

# Innovationsbericht 2006

Institut für  
Faserverbundleichtbau  
und Adaptronik

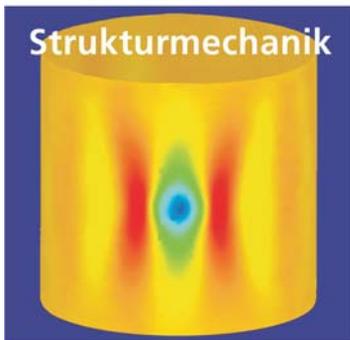
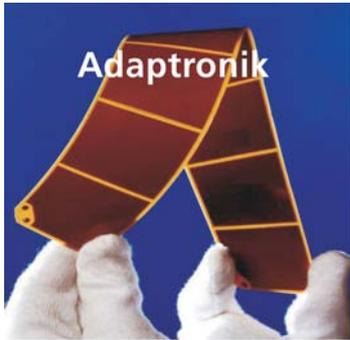


# Inhalt

Temperaturverteilung einer Fahrzeug-  
Verbundstruktur im Herstellungsprozess

|   |    |
|---|----|
| <b>Vorwort</b>  |    |
| Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach, Prof. Dr. Michael Sinapius                                    | 4  |
| <b>Robuster Entwurf von Faserverbundschalen</b>   |    |
| Dr. Christian Hühne, Prof. Dr. habil. Raimund Rolfes  | 6  |
| <b>Highspeed ARAMIS System</b>  |    |
| Dipl.-Phys. Hans Christian Goetting   | 8  |
| <b>IBUCK - ein schnelles Werkzeug für die Stabilitätsanalyse im Entwurf versteifter Paneele</b> |    |
| Dr. Phillip Bürmann   | 10 |
| <b>DLR Center of Excellence Composite Structures</b>  |    |
| Dr. Lars Herbeck, Dr. Jan Teßmer  | 12 |
| <b>Neueste Entwicklungen für den Schwarzen Rumpf</b>  |    |
| Dr. Lars Herbeck, Prof. Dr. Michael Sinapius, Dr. Jan Teßmer                                    | 14 |
| <b>Mikrowellengestützte Autoklavprozessierung</b>   |    |
| Dipl.-Ing. Maksim Podkorytov, Dipl.-Ing. Matthias Meyer   | 16 |
| <b>Qualitätsgesicherte Fertigung von Faserverbundbauteilen</b>                                  |    |
| Dipl.-Ing. (FH) Björn Köhnke  | 17 |
| <b>Thermale Prozesssimulation an einer Fahrzeugkarosserie</b>                                   |    |
| Dipl.-Ing. Tobias Wille   | 18 |
| <b>Hochleistungsaktuatoren für die Adaptronik</b>   |    |
| Dipl.-Ing. Peter Wierach  | 20 |
| <b>Aktive Lärmreduktion durch Active Structural Acoustic Control (ASAC)</b>                     |    |
| Dr. Olaf Heintze, Dipl.-Ing. Tom Weyer, Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach                        | 22 |
| <b>Frequenzvariabler Schwingungstilger</b>  |    |
| Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach, Dr. Stefan Keye, Dipl.-Ing. Ralf Keimer                       | 24 |
| <b>1 µm genaue Verformungsmessung unter Weltraumbedingungen</b>                                 |    |
| Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Haefker, Dr. Franz Lura  | 25 |
| <b>Photonik - Adaptronik mit optomechanischen Funktionswerkstoffen</b>                          |    |
| Dr. Jörg Melcher, Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach,<br>Dr. Wolfgang Braue, Dr. Bernd Hildmann   | 26 |
| <b>Selbst überwachende und selbst heilende Strukturen</b>                                       |    |
| Dr. Lars Herbeck, Dr. Wolfgang Hillger, Dr. Boris Kolesnikov                                    | 27 |
| <b>Frei formbares Flugzeug</b>  |    |
| Dr. L. Flavio Campanile   | 28 |
| <b>Die "High Altitude Long Endurance - UAV"-Entwicklung im DLR</b>                              |    |
| Dipl.-Ing. Michael Hanke,<br>Dr. Hartmut Runge, Dr. Holger Fiehmelt, Dr. Martin Hepperle        | 29 |
| <b>Publikationen und Patente 2005 - 2006</b>  | 30 |
| <b>Impressum</b>  | 31 |

# Vorwort



Der Wissenschaftstag 2006 und Innovationsbericht 2006 des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik legen den Schwerpunkt auf die Strukturmechanik des CFK-Rumpfes. Die Beiträge geben einen Einblick in aktuelle Arbeiten und jüngste Ergebnisse aus den Arbeiten zum Schwarzen Rumpf. Darüber hinaus werden die Auszeichnungen aus dem vergangenen Jahr vorgestellt, die an das Institut gegangen sind. Gemeinsam mit Teilen des Instituts für Bauweisen und Konstruktionsforschung wurde 40 Mitarbeiter des Instituts als „DLR-Center of Excellence Composite Structures“ ausgezeichnet. 2006 eröffnete der DLR-Vorstand zum zweiten Mal einen Wettbewerb der Visionen. Aus 60 eingereichten Ideen wurden 10 prämiert, an vier prämierten Ideen waren Mitarbeiter des Instituts für Faserverbund-leichtbau und Adaptronik beteiligt, zwei von drei Erstplatzierten stammen aus dem Institut FA.

Mit seinem diesjährigen Wissenschaftstag ehrt das DLR-Institut für Faserverbund-leichtbau und Adaptronik zwei Persönlichkeiten, die in herausragender Weise die fachliche Arbeit des Instituts über viele Jahrzehnte geprägt haben:

Professor Dr.-Ing. Heinrich Bergmann feierte dieses Jahr seinen 80sten Geburtstag. Er übernahm die Institutsleitung im Jahre 1976 nach jahrzehntelanger Arbeit in den USA, wo er sich in der dortigen Luft- und Raumfahrtindustrie sowie als Lehrender an amerikanischen Universitäten das fachliche Rüstzeug erarbeitete, mit dem er dem Institut über 15 Jahre seinen Stempel aufprägte. Aus einer beeindruckenden Vielzahl von originären Arbeiten sei hier beispielhaft auf seine Beiträge zur Realisierung der Shuttle Bay Doors des US Space Shuttle, zur Konzeptionierung des „SÄNGER“-Programms und zur thermomechanischen Auslegung des europäischen Raumtransporters HERMES verwiesen. Für die Forschungsarbeit des Instituts hat er durch die Einbindung thermomechanischer Fragestellungen wie auch der für Faserverbundstrukturen essentiellen Schadensmechanik neue Akzente gesetzt.

Heinz Bergmann hat seine wissenschaftlichen Fähigkeiten auch der Pflege und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses gewidmet. Deutlich sichtbar wird dieses in seinem Buch über das „Konstruieren mit Faserverbunden“ sowie in seiner langjährigen Tätigkeit als Honorarprofessor an der Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Universität in Hannover.

Sein hohes wissenschaftliches Engagement fand auch nach seiner Emeritierung eine sehr fruchtbringende Fortsetzung in einem Beitrag zum Thema „Versagenskriterien in Faserverbunden“, in dem er mit hoher fachlicher Kompetenz die heute verfügbaren Ansätze analysiert und einer vergleichenden Wertung zuführt.

Dass Heinz Bergmann und seine Frau Christiane nach wie vor tiefe Wurzeln auch in Amerika haben, hängt mit ihren dort lebenden Kindern und Enkeln zusammen. Dass diese Art „Wandern zwischen zwei Welten“ jung hält, ist an den beiden Bergmanns offenkundig sichtbar.

Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Rohwer hat die Geschichte des Instituts über einen wesentlich längeren Zeitraum seit 1968 erlebt und diese entscheidend mitbestimmt. Er ist zwar offiziell mit Vollendung seines 65sten Lebensjahres aus den Diensten des DLR ausgeschieden, steht dem Institut jedoch mit seinem unschätzbaren Erfahrungsschatz als Berater nach wie vor zur Verfügung.

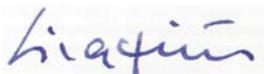
Obwohl er seine besonderen Stärken im Bereich der Strukturanalyse/-mechanik hat, ist er eine mit hoher Integrationskraft ausgestattete Persönlichkeit, deren Ideenreichtum und Rat der derzeit amtierende Institutsleiter immer wieder vor allem in besonders kritischen Fällen in Anspruch genommen hat. Bei all seinem erfolgreichen fachlichen und menschlichen Wirken kam Klaus Rohwer seine feste Einbindung und außergewöhnliche Anerkennung in der internationalen Strukturmechanik-Community zu Gute, der er vor allem in jüngeren Jahren eine feste Basis durch längere Auslandsaufenthalte z. B. beim CALTEC oder NLR gab. Diese besondere Persönlichkeits- und Erfahrungsstruktur fand schließlich ihren Niederschlag z. B. in seiner Ernennung zum Seniorwissenschaftler des DLR im Jahre 1992, in seiner Habilitation im Jahre 1996 an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg und schließlich in seiner von dieser Universität ausgesprochenen Ernennung zum Honorarprofessor im Jahr 2000. Ein wahrhaft erfolgreiches Leben, das in der Fachwelt tiefe Spuren hinterlassen hat. Beispielhaft für eine Vielzahl höchst innovativer Beiträge sind seine in der Welt der Strukturanalyse hoch anerkannten Ansätze zur rechnerischen Ermittlung interlaminaarer Spannungen in geschichteten Faserverbunden.

Privat machen er und seine Frau Ute seit einigen Jahren mit wachsender Begeisterung die Gewässer Mecklenburg-Vorpommerns „unsicher“. Ihre neuen „Karrieren“ als Freizeitkapitäne mögen dem Ehepaar Rohwer noch lange Jahre viel Freude bereiten.

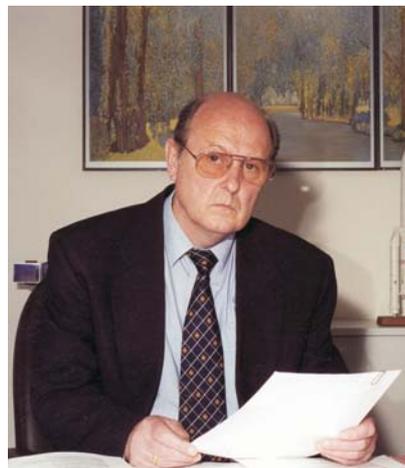
Braunschweig, September 2006



Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach  
Institutsleiter



Prof. Dr. Michael Sinapius  
Stellvertretender Institutsleiter



# Robuster Entwurf von Faserverbundschalen

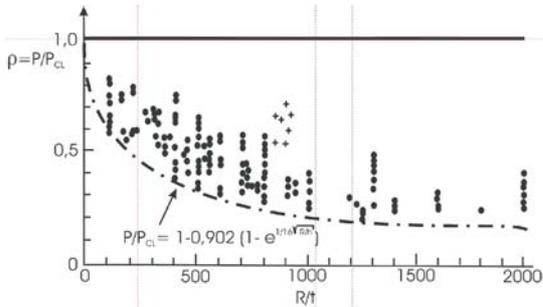


Bild 1:  
Versuchsergebnisse axial belasteter  
Zylinderschalen.

## Stabilität dünnwandiger Kreiszyinderschalen

Dünnwandige schalenartige Strukturen versagen nicht auf Grund lokaler Festigkeits-, sondern lokaler Stabilitätsgrenzen. Durch plötzliches, seitliches Ausweichen entzieht sich die Struktur der Aufnahme einer höheren Belastung. Abweichungen von der idealen perfekten Geometrie oder der idealen gleichmäßigen Belastung werden als Imperfektionen bezeichnet und können die Traglast einer idealen, perfekten Schale drastisch reduzieren.

Dies wird in Bild 1 durch den bei zunehmender Schlankheit (Quotient von Zylinder-radius und Wandstärke) abnehmenden Abminderungsfaktor deutlich, der als Quotient der Traglasten von realer, imperfekter Schale aus dem Versuch und idealer, perfekter Schale aus der Analyse definiert ist. Die große Diskrepanz zwischen den Ergebnissen aus Versuch und Simulation sowie ihre starke Streuung motivieren seit mehr als 50 Jahren weltweit die Ingenieure auf dem Gebiet der Stabilitätsanalyse zur Suche nach Methoden der Bestimmung der tiefsten Belastungsgrenze.

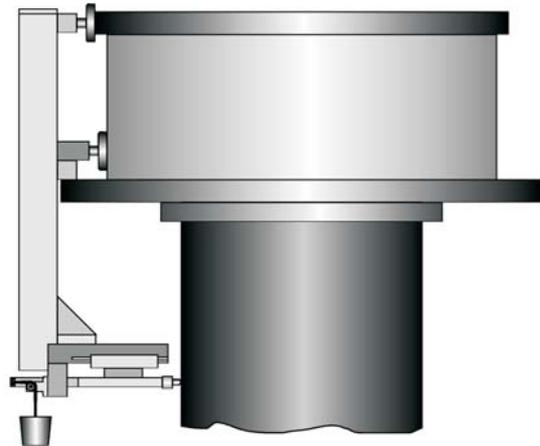
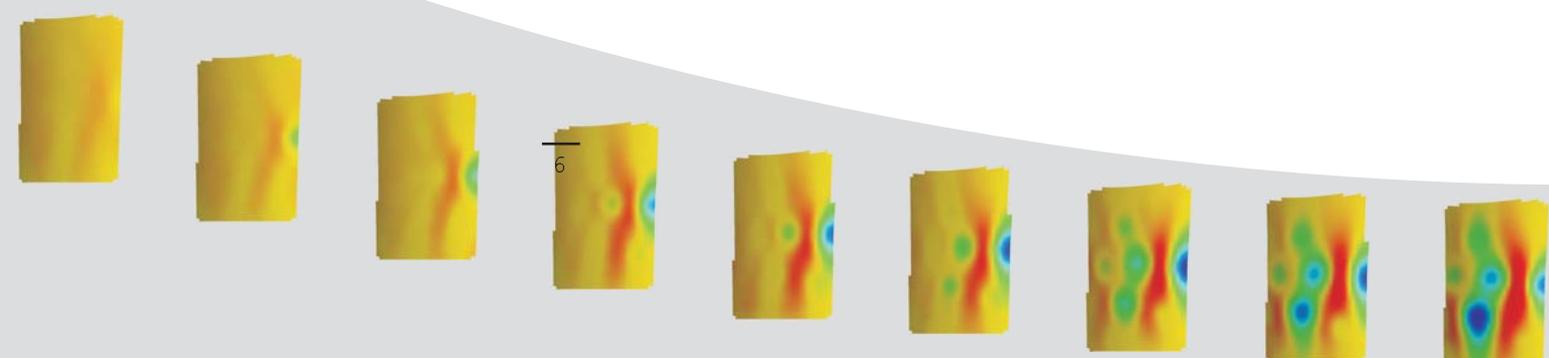


Bild 2:  
Störvorrichtung.

Auf Grund fehlender Methoden für eine genaue Berücksichtigung der vorhandenen Imperfektionen in der Analyse wurde in den 1950er und 60er Jahren eine große Anzahl von Versuchen an axial belasteten, unverstärkten Kreiszyinderschalen durchgeführt und deren Ergebnisse statistisch ausgewertet. Aus den Versuchsreihen wurden Abminderungsfaktoren der theoretischen Stabilitätsgrenzen abgeleitet und in Richtlinien wie der NASA-SP 8007 festgehalten. Dabei wurde die Qualität der Schalen, der Versuchsdurchführung sowie der Auswertung nicht berücksichtigt. Nach dem heutigen Stand der Technik durchgeführte Versuche machen deutlich, dass diese Abminderungsfaktoren als sehr konservativ angesehen werden müssen.

Eine verbesserte Auslegung setzt die Definition neuer, realitätsnäherer Abminderungsfaktoren voraus, wozu eine überaus große Anzahl neuer Versuche durchgeführt werden müsste. Auf Grund der inzwischen stark gestiegenen Rechnerleistung soll der Versuch gemacht werden, diesen Aufwand durch eine vergleichbar große Anzahl virtueller Versuche zu ersetzen. Die Berücksichtigung realistischer Imperfektionen in der numerischen Analyse ist dabei unabdingbar. Bisherige Methoden sind entweder extrem konservativ, oder sie benötigen Annahmen über die Form und die Amplitude der real vorhandenen Imperfektionen. Diese stehen jedoch zum Zeitpunkt des Entwerfens noch nicht zur Verfügung. Die Ermittlung und Standardisierung herstellungsbedingter Imperfektionen ist extrem aufwändig, und es stehen häufig nicht genügend Eingangsdaten für eine stochastische Auswertung zur Verfügung.

