdetektierung und -charakterisierung erforderlich. So sollen die Art und die Größe verschiedener Impactschäden (Schäden in den Deckschichtlaminaten, Deckschicht-Kern-Ablösungen und Kernschäden) bestimmt werden. Um die Proben bei nachfolgenden Restfestigkeitsuntersuchungen weiterverwenden zu können, ist eine zerstörende Prüfung zu vermeiden.

Numerische Simulation in CODAC

Das FE-Tool CODAC dient der schnellen Simulation des low-velocity Impacts und der Berechnung der Restfestigkeit von Faserverbundstrukturen. Für die Erweiterung von CODAC auf doppelschalige Strukturen wurden die dreischichtigen Schalenelemente S89 und S815 entwickelt, die eine effiziente Verformungs- und Spannungsanalyse ermöglichen. Element S89 beruht auf einem zweidimensionalen Spannungsansatz 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 aufwändiger als Element S89. Es liefert jedoch bei konzentrierten Lasten deutlich zuverlässigere Ergebnisse als Element S89 und wird daher bei Impactberechnungen bevorzugt eingesetzt.

Auf der Grundlage einer guten Approximation der Verformungen und Spannungen kann das Versagensverhalten des Kerns und der Deckschichten mit geeigneten Versagens- und Degradationsmodellen beschrieben werden. Entsprechende makromechanische Schädigungsmodelle wurden für den Kern in die Impactanalyse von CODAC eingebunden. Zur Validierung der Impactsimulation diente eine Impactversuchsreihe, die von den Projektpartnern der TU Dresden durchgeführt wurde. Für den Vergleich von Versuch und Berechnung wurden Kontaktkraft-Zeit-Verläufe sowie die Größen der Kernschäden herangezogen. Versuche mit niedrigen Impactenergien und äußerlich nicht sichtbarem Schaden (Kernschaden) können mit CODAC bereits sehr gut simuliert werden, vgl. Bilder 2 und 3. Bei Versuchen mit deutlich sichtbarem Deckschichtschaden kann der Impactverlauf bis zu dem Punkt gut nachvollzogen werden, an dem die Deckschicht zu reißen beginnt.

Für die Restfestigkeitsermittlung wird eine bereits geschädigte Struktur unter einaxialem Druck belastet. Lokale Schädigungen werden durch Degradation berücksichtigt. Damit CODAC rechentechnisch effizient bleibt, wurde zunächst eine lineare Versagensanalyse durchgeführt, um eine obere Grenze für die Restfestigkeit zu erhalten.

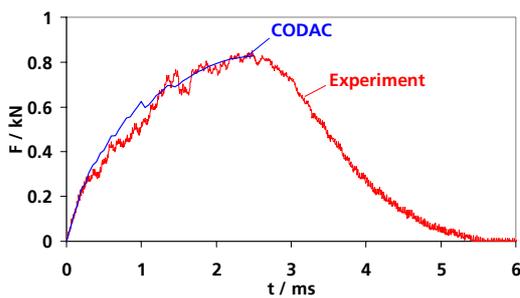


Bild 2:
Impactsimulation im Vergleich mit Impactversuch: Kontaktkraft-Zeit-Verläufe während eines 1J-Impacts.

Schadensdetektion und Schadenscharakterisierung mit Ultraschallprüfung

Die etablierten Methoden der zerstörungsfreien Prüfung mittels Ultraschall erlauben die Erkennung von Deckschichtdelaminationen und Deckschicht-Kern-Ablösungen. Auch Schäden in Honigwaben- und Schaumkernen lassen sich durch luftgekoppelte Ultraschallprüftechnik untersuchen. Dagegen sind Matrix- und Faserbrüche sowie Schäden in neuartigen Kernstrukturen wie Falzwaben oder kohlefaserverstärkten Schäumen bislang nur zerstörend durch Schnittbilder detektierbar.

Für die Ultraschallprüfung von Deckschichtlaminaten und anderer monolithischer Strukturen wurde am Institut ein Verfahren entwickelt, das die Ortsauflösung sowie die Detektion kleiner Fehlstellen verbessert. Die Methode beruht auf Methoden der digitalen Signalverarbeitung und trägt der hohen Schallschwächung von faserverstärkten Kunststoffen Rechnung. Mehr als beim klassischen Amplitudentiefenausgleich erlaubt das Verfahren eine tiefenunabhängige Fehlerauffindwahrscheinlichkeit und eine konstant bleibende Signalcharakteristik für gleichartige Fehlstellen. Dadurch sind zwei Fehler aus unterschiedlichen Dickenbereichen unmittelbar miteinander vergleichbar. Insbesondere bei dicken Laminaten sowie bei hohen Prüffrequenzen erleichtert dies die Fehlerbewertung und Schadenscharakterisierung.

Ein neuer Ansatzpunkt für die Untersuchung von Sandwich-Kernschäden ist der Einsatz von Lambwellen. Die Visualisierung des Lambwellenfeldes zeigt die Ausbreitung der Welle und ihre Interaktion mit Schäden. Während von Honigwabensandwiches viel versprechende Ergebnisse vorliegen, bleibt es Aufgabe weiterer Untersuchungen, das Potential dieser Technik für den Einsatz an Kernmaterialien wie Falzwaben zu evaluieren.

> Dipl.-Ing. Luise Kärger, Dipl.-Ing. Anja Wetzel, Dipl.-Phys. Uwe Pfeiffer, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

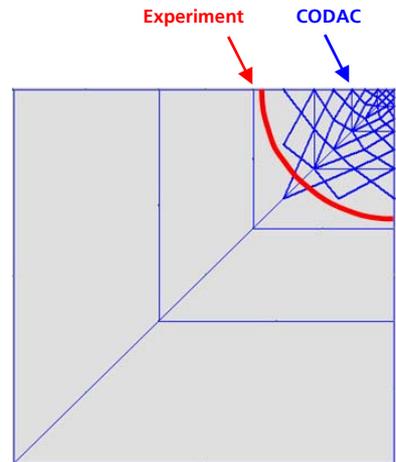


Bild 3:
Impactsimulation im Vergleich mit Impactversuch: Kernschaden einer Viertel-Sandwichplatte nach 1J-Impact.

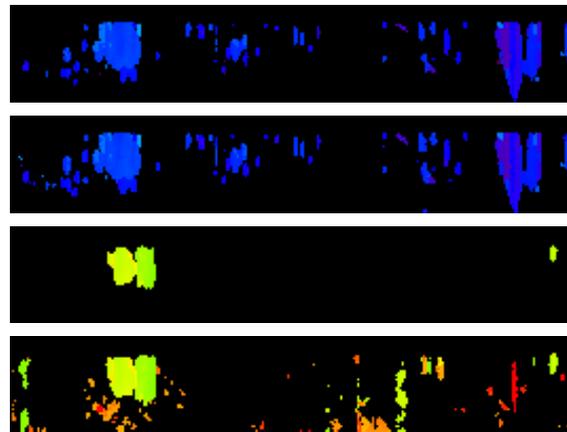


Bild 4:
Verbesserte Detektion rückwandnaher Schäden durch Signalverarbeitung. Die Farbcodierung entspricht unterschiedlicher Fehlertiefe. Von oben nach unten:
> oberflächennah – unverarbeitet,
> oberflächennah – nach Signalverarbeitung,
> rückwandnah – unverarbeitet,
> rückwandnah – nach Signalverarbeitung.

Kohlefaserverstärkte Kunststoffe: verbesserte NCF-Werkstoffe für die Nasstechnologie

Im kommerziellen Flugzeugbau finden trockene Faserhalbzeuge zur Herstellung kohlefaserverstärkter Kunststoffe (CFK) in Nasstechnologie zunehmend Anwendung, weil sie Kostenvorteile im Vergleich mit den üblicherweise eingesetzten Prepreg-Materialien (*pre-impregnated*) bringen können. Speziell der Einsatz von Multiaxialgelegen (oder engl. *non-crimp fabrics*, NCF) birgt hohe Einsparpotenziale. Allerdings ist der Einsatz von NCF-basierten Werkstoffen für Primärstruktur-Komponenten derzeit noch durch verschiedene Faktoren limitiert. Insbesondere liegen bestimmte mechanische Kennwerte, wie z. B. Druck- und Lochleibungsfestigkeiten oder Impact-Kennwerte, noch unterhalb derer klassischer Prepreg-Systeme. Vor diesem Hintergrund wurde im DLR Kundenzentrum Bremen in enger Zusammenarbeit mit Airbus die Weiterentwicklung von NCF-basierten Werkstoffen vorangetrieben, mit dem Ziel der Verbesserung der mechanischen Performance unter Beibehaltung der Kostenvorteile.

Nasstechnologie und NCF-Werkstoffe

In der Nasstechnologie wird ein niedrigviskoses Harzsystem (Injektionsharz) in die zuvor in einer Form abgelegten Faserplatten eingebracht und anschließend ausgehärtet. Verglichen mit Prepreg-Systemen ergeben sich Einsparungspotenziale bezüglich der Prozesskosten (Lagerung, Handhabung, etc.) und der Halbzeugkosten. Trockene Faserhalbzeuge in Form von NCF bieten darüber hinaus den Vorteil einer einstellbaren multidirektionalen Konstruktion: NCF-Halbzeuge bestehen aus mehreren, in verschiedenen Orientierungen verlaufenden Faserlagen, die im textilen Herstellungsprozess übereinander abgelegt und anschließend vernäht werden (Bild 1). So kann die Konstruktion für jedes NCF-Halbzeug auf die spezifischen strukturmechanischen Anforderungen des jeweiligen Bauteils eingestellt werden. Ein solches textiles Halbzeug kann in der Serienfertigung vergleichsweise schnell und kostengünstig in die Form abgelegt werden. Als Ergebnis der Zusammenarbeit mit Airbus Bremen stehen heute neue NCF-Systeme als Ausgangsbasis für weitere Entwicklungen zur Verfügung, die in vielen relevanten Kennwerten das Niveau der Prepregs bereits erreichen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Fortschritte sowohl durch Verbesserungen der Halbzeuge als auch durch neue Matrixsysteme erzielt wurden.

Verbesserte textile Halbzeuge

In Zusammenarbeit mit Werkstoffherstellern wurden NCF-Halbzeuge neuer Technologie untersucht, wobei signifikante Fortschritte in der mechanischen Performance im Vergleich zu älteren Textilien erzielt wurden. Um zu prüfen, welche Faktoren dazu beitragen, wurde u.a. die Filamentausrichtung verschiedener NCF-Laminats mittels einer eigens entwickelten Analyseverfahren untersucht. Es zeigte sich, dass durch neue textile Technologien die durch die Vernähtung eingebrachten Störungen der Faserbündel verringert werden. Als weiteres Ergebnis dieser Analyse wurde deutlich, dass unabhängig davon die einzelnen Filamente im gesamten NCF-Material dennoch weniger gut ausgerichtet sind als in typischen Prepreg-Laminats (Bild 2) – dies zeigt die Richtung weiterer Verbesserungsmöglichkeiten. Aufgrund zusätzlicher Experimente, etwa hinsichtlich der Drapier- und Preform-Fähigkeit, konnten die NCF-Halbzeuge in ihrer Prozessierbarkeit mit Blick auf die Anforderungen einer Serienproduktion weiterentwickelt werden, z. B. durch angepasste Vernähtungsarten und die Auswahl geeigneter Bindermaterialien.

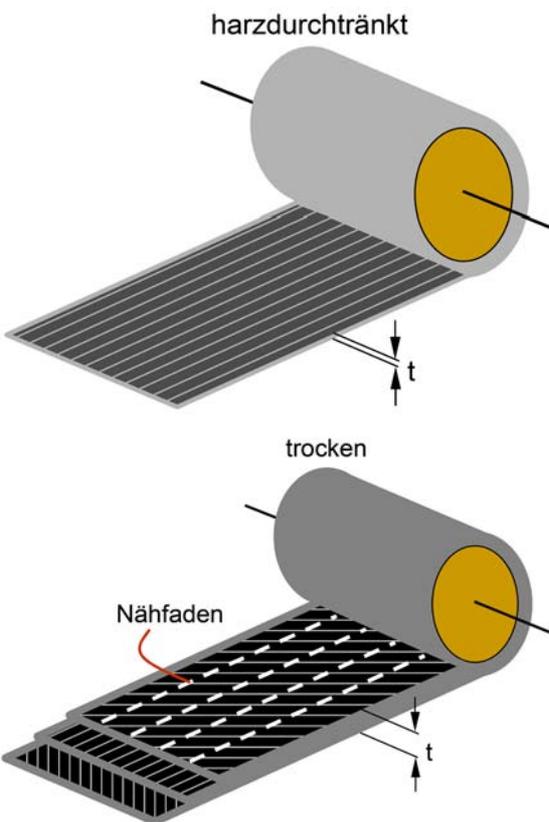


Bild 1:
CFK-Halbzeuge:
oben: klassisches Prepreg,
unten: trockenes NCF-Faserhalbzeug.

Verbesserte niedrigviskose Harzsysteme und multifunktionelle Binder

Fertigungsparameter wie Injektionstemperatur und -zeit sowie Aushärtungstemperatur und -dauer werden vom Harzsystem festgelegt. Deswegen fällt der Verfügbarkeit neuer Systeme eine wichtige Rolle bei der Optimierung von Serienfertigungsprozessen zu. So ist für große dicke Bauteile wie Flügelschalen eine lange Injektionszeit erforderlich, um das Halbzeug zu durchtränken. Für kleine Bauteile mit hohen Stückzahlen, wie z. B. Rumpfspante, wird eine kürzere Injektions- und Härtezeit gefordert. Unter diesen Randbedingungen wurden in Zusammenarbeit mit Harzherstellern gezielt neue Systeme untersucht und weiterentwickelt. Auch die mechanische Performance NCF-basierter Werkstoffe wird vom Harzsystem beeinflusst. Durch gezielte Anpassung von Modul, Festigkeit bzw. Bruchdehnung sowie Risszähigkeit der Matrix konnten Performance-Gewinne realisiert werden, zusätzlich zu den Verbesserungen durch neue Textilien. Das Verhalten bei Impactschäden konnte durch die gezielte Auswahl von Matrixsystemen verbessert werden: durch den Einsatz multifunktionaler Binder wird Prepreg-Niveau erreicht. Solche Binder, in Form von hochviskosen und zähen Partikeln oder als Vlies, können auf die Textilien aufgebracht werden und dienen einerseits als klassische Binder, nämlich zur Fixierung der trockenen Fasern, und andererseits als Zähmodifikation zur Verbesserung des interlaminaren Schädungsverhaltens bei Impact.

Mechanisches Verhalten

Letztlich führt auf dem Weg zum vollständigen Ausschöpfen des Potenzials der Nasstechnologie kein Weg an der Untersuchung der physikalischen Zusammenhänge vorbei, die zu dem beobachteten mechanischen Verhalten führen. Eine wesentliche Erkenntnis bei der Modellbildung ist, dass das Schädigungsverhalten gelochter Proben stark durch die Harzauswahl kontrolliert wird: NCF-Laminats mit herkömmlichen Injektionsharzen neigen zu vergleichsweise frühen Zwischenfaserbrüchen (Bild 3), was durch Abbau von Spannungsspitzen zu vermeintlich hohen Festigkeitskennwerten gelochter Zugproben führt. Dank der Untersuchung konnten die für viele Nasstechnologie-Systeme typischen hohen gelochten Zugfestigkeiten neu bewertet, Rückschlüsse auf andere Kennwerte wie Lochleibung gezogen und Möglichkeiten zur Performance-Steigerung neuer Materialien identifiziert werden.

Im DLR-Kundenzentrum Bremen entwickelte mikromechanische Modellierungsansätze erfassen den Einfluss der unterschiedlichsten Parameter auf die Einzellagen-Druckfestigkeit. Insbesondere der Einfluss der Faserfehlausrichtung (siehe oben) und die Rolle der im Rahmen der Arbeiten ermittelten Reinharzkennwerte werden in den Modellen charakterisiert. Zur Verifizierung der aus den Untersuchungen gezogenen Schlüsse und zur Identifizierung gezielter Verbesserungsmaßnahmen konnte in Zusammenarbeit mit Airbus ein großer Teil der zur Verfügung stehenden Ergebnisse vorangegangener mechanischer Prüfprogramme an Nasstechnologie-Werkstoffen aufgearbeitet und analysiert werden.

> **Dipl.-Ing. Anatole Gilliot, Dipl.-Ing. Simon Wohlfart,**
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptionik, Kundenzentrum Bremen

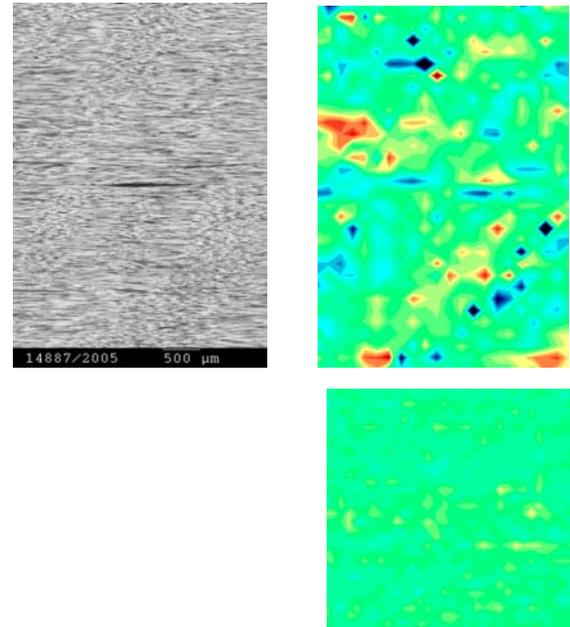


Bild 2:
(Oben links) Mikroschliff eines NCF-Laminats in der Draufsicht,
(oben rechts) gemessene Faserwinkelverteilung für diese Ansicht, grün: Faserwinkel um 0°; rot/blau: Faserwinkel bis zu $\pm 4^\circ$
(unten) zum Vergleich: gemessene Faserwinkelverteilung eines Prepreg-Laminats.

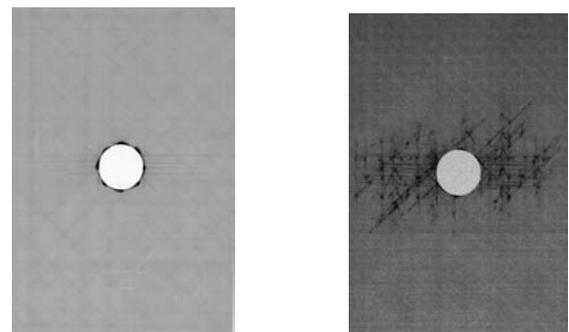


Bild 3:
Vorschädigungen (vor Erreichen der Versagenslast) einer gelochten Zugprobe aus multidirektionalen Laminaten mit (links) typischem Prepreg-Material und (rechts) NCF-Halbzeug und Injektionsharz bei gleichem Lastniveau, sichtbar gemacht durch Kontrast-Eindringmittel und Röntgendurchstrahlung.

Mikrowellenprozessierung von kohlefaser- verstärkten Kunststoffen



Bild 1:
Mikrowellenuniversalofen zur Prozesssimulation, Entwicklung von Verfahren und Durchführung von Werkstoffuntersuchungsprogrammen.



Bild 2:
In Mikrowellen-Infusionsverfahren hergestellte Bauteile.

Anforderungen an moderne Fertigungsverfahren

Die Herstellung von Hochleistungsverbundbauteilen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen erfolgt u. a. über eine genaue Temperierung. Diese ist bei duroplastischen Systemen notwendig, um optimale Bedingungen bei der Polymerreaktion sicherzustellen, die maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Systems beeinflusst. In konventionellen Öfen ist die gezielte Temperierung wegen einer trägen Erwärmung aufwändig und sehr zeitintensiv. Diese passive Form der Erwärmung wird prozesstechnisch nur indirekt beeinflusst. Das Ziel ist daher die Bereitstellung einer Technologie zur direkten Erwärmung der Bauteile während des Herstellungsprozesses. Mit Hilfe der Erwärmung durch Mikrowellen ist ein Prozess gefunden, der die Ansprüche zur gezielten homogenen Temperierung und Prozesszeitverkürzung zu erfüllen vermag.