Mit der Verwendung von Faserverbundwerkstoffen aus unidirektionalen Einzelschichten stehen dem Entwurfsingenieur mit den Faserorientierungen eine große Anzahl zusätzlicher Entwurfsparameter zur Verfügung, mit denen das Strukturverhalten gezielt beeinflusst werden kann. Für den optimalen Entwurf ist die Bemessungslast der realen imperfekten Schale zu maximieren. Richtlinien für die Bestimmung der Bemessungslast anisotroper Faserverbundschalen stehen bisher jedoch nicht zur Verfügung.



## Ein neuer deterministischer Ansatz zur Bestimmung der Bemessungslast

Da insbesondere für Faserverbundschalen keine ausreichende Anzahl von Versuchsergebnissen und Imperfektionsdaten vorhanden ist, führt ein stochastischer Ansatz nicht zum Ziel. Entgegen den nach dem Stand der Technik üblichen stochastischen Methoden wird deshalb eine neue deterministische Methode zur Bestimmung der Bemessungslast entwickelt.

Die Einzelbeule ist in einer Reihe von Veröffentlichungen als realistische, ungünstigste und stimulierende geometrische Imperfektion beschrieben und kann daher als charakteristische Imperfektion axial belasteter Kreiszyinderschalen angenommen werden. Im Versuch wird wie in Bild 2 dargestellt die Einzelbeule durch eine in radialer Richtung angreifende Störlast induziert und dann die Schale in axialer Richtung gestaucht, bis die maximale Traglast (Beullast) erreicht ist. Bei Variation der Störlast ergeben sich charakteristische Beullast-Störlast-Diagramme wie in Bild 3.

Der Kurvenverlauf kann durch drei Geraden idealisiert werden. Während die Beullast auf der Geraden b mit steigender radialer Störlast linear abnimmt, muss die Störlast auf der Geraden c drastisch erhöht werden, um die Beullast weiter zu reduzieren. Die Einzelbeule am Angriffspunkt der Störlast ist in diesem Bereich so groß, dass sie durch eine visuelle Kontrolle detektiert wird und damit als unrealistisch groß angesehen werden kann. Im Schnittpunkt der Geraden b und c, der durch den Punkt  $(P_1, N_1)$  beschrieben wird, ändert sich das Strukturverhalten.

Um diese Änderung zu untersuchen, wird das Deformationsverhalten mit Hilfe eines ARAMIS-Messsystems aufgezeichnet. Mit den vier zeitgleich verwendeten Messsystemen wird zunächst wie in Bild 4 die gesamte Schalenoberfläche mit einer Frequenz von 920 Hz vermessen. Für den hochdynamischen Vorgang des Stabilitätsversagens werden die vier Messsysteme auf einen Ausschnitt der Schale fokussiert (Bildsequenz unten) und die Bildfrequenz auf 3680 Hz gesteigert. Durch die Messungen wird deutlich, dass im Bereich der Geraden c die radiale Störung so groß ist, dass lokal keine weitere axiale Belastung aufgenommen werden kann. Die Spannungen lagern sich um und das lokale Stabilitätsversagen beginnt nicht am Ort der Störung, sondern in Umfangsrichtung versetzt. Eine Erhöhung der Störlast und damit die Vergrößerung der Störung haben nur einen sehr geringen Einfluss auf die Höhe der Beullast.

Da die Einzelbeulen für eine Störlast größer  $P_1$  unrealistisch groß sind und sich die Beullast nur geringfügig bei einer Erhöhung der Störlast ändern, wird die Beullast  $N_1$  als neue Bemessungslast definiert. Diese Bemessungslast stellt eine sichere untere Grenze dar, die zugleich aber gegenüber der vorhandenen Richtlinie NASA-SP 8007 um bis zu 150 Prozent höhere Ergebnisse liefert und damit bisherige ungenutzte Tragreserven ausnutzt. Sollte sich dieses deterministische Konzept bestätigen, stünde dem Ingenieur ein erheblich erweiterter Spielraum bei der optimalen Auslegung von Composite-Zylinderschalen zur Verfügung.

- > **Dr. Christian Hühne und Prof. Dr. habil. Raimund Rolfes, inzwischen Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Universität Hannover**

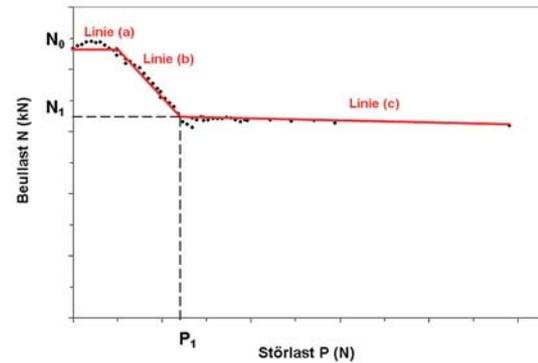


Bild 3:  
Beullast-Störlast-Diagramm.

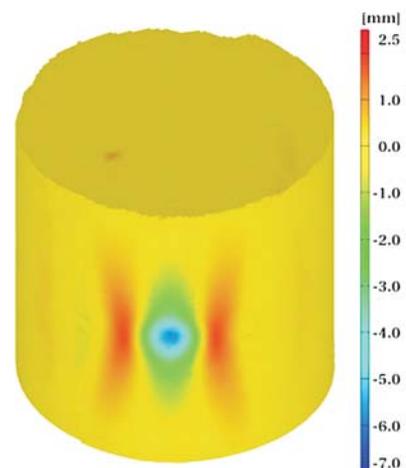
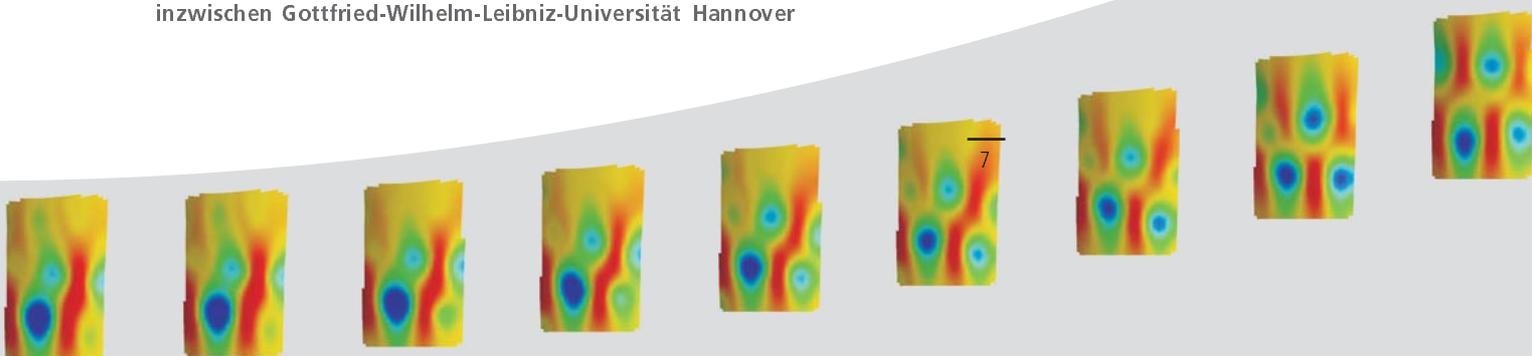


Bild 4:  
Rundumvermessung.



# Highspeed ARAMIS System

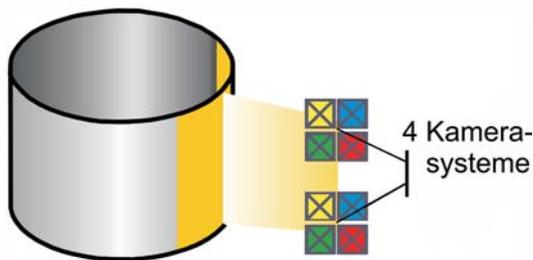


Bild 1:  
Schema der Hochgeschwindigkeitsmessung durch Ausrichtung von bis zu vier Messsystemen auf eine Fläche.

## Fotogrammetrie mit 4000 Bildern pro Sekunde

Bei hoch-dynamischen Beulvorgängen an Zylindern und gekrümmten Paneelen aus Faserverbundwerkstoffen müssen die vollständigen 3D-Verformungen mit hoher Geschwindigkeit gemessen werden, um Simulationsverfahren zu validieren. Dazu eignet sich besonders das neue ARAMIS Hochgeschwindigkeitssystem, das in Zusammenarbeit zwischen dem DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik und der Braunschweiger Firma GOM GmbH für Messungen für bis zu 4.000 Bildern pro Sekunde entwickelt wurde.

Das Grundprinzip des ARAMIS beruht darauf, mit einem Mattlack-Spray auf die Oberfläche aufgebrauchte Grauwertmuster aus regelmäßig oder auch stochastisch verteilten Punkten mit 2 hoch auflösenden Digitalkameras während der Verformung zu erfassen. Die Messfläche wird in kleine Facetten eingeteilt, und durch Bildkorrelation eine Zuordnung dieser Facetten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem vorgenommen. Bei einer Verformung des Objekts werden die drei-dimensionalen Verschiebungen jeder Facette mit Algorithmen der Fotogrammetrie ausgewertet und quantitativ erfasst. Bei geeigneter Wahl der Auflösung können hiermit auch die 3D-Dehnungsverteilungen ermittelt werden.

Das Prinzip des neuen Highspeed ARAMIS basiert auf der Verkopplung von bis zu vier einzelnen Systemen, von denen jedes dank neuer Hochgeschwindigkeitsdigitalkameras bis zu 1.000 Bilder/s messen kann. Eine speziell hierfür entwickelte Triggerbox ermöglicht nun die um jeweils 250  $\mu$ s zeitversetzte Ansteuerung der auf dieselbe Messobjektfläche ausgerichteten Einzelsysteme, sodass bei geeigneter Ausleuchtung der Objektoberfläche eine Messrate von bis zu 4.000 Bilder/s erreicht wird (Bild 1).

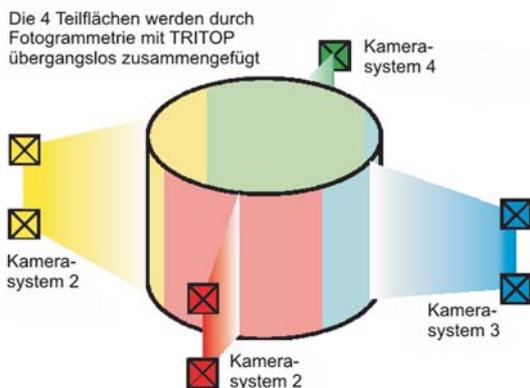


Bild 2:  
Schema der Rundumvermessung an einem Zylinder im Beulversuch.

Erstmals ist dadurch eine quantitative Ganzfeld-Erfassung hochdynamischer Verformungen im Bereich einiger Millisekunden, wie sie bei Beulvorgängen, Impact- und Crash-Ereignissen bzw. Bruchvorgängen auftreten, auch für größere Messflächen realisiert worden. Die Verkopplung ermöglicht aber auch eine Rundumvermessung zylindrischer Bauteile. Bild 2 zeigt schematisch die Anordnung der vier einzelnen Systeme, repräsentiert durch jeweils ein Kamerapaar, um den zu vermessenden Zylinder. Die Messergebnisse der um den Zylinder angeordneten ARAMIS Systeme werden hierbei über mindestens drei Referenzpunkte mit Hilfe des Fotogrammetrie-systems TRITOP in das globale Koordinatensystem des Zylinders transformiert und anschließend visualisiert.

Als Messergebnisse sind die 3D-Koordinaten der Bauteiloberfläche in jedem aufgenommenen Lastzustand, die zugehörigen 3D-Verschiebungen und die Verteilung der ebenen Dehnungen verfügbar. Die Verteilungen der Verschiebungen können durch die Software in dreidimensionaler Ansicht dargestellt werden, so dass das vollständige Verformungsbild des Zylinders betrachtet werden kann (Bild 4).

Bild 4 stellt beispielhaft für zwei Laststufen die dreidimensionale Darstellung der Verschiebungen senkrecht zur Oberfläche für den gesamten Zylinder dar, die es gestattet, die Entstehung und Weiterentwicklung der charakteristischen Beulmuster zu verfolgen.

## Vielseitige Anwendungsmöglichkeiten

Das System hat sich in unterschiedlichsten Anwendungen bewährt:

- > Dynamische dreidimensionale Verformungsmessungen an einem CFK-Flugzeugholm beim Bruchversuch, vor allem der schnellen Aufzeichnung der kritischen Verformungen unmittelbar vor dem Bruch.
- > Messung der vollständigen dreidimensionalen Verformungen an Zylindern in Form einer „Rundumvermessung“ zum Erfassen der Dynamik des Beulvorgangs bei quasi statischer Belastung.
- > Hochgeschwindigkeitsmessung (4000/s) der Verformung einer Viertelfläche eines versteiften CFK-Zylinders während eines dynamischen Beulversuchs. Die Bildsequenz auf den Seiten 6 und 7 zeigt die charakteristische Beulmusterentwicklung.
- > Messung des sog. „Mode-Switching“ an einem ebenen versteiften CFK-Paneel (Projekt gemeinsam mit dem Imperial College, London). Erstmals wurde hier das schnelle Wechseln zwischen zwei Beulmoden quantitativ erfasst.
- > Messungen der Beulmusterentwicklung an unversteiften CFK-Zylindern mit radialer Störkraft verschiedener Amplitude und Position. Hierbei konnte durch die Messungen gezeigt werden, dass eine initiale Einzelbeule das Stabilitätsversagen auslöst.
- > Dynamische Verformungsmessung (3800/s) an versteiften Paneelen während einer Schlagbelastung. Bild 3 zeigt den Versuchsaufbau, bei dem alle vier ARAMIS Systeme auf eine Hälfte des Paneels gerichtet sind. Die Verteilung der dynamischen Verformungen während des 12 ms dauernden Vorgangs wurde zuverlässig erfasst.
- > Messung insbesondere der „out-of-plane“-Verformungen an unterschiedlichen Faserverbundpaneelen unter zyklischer Belastung. Erfassung des Schadensfortschritts (Delamination) sowie bei Restfestigkeitsversuchen an schlagbelasteten Sandwichpaneelen. Bild 4 zeigt beispielhaft den Fortschritt von Delaminationen, die durch einen Impact in ein Laminat aus Multiaxialgelege eingebracht wurden, während einer Zug-Druck-Schwingbelastung. Durch die genaue quantitative Erfassung der Schädigung kann mit dieser Methode der bei Faserverbunden oft schmale Bereich des Übergangs von stabilem zu instabilem Schadenswachstum unter betriebsnahen Belastungen sehr genau bestimmt werden.

Weitere konkrete Anwendungsmöglichkeiten sind denkbar wie:

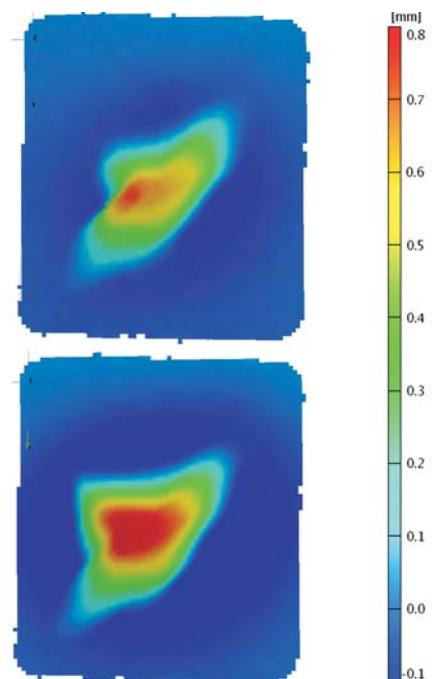
- > Messungen in der Kraftfahrzeugindustrie zur Definition der Steifigkeit und Deformation der Karosserie.
- > Dynamische Verformungsanalyse beim Auftreffen eines Fallkörpers auf ein Versuchsobjekt.
- > Digitales Echtzeit-Video (Stroboskopaufnahmen) von reproduzierbaren Vorgängen, z.B. zur Kontrolle vibrierender Triebwerksschaufeln.

Das System ist mobil, d.h. vor Ort beim Kunden bei eigenen Versuchen einsetzbar.

- > **Dipl.-Phys. Hans Christian Goetting**



**Bild 3:**  
Messaufbau zur Erfassung der dynamischen Verformungen eines ebenen versteiften Paneels bei einer Impact-Belastung, Messung mit 3800 Bildern/s.



**Bild 4:**  
Beispiel für die on-line Erfassung des Schadensfortschritts unter Zug-Druck-Schwingbelastung an einer impactgeschädigten CFK-Probe.

# IBUCK - ein schnelles Werkzeug für die Stabilitätsanalyse im Entwurf versteifter Paneele



Bild 1:  
A380 Barrel und versteiftes Paneel.