Das Anwendungsspektrum der Mikrowellenerwärmung zur Herstellung von Strukturen aus CFK ist dabei auf die thermischen Verfahrensschritte zu beziehen. Dazu zählen die Konditionierung von Harzen, das Herstellen von formstabilen Faserhalbzeugen, so genannten Preforms und die Aushärtung oder Konsolidierung von Bauteilen. Die einzelnen Verfahrensschritte sind für eine industrielle Umsetzung anhand von Werkstoffuntersuchungen zu qualifizieren, um einen evtl. vorhandenen Einfluss des Mikrowellenverfahrens auf den Werkstoff festzustellen.

Mit Hilfe eines energiesparenden und schnellen Fertigungsverfahrens werden die Produktionskosten zur Herstellung von Bauteilen aus CFK gesenkt. Damit ist ein weiterer Anreiz zur kurzfristigen technischen Anwendung dieses Werkstoffs gegeben.

Hintergrund

Grundsätzlich ist die Erwärmung eines Produktes mittels Mikrowellen von der konventionellen unterschiedlich. Während bei der konventionellen Erwärmung die Temperaturerhöhung im Produkt über einen durch die Oberfläche eindringenden Wärmestrom in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit erzeugt wird, erfolgt die Erwärmung mittels Mikrowellen aus dem Bauteilvolumen heraus. Die Erwärmung durch die Mikrowellen ist ein thermischer Verlust, der beim Eindringen der Welle in das Material entsteht. Dabei wird die Welle gedämpft. Die maßgeblichen Einflussfaktoren sind durch die dielektrischen Materialeigenschaften gegeben, die den so genannten Verlustwinkel bestimmen. Über den Verlustwinkel der thermische Umsatz im Material bestimmt. Einen hohen Einfluss hat die Intensität des Mikrowellenfeldes, das durch anlagentechnisch in bestimmten Grenzen einstellbar ist. Wegen des bei der Mikrowellenerwärmung nicht auszuschließenden inneren Wärmestroms, sind hier zwei Effekte überlagert, die die Effizienz der Mikrowellenerwärmung kennzeichnen.

Technologietransfer zur technischen Anwendung

Der Anwendung von Mikrowellenverfahren liegen Randbedingungen zugrunde, die einerseits die Bedürfnisse von CFK-Herstellungsverfahren unterliegen und andererseits die Prozessierbarkeit im Mikrowellenfeld ermöglichen. Primär ist die Transparenz des Fertigungswerkzeugs zu nennen, um das Interagieren der Mikrowellenstrahlung mit dem Prozessgut sicherzustellen. Für einige CFK-Prozesse sind deswegen Werkzeugneuentwicklungen notwendig, da Bauteile beispielsweise in der Resin-Transfer-Molding-Technik in geschlossenen die Mikrowellen reflektierenden Metallwerkzeugen hergestellt werden. Das Material des Werkzeugs beeinflusst das im Mikrowellenofen entstehende Feld und damit das Erwärmungsverhalten des Werkstücks im Feld. Erste Technologiedemonstrationen (siehe Bild 2) wurden mittels angepasster metallischer Werkzeuge durchgeführt, die in Infusionsverfahren hergestellt wurden. Ein Optimum für das Verfahren stellen diese Werkzeuge nach dem jetzigen Stand noch nicht da. Deswegen werden derzeit im Institut vollständig transparente Werkzeuge auf keramischer oder polymerer Basis entwickelt. Selbst schlecht ankoppelnde Materialien, wie trockene Kohlenstofffasern sind in einem vollständig transparenten Werkzeug schnell zu erwärmen. Neben der Transparenz als Randbedingung sind dielektrische Inhomogenitäten zu vermeiden, die eine zu starke Erwärmung einzelner Bereiche verursachen. Darüber hinaus besteht in Mikrowellenfeldern die Möglichkeit, dass entstehende Lichtbögen den zu prozessierenden Werkstoff schädigen. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurden Verfahren entwickelt, mit denen ein Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf die Werkstoffeigenschaften untersucht wird. Verbunden mit einer Prozesszeitverkürzung wurde kein negativer Einfluss der Mikrowellenerwärmung auf den Werkstoff festgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den durch die Matrix dominierten Werkstoffkennwerten, wie den Schubeigenschaften, die auszugsweise auf Abbildung 3 dargestellt sind. Dies zugrunde legend, werden Verfahren und Anlagen für die industrielle Anwendung entwickelt. Gemeinsam mit den Kooperationspartnern CTC-Stade, Fricke und Mallah GmbH und Bolle und Cords wurde ein Verfahren zur Erwärmung von Harz für die Serienfertigung bei Airbus Stade entwickelt. Hier gelang es den ursprünglichen Prozess um 90% zu verkürzen. Darauf aufbauend sind Prozesse zur Entwicklung eines serientauglichen Preformprozesses in Erprobung. Die Entwicklung einer völlig neuartigen Anlagentechnologie und den damit verbundenen Verfahren wird zusammen mit der Fa. Scholz betrieben, wobei ein Mikrowellenautoklav entwickelt und erprobt wird.

Die Schwerpunkte künftiger Forschungsarbeiten sind bei der qualifizierten Aushärtung von Strukturbauteilen zu suchen. Dabei spielen Autoklavverfahren und RTM-Verfahren eine übergeordnete Rolle, da hier die für den Mikrowellenprozess spezifischen Vorteile am stärksten ausgeprägt sind. Das Einsparen von Energie und die Reduktion von Zykluszeiten bei der Herstellung stellen die Kernfragen für eine kosteneffektive Fertigung von CFK-Strukturen dar. Innerhalb der bisher durchgeführten Forschungsaktivitäten wurde gezeigt, dass dies mittels der Mikrowellenprozessierung zu erfüllen ist.

> **Dipl.-Ing. Matthias Meyer,**
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

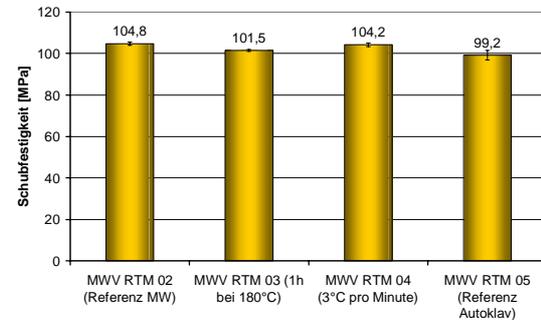


Bild 3: Schubfestigkeiten im Vergleich; auch die in optimierten Mikrowellen - gestützten Verfahren hergestellten Werkstoffproben schneiden auf einem gleichwertigen Niveau ab. Die Prozesszeit im Vergleich zur Autoklavreferenz wurde im Vergleich zur konventionellen Referenz um etwa 40% reduziert.

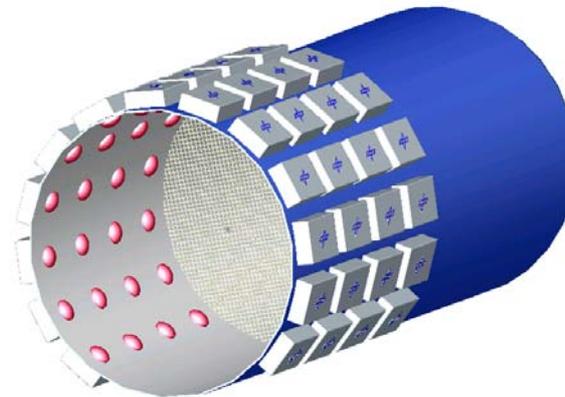


Bild 4: Mikrowellenautoklav.

Integrale CFK-Fertigungsverfahren mit kombinierten Halbzeugvarianten



Bild 1:
Positionierung der „hybriden“ Fertigung gegenüber der Prepreg- und der Nassbauweise.

Kombination von Prepreg- und Injektionstechnologie

Ein umfassender Einsatz kohlefaserverstärkter Kunststoffe in industriellen Anwendungen ist auf Grund der hohen Kosten für die Herstellung von mechanisch hochfesten und qualitativ hochwertigen Bauteilen derzeit nicht gegeben. Die in den vergangenen Jahren durchgeführten Anstrengungen auf dem Gebiet der Injektionsfertigungsverfahren konnte zwar einen wirksamen Beitrag zur Kostenreduzierung leisten, allerdings liegen die mit diesen Methoden erreichbaren Bauteilfestigkeiten bis zu 20 % unterhalb der mittels klassischer Prepreg-Technologie erreichbaren Werte.

Es wurde daher eine Fertigungstechnologie untersucht, die aus einer Kombination der beiden erwähnten Herstellungsverfahren besteht. Diese so genannte „hybride Fertigung“, deren spezifischer Charakter in einem gleichzeitigen Aushärten injizierter sowie vorimprägnierter Bauteilbereiche besteht, verspricht durch eine positive Vereinigung der Verfahrenseigenschaften sowohl hohe mechanische Bauteilkennwerte als auch einen verringerten Fertigungsaufwand (Bild 1).

Von praktischer Bedeutung ist eine derartige Fertigungstechnologie vor allem für Bauteile, die sich sowohl durch geometrisch komplexe als auch einfache Bereiche auszeichnen. Ein anschauliches Beispiel bilden hierfür Stringer-Haut-Strukturen von Flugzeugleitwerken (Bild 2). Vorstellbar ist eine gewinnbringende Anwendung allerdings auch in versteiften Rumpfstrukturen. Das Ziel der Untersuchungen besteht im Nachweis der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit der „hybriden“ Fertigung unter Beibehaltung der erwarteten mechanischen Eigenschaften.

In Hinsicht auf die Erfüllung dieser Zielsetzung besitzt die Charakterisierung der Übergangszone zwischen Injektions- und Prepreg-Matrixsystem, die durch den Einsatz von zwei unterschiedlichen Fertigungsverfahren zwangsläufig entsteht, eine besondere Bedeutung. So ist vorstellbar, dass im Kontaktbereich der beiden Matrixwerkstoffe, bedingt durch beschränkte chemische als auch physikalische Kompatibilität, Eigenspannungen sowie Fehlstellen entstehen können. Mit dem Auftreten derartiger qualitäts- und eigenschaftsmindernder Phänomene wäre eine Funktionstüchtigkeit der hybriden Fertigungstechnologie nicht gegeben.

Charakterisierung der Matrixübergangszone

Hinsichtlich der Charakterisierung der Matrixübergangszone wurden drei Themenschwerpunkte näher untersucht:

- > die Kompatibilität der Matrices,
- > das Fließ- und Durchmischverhalten der Matrixwerkstoffe in der Kontaktzone
- > und die mechanischen Eigenschaften hybrider gefertigter Lamine.

Die im Rahmen der Kompatibilitätsuntersuchungen ermittelten Werkstoffkennwerte geben Aufschluss über die Polymerisations- und die thermische Eigendehnung der beiden Matrixsysteme (Prepregsystem: Fibredux 6376/ Injektionsharzsystem: RTM 6). Die aus diesen Daten ableitbaren maximal möglichen Eigenspannungen in der Kontaktzone erscheinen für eine praktische Anwendung der hybriden Fertigungstechnologie wenig relevant. Zu berücksichtigen bleibt allerdings, dass dieses Ergebnis ausschließlich für die untersuchte Werkstoffpaarung zutrifft.



Bild 2:
„Hybrid“ hergestellte Stringer-Haut-Struktur mit injizierten Stringern und Prepreghaut.

Im Mittelpunkt der Ermittlung des Fließ- und Durchmischungsverhaltens der Matrixharze stand die Bestimmung des „Ausbluteverhaltens“ des Prepregpreformling unter Anwesenheit von nicht injiziertem trockenem Fasermaterial sowie eine qualitative Beurteilung der Durchmischung der Matrixsysteme im Kontaktbereich. Im Zuge dieser Aufgabenstellung wurde das für den Einsatz vorgesehene Injektionsharzsystem RTM 6 zuvor mit einem fluoreszierenden, molekular löslichen Farbstoff versehen. Die Auswertung erfolgte anhand von Schlibfbildern sowie unter Zuhilfenahme entsprechender optischer Geräte. Als Ergebnis der Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Steighöhen des Prepregharzsystems von der Länge der Haltezeit vor der Injektion sowie der dabei beaufschlagten Autoklavtemperatur beeinflusst werden. Ebenso konnte eine Abhängigkeit zwischen Steigverhalten und Laminataufbau nachgewiesen werden. Einen vernachlässigbaren Einfluss besitzt hingegen die Wirkrichtung der Schwerkraft. Die Auswertung der Schlibfbilder bezüglich der Durchmischung zeigte bei allen Laminaten ein lokales Ineinanderfließen der Matrixwerkstoffe, das sich mit zunehmender Injektionstemperatur verstärkt. Eine formschlüssige Verzahnung der Materialien ist somit gegeben. Die im Rahmen der Untersuchungen ebenso variierten Injektionsweglängen besitzen allerdings keinen Einfluss auf die Verteilung der Matrices in den Probenplatten. Die Bilder 3 und 4 zeigen typische Plattenquerschnitte der angefertigten Proben bei unterschiedlichen Prozessparametern.

Festigkeitsuntersuchungen

Den durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften hybrid gefertigter Laminat lag die Annahme zu Grunde, dass die Matrixkontaktzone die potenziell schwächste Stelle im Verbund darstellt. Entsprechend wurden für eine vergleichende Festigkeitsbetrachtung zwischen den „reinen“ Ausgangsverfahren und der neuartigen hybriden Fertigungstechnologie mit der interlaminaren Scherfestigkeit und der Risszähigkeit G_{IC} Prüfkriterien zu Grunde gelegt, die speziell auf die Haftung zwischen den einzelnen Faserlagen eingeht. Die Auswertungen zeigen, dass die hybrid gefertigten Faserverbundproben bei der Schubfestigkeit immer zwischen den Festigkeiten der rein injizierten und denen der reinen Prepreglaminaten liegen. Die Versuche zur Schälfestigkeit konnten darüber hinaus zeigen, dass sich niedrigere Haltetemperaturen und geringere Haltezeiten vor dem Injektionsprozess positiv auf den Übergangsbereich der Matrixsysteme in den Proben auswirken. Die bei der Verwendung von unterschiedlichen Matrixmaterialien zwangsläufig auftretende Kontaktzone stellt somit keine erfassbare mechanische Schwachstelle dar.

Zusammenfassung

Die hybride Fertigungstechnologie stellt eine kostenmindernde Alternative zu herkömmlichen Herstellungsverfahren für integrale kohlefaserverstärkte Verbundbauteile dar. Ihre prinzipielle Funktionstüchtigkeit konnte für die im Rahmen dieser Arbeiten untersuchte Matrixpaarung nachgewiesen werden. Der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Gestalt der Übergangszone vom Prepreg- zum Injektionsharzsystem konnte dargestellt werden. Eine Optimierung der Prozessparameter Haltezeit und Injektionstemperatur wurde mit Hilfe der Ermittlung der Risszähigkeiten G_{IC} erfolgreich durchgeführt.

> **Dipl.-Ing. Robert Kaps, Prof. Dr. Elmar Breitbach,**
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

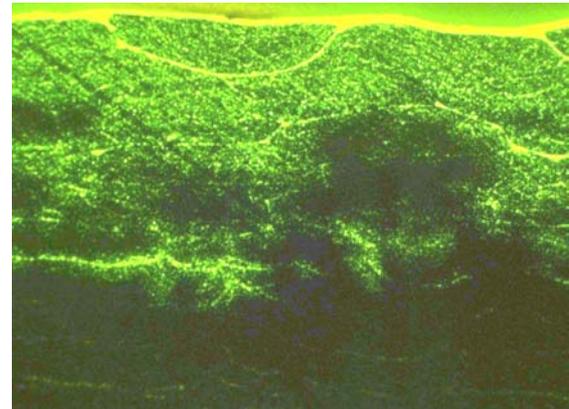


Bild 3:
 Querschnitt der Fließprobe HFA001, Injektionstemperatur 120°C, 60 Minuten Haltezeit.

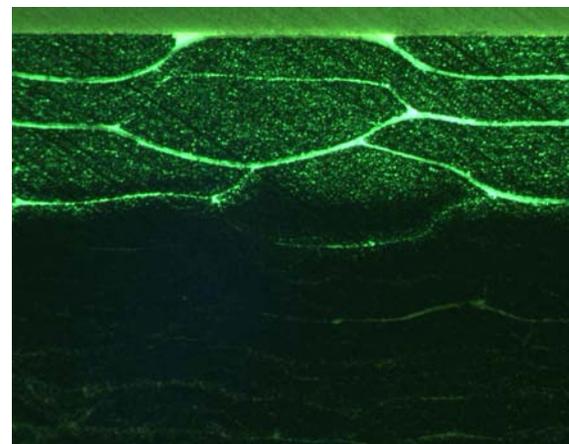


Bild 3:
 Querschnitt der Fließprobe HFA007, Injektionstemperatur 90°C, 30 Minuten Haltezeit.

Lokale Metallamine: effiziente mechanische Kopplung von Faserverbundlaminate

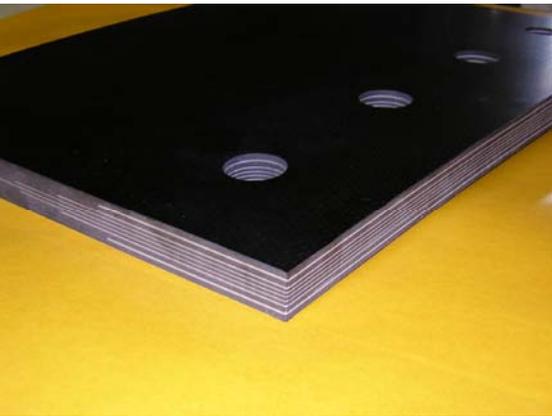


Bild 1:
Lokale Verstärkung durch Einbettung von Metallschichten.

Strukturelle Kopplung als Randbedingung von Hochleistungsfaserverbunden

Ein wichtiger Vorzug von Faserverbunden ist neben der Gewichtsreduktion auch die Möglichkeit hoher Integrationsgrade, d.h. der Reduktion der zu fügenden und zu verbindenden Einzelteile. Trotz des bereits jetzt schon realisierbaren hohen Integrationsgrades bleibt die Kopplung von Teilstrukturen auch für Faserverbundbauweisen eine wesentliche und ausschlaggebende Aufgabe in der praktischen Strukturentwicklung. Diese Aufgabe ist nach wie vor größtenteils durch den Einsatz von mechanischen Fügeverfahren wie Niet- oder Bolzenverbindungen gelöst, trotz der als faserngerecht einzustufenden Philosophie dieser formschlüssigen Verbindungstechnik.

Die Nutzung des Werkstoffpotentials wird hierbei durch die niedrige Kopplungseffizienz dieser Verbindungstechniken eingeschränkt. Dieses Verhalten ist eine unmittelbare Folge der niedrigen Lochleibungs- und Scherfestigkeiten sowie der Feuchte- und Temperaturabhängigkeit.

Eine Erhöhung des Anschlussgütegrades und somit der Werkstoffausnutzung wird üblicherweise durch den Einsatz von lokalen Aufdickungen erzielt. Die hierfür notwendige zusätzliche Laminatdicke ruft jedoch lokale Exzentrizitäten und eine erhöhte geometrische Bauteilkomplexität hervor. Das strukturelle Leichtbaupotential dieser Verbindungstechnik wird zudem durch ein erhöhtes Strukturgewicht infolge von größeren Klemmlängen und Bolzendurchmessern sowie durch schwerere Anschlussbeschläge beeinträchtigt. Im Gegensatz zu Faserverbundwerkstoffen weisen isotrope metallische Werkstoffe eine der Materialfestigkeit entsprechenden Lochleibungs- und Bolzenverbindungsfestigkeit auf.

Lokale Verstärkung durch CFK/Metall-Hybridisierung

Es liegt nahe, die Vorzüge isotroper metallischer Werkstoffe mit dem Leichtbaupotential der Faserverbunde zu verbinden. Durch eine lokale Einbettung von dünnen Metallfolien im lokalen Bolzenverbindungsbereich wird ein Gradientenwerkstoff mit hohen Lochleibungs- und Scherfestigkeiten sowie Zug- und Druckfestigkeiten im Bolzenverbindungsbereich konfiguriert.

Die Einbettung der Metallfolien im Faserverbundlaminate erfolgt durch einen Schichtersatz: ein bestimmter Anteil von Laminatschichten werden auf Stoß durch entsprechend dünne Metallschichten ersetzt. Die restlichen Schichten sind kontinuierlich und agieren als Adhäsionsschicht zwischen den einzelnen Metallschichten im Hybridbereich. Der Einsatz von dünnen Schichten erlaubt eine feine Diskretisierung und Abstufung des Schichtersatzes im Übergangsbereich zwischen dem Grundlaminate und dem Hybridlaminate. Auf diese Weise bedeutet jeder Schichtersatz eine geringe Störung des Laminats, bei der die Querschnittsabminderung und Steifigkeitsänderung und somit die Laminatschwächung minimiert werden können.