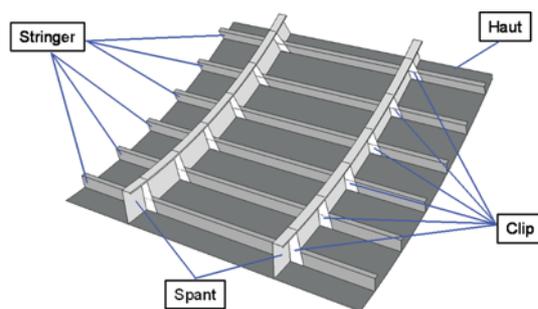


Bild 2:  
Repräsentatives Paneel.

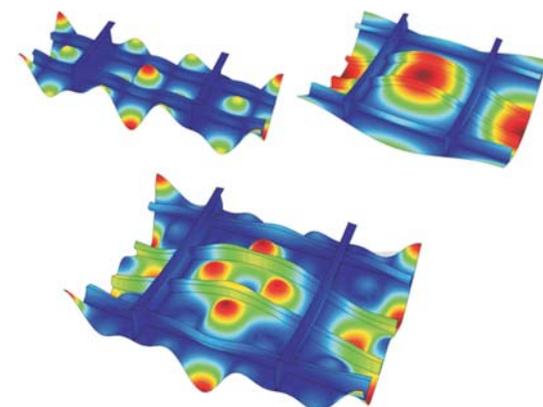


Bild 3:  
Lokale, globale und überlagerte Verformungsmuster.

## Beulen von versteiften dünnwandigen Bauteilen

Konventionelle Flugzeugrümpfe und Tragflächen bestehen aus versteiften Paneelen, die sich typischerweise aus einer dünnen Haut und Versteifungen zusammensetzen. In Flugzeugstrukturen werden die Längsversteifungen typischerweise als Stringer und die Versteifungen in Umfangsrichtung als Spante oder Rippen bezeichnet.

Zur Gewichtsersparnis werden dünnwandige Paneele verwendet, die grundsätzlich beulgefährdet sind. Hierbei versteht man unter Beulen das plötzliche Ausweichen der Struktur quer zur wirkenden Last, sobald ein kritisches Lastniveau erreicht wird. Nach Erreichen der Beullast lagern sich die Lasten über den Querschnitt des Paneels um; typische versteifte Paneele zeigen zunächst Hautbeulen, gefolgt von einer Lastumlagerung hin zu den Versteifungen. Weitere Laststeigerungen führt vom Beulen der Hautfelder in den Nachbeulbereich, bei dem auch die Versteifungen in die Verformung bis zum globalen Versagen bzw. Kollaps der Struktur einbezogen sind. Um die strukturellen Reserven voll auszunutzen, muss daher sein Verhalten im Nachbeulbereich bereits in der Entwurfsphase untersucht und beurteilt werden.

In der Praxis beschränkt man sich auf die Betrachtung repräsentativer, aus mehreren Hautfeldern bestehender Paneele und zieht aus dem Verhalten des Paneels Rückschlüsse auf das Verhalten der Rumpftonne. Da beim Betrachten eines einzelnen Paneels die gegenseitige Stützwirkung benachbarter Paneele in der Rumpftonne vernachlässigt wird, ist dieses Vorgehen in der Regel konservativ.

## Repräsentative Paneele

IBUCK wurde als semi-analytisches Verfahren zur schnellen Berechnung des Beul- und des Nachbeulverhaltens dünnwandiger versteifter Flugzeugpaneele entwickelt.

Die in IBUCK modellierten Paneele werden als repräsentativ für Rumpfsektionen angenommen. Sie bestehen aus einer Haut (Teilzylinderschale), die durch Stringer und Spante versteift ist. Zusätzlich werden für Flugzeugpaneele typische Komponenten wie Hautdoppler (zur Verstärkung der Haut unterhalb der Versteifungen) und Clips (zur seitlichen Abstützung der Spante) berücksichtigt. Stringer und Spante sind als Strukturelemente mit eigenen Freiheitsgraden modelliert und werden daher nicht als auf die Haut verschmierte Steifigkeiten behandelt. Die Kontinuität zwischen Haut und Versteifungen bezüglich Rotation und Längsausdehnung wird durch Übergangsbedingungen sichergestellt.

Für lokales und globales Beulen werden geeignete Ansatzfunktionen gewählt und anschließend überlagert. Hierbei bezeichnet lokales Beulen das Beulen innerhalb eines Hautfelds und eine dadurch verursachte Rotation der Versteifungen, wobei die Versteifungen die Knotenlinien der Verschiebungen bilden. Globales Beulen bezeichnet das Beulen des Paneels über mehrere Hautfelder hinweg, wobei die Stringer mitsamt der Haut ausbeulen, die wesentlich steiferen Spante jedoch weiterhin Knotenlinien der Verschiebungen bilden. Die Paneele können in Längs- und Querrichtung und durch ebenen Schub belastet werden. Zusätzlich ist als Lastfall die Belastung durch ein externes Biegemoment vorgesehen, der von besonderem Interesse für die Luftfahrtindustrie ist.

Im Gegensatz zum allgemeinen FEM Ansatz mit sehr vielen kleinen strukturgleichen finiten Elementen verwendet IBUCK schnellere semi-analytische Ansätze, die für die speziellen Geometrie- und Deformationsformen versteifter Flugzeugpaneele ausgewählt und optimiert sind. Durch die Verwendung eines Ritzansatzes mit Ansatzfunktionen über makroskopische Strukturbereiche (Hautfeld, Stringersteg, etc.) kann die Anzahl der Freiheitsgrade drastisch reduziert werden. Zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems wird ein Bogenlängenverfahren eingesetzt.

Durch das Aufbringen von Imperfektionen (in der Form einer beliebigen Linearkombination von Beuleigenformen) wird das plötzliche Einsetzen der Beulverformungen in ein allmähliches Wachsen der out-of-plane-Verformungen quer zur Lastrichtung überführt. Durch die Verwendung eines Kurvenverfolgungsverfahrens zur inkrementellen Bestimmung von Gleichgewichtszuständen im Nachbeulbereich können jedoch Instabilitäten wie mode switching bzw. snap back (verbunden mit Lastabfall) erfasst werden.

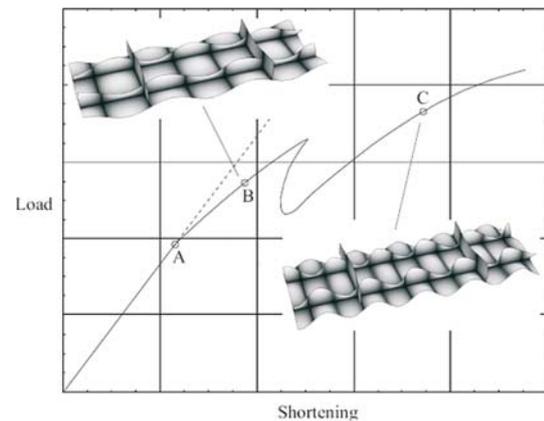


Bild 4:  
Last-Stauchungsverlauf mit  
Bogenlängenverfahren.

## Validierung durch Vergleichsrechnungen

Zur Validierung und Bewertung des neuen Verfahrens wurden Vergleichsrechnungen zwischen IBUCK und ABAQUS/Standard durchgeführt. Hierzu wurden Last-Stauchungs-Kurven der Paneele generiert und das Verhalten der Paneele bezüglich des Einsetzens der verschiedenen untersuchten Versagensmoden - lokales Beulen, Stringerkippen, globales Beulen und Kollaps, Materialversagen - untersucht.

Die besten Ergebnisse wurden bei der Betrachtung von schlanken, axial gedrückten Paneelen erzielt, bei denen IBUCK einen Rechenzeitgewinn von bis zu 95% ermöglichte, da sich die Beulverformungen in der Regel mit wenigen Freiheitsgraden darstellen ließen. Für Paneele unter Schubbelastung zeigte sich, dass die gewählten trigonometrischen Ansatzfunktionen keine zufrieden stellende Beschreibung der Beulen erlaubten. Dies liegt darin begründet, dass bei Integration der Energie genau jene Terme entfallen, die für die Beschreibung der Schubbeulen entscheidend sind.

Für Paneele unter Biegebelastung ergab sich der größte Rechenzeitgewinn, jedoch zeigte sich, dass das Verhalten des Panels bei schließendem Biegemoment im Nachbeulbereich nicht nur durch eine Umlagerung der Last über den Querschnitt, sondern auch durch eine je nach Geometrie mehr oder minder drastische Absenkung der Biegesteifigkeit gekennzeichnet war. Insbesondere letzterer Effekt konnte durch trigonometrische Ansatzfunktionen mit nur wenigen Freiheitsgraden nur schwerlich hinreichend genau beschrieben werden und erforderte die Implementierung einer Routine zur Berechnung der von der Beulverformung des Spantes abhängigen Biegesteifigkeit des Panels.

IBUCK wurde von 2002 bis 2005 im Rahmen einer Patenschaftsvertrages zwischen dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR und der Abteilung ESAS, Structure Analysis Static Strength, der Airbus Deutschland GmbH entwickelt. Derzeit wird IBUCK am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik weiterentwickelt und auf die Beschreibung von Faserverbundmaterialien erweitert.

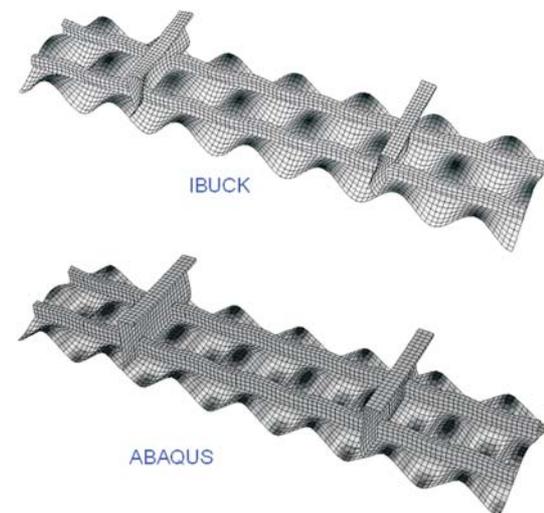


Bild 5:  
Vergleich IBUCK und ABAQUS (Laststauchung  
und Verformungsmuster).

- > **Dr. Philipp Bürmann,**  
inzwischen Airbus Deutschland GmbH, ESAS - Structure Analysis Static Strength

# DLR Center of Excellence Composite Structures

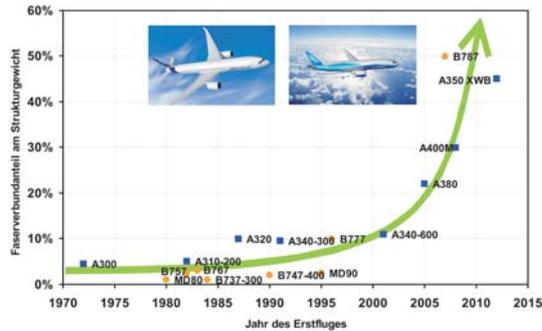


Bild 1:  
Entwicklung des Faserverbundanteils am Strukturgewicht im kommerziellen Flugzeugbau,  
(Quellen: NASA, AIRBUS, BOEING).

## Würdigung anerkannter Spitzenforschung

Im Juni 2005 rief der DLR-Vorstand zur Bewerbung um den Titel "DLR-Center of Excellence 2005" auf. Mit der Vergabe der Auszeichnung sollen wissenschaftlich-technische Leistungen und deren Anwendungspotenziale gewürdigt werden. Gegen eine große Zahl von Mitbewerbern setzte sich eine Arbeitsgruppe von 60 Wissenschaftlern aus dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik und dem Institut für Bauweisen und Konstruktionsforschung durch und wurde als DLR-Center of Excellence Composite Structures (**CoE CoSt**) ausgezeichnet.

Hauptarbeitsgebiet des **CoE CoSt** ist die Entwicklung von Strukturkomponenten aus Faserverbundwerkstoffen für den Bereich der zivilen und militärischen Luft- und Raumfahrt sowie der Energie- und Verkehrstechnik. Dies geschieht auf Basis aktueller Forschungsergebnisse der Werkstoffentwicklung, Werkstoffauswahl, faserverbundgerechten Konstruktion, deren Berechnung und Fertigung und ist damit dem Stand der Technik immer einen Schritt voraus. Mit strategischen Partnern in Forschung und Industrie besteht ein Netzwerk, das Projekte von der Idee bis zur Serienfertigung ermöglicht. Erst die vollständige Durchgängigkeit der Prozesskette garantiert bei Faserverbundbauteilen die erfolgreiche Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Anwendung. Aufbau und Leitung der gesamten Entwicklungskette soll zu einer signifikanten Verkürzung des Innovationszyklus von Faserverbundstrukturen führen.

Während Faserverbunde in der Raumfahrt etabliert sind und die Strukturen mit ausgefeilten Composite Bauweisen dominieren, finden sie in großen Verkehrsflugzeugen aktuell stürmisch Einzug. BOEING kündigt mit der 787 den ersten "All Composite Jetliner" an, AIRBUS vervielfacht gegenwärtig seine Anstrengungen Composites in allen Primärbauanteilen einzusetzen, siehe Bild 1. Es entsteht bezüglich des Einsatzes von Composites eine Sogwirkung auf Forschung und Entwicklung. Das DLR hat sich in diesem Umfeld strategisch mit dem CoE Composite Structures positioniert und stellt so seine führende Rolle in der Luftfahrtforschung heraus, die mit der Auszeichnung an Hand von Kriterien wie Kooperationen, Patente, Publikationen nachgewiesen ist.

## Partner des CoE Composite Structures

Am **CoE Composite Structure** sind das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr. Elmar Breitbach und das Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung in Stuttgart (BK) unter der Leitung von Prof. Dr. Heinz Voggenteiler beteiligt. Die Arbeitsgruppe des **CoE CoSt** umfasst 20 Wissenschaftler der Organisationseinheit Faserverbundtechnologie unter der Leitung von Dr. Lars Herbeck, 10 Wissenschaftler der OE Rechnergestützte Bauteilgestaltung unter der Leitung von Dr. Wolfgang Dudenhausen, 20 Wissenschaftler der OE Strukturmechanik unter der Leitung von Dr. Jan Teßmer und 10 Mitarbeiter der OE Strukturelle Integrität unter der Leitung von Dipl.-Ing. Christof Kindervater.

In zahlreichen Projekten arbeiten die Wissenschaftler eng zusammen und bieten ihre einmalige und umfassende Kompetenz auf dem Gebiet des Faserverbundleichtbaus den Hauptkunden gemeinsam an.



Bild 2:  
CFK-Schaumsandwich Nose Landing Gear Door der Fairchild Dornier Do728,  
linke Tür unlackiert,  
in Zusammenarbeit mit der INVENT GmbH.

## Aktuelle Leichtbauentwicklungen des CoE Composite Structures

Leichtbauentwicklungen der Luft- u. Raumfahrt sind Arbeiten am CFK-Flügel für den A350, an Komponenten militärischer Kampfflugzeuge (Leitprojekt UCAV-Strukturen), der Entwicklung neuer Bauweisen für Seitenleitwerke der Zukunft sowie am CFK-Rumpf für zukünftige AIRBUS Flugzeuge. In Zusammenarbeit mit EUROCOPTER sind Crash-sichere Faserverbundstrukturen entstanden, die in aktuelle Hubschrauberentwicklungen (Tiger, NH90) einfließen. Das **CoE CoSt** konzipiert, integriert und qualifiziert komplette Raumfahrtstrukturen. Herausragende Beispiele sind die Strukturentwicklungen des Kometenlanders ROSETTA (Bild 3) und die Ultraleichtbau-Entfaltungsstruktur eines Solar Sails.

Mit industriellen Partnern aus der Verkehrstechnik realisiert das **CoE CoSt** leichte und effiziente Faserverbundstrukturen für Ressourcen schonende Fahrzeuge. Im Automobilbau werden zusammen mit der Industrie neue Werkstoffsysteme und Fertigungsverfahren entwickelt, die in innovativen Produkten, wie z. B. einer Notlaufelge aus Faserverbund (Bild 4) münden. Mit der Schienenfahrzeugindustrie werden Faserverbundbauweisen für Nahverkehrs- und Hochgeschwindigkeitszugsystem entworfen. Im BMBF Leitprojekt DYNASTORE entsteht in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern ein hocheffizienter Energiespeicher für lokale Anwendungen. In den publikumswirksamen Bereichen der FORMEL 1 und des America's Cup leistet das **CoE CoSt** mit seinem Know-how einen entscheidenden Beitrag zur Realisierung von Hochleistungsanwendungen. Das Arbeitsspektrum reicht dabei von grundfinanzierten Forschungsaufgaben bis zu Dienstleistungsaufgaben der Vorentwicklung. Das Motto des **CoE CoSt** lautet:

"Von der Idee bis zum Prototypen und darüber hinaus"

## Forschungsschwerpunkte des CoE Composite Structures

Neue Werkstoffe, Bauweisen, Berechnungsverfahren und Fertigungsmethoden sind:

- > Die Entwicklung von Strukturkomponenten aus Faserverbundwerkstoffen,
- > der Entwurf und die Berechnung von Faserverbundbauteilen,
- > die experimentelle Validierung von Berechnungsmethoden,
- > die Erhöhung der Sicherheit und des Insassenschutz,
- > die Entwicklung von effizienten Produktionsprozessen,
- > die Inspektion durch online Health Monitoring Technologien,
- > die Realisierung von Prototypen und der Technologie Transfer.