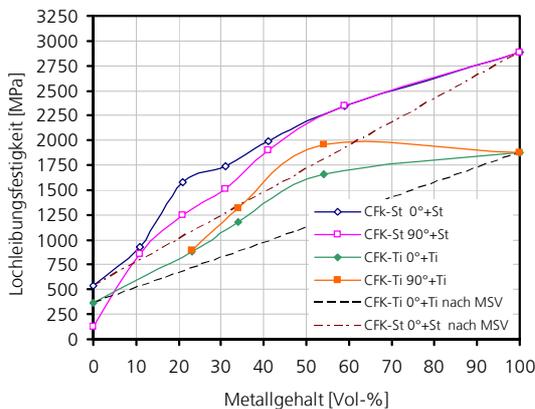


Bild 2:
Lochleibungsfestigkeit von CFK/St und CFK/Ti.

Nur durch den Einsatz hochfester isotroper Materialien lässt sich eine strukturelle und wirtschaftlich sinnvolle Verstärkungstechnik realisieren. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik sucht neue Wege durch den Einsatz von Titanlegierungen und hochfesten korrosionsbeständigen Stahllegierungen. Während die Titanlegierungen sich besonders durch ihre hohen spezifischen mechanischen Eigenschaften, ihre sehr gute Korrosionsbeständigkeit, ihren niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihre elektrochemische Kompatibilität zu Carbon auszeichnen, liefern hochfeste Stahllegierungen höchste absolute mechanische Eigenschaften und niedrigste Materialkosten. Die Lochleibungsfestigkeit der Metallhybride – als eine von zahlreichen Einflussparametern von Niet- und Bolzenverbindungen – ist durch günstige Interaktionsmechanismen zwischen den beiden Komponenten gekennzeichnet, die zu höheren Lochleibungskapazitäten führen als theoretisch durch Mischungsverhältnisse zu erwarten. Dies führt dazu, dass die Lochleibungskapazität des reinen Titans schon bei Titangehalten von 50 % erzielt wird.

Dem Institut ist der Nachweis der strukturellen und technologischen Eignung der lokalen Verstärkungstechnik hinsichtlich der Nastechnologie gelungen, was die Untersuchung des dynamischen Verhaltens von mehrreihigen Bolzenverbindungen einschloss. Fortschrittliche Vorbehandlungsmaßnahmen der metallischen Schichten erlauben eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und der industriellen Durchführbarkeit der Verstärkungstechnik hinsichtlich Prozesskosten, Verarbeitungszeiten und Umweltverträglichkeit.

Anwendung

Die deutliche Erhöhung der Lochleibungs- und Bolzenverbindungsfestigkeit durch lokale Hybridisierung mittels Schichtersatztechniken erlaubt eine Vermeidung von lokalen Aufdickungen und den damit einhergehenden Sekundärbelastungen. Bolzendurchmesser und Klemmlängen können durch das Vermeiden von Aufdickungen herabgesetzt werden. Höhere Bolzenverbindungsfestigkeiten und Lochleibungsfestigkeiten reduzieren zudem die Anzahl erforderlicher Bolzen, so dass unter Berücksichtigung kleinerer, einzuhaltender Randabstände die Anzahl erforderlicher Bolzenreihen verringert werden kann. Dies führt zu einer Abminderung der Überlappungslängen, sowie der Ausmaße von metallischen Anschlussbeschlägen und -ringen. Geringere Temperatur- und Feuchteinflüsse und eine geringere Abhängigkeit der Belastungsrichtung erhöhen die mechanische Effizienz der Bolzenverbindungen. Die deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit eines lokalen Hybridlaminats hinsichtlich einer Bolzenverbindung führt zu erheblichen Gewichtseinsparungen und Vereinfachungen der Strukturgeometrie. Eine kleinere Anzahl erforderlicher Bolzen bringt ebenso eine Kostenreduktion infolge geringerer Montagezeiten mit sich.

Die lokale Verstärkungstechnik mittels Metallhybridisierung führt zu deutlichen strukturellen Vorteilen und zu einer ausschlaggebenden Verbesserung des Leichtbaupotentials von Niet- und Bolzenverbindungen für hochbeanspruchte Faserverbundstrukturen.

> Dipl.-Ing. Axel Fink, Dr. Boris Kolesnikov, Dr. Lars Herbeck,
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

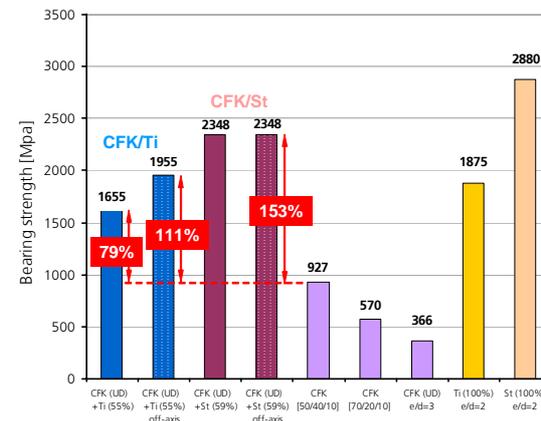


Bild 3:
Lochleibungsfestigkeit von Metalllaminaten im Vergleich.

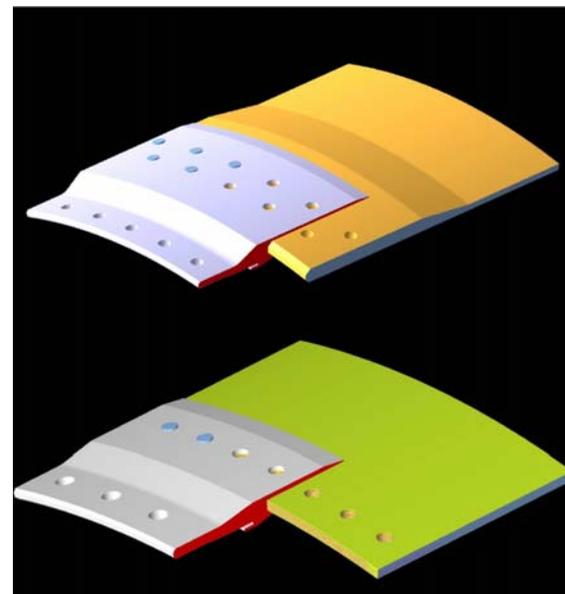


Bild 4:
Konstruktive Optimierung des Kopplungsbereiches mittels lokaler CFK/Metall Hybridisierung.

Active Twist Blade

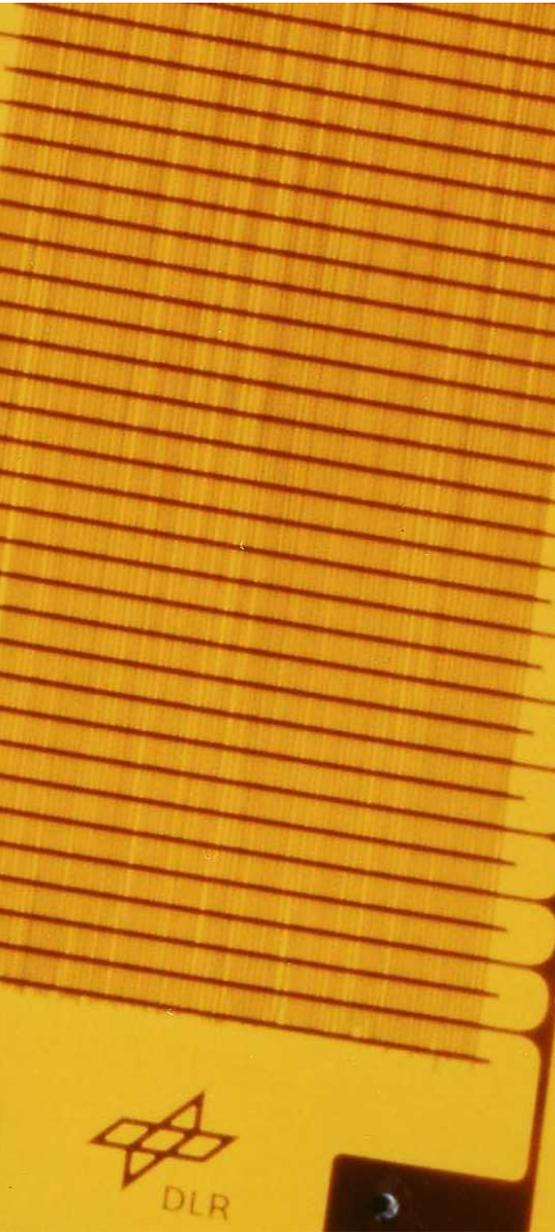


Bild 1:
Elektrodenstruktur eines piezokeramischen
Flächenaktuators.

Lärmreduktion durch höherharmonische und individuelle Blattsteuerung

Nach wie vor ist die Verbesserung von Hubschraubern im Hinblick auf Lärm, Vibrationen und Flugeleistungen ein vorrangiges Forschungsziel. Ein viel versprechender Ansatz in diese Richtung führt über die höherharmonische (HHC) bzw. individuelle Blattsteuerung (IBC). Neben der Reduktion von Lärm und Vibrationen liegen die Vorteile von HHC und IBC in einer möglichen Erhöhung der Fluggeschwindigkeit, der Erhöhung des Rotorschubs sowie der Verbesserung der Manövrierfähigkeit und Stabilität. Erreicht werden diese Verbesserungen z.B. durch die Minderung der Blatt- Wirbelinterferenz, der Reduktion von Überschalleffekten und der Realisierbarkeit extremer Blattanstellwinkel.

Bei den in der Vergangenheit verfolgten Konzepten zur technischen Realisierung von HHC und IBC mit konventionellen Mitteln konnte die prinzipielle Machbarkeit und die Wirksamkeit im Windkanal und im Flug nachgewiesen werden. Gemeinsame Nachteile aller bisherigen Konzepte sind jedoch die erforderlichen beweglichen Steuerelemente an den Blättern und die aufwändigen mechanischen oder hydraulischen Übertragungselemente zwischen Rumpf und Rotorkopf. Die Komplexität dieser Systeme hat eine kommerzielle Nutzung bisher nicht zugelassen.