Die Arbeit des **CoE CoSt** schlägt dabei eine "Brücke zwischen der Grundlagenforschung und der industriellen Anwendung".

- > **Dr. Lars Herbeck** und **Dr. Jan Teßmer**



Bild 3:  
ROSETTA-Lander.



Bild 4:  
Faserverbund Notlaufelge in  
Zusammenarbeit mit der Continental AG  
(Quelle: Continental AG).

# Neueste Entwicklungen für den Schwarzen Rumpf

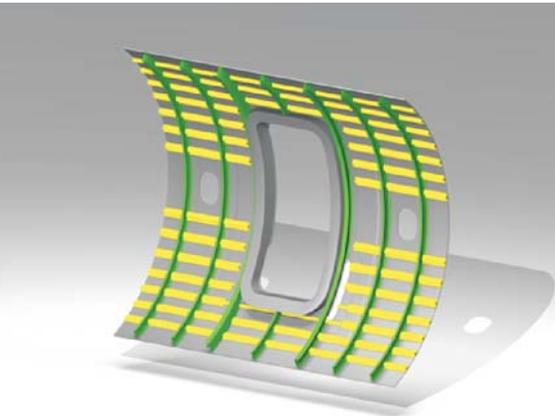


Bild 1:  
Hochintegrierte CFK-Türrahmenstruktur.

Seit jeher waren neue Werkstoffe, Materialsysteme und die adäquate Umsetzung ihrer Eigenschaften in Strukturen maßgebliche Innovationsmotoren der technischen Entwicklung und entschieden damit auch über die Marktführerschaft gerade auch in der Luftfahrt. So verlor Fokker in den frühen dreißiger Jahren des vergangenen Jahrhunderts seine führende Stellung als Flugzeughersteller, als Boeing und Douglas zunehmend die Holzstrukturen durch Aluminiumbauteile ersetzen. Heute wird in der Luftfahrt der Wettbewerb ganz wesentlich über den Einsatz von Faserverbunden entschieden werden. Boeing hat 2003 als Kampfansage im Wettbewerb mit Airbus den 787 „Dreamliner“ als „First Composite Jetliner“ angekündigt. Das Ziel einer deutlichen Treibstoffeinsparung, ausgedrückt in einer Senkung des passagierbezogenen Treibstoffverbrauchs um 20 %, soll neben einer Verbesserung von Triebwerk und Aerodynamik immerhin zu einem Viertel durch neue Materialsysteme und Strukturkonzepte erreicht werden.

Entsieden werden wird der Wechsel im Material über das Erreichen der hochgesteckten Ziele:

- > Gewichtsreduktion um 30% durch neue verbesserte Werkstoffe und den Möglichkeiten der neuen Werkstoffe angepasste Bauweisen
- > Kostenreduktion um 40 % durch großserientaugliche Fertigungsverfahren mit angepassten Werkstoffen, industrialisierte Produktionsmethoden für große Bauteile.

## CFK Rumpf im EU-Projekt ALCAS

In zahlreichen nationalen und europäischen Projekten wird an der Umsetzung der Faserverbundtechnologie für Großflugzeuge gearbeitet. 2006 startete die Europäische Union im Rahmen des 6. Forschungsrahmenprogramms das größte Integrierte Projekt mit einem Gesamtvolumen von über 100 M€ zur Erforschung und Entwicklung von CFK-Großkomponenten.

Das DLR ist als Projektpartner von ALCAS unter anderem für Arbeiten zum CFK Rumpf verantwortlich. In enger Zusammenarbeit mit Airbus Deutschland werden hoch integrierte Türrahmenstrukturen für den CFK-Rumpf entwickelt. Im Bereich großer Ausschnitte ist es besonders schwierig, die Vorteile der Faserverbunde effektiv zu nutzen. Dies liegt zum einen an den durch Lastumlagerungen entstehenden komplexen Belastungsszenarien und zum anderen an dem erhöhten Beschädigungsrisiko durch Serviceaktivitäten in den Bereichen der Passagiereingänge und Frachttore. Da Faserverbundwerkstoffe im Vergleich mit Metallen Vorteile im Bereich des Wartungsaufwandes (höhere Dauerfestigkeit) besitzen, ist man bestrebt möglichst wenig metallische Komponenten im Bereich der Türrahmenstrukturen zu integrieren, da dies den Wartungsvorteil wieder reduzieren würde. Auch unter Kostenaspekten ist die Entwicklung einer Faserverbund-Türrahmenstruktur eine besondere Herausforderung.

Lösungsansätze für den Bereich mit hoher Beschädigungswahrscheinlichkeit basieren neben der Nutzung spezieller schädigungstoleranter Lamine auf dem Einsatz eines austauschbaren Schutzschildes, welcher den kritischen Bereich des Türrahmens abdeckt und damit in der Lage ist, die die Schädigung verursachenden Lasten zu absorbieren. Damit kann insbesondere bei gewichtseffizienten, hoch integralen Strukturkonzepten die schwer zu reparierende Tragstruktur geschützt werden.

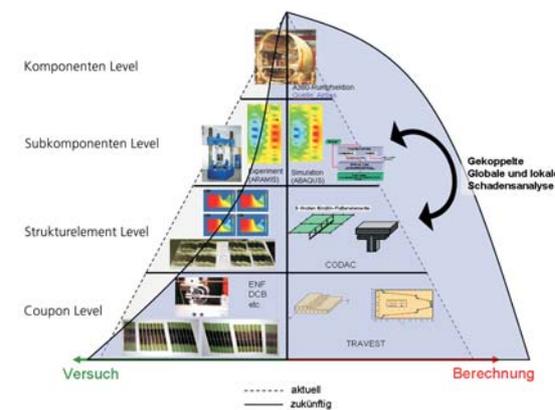


Bild 2:  
Testpyramide.

Ein zweiter Schwerpunkt der DLR Aktivitäten zum Schwarzen Rumpf sind Arbeiten zur lokalen und globalen Schadensanalyse. Insbesondere im Bereich komplexerer Faserverbundstrukturen auf Komponenten- und Subkomponenten-Ebene ist das Ziel aktueller Forschung, kostenintensive Versuche durch Simulationen zu ersetzen. Dafür werden neue Berechnungsmethoden auf dem Gebiet der Schadensanalyse entwickelt, die zum einen die Schadensresistenz unversehrter Strukturen (Impactsimulation) und zum anderen die Schadenstoleranz geschädigter Strukturen (Restfestigkeitsberechnung) untersuchen.

Für die Modellierung von kleinen Schäden, die das Coupon-Level nicht überschreiten und dennoch Auswirkungen auf das globale Tragverhalten haben, sind im Allgemeinen sehr feine Diskretisierungen nötig. Dadurch wachsen Modellierungs- und Rechenaufwand erheblich. Um die Schadensanalyse globaler Strukturen effizienter zu gestalten, wurde eine Verknüpfung zwischen globaler und lokaler Modellierung geschaffen: Die Schadensdetektion erfolgt im FE-Tool CODAC mit einem lokalen FE-Modell, wobei die Randbedingungen in Form von Verschiebungen aus einem globalen FE-Modell einer ABAQUS-Rechnung stammen. In Abhängigkeit der Schädigung und unter Berücksichtigung der Randbedingungen wird mit dem lokalen Modell eine äquivalente Materialdegradation für das globale Modell berechnet. Damit kann die globale Rechnung unter Berücksichtigung des Schadens wiederholt und die Ergebnisse können entsprechend verbessert werden.

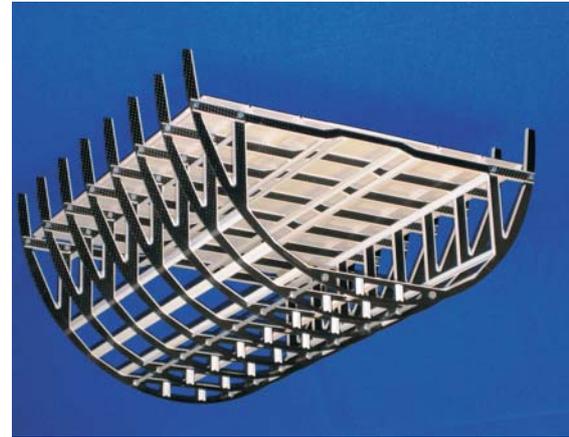


Bild 3:  
CFK-Rumpf-Design im Maßstab 1:10.

## CFK Rumpf Nächster Generation

Alle Aktivitäten des DLR zum Thema CFK-Rumpf werden ab 2007 in einem Leitprojekt „CFK-Rumpf Nächster Generation“ gebündelt. Ein Lenkungsausschuss mit Vertretern der Airbus Deutschland GmbH wird das Projektteam bei der inhaltlichen Schwerpunktsetzung beraten. Als übergeordnete Projektziele sind formuliert

- > Gewichtsreduktion um 30% durch neue verbesserte Werkstoffe, intelligente Bauweisen ermöglicht durch SHM, optimierte Strukturen durch verbesserte Simulations- und Reparaturverfahren
- > Kostenreduktion um 40% durch großserientaugliche Fertigungsverfahren mit angepassten Werkstoffen, industrialisierte Produktionsmethoden für große Bauteile, der Nachweis erfolgt über Kostenanalyseverfahren
- > Sichere Zelle für sicheres Fliegen durch Crash optimierte, Durchbrand sichere, permanent überwachte (Structural Health Monitoring) und exakt simulierte Strukturen, zerstörungsfreie Prüfverfahren
- > Umweltfreundliches, komfortables Fliegen durch Reduktion der Produktionsabfälle, den Einsatz nachwachsender Rohstoffe, Verbesserten Passagierkomfort (Leise, helle Kabine), der Nachweis erfolgt über Systemanalysen.

> **Dr. Lars Herbeck, Prof. Dr. Michael Sinapius und Dr. Jan Teßmer**

# Mikrowellengestützte Autoklavprozessierung

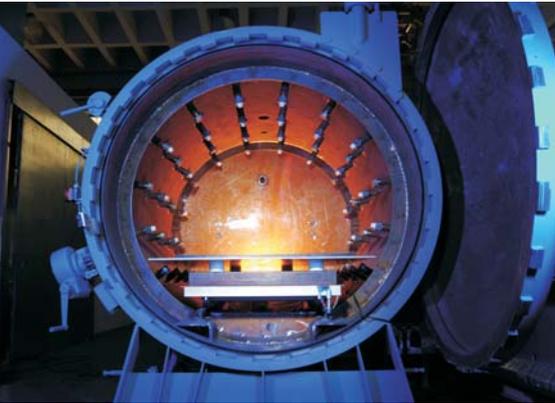


Bild 1:  
Testsegment des Mikrowellenautoklaven,  
Innenansicht.

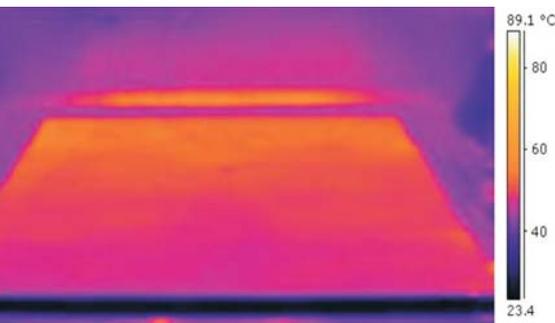


Bild 2:  
Gleichmäßige Erwärmung einer CFK-Platte.

Nach dem aktuellen Stand der Technik für die Fertigung von Hochleistungsverbundbauteilen werden Prepregs in einem Autoklaven unter hohem Umgebungsdruck kompaktiert und anschließend mittels Umluft erwärmt über einen definierten Temperaturzyklus ausgehärtet. Bedingt durch einen steigenden Bedarf an immer größeren Bauteilen, nehmen die Abmessungen von Autoklavanlagen zu und stoßen gleichzeitig an physikalische Grenzen hinsichtlich einer gleichmäßigen Temperierung von Bauteilen. Ein Lösungsansatz zur homogenen und trägheitslosen Erwärmung von Bauteilen 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.

## Anlagenkonzept

Die Potentiale der mikrowellengestützten Autoklavprozessierung werden mittels eines gemeinsam mit der Fa. Scholz Maschinenbau GmbH entwickelten Prototypen untersucht. Neben der Mikrowellenheizung von bis zu 96 kW ist der Autoklav in Referenz dazu mit einem konventionellen Heizregister von 231 kW ausgerüstet. Die maximale im Autoklaven herzustellende Bauteilgröße beträgt 1500 x 4000 mm<sup>2</sup>. Die Einkopplung der Mikrowellen geschieht über radial ausgerichtete Quellen, durch die eine annähernd homogene Verteilung des Mikrowellenfeldes über die Kessellänge gewährleistet ist. Die Mikrowellensender sind in axialer Richtung in mehrere Sektionen unterteilt und können abschnittsweise geregelt werden. Über einstellbare Mikrowellenfelder ist somit erstmals eine Möglichkeit gegeben, in einem Druckraum Bauteile auf unterschiedlichen Temperaturniveaus parallel zu prozessieren. Das Einkopplungskonzept ist damit geeignet, CFK-Bauteile besonders gleichmäßig zu temperieren. Ein homogenes Erwärmungsmuster reduziert die thermische Belastung der Bauteile und ermöglicht zudem kürzere Prozesszyklen. Durch eine homogene Erwärmung wird vor allem die Neigung zum Bilden von thermisch bedingten Eigenspannungen reduziert. Mikrowellenprozesse sind temperaturgeregelt und damit auf die genaue Erfassung der Prozesstemperatur angewiesen. Für die Messwertaufnahme werden eigens entwickelte ummantelte Stahlthermoelemente erfolgreich eingesetzt.

Nach dem Testen des Prototypen-Segments mit der Eignungsprüfung von Regelungs-, Mess- und Einkopplungskonzepten wird in einer zweiten Phase ab Dezember 2006 die Herstellung einer schwach gekrümmten Flügelhalbschale im verkleinerten Maßstab erprobt. Anschließend wird die Möglichkeit untersucht, das Verfahren anhand der Simulation einer Kleinserienfertigung (ca. 100 Stück/Jahr) bis Ende 2008 zu qualifizieren. Für eine erfolgreiche Umsetzung dieses Konzepts ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der mikrowellenspezifischen Formwerkzeuge notwendig, mit den Zielen einer homogenen Temperierung und Steigerung der Energieeffizienz der Anlage durch eine Mehrfachbeschickung. Im bundesweiten und weltweiten Vergleich entsteht mit dem Mikrowellenautoklaven erstmals die qualifizierte und auch derzeit einzigartige Möglichkeit, Bauteile aus Prepreg in einem Mikrowellenfeld auszuhärten. Das zukünftige Potential der Anlagentechnik ist als besonders hoch einzuschätzen, da Energiekosten für große Autoklaven einen erheblichen Anteil der Produktionskosten ausmachen.

> **Dipl.-Ing. Maksim Podkorytov und Dipl.-Ing. Matthias Meyer**

# Qualitätsgesicherte Fertigung von Faserverbundbauteilen

## Herausforderung qualitätsgesicherter CFK-Fertigung

Die Herstellung von Hochleistungsverbundbauteilen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit modernen Harzinfusionsverfahren ist je nach Komplexität nur mit einer vergleichsweise hohen Ausschussquote reproduzierbar möglich. Die Ursachen liegen unter anderem in Fertigungsschwankungen, z.B. in der Qualität der Faserhalbzeuge und derzeit fehlender Information über den Bauteilzustand während des Konsolidierungsprozesses. Die erforderlichen Parameter für den Fertigungsprozess werden zurzeit aufwendig empirisch ermittelt. Die aktuellen Qualitätsstandards reichen zum Teil noch nicht aus oder sind relativ ressourcenintensiv. Bei der Fertigung eines Faserverbundbauteils ist besonders der Konsolidierungsprozess der Matrix als kritisch anzusehen. Es wird ein Messverfahren benötigt, das eine hinreichend genaue Information über den Bauteilzustand während des Konsolidierungsprozesses liefert. Es sollte dazu auch den Anforderungen einer industriellen Serienfertigung entsprechen.