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik verfolgt einen neuen Ansatz der Realisierung von HHC bzw. IBC auf Basis integrierter piezokeramischer Werkstoffe, die eine aktive Verwindung des Rotorblattes ermöglichen.

Ein aktiver Verwindungsrotor mit piezokeramischen Flächenaktuatoren

Ein wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung des Rotorblattes ist die piezokeramische Aktuatorik. Ihre Leistungsfähigkeit entscheidet letztendlich über die maximal erzielbaren Anstellwinkeländerungen und damit über die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Mit heutiger Piezotechnologie können mit flächig wirkenden Aktuatoren Dehnungen von bis zu 0,18 % erreicht werden. Durch eine faserartige Architektur der Aktuatoren werden Kräfte und Deformationen gerichtet in die Struktur eingetragen. Mittels einer geschickten Orientierung der Aktuatoren wird so eine direkte Verwindung des Rotorblattes erreicht. Weiterhin kann die Wirkung der Aktuatorik durch eine gezielte Nutzung von Zug-Torsionskopplungen weiter gesteigert werden. Hierfür wurde der Aufbau der Faserverbundhaut im Rahmen einer Parameterstudie optimiert (Bild 3). Mit dem so entwickelten Modellrotorblatt wird über den relevanten Frequenzbereich eine aktive Verwindung von $\pm 1,2^\circ$ erreicht. Die Randbedingungen hinsichtlich Massenverteilung, Torsions- und Biegesteifigkeiten wurden dabei eingehalten.

Als Referenz diente ein BO105 Model rotorblatt. Simulationen haben gezeigt, dass die angestrebten Ziele zur Reduktion des Vibrationsniveaus um 90 %, und zur Reduktion des Lärms aufgrund von Blatt-Wirbel-Interferenzen (BVI) um 6 dB erreicht werden können. Die Leistungssteigerung hinsichtlich des Rotorschubes liegt bei etwa 3 %.

Mit einem durch integrierte piezoelektrische Elemente verwindbaren Rotorblatt lassen sich die Vorteile von HHC/IBC in vollem Umfang ausschöpfen, wobei lediglich geringe und bezüglich der Flugtauglichkeit unkritische Modifikationen an der Hubschrauberstruktur vorzunehmen sind (kein Eingriff in die Primärsteuerung, weitestgehend konventioneller Blattaufbau, keine grundlegend neuen Komponenten). Ein besonderer Vorteil des Konzeptes liegt darin, dass kein Bauraum innerhalb des Blattes beansprucht und damit keine Schwächung der Struktur vorgenommen wird. Darüber hinaus beinhaltet das aktive Verwindungskonzept keine beweglichen Teile, wodurch ein besonders hohes Maß an Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit erreicht wird.

Weiterführende Untersuchungen

Der nächste Schritt auf dem Weg zu einem aktiven Verwindungsrotor wird der Entwurf und der Bau eines voll instrumentierten Windkanalmodells sein. Ziel einer Windkanaltestkampagne ist die Erstellung einer umfassenden experimentellen Datenbasis. Diese Daten ermöglichen eine Validierung der verwendeten Berechnungswerkzeuge bzw. deren Weiterentwicklung. Die Ergebnisse der Windkanaluntersuchungen führen zu einer weiteren Verbesserung des physikalischen Verständnisses der Wirkungsweise der individuellen Blattsteuerung mit einem aktiven Verwindungsrotor, welches die Grundlage einer gezielten und effizienten Nutzung dieser Technologie darstellt. Die gewonnenen Erkenntnisse sind eine wesentliche Voraussetzung für eine weitergehende, insbesondere auch kommerzielle Realisierung eines Hubschrauberrotors mit aktiver Verwindung.

In intensiver Kooperation mit der ONERA und Partnern aus anderen DLR-Instituten wird das Thema in dem DLR Projekt ATB bearbeitet. Auf europäischer Ebene beteiligt sich das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik an dem Integrierten Projekt (IP) FRIENDCOPTER, das von Eurocopter geführt wird.

> **Dipl.-Ing. Peter Wierach, Dipl.-Ing. Johannes Riemenschneider,**
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik



Bild 2:
 Vision eines Hubschraubers mit einem aktiven Verwindungsrotor und verteilter piezokeramischer Aktuatorik.

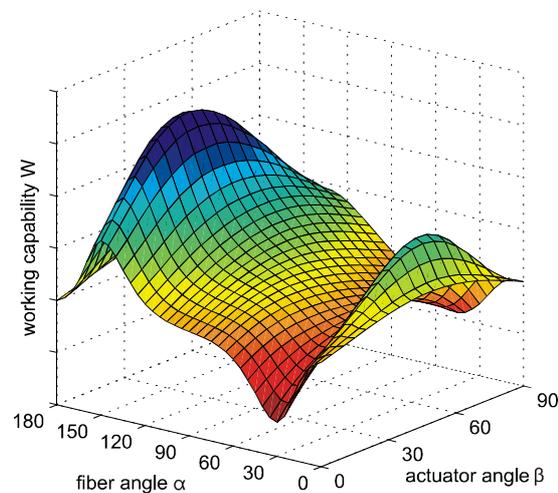


Bild 3:
 Einfluss von Faserwinkel und Aktuatorrichtung auf die aktive Verwindung des Rotorblattes.

Health-Monitoring mit Ultraschall-Lamb-Wellen zur Detektion von Schäden in Composites

Die Vision: Hochbelastbare Bauteile mit Selbstüberwachung

Um hohe Steifigkeit und Festigkeit bei modernen Primärstrukturen im Luft- und Raumfahrtbereich zu erreichen, ist ein immer komplexerer Aufbau mit Composites notwendig. Dieser treibt die Kosten für die notwendige zerstörungsfreie Prüfung nach der Fertigung und auch im späteren Betrieb in die Höhe.

Die bildgebende Ultraschallprüftechnik ist ein bewährtes Verfahren, das innen liegende, von außen nicht sichtbare Fehlstellen mit hoher Genauigkeit nachweisen kann. Allerdings erfolgt die Prüfung mehr oder weniger punktförmig, so dass ein zeitaufwändiges Scannen erforderlich ist. Bei zukünftigen doppelschaligen Bauteilen kann in eingebauten Zustand keine Prüfung mit klassischen Verfahren durchgeführt werden. Um die Kosten zu reduzieren und Prüfungen überhaupt möglich zu machen, sind völlig neue Ansätze dringend notwendig.

Das Prinzip der Ultraschall-Lamb-Wellen

Lamb-Wellen regen die gesamte Bauteildicke zu mechanischen Schwingungen an und breiten sich über größere Entfernungen aus. Damit lassen sich prinzipiell sowohl Oberflächenfehler an beiden Seiten, als auch innere Defekte anzeigen. Structural Health Monitoring (SHM) mit Lamb-Wellen verspricht eine hohe Kostenersparnis im Luft- und Raumfahrtbereich, da sich prinzipiell komplexe Bauteile mit relativ wenigen applizierten Aktuatoren und Sensoren großflächig prüfen lassen. Die Aktuatoren (Sender) und Sensoren (Empfänger) können in die Struktur integriert oder äußerlich appliziert werden. Bild 1 zeigt ein stringerversteiftes CFK-Bauteil mit applizierten Piezoelementen im Haut- und Stringerbereich.

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 dann im Empfangssignal schwer zu unterscheiden sind. Wegen der flächigen Ausbreitung treten an Bauteilrändern und bei Strukturänderungen Reflexionen auf, die die Auswertung weiter erschweren. Darüber hinaus sind die Änderungen im Empfangssignal durch Fehlstellen sehr klein, so dass aufwändige Auswertungsverfahren entwickelt werden müssen.



Bild 1:
CFK-Bauteil mit Stringern und applizierten Piezo-Elementen.

Untersuchungen an CFK-Proben und -Strukturen

Zum Verständnis der Ausbreitung der Lamb-Wellen in Bauteilen und vor allem deren Interaktion mit Fehlstellen ist eine Visualisierung erforderlich. Häufig erfolgt die Messung des Lamb-Wellenfeldes mit einem Laser-Vibrometer. Im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik wird die bildgebende Ultraschallprüftechnik eingesetzt.

Ein Aktuator am Bauteil, der mit dem Sendeausgang des Ultraschallprüfsystems verbunden wird, dient als Sender für Lamb-Wellen. Als Empfänger wird ein über Wasser-spalt angekoppelter Piezo benutzt, mit dem das Bauteil gescannt wird. Während des Abrasterns wird ein vollständiger A-Bild-Dateneinzug durchgeführt, so dass anschließend A-Bilder an allen Rasterpunkten zur Verfügung stehen und sich „Lamb-Wellen B-, C- und D-Bilder“ berechnen lassen.

CFK-Bauteile sind häufig mit Stringern versteift. Da sich im Stringerbereich die Dicke ändert, kann sich der im Hautbereich angeregte Mode hier nicht ausbreiten. Anschaulich stellt Bild 2 („Lamb-Wellen-Laufzeitbild“) diesen Effekt dar. Es handelt sich um einen Ausschnitt aus der Platte, wobei zwischen den beiden horizontal verlaufenden Stringern bei $y=200$ und $y=370$ im Hautbereich am rechten Rand Aktuatoren appliziert wurden (Bild 1). Von der den Stringern abgewandten Seite wurde das Bauteil gescannt. Bei dem linken D-Bild (Bild 2) wurden die im oberen und im unteren Hautfeld befindlichen Aktuatoren parallel angeregt. Aus den Bildern lässt sich folgern, dass die Ablösung eines Stringers die Ausbreitung des Lamb-Wellen in ein benachbartes Feld ermöglicht und dadurch detektiert werden kann.

Zur Zeit werden im Rahmen des AISHA-Projekts Untersuchungen an monolithischen CFK-Proben und CFK- Sandwich-Proben mit Honigwaben und Schaumkernen durchgeführt, die durch Impact, dynamische Zug-/Druckbelastung wie durch thermisches Zyklieren geschädigt wurden. Hierfür sind die Auswahl optimaler Wellenmoden für das jeweilige Material und die nachzuweisenden Fehlertypen notwendig. Die Anregung erfolgt mit Rechteck-Burst-Signalen, wobei die störenden Oberwellen sende- und empfangsseitig durch entsprechende Filter unterdrückt werden. Die Frequenz- und die Bandbreite des Empfangssignals lassen sich in Echtzeit über FFT auswerten.

Für die ersten grundlegenden Untersuchungen kann zunächst ein bildgebendes Ultraschallsystem mit entsprechenden Schnittstellen (externe Sendestufe, rauscharmer Vorverstärker mit Bandpassfiltern) eingesetzt werden. Geplant ist jedoch ein spezielles, auf die besonderen Anforderungen der Lambwellentechnik optimiertes Mehrkanalsystem zu beschaffen.

> **Dr. Wolfgang Hillger,**
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

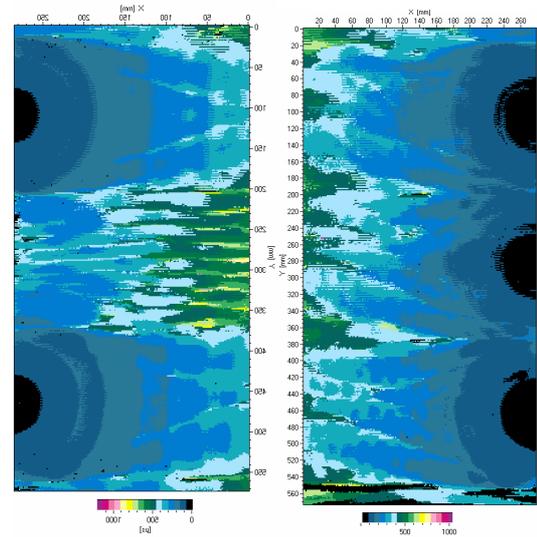


Bild 2:
Lamb-Wellen-Ausbreitung zwischen den Stringern,
links: Anregung mit zwei Aktuatoren,
rechts: Anregung mit drei parallel geschalteten
Aktuatoren.

Effiziente Thermalanalyse

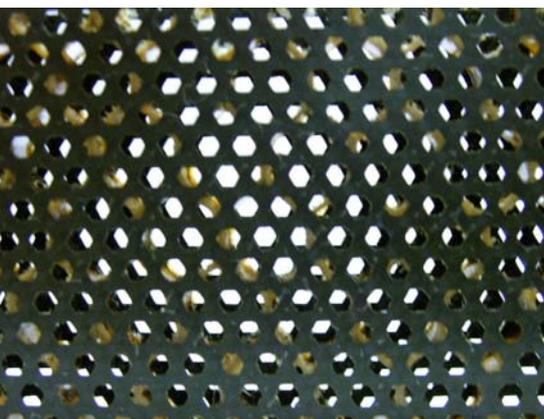


Bild 1:
Perforiertes Sandwichmaterial.

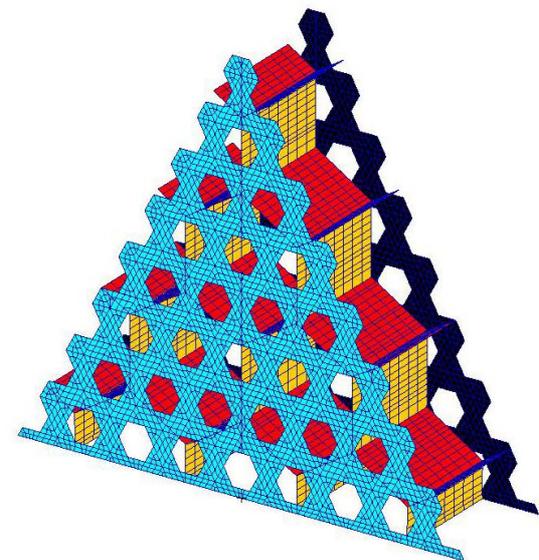


Bild 2:
Sandwich Einheitszelle.

Homogenisierung perforierter Sandwichmaterialien von Raumfahrtantennen unter thermischen Lasten

Für die rasant wachsenden Kapazitätsanforderungen in der Satellitenkommunikation ist eine ständige Verbesserung der Antennentechnik erforderlich. Hohe Ansprüche werden insbesondere bezüglich der Send- und Empfangsqualität gestellt. Hierbei führt der Trend in Richtung höherer Sendefrequenzen zu extremen Anforderungen bezüglich der geometrischen Stabilität von Antennenreflektoren unter wechselnden thermischen Einflüssen.

Der Forderung nach geometrischer Stabilität, die im Allgemeinen durch ein verstärktes und steiferes Strukturkonzept erreicht werden kann, steht aus Kostengründen der Wunsch nach minimalen Massen entgegen.

Ein weiteres Problem resultiert daraus, dass bei thermischen Belastungen ein Steifigkeitsanstieg nicht unbedingt auch eine Verringerung der Deformationen zur Folge hat, so wie es bei mechanischen Lasten üblich ist. Sind die aussteifenden Strukturteile selbst von thermischen Einflüssen betroffen, ist vielmehr auf einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Materials bzw. auf eine „Abschwächung“ der Last selbst zu achten.

Die intelligente Anwendung moderner Werkstoffe spielt bei der optimalen Auslegung eine wichtige Rolle. Dafür sind entsprechende Berechnungsmethoden erforderlich, welche die wesentlichen Einflüsse auf das thermomechanische Verhalten zuverlässig beschreiben können.

Am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik sind neue Homogenisierungsverfahren entwickelt worden, mit deren Hilfe Satellitenreflektoren in Sandwichbauweisen berechnet werden können.

Die Leistungsfähigkeit der neuen Verfahren zeigte die Thermalanalyse von Sandwichstrukturen, die aus perforierten CFK-Deckschichten und KOREX Honigwabenkernen bestehen. Der spezielle triaxiale Lagenaufbau von CFK-Rovings führt zu Löchern in den Deckschichten, wie sie in Bild 1 dargestellt sind. Thermische Lasten, insbesondere durch Sonneneinstrahlung, treffen daher nicht nur auf die Vorderseite der Sandwichstruktur sondern auch auf die Hinterseite. Durch diesen Effekt wird der thermische Gradient zwischen Vorder- und Hinterseite verkleinert, was insgesamt zu einer Entlastung der Struktur führt. Die Intensität ist dabei stark vom Einstrahlwinkel und dem internen Aufbau des Sandwichkerns abhängig.

So sind beispielsweise folgende Konfigurationen denkbar:

- > **Sonnenstrahlen, die durch die Perforation fallen, treffen auf die hintere Deckschicht,**
- > **Sonnenstrahlen, die durch die Perforation fallen, gehen ebenfalls durch die Löcher der hinteren Deckschicht,**
- > **Sonnenstrahlen fallen durch die Perforation auf die Seitenwände der Honigwaben.**

Neben den möglichen Kombinationen dieser Teilfälle kommen interne Wärmeübergänge in der Struktur selbst dazu. Würde man alle Wärmetransportmechanismen (Wärmeleitung, -strahlung und Konvektion) detailliert berechnen wollen, wäre der Zeitaufwand enorm und Berechnungen an ganzen Antennenstrukturen realistisch nicht durchführbar. Daher werden homogenisierte Modelle entwickelt, die um Größenordnungen schneller zu berechnen sind.

Zur Ableitung der homogenisierten Modelle wurde das thermische Verhalten auf Mikrolevel anhand einer repräsentativen Einzelzelle untersucht. Daraus wurden makroskopische Materialeigenschaften abgeleitet, die in den groben Diskretisierungen der Gesamtstruktur zur Anwendung kommen.

Anhand der Einheitszelle, siehe Bild 2, wurden verschiedene Bestrahlungswinkel und unterschiedliche Ausrichtungen der Deckschichten relativ zueinander untersucht. Insbesondere für die hintere Deckschicht ergeben sich dabei recht unterschiedliche Temperaturen, die exemplarisch in Bild 3 dargestellt sind.

Unter Berücksichtigung der zufälligen Anordnung der Deckschichten im realen Reflektor sind Lösungen für die Thermalanalyse entwickelt und bezüglich experimenteller Tests validiert worden. Auf Basis dieser Ergebnisse sind homogenisierte Ansätze für die effektive Wärmeleitfähigkeit in der Schalenebene und senkrecht dazu formuliert worden. Diese nichtlinearen effektiven Wärmeleitfähigkeiten repräsentieren alle signifikanten Wärmetransportmechanismen. Sie werden im globalen Reflektormodell eingesetzt, siehe Bild 4. Die Deckschichten werden dabei mit Schalenelementen und der Kern durch eine Lage Solidelemente modelliert.

Die Anwendbarkeit dieser Methode für den Entwurf realer Strukturen wurde anhand eines Antennenreflektors für einen Satelliten im geostationären Orbit demonstriert.

> **Dipl.-Ing. Tom Sprowitz, Dr. Jan Teßmer,**
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

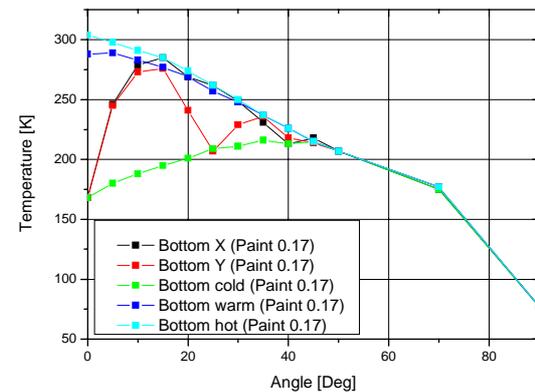


Bild 3:
Temperaturen der hinteren Deckschicht.

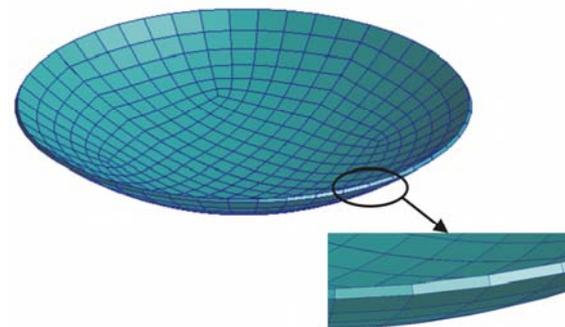


Bild 4:
Vereinfachtes Reflektormodell.