## Ultraschalltechnik im Fertigungsprozess

Die Information über den Bauteilzustand im Konsolidierungsprozess liefert der Aushärtegrad bzw. Vernetzungsgrad der Matrix. Dieser kann über die Schallgeschwindigkeit eines Ultraschallsignals bestimmt werden. Die Schallgeschwindigkeit wird durch die Messung der Laufzeit und der Bauteildicke berechnet. Da der Vernetzungsgrad einen Energiewert darstellt, der unabhängig davon ist, in wie vielen Schritten er erreicht wurde, wird sich im Rahmen der Chargenschwankungen immer ein dem Vernetzungsgrad proportionaler Laufzeitwert (spezifischer Schallgeschwindigkeitswert) über die Prozesszeit für die Matrix einstellen.

Bei jedem zu fertigenden Faserverbundbauteil wird ein bestimmter Faservolumengehalt angestrebt. Um eine regelbare Prozessgröße zu erhalten, wird aus dem Gesamtfaserflächengewicht, dem Faservolumengehalt und der Faserdichte die Laminatdicke näherungsweise berechnet. Da bei Fertigungsprozessen mit flexibler Membran (DP-RTM, SLI) die Bauteildicke über den Konsolidierungsprozess nicht konstant bleibt, kann die Schallgeschwindigkeit zurzeit nicht „online“ berechnet werden. Um dies später doch zu ermöglichen, wird die relative Membranbewegung (Bild 2) während des Fertigungsprozesses aufgezeichnet. Durch nachträgliche Messung der Laminatdicke in Verbindung mit der aufgezeichneten Laminatschalllaufzeit, kann die Schallgeschwindigkeit berechnet werden. Gleichzeitig wird in zwei separaten Tools (Bild 1), mit konstantem Sensorabstand, die Signallaufzeit im Reinharz und im Laminat erfasst. Diese Prozessinformationen werden in einer Datenbank abgelegt. Mit einer fundierten Datenbasis kann später auf die Erfassung der relativen Bewegung der Membran verzichtet werden. Die Laminatdicke wird daraufhin für den entsprechenden Fertigungsprozess mit dem in der Datenbank hinterlegten Schallgeschwindigkeitsverlauf vorhergesagt. Durch die Nutzung des Ultraschallgeräts zur Aushärtekontrolle kann ein deutlicher Beitrag zur Qualitätssicherung erreicht werden. Die in der Datenbank hinterlegten Messdaten aus den Versuchsreihen, sowie deren ständige Erweiterung und Konsolidierung durch die laufende Fertigung (Serienfertigung), liefern die Entscheidungshilfen für zukünftig zu erstellende Fertigungsparameter.

> Dipl.-Ing. (FH) Björn Köhnke

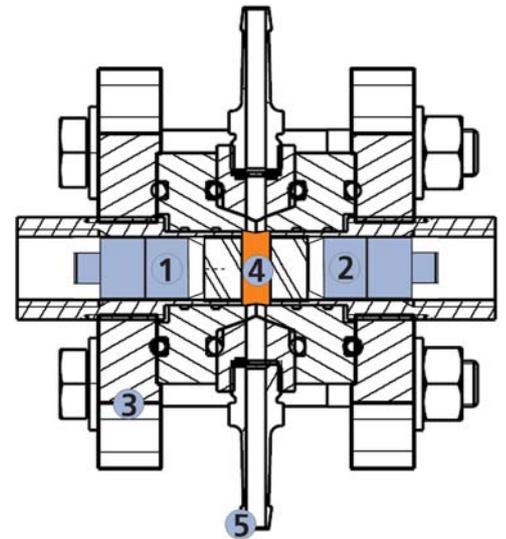


Bild 1:  
US-Tool zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten über den Konsolidierungsprozess im Reinharz und im Faserverbundlaminat:  
1 Ultraschall-Prüfkopf K4V1; Sender,  
2 Ultraschall-Prüfkopf K4V1; Empfänger,  
3 US-Werkzeug, Reinharz/ Laminat,  
4 Messkammer,  
5 Anschlussstülle.

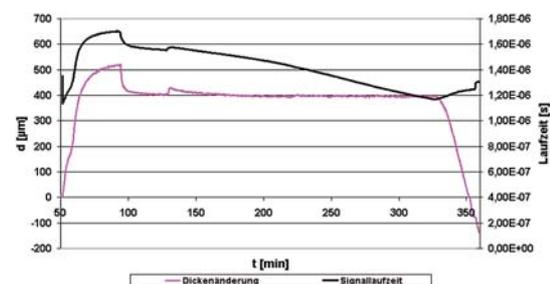


Bild 2:  
Vergleich Dickenänderung Membran und Laufzeitänderung über die Prozesszeit.

# Thermale Prozesssimulation an einer Fahrzeugkarosserie

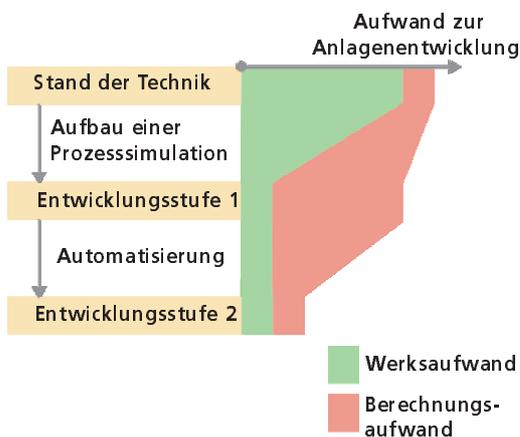


Bild 1:  
Reduktion des Zeit- und Kostenaufwands der empirischen Auslegung des Produktionsprozesses durch eine Prozesssimulation und eine automatisierte Optimierung.

## Motivation

Bei der Hohlraumkonservierung im Automobilbau werden häufig Infrarot-Strahler eingesetzt, welche die Schweller- und Radkastenbereiche von Fahrzeugkarosserien in sehr kurzer Zeit erwärmen, um das in den Hohlräumen befindliche Versiegelungswachs auf seine zur Aushärtung notwendige Reaktionstemperatur zu bringen. Da diese lokale Erwärmung jedoch aufgrund der maximal ertragbaren Temperaturen des Lackes und Temperaturgradienten in der Struktur begrenzt ist, muss ein Optimum von Strahlerleistung, Bestrahlungsgebiet und Bestrahlungsdauer bestimmt werden.

Bisher werden die optimalen Anlagenparameter mit dem derzeitigen Stand der Technik empirisch ermittelt. Der hieraus resultierende Zeit- und Kostenaufwand in der Produktionsanlage ist erheblich (siehe Bild 1) und soll nun im Zuge ständiger Produktivitätssteigerungen und Flexibilisierungen beim Modellwechsel deutlich reduziert werden. Mit Hilfe eines virtuellen Versuchsstandes wird der gesamte Fertigungsprozess simuliert und so die bisherige empirische Vorgehensweise ersetzt (Entwicklungsstufe 1). Zur gewünschten Produktivitätssteigerung mit einer signifikanten Reduktion des Gesamtaufwandes wird die Prozesssimulation darüber hinaus in einen automatisierten Optimierungsprozess eingebettet (Entwicklungsstufe 2).

## Thermischer Kontakt

Zur thermischen Simulation der Hohlraumkonservierung unter Verwendung der Methode der Finiten Elemente wurden zunächst verschiedene Grundlagenuntersuchungen zum thermischen Kontakt von geklebten und ungeklebten Punktschweißverbindungen durchgeführt (siehe Bild 2). Obwohl die einzelnen Materialkennwerte wie Wärmeleitfähigkeiten, Wärmekapazitäten und Dichten der Komponenten sehr gut bekannt sind, ist eine exakte Modellierung nur unter erhöhtem Aufwand möglich. Ursache hierfür sind Verwerfungen der Bleche, die während der Tiefzieh- und Schweißprozesse hervorgerufen werden, so dass die Bleche unterschiedlich gut aneinander anliegen. Dadurch kann der Kontaktwiderstand zwischen den Blechen um Größenordnungen variieren und ist nur innerhalb gewisser Toleranzbänder vorher-sagbar. Aus diesem Grund wurden am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik die folgenden Einflussfaktoren als wesentlich identifiziert und ihre Auswirkungen auf den Wärmeleitwiderstand numerisch und experimentell eingehend untersucht:

- > Einfluss von eingepprägten Verformungen
- > Einfluss von Klebschichten.

Für Grundlagenuntersuchungen in der Thermalanalyse stehen dem Institut verschiedene Versuchsstände zur Charakterisierung von Wärmeleitung, -strahlung und Konvektion zur Verfügung. Eine Besonderheit stellt hierbei die eigens für Strahlungsversuche mit hohen Strahlungsleistungen im Vakuum entwickelte Versuchsstand dar (siehe Bild 3). Dieser wurde derart konzipiert, dass Messungen sowohl im Vakuum als auch unter Atmosphärendruck durchgeführt werden können, um konvektive Einflüsse gezielt ein- oder auszuschalten. Durch den Einsatz von speziellen Isolationswerkstoffen können darüber hinaus auch Wärmestrahlungs- und Wärmeleitmechanismen getrennt untersucht werden. Somit ist dieser Versuchsstand auch für die Charakterisierung der thermalen Kontaktsteifigkeit von Punktschweißverbindungen geeignet.

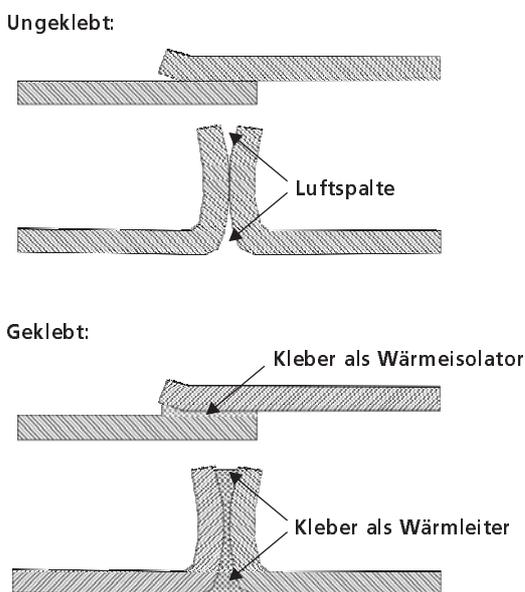


Bild 2:  
Auswirkungen von Klebschichten auf den thermischen Kontakt von Punktschweißverbindungen.

Temperaturmessungen an ausgewählten Demonstratorbauteilen wie punktgeschweißten und geklebten Blechen und Hohlprofilen bilden die Grundlage für eine Validierung detaillierter 3D-FEM-Berechnungen und der anschließenden Entwicklung von Modellierungsrichtlinien für den Einsatz industrieller Berechnungsmodelle. Um die Rechenzeit für industrielle Modelle deutlich zu reduzieren, wurden Homogenisierungsmethoden für Punktschweißverbindungen entwickelt, welche die thermischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten verschmelzen und somit den thermischen Kontakt des Überlappungsbereichs vereinfacht abbilden. Hierbei können jedoch alle wesentlichen Effekte wie Schwankungen von Klebschichtdicken oder Luftspalten berücksichtigt und die erforderliche Modellgenauigkeit beibehalten werden.

## Prozesssimulation

Trotz ständig weiterentwickelter Rechentechnik können umfassende Thermalberechnungen mit der Methode der Finiten Elemente schnell zu extrem hohen Rechenzeiten führen. Eine hohe Effizienz ist daher nur dann gewährleistet, wenn Wärmetransportmechanismen und Randbedingungen bezüglich der folgenden Kriterien abgeschätzt werden:

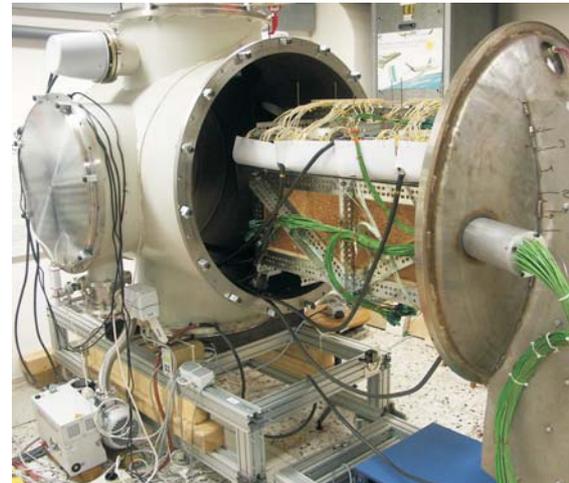
- > Rechenintensität
- > Ergebnissensitivität
- > Homogenisierungsmöglichkeit.

Da auch im Fall der thermalen Prozesssimulation ein sehr detailliertes FEM-Modell mit zeitabhängig veränderlichen Randbedingungen vorliegt, wurden besonders rechenzeitintensive Randbedingungen wie Hohlraumstrahlung und Konvektion bezüglich der oben beschriebenen Sensitivitäten untersucht. Auf der Grundlage von ergänzenden experimentellen Untersuchungen konnten so sichere Aussagen bezüglich der Relevanz einzelner Effekte abgeleitet werden. Zusammen mit den in Grundlagenuntersuchungen erarbeiteten Modellierungstechniken wurde schließlich ein besonders effizientes numerisches Modell zur thermischen Simulation der Hohlraumkonservierung erstellt.

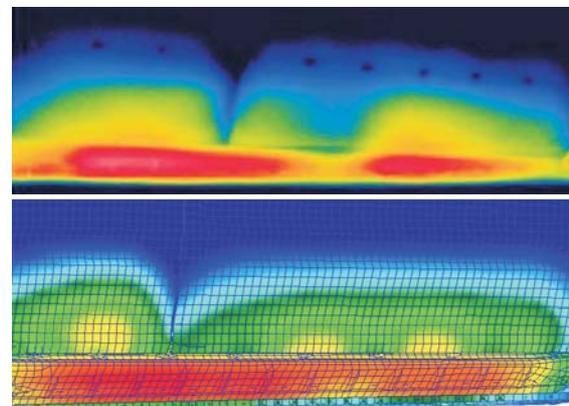
Umfassende Temperaturmessungen mit Thermoelementen und einer Thermokamera an einer Messkarosserie in der Produktionsanlage führten letztlich zur experimentellen Validierung des Simulationsmodells (siehe Bild 4). Eine Besonderheit war hierbei die Aufzeichnung von zeitabhängigen Temperaturfeldern. Diese erlaubten es, die übliche Validierung eines Berechnungsmodells an diskreten Bauteilorten (Thermoelement) oder zu diskreten Zeitpunkten (Thermokamerabild) durch eine örtlich und zeitlich globale Validierung zu ersetzen.

Das erstellte Simulationsmodell soll der Optimierung des Fertigungsprozesses dienen, wobei vor allem die Produktivität und die Qualitätssicherung im Vordergrund stehen. Ziel weiterer Entwicklungen ist daher die Einbettung des Simulationsmodells in einen Optimierungsalgorithmus, welcher auf Basis vorgegebener kritischer Prozessparameter wie zeitliche Temperatur- oder Spannungsfelder eine optimale Anlagenkonfiguration bezüglich Prozesszeit und Bauteilqualität bestimmt.

- > **Dipl.-Ing. Tobias Wille**



**Bild 3:**  
Versuchsstand zur Charakterisierung von Wärmeleitung, -strahlung und Konvektion.



**Bild 4:**  
Vergleich von Temperaturfeldern aus Messung (oben) und Simulation (unten).

# Hochleistungsaktuatoren für die Adaptronik

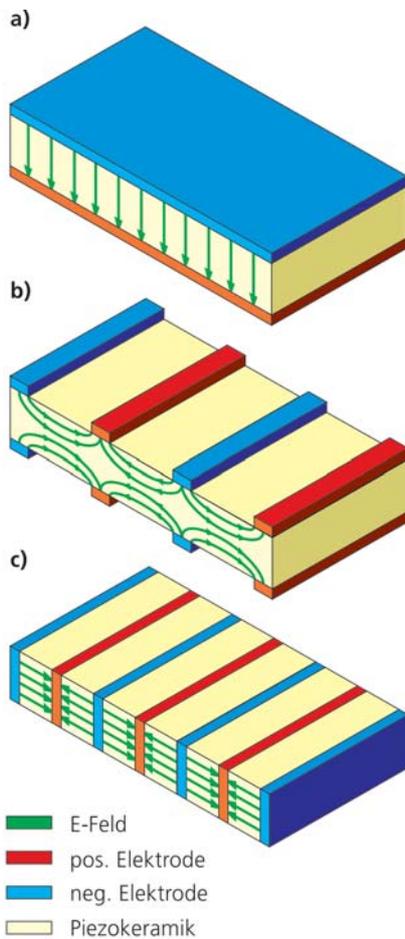


Bild 1:

- a) Elektrodenanordnung zur Nutzung des Quereffektes  
 b) Kammartige Elektrodenanordnung zur Nutzung des Längseffektes  
 c) Elektrodenanordnung zur Nutzung des Längseffektes auf Basis von Multilayer-aktuatoren.

## Piezokomposite als Flächenaktuatoren

Aktuatoren und Sensoren auf Basis multifunktionaler Werkstoffe sind ein wesentlicher Bestandteil adaptiver Strukturen. Aufgrund vielfältiger Vorteile wie z.B. gute Verfügbarkeit, großer Frequenzbereich und hohe Kräfte, werden piezokeramische Werkstoffe am häufigsten für den Aufbau adaptiver Strukturen verwendet. Zur Verbesserung der Eigenschaften der spröden und bruchempfindlichen Materialien sowie zur Vereinfachung der Handhabung hat sich in der Vergangenheit die Verwendung von Piezokompositen durchgesetzt. Piezokomposite sind eine Kombination aus dem spröden keramischen Werkstoff mit einem duktilen Polymerwerkstoff und enthalten auch notwendige zusätzliche Komponenten wie Elektroden, Energiezuleitungen und Isolatoren. Für die Adaptronik kommen insbesondere flächige Komposite zum Einsatz, bei denen die Krafteinleitung nicht an diskreten Punkten erfolgt, sondern flächig über eine Klebschicht. Diese Art von Aktuatoren werden als Flächenaktuatoren bezeichnet.

## Piezoelektrische Teileffekte

Von den drei richtungsabhängigen piezoelektrischen Teileffekten (Längseffekt, Quereffekt und Schereffekt) werden für Piezokomposite in der Adaptronik fast ausschließlich der Längs- und Quereffekt genutzt. Die Anordnung der Elektroden ist dafür entscheidend, welcher Effekt genutzt wird. Beim einfachsten Aufbau werden flächige Elektroden beidseitig auf eine dünne Piezoplatte aufgetragen, der Quereffekt wird also genutzt. Das elektrische Feld bildet sich dann homogen zwischen den Elektroden aus (Bild 1a). Die Dicke der Piezokeramik definiert dabei den Elektrodenabstand und damit die erforderliche Spannung um ein bestimmtes elektrisches Feld aufzubringen. Üblich ist eine Dicke von 0,2 mm, bei der zur Erzeugung eines elektrischen Feldes von 1 kV/mm eine Spannung von 200 V angelegt werden muss.

Aktuatoren mit Längseffekt erzielen zwar dreifach höhere Dehnungen im Vergleich zum Quereffekt, sind jedoch im Aufbau deutlich komplizierter. Bisherige Konzepte basieren auf zwei ineinander greifenden Elektrodenkämmen mit unterschiedlicher Polarität auf der Oberfläche der Keramik, Dadurch entstehen zwischen den Elektrodenfingern wechselnde elektrische Felder, die bauweisenbedingt sehr inhomogen sind (Bild 1b). Dies hat direkte Auswirkung auf den minimalen Elektrodenabstand und damit auf die Betriebsspannung. Werden die Abstände der Elektrodenfinger im Verhältnis zur Keramikdicke zu gering gewählt, dringt das elektrische Feld nicht in ausreichendem Maße in die Keramik ein und die Effizienz des Aktuators ist reduziert. In Abhängigkeit von der Keramikdicke ergeben sich dadurch minimal zulässige Elektrodenabstände. Hinzu kommt, dass der Bereich unterhalb der Elektrodenfinger nicht zur Dehnung der Keramik beiträgt. Bei geringem Elektrodenabstand steigt die Anzahl der Elektrodenfinger und damit der Anteil des „toten“ Materials. Dieser Effekt kann nur bedingt mit sehr dünnen Elektrodenfingern ausgeglichen werden, da sich bei sehr dünnen Elektrodenfingern hohe Gradienten in der elektrischen Feldverteilung ergeben, die zu einer hohen mechanischen Belastung des keramischen Werkstoffes führen. Für einen piezokeramischen Körper mit einer Dicke von 0,2 mm ergeben sich günstige Elektrodenabstände zwischen 0,5-1 mm. Ohne Berücksichtigung der Feldinhomogenität sind 500-1000 V erforderlich, um ein elektrisches Feld von 1 kV/mm zu erzeugen.

## Einsatz der Multilayertechnologie

Die prinzipbedingten hohen Betriebsspannungen von bis zu 2000 V bei den bisher verwendeten d33-Flächenaktuatoren sind für viele Anwendungen nicht akzeptabel. Mit einer neuen Technologie ist es dem Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik gelungen einen Flächenaktuator zu entwickeln, der bei sehr geringen Betriebsspannungen das Potential des d33-Effektes ausschöpfen kann. Eine wesentliche Komponente dieser neuartigen Aktuatoren sind piezokeramische Multilayerstapel. Multilayerstapel sind eine Weiterentwicklung konventioneller piezokeramischer Stapelaktuatoren, haben prinzipiell den gleichen Aufbau, werden jedoch mit einer anderen Technik hergestellt. Die Elektroden werden als sehr dünne Schichten (wenige  $\mu\text{m}$ ) auf den keramischen Grünkörper aufgebracht und anschließend mit der Keramik gesintert. Dadurch ist die Elektrode Bestandteil des monolithischen Keramikkörpers. Weil keine Polymerwerkstoffe zum Aufbau des Aktuators benötigt werden, ist der Multilayerstapel deutlich steifer als ein konventioneller Stapelaktuator. Zusätzlich ermöglicht diese Bauweise eine Reduzierung der Betriebsspannung, da mehr Elektroden mit geringerem Abstand in den Stapel ohne Reduktion der Steifigkeit eingebracht werden können.

Zur Herstellung von Flächenaktuatoren in Multilayertechnik werden zunächst dünne Platten von dem Multilayerstapel abgetrennt (Bild 2). Danach werden diese dünnen und sehr empfindlichen Scheiben zur mechanischen Stabilisierung und elektrischen Isolierung mit einem Polymer vergossen. Ergebnis ist ein einfach zu handhabender und zuverlässiger Flächenaktuator (Bild 3). Wesentlich für die Zuverlässigkeit des Flächenaktuators ist die elektrische Kontaktierung der seitlichen Sammelelektrode. Risse, die sich im Randbereich des Keramikkörpers bilden können, dürfen auf keinen Fall die elektrische Kontaktierung unterbrechen, da der Aktuator sonst teilweise oder vollständig ausfällt. Gelöst wurde dieses Problem durch die Verwendung eines extrem elastischen und elektrisch leitenden Fasermaterials, das während der Herstellung in den Komposit eingebracht wird.

## Überlegene Leistungsfähigkeit

Im Gegensatz zu kammartigen Oberflächenelektroden bedecken die Elektroden den gesamten Querschnitt des Multilayer Flächenaktuators. Zwischen den Elektroden bilden sich so sehr homogene elektrische Felder aus und erlauben eine optimale Ausnutzung des keramischen Werkstoffs (Bild 1c). Die Abstände der Elektroden können so eingestellt werden, dass mit Betriebsspannungen von unter 200 V bereits hohe Dehnungswerte erreicht werden können. Veranschaulicht wird dies durch die in Bild 4 dargestellten Ergebnisse einer freien Dehnungsmessung. Während der konventionelle Flächenaktuator erst bei einer Spannung von 1200 V eine Dehnung von  $1000 \mu\text{m/m}$  (0,1%) erreicht, benötigt der Flächenaktuator auf Basis der Multilayertechnologie für diese Dehnung nur eine Spannung von 200 V.

> Dipl.-Ing. Peter Wierach

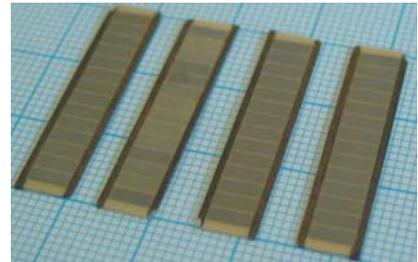


Bild 2:  
Aus einem Multilayerstapel gesägte dünne Platten.

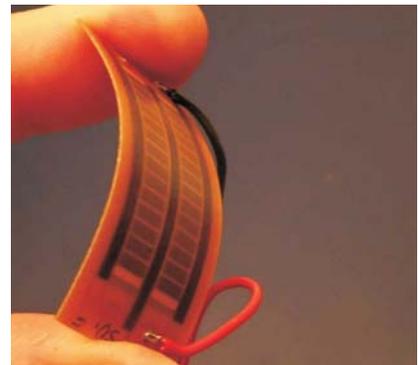


Bild 3:  
Prototyp eines Multilayer Flächenaktuators.

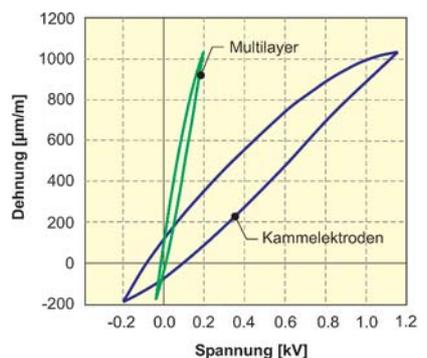


Bild 4:  
Vergleich der freien Dehnung eines konventionellen d33-Flächenaktuators mit einem Flächenaktuator auf Basis der Multilayertechnologie.

# Aktive Lärmreduktion durch Active Structural Acoustic Control (ASAC)

## Mit Körperschall gegen den Lärm

Moderne, hoch technisierte Gesellschaften stehen oft unter dem Einfluss anhaltend wachsender Lärmbelastungen, wobei Lärm zu einem der größten Umweltprobleme überhaupt zählt und zudem enorme finanzielle und gesundheitliche Schäden hervorruft. Typische Verursacher sind Flug-, Zug- und Straßenverkehr sowie Industrieanlagen, und häufig ist dabei eine schwingende Struktur als Lärmquelle identifizierbar. Die Lärmemissionen einer solchen Quelle können sofort in ihrer ursächlichen Entstehung bekämpft werden, wozu man die neue Werkstoffgeneration der Piezokeramiken nutzt. Diese werden in die Struktur eingebracht und beeinflussen durch das Anlegen einer elektrischen Spannung die Strukturdynamik. Ein aktives System zur Lärmreduktion benutzt diese Technologie zur Veränderung der bestehenden lärmrelevanten Struktur-schwingung, hin zu einer mit geringerer akustischer Relevanz und reduziert so den abgestrahlten Lärm.

## Herausforderung "breitbandiger Lärm"

Mit dem gezielten Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im modernen Flugzeugbau werden neuartige Konstruktionsprinzipien realisiert. Diese hochintegralen Leichtbaustrukturen stellen eine neue Herausforderung für die Entwicklung einer leisen und komfortablen Flugzeugkabine dar und werden zudem zeitlich und räumlich inkohärent zu Schwingungen angeregt, wobei diese Schwingungen Lärm mit breitbandig verteilten Frequenzanteilen verursachen. Unter diesen Randbedingungen können ASAC-Systeme nur dann erfolgreich realisiert werden, wenn die vibroakustische Kopplung in die Reglerauslegung integriert wird. Im Gegensatz zu monofrequenten Struktur-anregungen tritt hier keine wohl definierte Strukturschwingung auf. Das ASAC-System muss auf stetig wechselnde Betriebsschwingungen reagieren können und dabei immer eine Lärmreduktion bewirken. Ähnliche Anforderungen finden sich ebenso im Verkehrswesen mit dem zusätzlichen Schwerpunkt Außenlärm.

## Analyseverfahren und Realisierung

Für die Berechnung der vibroakustischen Kopplung sind numerische Verfahren für Innen- und Außenlärm entwickelt worden, wobei damit die durch die Strukturschwingung hervorgerufene Schallabstrahlung analysiert werden kann. Für Lärm in Innenräumen kommt es zur Interaktion von Strukturmoden mit den Moden des eingeschlossenen Fluids, wobei sich diese Wechselwirkung anhand des modalen Kopplungskoeffizienten quantifizieren lässt und ein Grundbaustein für die Auslegung eines breitbandig wirksamen ASAC-Systems für Innenlärm ist (Bild 1, 2). Der Effekt der Berücksichtigung der vibroakustischen Kopplung für ein breitbandig wirksames ASAC-System ist in Bild 3 am Beispiel einer Platte dargestellt, wobei hier die Strukturantwort auf eine breitbandige Anregung experimentell vermessen und die vibroakustische Kopplung berechnet

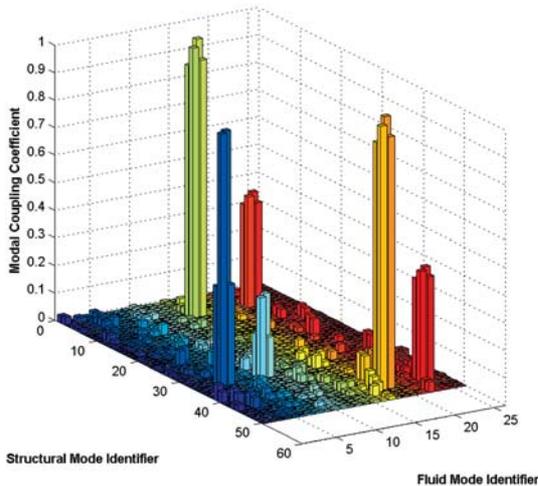


Bild 1: Modaler Kopplungskoeffizient zur Identifikation der vibroakustischen Kopplung zwischen Struktur- und Fluidmoden bei Lärm in Innenräumen (Beispiel versteifter, abgeschlossener Zylinder).

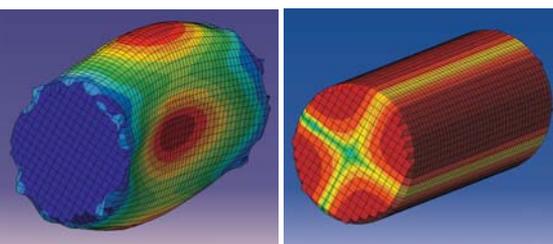
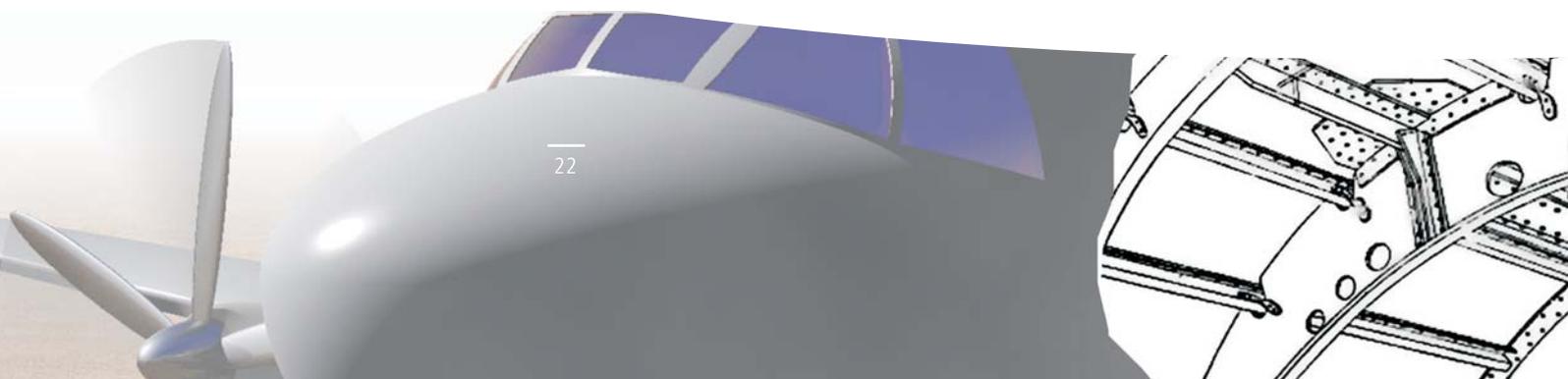


Bild 2: Beispielhafte Darstellung einer stark gekoppelten Struktur- (links) und Fluidmode (rechts) auf einem Stellvertreternetz zur Berechnung der vibroakustischen Kopplung.



wurde. Der mit diesem Hybrid-Verfahren ausgelegte Regler versucht nicht nur die mittlere Schwingung zu reduzieren, sondern auch akustisch effiziente Schwingformen so zu verändern, dass weniger Schall abgestrahlt wird. Der akustische Vorteil gegenüber der reinen Schwingungsreduktion ist deutlich erkennbar.

## Realisierung von ASAC-Systemen

Zur Realisierung eines ASAC Systems sind in der Regel experimentelle Untersuchungen notwendig. Einerseits kann dadurch die Genauigkeit von Finite-Elemente-Modellen (FE) durch Modelupdating gesteigert und andererseits die Auslegung des Systems zur Lärmreduktion validiert werden. Ein rein experimentelles Vorgehen hingegen ist insbesondere dann nötig, wenn kein FE-Modell der Struktur zur Verfügung steht.