Materialien und Strukturen für Energie- und Thermalsysteme

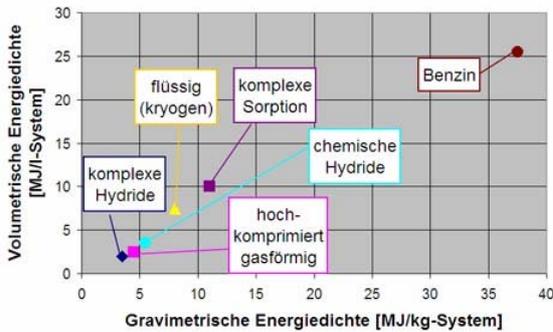


Bild 1:
Wasserstoffspeichertechnologien im Vergleich.

Neues Konzept zur Speichertechnologie für Wasserstoff

Ein Schlüssel zur erfolgreichen Nutzung von Wasserstoff als zukünftiger Energieträger im Automobilbau ist die Speichertechnologie. Realisiert wurden bisher Druckspeicher, kryogene Speicher und Sorptionsspeicher, bei denen Wasserstoff physikalisch oder chemisch gebunden wird. Alle bisherigen Systeme liegen jedoch bezüglich der volumetrischen Energiedichte um eine Größenordnung unter der von Benzin. Im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik wurde jetzt ein Konzept für eine neuartige Wasserstoffspeichertechnologie erarbeitet, das auf einer optimalen Kombination von Physisorptionseffekten unter Hochdruck bei kryogenen Temperaturen basiert. Bei konkurrenzfähig höher energetischer Speicherkapazität weist die neue Technologie in jedem der Bereiche Sicherheit, Kosten und Systemintegrierbarkeit akzeptable und gut kontrollierbare Charakteristiken auf. Diese „3 in 1“-Wasserstoffspeichertechnologie (Complex, Sorption, Cryo) hat aufgrund der Ausgewogenheit der einzelnen Kriterien Vorteile gegenüber etablierten Speichertechnologien (siehe Bild 1) und ist zum Patent angemeldet. Gegenwärtig werden Partner gesucht, um das Konzept bis zum Stadium eines Prototyps für mobile Anwendungen umzusetzen. Durch den Aufbau einer Demonstrationsanlage soll auch die Systemintegrierbarkeit gezeigt werden, die letztlich einen entscheidenden Schritt zur Verwertung der Technologie auf dem Markt darstellt.

Thermalmanagement thermisch hoch belasteter Strukturen

Zweiter Schwerpunkt des Instituts bei der Konditionierung von Systemen für Energie und Thermalaufgaben ist das Thermalmanagement thermisch hoch belasteter Strukturen. Hierbei geht es darum, das Know-How aus der Raumfahrt anderen Technikbereichen nutzbar zu machen. Anders als unter irdischen Umgebungsbedingungen gibt es den konvektiven Wärmetransport im freien Weltraum prinzipiell nicht (Hochvakuum und Schwerelosigkeit). Die Konvektion (freie und erzwungene) ist aber ein äußerst wirksamer Wärmetransferprozess. Da im freien Weltraum nur noch Wärmeleitung und Wärmestrahlung als thermische Wechselwirkung übrig bleiben, muss die Leistungsfähigkeit dieser Wärmetransferprozesse für ein effizientes Thermalmanagement maximal ausgelegt werden. Insbesondere bezüglich der Wärmeleitung hat die Raumfahrt sowohl den thermischen Kontaktwiderstand als auch den thermischen Leitwert betreffend extrem leistungsfähige Technologien entwickelt. Überall dort, wo Systeme unter extremen thermischen Umgebungsbedingungen konditioniert werden müssen, sind diese Technologien in vielen Fällen die einzige Möglichkeit zur Problemlösung: Zur Minimierung des thermischen Kontaktwiderstandes nutzt man so genannte „gap filler“ (z.B. Wärmeleitpaste) zwischen den Grenzflächen von Komponenten, die auch bei relativ geringen mechanischen Anpresskräften einen hervorragenden thermischen Kontakt gewährleisten und selbst einen hohen thermischen Leitwert haben. Mit so genannten „heat pipes“ (Wärmerohre) kann man die Wärmeleitung im Vergleich zum thermischen Leitwert konventioneller guter Wärmeleiter (z.B. Kupfer) extrem verbessern (bis zu mehreren Zehnerpotenzen bei gleichen Querschnitten und Längen!). Wärmerohre nutzen einen geschlossenen 2-Phasen-Zyklus (flüssig/dampf) zum Wärmetransport zwischen Wärmequelle und Wärmesenke und können sogar so ausgelegt werden, dass die Wärme nur in eine Richtung fließen kann (thermo diode) oder/und

der thermische Leitwert variabel ist (variable conduct heat pipe/VCHP), so dass mit dem Wärmetransferelement gleichzeitig eine Thermalkontrolle (z.B. Temperaturstabilisierung) möglich wird. Letztlich kommen auch völlig inerte Flüssigkeiten zum Einsatz, die durch Umspülung von thermisch hoch belasteten Komponenten einen sehr effektiven Wärmetransfer realisieren.

Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickelt Konzepte, um dieses Potenzial für „irdische“ Anwendungen nutzbar zu machen. Dies soll an drei Beispielen deutlich gemacht werden:

Beispiel 1: Automobilbau

Im Motorraum erzeugt der Antriebsstrang eine beträchtliche Wärmeleistung. In dieser thermisch hoch belasteten Zone ist eine konvektive Kühlung ausgeschlossen. Für das Motorenmanagement werden jedoch Steuergeräte genau in diesem Umfeld benötigt. Ein Steuergerät selbst erzeugt ca. 50 bis 80 Watt Wärmeleistung.

Die Kühlung einer solchen E-Box kann durch den Wärmetransfer über Wärmerohre (Heat Pipes) zu einer geeigneten Wärmesenke außerhalb des thermisch hoch belasteten Motorraumes gewährleistet werden. Die Heat Pipes werden über geeignete gap filler direkt mit der Außenseite des Steuergerätes verbunden und transferieren die Wärme zum Wärmetauscher (z. B. in einen Radkasten).

Mit Hilfe von Thermalmodellierung wurde untersucht, welche Auswirkungen eine thermische Isolation um die E-Box hat (Abschirmung gegen den thermisch hoch belasteten Motorraum). Wie sich zeigte, ist eine Thermalisolation direkt um die E-Box, wie sie prinzipiell in Bild 2 dargestellt ist, in speziellen Fällen unerlässlich.

Beispiel 2: Elektromotoren/Leistungselektronik

Eine weitere Anwendung neuer Technologien der Thermalkonditionierung wird für die Optimierung des Thermalmanagements von Motoren und Elektronikkomponenten für den Einsatz in Industrieanlagen entwickelt. Mit Finite Element Modellen können kostengünstig Variantenvergleiche bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und mit unterschiedlichen Modifikationen durchgeführt werden. Die jeweils günstigste Variante wird dann an einem Hardwaremodell in unseren Testanlagen verifiziert. Dabei sind äußerst enge Kostengrenzen einzuhalten.

Beispiel 3: LED-Array

Zuverlässigkeit und optimale Leistung der LED Lichtquellen hängen in hohem Maße vom thermischen Management ab. Anders als für konventionelle Lichtquellen gibt hier stärkere thermische Beschränkungen. Die erlaubte Betriebstemperatur während der spezifischen Lebenszeit wird durch den Glas-Punkt des LED Harzes begrenzt. Die maximal zulässige Grenzschichttemperatur liegt allgemein im Bereich von 95 °C – 125 °C. Somit kommt einer wirksamen Kühlung, direkt am Chip, eine besondere Bedeutung zu. In einem Demonstratorexperiment konnte gezeigt werden, dass ein LED-Array direkt durch Umspülung mit einer inerten Flüssigkeit hochwirksam gekühlt werden kann (siehe Bild 3). Das entwickelte Verfahren ist zum Patent angemeldet.

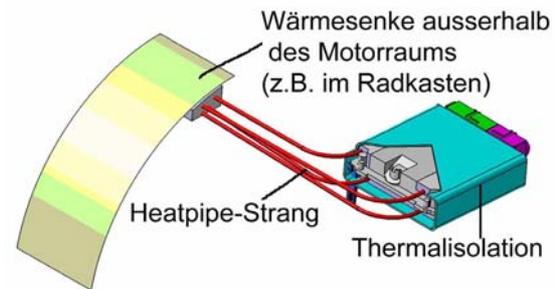


Bild 2:
Thermalmanagement für E-Box.

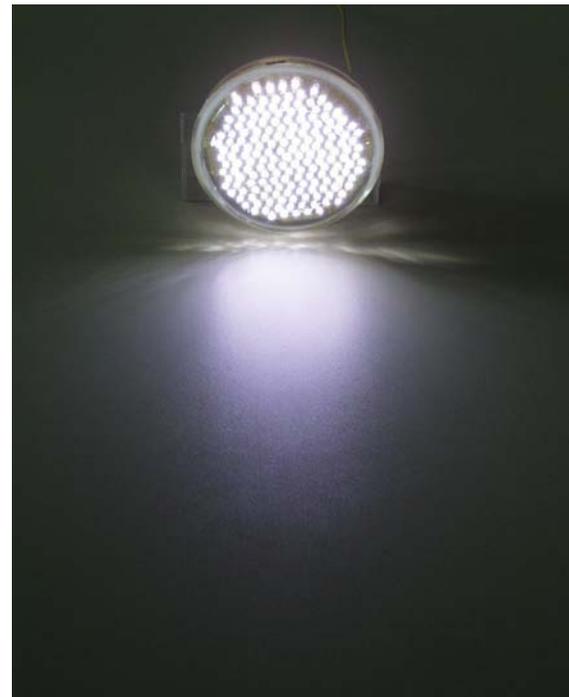


Bild 3:
LED-Array, umspült von inerter Flüssigkeit.

> Dr. Franz Lura, Dipl.-Ing. (FH). Horst-Georg Lötze,
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

- Herausgeber** **Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft
- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
- Titelmotiv** Innovationsmotore des Instituts
für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
- Anschrift** Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
- Redaktion** Prof. Dr. Michael Sinapius
Dr. Jörg Melcher
- Druck** Buch- und Offsetdruckerei Richard Thierbach GmbH,
Mülheim an der Ruhr
- Drucklegung** Braunschweig, im Oktober 2005
- Abdruck (auch von Teilen) oder sonstige Verwendung
nur nach vorheriger Absprache mit dem DLR gestattet.
- www.DLR.de



Mikrowellenuniversalofen.



DLR

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

**Institut für Faserverbundleichtbau und
Adaptronik**

Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

www.DLR.de/fa