Zunächst werden die im Betrieb auftretenden Schallspektren und -pegel über Mikrofonmessungen aufgenommen. Dann werden die Strukturmodaldaten über eine experimentelle Modalanalyse ermittelt. Durch Vergleich der Übertragungsfunktionen von einer definierten Krafteinleitung zu den Strukturschwingungen und Schalldrücken werden Strukturmoden ermittelt, die die Schallabstrahlung dominieren. Basierend auf diesen identifizierten Moden und den bekannten generalisierten Störkräften wird die benötigte Aktuatormasse und -verteilung mit einem am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik entwickelten Verfahren berechnet. Als Sensoren werden Beschleunigungsaufnehmer, die kollokal auf der Aktuatormitte platziert werden, verwendet. Als Aktuatoren kommen am Institut entwickelte piezokeramische Flächenaktuatoren zum Einsatz. Nach Applikation der Sensoren und Aktuatoren erfolgt die Reglerauslegung, wobei der Regler durch eine analoge Schaltung oder einen digitalen Signalprozessor realisiert wird. Als Regelalgorithmus werden in der Regel optimale, adaptive und selbststellende Verfahren gewählt, wobei die Erkenntnis berücksichtigt wird, dass die Reduktion von Strukturschwingungen nicht zwangsläufig auf eine Lärmpegelreduktion führt. Die Verwendung von akustisch optimierten Reglern löst dieses Problem, da hierdurch eine Kostenfunktion minimiert wird, die zu der abgestrahlten Schalleistung bzw. Schalldruckpegel am Ohr des Benutzers proportional ist.

## Minderung des Lärmpegels um 15 dB

An dem Dach eines Volkswagen Golf 3 Variant konnte gezeigt werden, dass durch ASAC Lärmpegelreduktionen im PKW-Innenraum von 15-20 dB möglich sind (Bild 4). Dabei zeigte sich deutlich, dass die Verwendung von akustisch optimierten Reglern das Ergebnis gegenüber nicht-optimierten Reglern stark verbessert.

Mit den im Rahmen der Untersuchungen entwickelten Kompetenzen wird sich das Institut weiteren Anwendungsfeldern des ASAC zuwenden. Dazu zählen Systeme wie die PKW-Windschutzscheibe, die Motorölwanne eines LKW und schließlich als großes, komplexes System der CFK-Rumpf großer Verkehrsflugzeuge.

> Dr. Olaf Heintze, Dipl.-Ing. Tom Weyer und Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach

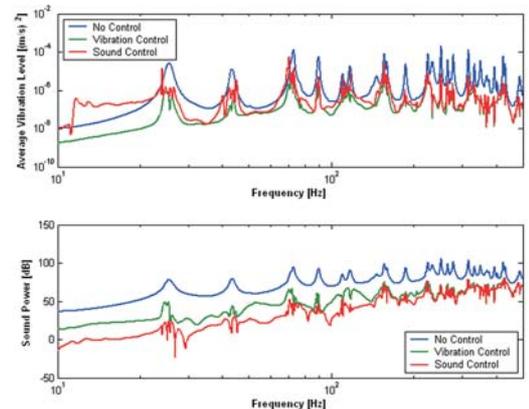


Bild 3: Vergleich zweier Regelungsansätze für ASAC mit zwei Aktuatoren an einer schallabstrahlenden Platte unter breitbandiger Anregung (Simulation auf Basis experimentell ermittelter, struktureller Übertragungsfunktionen).

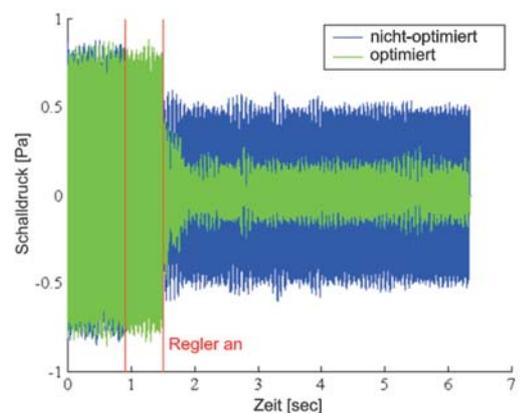


Bild 4: Lärmpegelreduktion am Fahrerohr im Volkswagen Golf 3 Variant mit optimiertem und nicht-optimiertem Regler.



# Frequenzvariabler Schwingungstilger

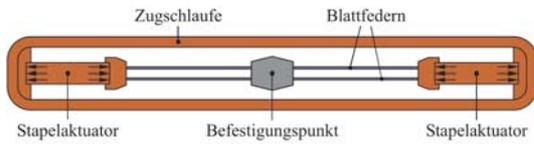


Bild 1:  
Prinzipskizze des frequenzvariablen Schwingungstilgers.

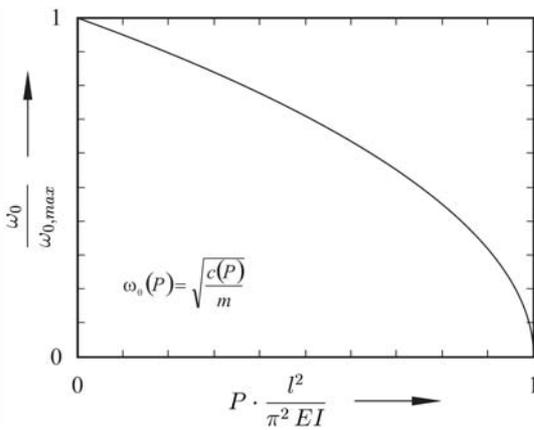


Bild 2:  
Zusammenhang zwischen Eigenfrequenz und Axialdruckkraft.

Im Schallspektrum von Turbopropantrieben finden sich eine Reihe charakteristischer Pegelspitzen, deren Frequenzen dem Produkt aus Propellerdrehzahl und Anzahl der Blätter sowie deren ganzzahligen Vielfachen, den sogenannten Blattpassierfrequenzen, entsprechen. Diese Schallpegelspitzen tragen trotz ihrer Schmalbandigkeit signifikant zum Gesamtschallpegel sowohl außerhalb des Flugzeugs als auch im Innenraum bei. Ihr Beitrag zum Kabinenlärm lässt sich durch an den Rumpfspanten angebrachte, angepasste Schwingungstilger deutlich reduzieren. Da jedoch die Propellerdrehzahl vom jeweiligen Flugzustand abhängt, können herkömmliche Tilger mit fester Eigenfrequenz lediglich einen Kompromiss darstellen. Der in Zusammenarbeit mit der OHB System AG in Bremen entwickelte adaptive Schwingungstilger PTVA (Piezo Tuneable Vibration Absorber) besitzt hingegen eine variable Resonanzfrequenz, wodurch eine Anpassung an unterschiedliche Flugphasen mit erheblich verbesserter Lärmreduktion möglich wird. Die Frequenzänderung wird beim PTVA durch piezoelektrische Aktuatoren realisiert, die eine axiale Druckkraft auf ein Blattfederpaar ausüben und so dessen Biegesteifigkeit, und damit die Resonanzfrequenz des Tilgers, beeinflussen.

Der frequenzvariable Schwingungstilger ist in Bild 1 skizziert. Durch Erhöhung der von den Aktuatoren auf die Blattfedern ausgeübten Längsdruckkraft  $P$  reduziert sich deren Biegesteifigkeit und damit die Eigenfrequenz. (Abbildung 2).

Hauptvorteile dieses Funktionsprinzips sind die statische Ansteuerung und der geringe Energieverbrauch. Um den Anforderungen des Leichtbaus gerecht zu werden, sind außerdem alle zur Einleitung der Druckkraft notwendigen Komponenten als Teil der schwingenden Masse ausgeführt. Die Systemintegration erfolgt, wie bei konventionellen Tilgern, über einen einzelnen zentralen Befestigungspunkt. Optional lassen sich noch eine variable Dämpfung und ein Betrieb im Multifrequenzmodus realisieren.

## Demonstratorentwicklung für A400M

Im Rahmen der Entwicklung eines luftfahrttauglichen Demonstrators für den Airbus A400M, Abbildung 3, wurden alle Komponenten unter Berücksichtigung herstellerseitiger Anforderungen hinsichtlich Tilgerwirkung, Frequenzbereich, Betriebstemperaturbereich, Bauraum, Herstellungskosten u.s.w. optimiert. Besonderes Augenmerk galt dabei dem Einfluss funktionsrelevanter Geometrie- und Materialparameter auf Art und Anzahl der zum Erreichen der geforderten Frequenzverstimmung notwendigen piezoelektrischen Aktuatoren. Durch Verwendung eines in großen Stückzahlen für die Automobilindustrie produzierten Aktuatortyps konnte hier eine erhebliche Kostenreduktion erreicht werden.

> Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach, Dr. Stefan Keye und Dipl.-Ing. Ralf Keimer

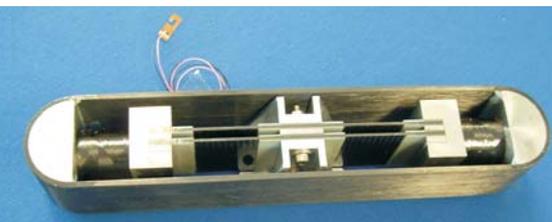


Bild 3:  
Luftfahrttauglicher Prototyp  
(Quelle: OHB System AG).

# 1 $\mu\text{m}$ genaue Verformungsmessung unter Weltraumbedingungen

Für die Raumfahrt werden immer leistungsfähigere Weltraumteleskope für den Infrarot- bzw. sub-mm Bereich entwickelt. Dazu sind große Abmessungen und sehr hohe Qualität der Oberflächen nötig, die nur in Verbindung mit neuen Materialien und Technologien erreichbar sind. In einer Studie der ESA zu hochstabilen Antennenoberflächen soll die Stabilität des Reflektors und das Erreichen der geforderten Genauigkeit durch Vermessung der Flächen und Antennenstruktur unter Weltraumbedingungen demonstriert werden. Hauptparameter sind das Vakuum und thermische Lasten (Temperaturbereich +100 °C bis -100 °C). Der Demonstrator hat einen Durchmesser von 1200 mm und stellt eine Empfangsantenne für das K-Band (10-36 GHz) bzw. Q-Band (36-46 GHz) dar. Die entsprechenden Messungen wurden in der Weltraumsimulationsanlage (WSA) des Institutes (Bild 1) durchgeführt. Als äußerst schwierig und langwierig erwies sich die Suche nach einem geeigneten Messsystem, weil bislang angewandte Standardverfahren bezüglich der geforderten Genauigkeiten bei den großen Abmessungen nicht geeignet sind.

Gefordert war eine Messgenauigkeit von weniger als 1,2  $\mu\text{m}$  über 800 Punkte auf der parabolischen Fläche unter atmosphärischen Bedingungen wie unter Vakuum. Dazu kommt noch die Forderung nach einem sehr weit gefassten Temperaturbereich von +100 °C bis -100 °C. Verfügbare 3D-Messmaschinen sind im Vakuum nicht einsetzbar. Andere traditionelle Techniken wie Videogrammetrie und Photogrammetrie erreichen die geforderte Genauigkeit nicht bzw. nur auf kleinen Flächen.

Zur Untersuchung von transienten und dynamischen Vorgängen an angeregten Bauteilen unter Betriebsbedingungen verwendet man u. a. ESPI Messsysteme (Elektronic Speckle Interferometrie). Ein von der Steinbichler Optotechnik GmbH entwickeltes, berührungslos arbeitendes Messsystem verbindet die Vorzüge der konventionellen Pulsholografie mit denen der elektronischen Speckle Interferometrie. Diese Technik erlaubt es Messungen von außen in der Vakuumkammer vorzunehmen, wenn große Fenster aus Quarzglas vorhanden und diese für den Wellenlängebereich des Lasers (694 nm) entspiegelt sind. Mit einem solchen ESPI Messsystem sind erste erfolgreiche Messungen in der WSA durchgeführt worden. Die PulsESPI Kamera und ein Rubinlaser zur Objektausleuchtung werden durch ein speziell konzipiertes Triggersystem gesteuert. Auf Grund der kurzen Aufnahmezeiten von wenigen Nanosekunden ist das PulsESPI System unempfindlich gegenüber Störeinflüssen wie niederfrequenten Gebäudeschwingungen und Thermoschlieren. Hochfrequente Schwingungen, verursacht durch das Vakuumpumpsystem und schnell strömendes N<sub>2</sub> in den Kaltwänden sowie die ungleichmäßige Temperaturverteilung während der Abkühlphase, erforderten einen Abstand zwischen zwei Doppelpulsen von 25 s. Für die Messung wurde die Abkühlphase der Antenne gewählt, weil hier die Vakuumpumpen nicht zwingend in Betrieb sein mussten, da es gelang, einen Druck von weniger als  $1 \times 10^{-3}$  Torr nur mit den Kaltwänden der WSA aufrecht zu erhalten. Die über 12 Stunden dauernde Abkühlphase der Antenne lieferte mehr als 1700 Bilder.

Bereits vielfach hat sich das PulsESPI System bei industriellen Anwendungen bewährt. Im DLR wurde es erstmalig zur Untersuchung der thermoelastischen Verformung von Oberflächen unter simulierten Weltraumbedingungen angewendet. Das in Bild 2 gezeigte Phasenmuster der Parabolantenne zeigt das hohe Auflösungsvermögen des Verfahrens und lässt ein präzises Ergebnis der Antennenvermessung erwarten. Die Datenauswertung dauert noch an.

> Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Haefker und Dr. Franz Lura



Bild 1:  
Berührungslose Messung von thermoelastischer Verformung unter simulierten Weltraumbedingungen.

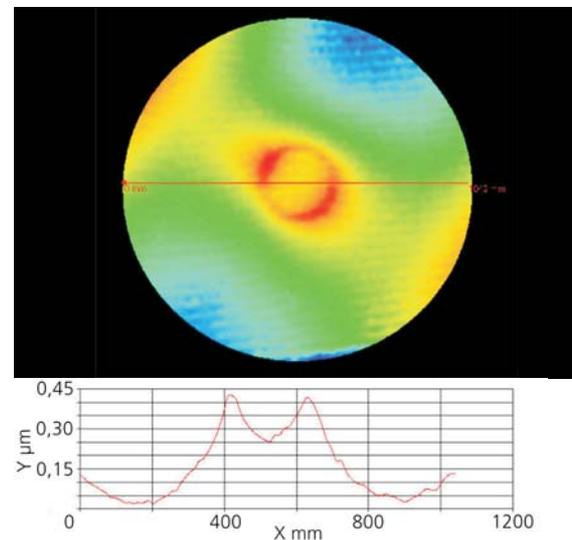


Bild 2:  
Ergebnisbild mit Verformung entlang des oben dargestellten Schnitts. Die mittlere Temperatur der Antenne beträgt 98 °C.

# Photronik - Adaptronik mit optomechanischen Funktionswerkstoffen -

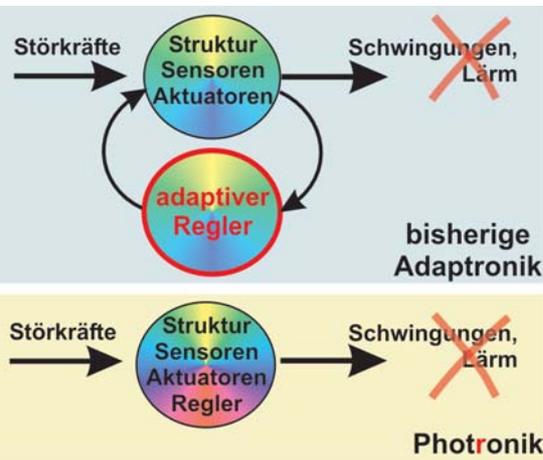


Bild 1: Technologien der Adaptronik: Adaptronik mit externem Regler (oben), Photronik (unten).

Im Wettbewerb der Visionen 2006 wurde die Vision "Photronik" mit einem ersten Platz ausgezeichnet:

## Vision: Adaptronik mit Photonen

Unerwünschte Schwingungen und Lärm mithilfe adaptronischer Systeme zu unterdrücken, bei denen die Reglereinheiten, die Sensorverstärker und die Leistungsverstärker nicht mehr extern ausgeführt sind, sind eine faszinierende Vorstellung (Bild 1), denn bislang lassen sich bei adaptronischen Systemen lediglich die multifunktionalen (z.B. piezokeramischen) Sensoren und Aktuatoren strukturell integrieren.

Realisierbar wird diese Vision durch die Entwicklung optomechanisch wirksamer Wandler auf der Basis sogenannter photonischer Funktionswerkstoffe, deren Wirkungsweise nun im Wesentlichen auf Wechselwirkungen mit ladungsfreien Lichtteilchen (Photonen) beruht. So bewirkt beispielsweise der Lichteinfall bei einem photonischen Aktuator eine Ausdehnung und eine mechanische Kraft bei einem photonischen Sensor ein optisches Signal. Vielversprechende Kandidaten derartiger Funktionswerkstoffe sind polare Halbleiter, organische Werkstoffe und anorganische Photo-Ferroelektrika. Als physikalische Wandlereffekte kommen dabei in Betracht: die spontane piezoelektrische Polarisation, der elektrooptische Pockelseffekt mit nichtlinearer Suszeptibilität zweiter Ordnung, photoplastische Effekte (PPE), optische Nichtlinearitäten oder auch die optische Änderung des Piezoeffektes durch Auf- und Abbau ferroelektrischer Polarisation.

**Das 20. Jahrhundert war das Zeitalter des Elektrons, das 21. Jahrhundert wird das Zeitalter des Photons!**

Durch den photonischen Ansatz wird das Anwendungsspektrum der Adaptronik deutlich erweitert. Zu den visionären Produkten gehören: Gebäude- und Kfz-Verglasungen mit aktivem Schallschutz, Materialien mit adaptiver Transparenz, Photophone (akustooptische Kommunikation), Echtzeitholographie (3D-Speicher im Terabyte-Bereich), EMV-robuste Sensoren und Aktuatoren mit besonders ausgeprägter Präzision oder auch smarte Implantate und künstliche Muskeln.

## Das Forschungsprojekt Photronik

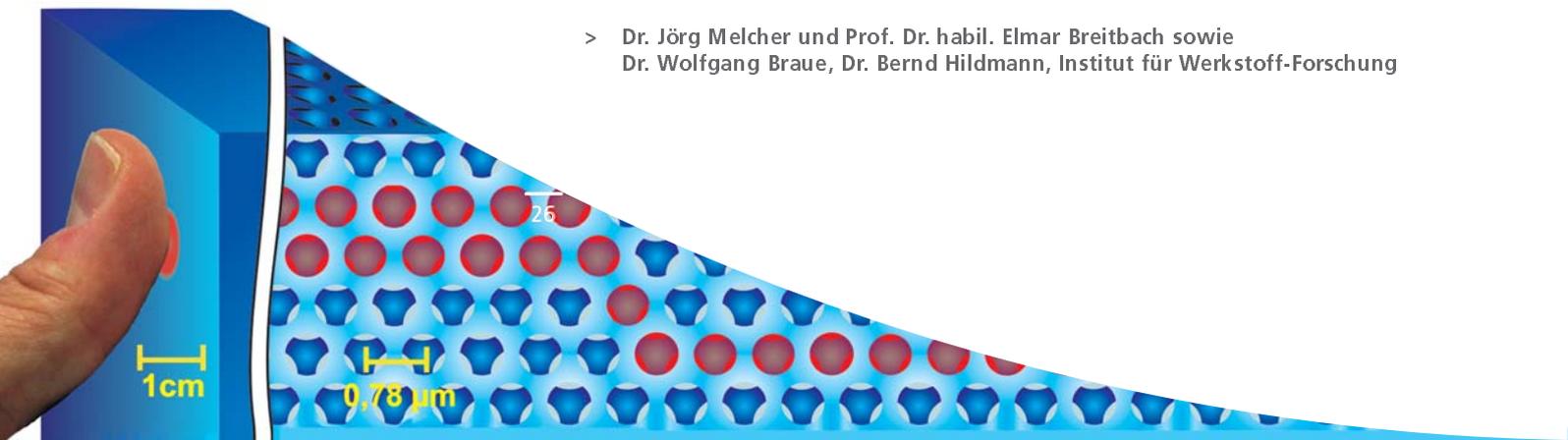
Im Rahmen des DLR-internen Wettbewerbs der Visionen wird zur Zeit eine zweijährige Studie durchgeführt mit dem Ziel, die zur Realisierung photonischer Strukturen erforderlichen Technologien vollständig zu identifizieren, photonische Materialien durch makro- und mikrophysikalische Untersuchungen zu charakterisieren und kleinere Technologie- bzw. Effekt-Demonstratoren aufzubauen.

Darüberhinaus wird gegenwärtig ein grundlagenorientiertes Forschungsprojekt Photronik (Bild 2) zur Entwicklung photonischer Struktursysteme (Bild unten) vorbereitet, an dem neben DLR-Instituten exzellente universitäre Forschergruppen der beiden Schlüsseltechnologien Adaptronik und Photonik beteiligt sind.



Bild 2: Forschungsprojekt Photronik.

- > Dr. Jörg Melcher und Prof. Dr. habil. Elmar Breitbach sowie Dr. Wolfgang Braue, Dr. Bernd Hildmann, Institut für Werkstoff-Forschung



# Selbst überwachende und selbst heilende Strukturen

Im Rahmen des vom DLR-Vorstand ausgeschriebenen Wettbewerbs der Visionen wurden aus 60 eingereichten Ideen 10 prämiert. Zu den drei Erstplatzierten gehört ebenfalls die Vision selbst überwachender und selbst heilender Strukturen:

## Vision

Zukünftige Verkehrsmittel müssen sicherer, wirtschaftlicher und ressourcenschonender sein. Durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen können leichtere und damit effizientere Strukturen realisiert werden. Der Nachteil dieses Werkstoffs besteht in der Schadensanfälligkeit, bzw. der schwierigen Detektion der Schäden. Die Sicherheit und die Betriebskosten könnten mit intelligenten, multifunktionalen Strukturen deutlich verbessert werden. Dazu ist ein Mess- und Prüfsystem zur Last- und Schadenserken- nung erforderlich. Zusätzlich sollte ein Reparatursystem zur Selbstheilung der Faser- verbundstrukturen integriert sein. Ein Schaden an der Struktur, zum Beispiel verursacht durch einen Steinschlag, könnte so im Moment des Entstehens erkannt, analysiert und dann bereits im Betrieb repariert werden. Dadurch reduzieren sich die Ausfallzeiten und eine Gefährdung des Transportsystems wird vermieden.

## Realisierung nach dem Vorbild Natur

Erreicht werden können diese Ziele durch:

- > Entwicklung eines automatisch arbeitendes Detektionssystem von Lasten und Schäden
- > Gewichtsneutrale Verwendung der in den Bauteilen aus Steifigkeitsgründen integrierten Fasern als Sensoren zum Messen der Belastungen und der Schäden
- > Einsatz von zusätzlich mittragenden Hohlfasern die im Falle eines Schadens das Reparaturmaterial zum Ort der Schädigung transportieren
- > Nachweis der erfolgreichen Heilung durch die Verwendung des Detektionssystems.

Durch Vernetzung der Sensoren und Auswertung der Daten wird eine Art Nervensystem für künstliche Systeme geschaffen. Die Ausgabedaten könnten ähnlich wie Schmerzreize dazu verwendet werden, bestimmte Fahr bzw. Flugmanöver im Fall einer Schädigung zu unterdrücken. In Analogie zu biologischen Organismen wird dann ein Heilungsprozess eingeleitet.

In Zukunft sollen Demonstrationsbauteile mit integrierter Messtechnik und Selbstheilungsfunktionen gebaut und so der Grundstein für die nächste Generation „intelligenter multifunktionaler Bauteile“ gelegt werden.

- > **Dr. Lars Herbeck, Dr. Wolfgang Hillger und Dr. Boris Kolesnikov**



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

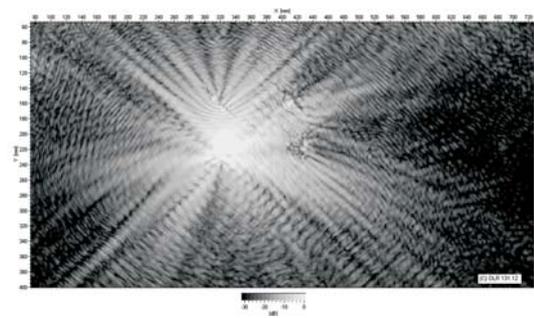


Bild 2:  
Ausbreitung von Lambwellen in einer CFK- Platte.

# Frei Formbares Flugzeug

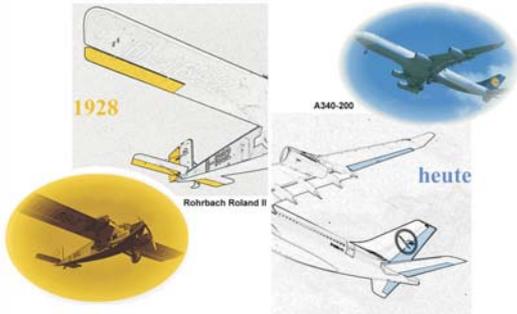


Bild 1:  
In der Frage der Geometriegestaltung von Flugzeugtragflächen sind in den letzten 80 Jahren keine grundlegenden Fortschritte zu verzeichnen.

## Gekoppelte Mechanik für die volle Geometriekontrolle im Flug

Zu den 10 im Wettbewerb der Visionen ausgewählten, näher zu untersuchenden Visionen zählt die Vision von frei formbaren Flugzeug.

„Der Vogel fliegt, weil er mit geeignet geformten Flügeln auf geeignete Weise die ihn umgebende Luft bearbeitet“. Dieser Satz von Otto Lilienthal umfasst die gesamte Vision des frei formbaren Flugzeugs: Die Vision des Fluges, so leise, wirtschaftlich und zuverlässig, wie wir ihn vom Naturvorbild kennen, realisiert durch die freie Gestaltbarkeit umströmter Flächen. In Lilienthals Vorstellung ist der Flügel Tragflügel, Ruder, Hochauftriebssystem und Triebwerk gleichzeitig; aber auch kleine Schritte in Richtung dieser visionären Vorstellung wie die quasistatische Anpassung der Tragflügelgeometrie eines konventionell angetriebenes Flugzeuges eröffnen ungeahnte Perspektiven der Leistungsoptimierung.

Die technische Möglichkeit, „geeignet geformte Flügel“ zu bauen, die sich „auf geeignete Weise“ verformen ließen, in anderen Worten die Geometrie umströmter Flächen im Sinne der aerodynamischen Anforderungen frei zu wählen und zu verändern, war vor hundert Jahren nicht gegeben. So schlug die Entwicklung der Luftfahrt einen pragmatischeren Weg ein und kam zur gegenwärtigen, von strukturmehchanischen Restriktionen dominierten und dadurch stark eingeschränkten Art der Formgestaltung.

Heute, im Zeitalter der rechnergestützten Mechanik und der multidisziplinären Optimierung, sowie nach den gewaltigen Fortschritten in den Materialwissenschaften und in den Aktuatortechnik, ist die Zeit reif geworden, die Vision des frei formbarer Flugzeugs wieder anzusteuern. Der wesentliche Schritt auf dem Weg zur Verwirklichung dieser Vision ist eine völlig neue Entwurfsphilosophie, in der die aerodynamisch wirksamen Flächen eines Flugzeugs als gekoppeltes mechanisches System (Struktur-Aktuator-Aerodynamik) unter gezielter Ausnutzung elastischer Verformungen optimiert werden.

Als Ergebnis steht die Vision eines Flugzeugs, das die zur Durchführung und Optimierung der Mission notwendige Geometrieveränderungen als Zusammenspiel von elastischer Verformbarkeit, Aerodynamik und Aktuatorik realisiert.

Freie Geometriegestaltung bedeutet den Zugang zu ungeahnten Möglichkeit der Leistungsoptimierung. An erster Stelle der Vorteile für Gesellschaft und Wirtschaft steht der schonende Umgang mit Ressourcen durch reduzierten Treibstoffverbrauch. Gesellschaftlich sind Vorteile in Umwelt- und Lärmschutz zu erwarten sowie ein unvermindertes oder gar verbessertes Zuverlässigkeits- und Sicherheitsniveau des Luftfahrttransports bei zunehmender Verkehrsdichte. Aus wissenschaftlicher Sicht stellt die gekoppelte mechanische Analyse und Synthese eine höchst anspruchsvolle Aufgabe dar. Die damit zusammenhängende Auflösung jahrhundertalter Entwurfsparadigmen gestaltet sich als ein Schritt von wissenschaftshistorischer Bedeutung.

> Dr. L. Flavio Campanile, inzwischen EMPA, Schweiz

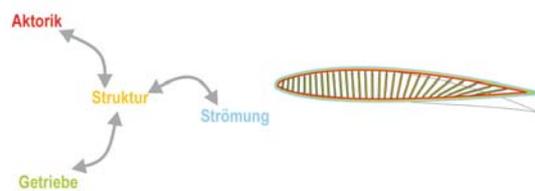


Bild 2:  
Gekoppelte Mechanik als Schlüssel zum frei formbaren Flugzeug

# Die „High Altitude Long Endurance - UAV“ Entwicklung im DLR

Im Rahmen des Wettbewerbs der Visionen wurde die Vision einer eigenständigen DLR Entwicklung eines HALE-UAVs mit einer Sonderförderung ausgezeichnet.

## Die HALE - Vision:

Das DLR übernimmt die Federführung für die Entwicklung, den Bau und die Nutzung von in der Stratosphäre stationierten fliegenden Plattformen wie Flugzeugen oder Luftschiffen. Das Besondere an diesen Plattformen ist, dass sie autonom arbeiten, an einer vorgegebenen Position (z. B. über einer Großstadt) positioniert werden und dort über lange Zeiträume (zumindest Monate) im Einsatz sind. Das DLR verfügt über hervorragende Kompetenzen für deren Konzeptionierung, Entwicklung, Betrieb und Anwendung.

Diese sog. HALE (High-Altitude Long-Endurance) Plattformen haben gegenüber herkömmlichen Flugzeugen den Vorteil, dass sie einen dauerhaften Service bieten. Es handelt sich praktisch um einen „geostationären Satelliten“, wobei der Abstand zur Erdoberfläche aber weniger als 20 km statt 36.000 km (im geostationären Orbit) beträgt. Dies macht viele Messungen überhaupt erst möglich. Gegenüber klassischen Fernerkundungssatelliten in einem umlaufenden niedrigen Erdorbit (z. B. zwischen 500 km und 1.000 km) haben sie neben dem geringeren Abstand zwischen Sensor und Erdoberfläche den großen Vorteil, dass die Applikation über einem bestimmten Gebiet praktisch ununterbrochen erfolgen kann. Es wird mit bedeutend geringeren Kosten als bei Satelliten gerechnet, da beim Ausfall einer Nutzlast eine Reparatur am Boden erfolgen kann. Weiterhin wird eine größere Flexibilität erreicht, da die Nutzlasten auch ausgetauscht werden können („Updates“).

## Die HALE - Studie:

Das DLR verfügt mit seinen Instituten über die Kompetenzen für die Realisierung der Vision. Mehrere DLR-Wissenschaftler engagieren sich bereits seit Jahren für unbemannte und autonome Flugkörper sowie Stratosphärenflugzeuge. Die Machbarkeit dieser HALE-UAV-Vision soll im Rahmen einer Studie von einem institutsübergreifenden Team demonstriert werden.

Zunächst wird eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Kompetenzen im DLR und potenzieller Anwendungen, sowie der jeweils damit verbundenen Anforderungen (wie Nutzlast und Einsatzprofil) erstellt. In einer zweiten Studienphase werden Lösungen für besondere technische Probleme aufgezeigt, erste Entwürfe durchgerechnet und den verschiedenen Anforderungen gegenüber gestellt. Im Abschlussbericht werden die Zielanwendungen identifiziert, ein erstes technisches Konzept vorgestellt und Vorschläge für die weitere Vorgehensweise dargelegt.

- > **Dipl.-Ing. Michael Hanke sowie**  
**Dr. Hartmut Runge, Institut für Methodik der Fernerkundung**  
**Dr. Holger Friehmelt, Institut für Flugsystemtechnik**  
**Dr. Martin Hepperle, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik**

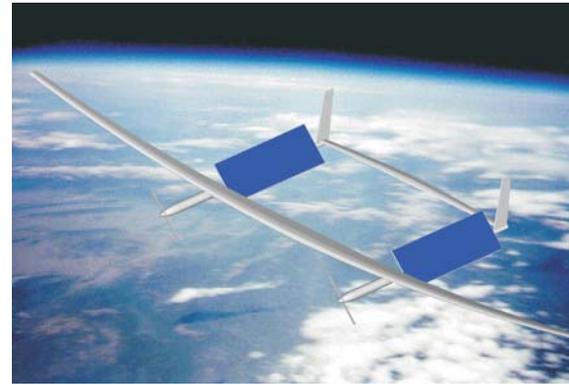


Bild 1:  
Früher Entwurf eines solar angetriebenen  
HALE-UAVs mit schwenkbaren Solarpanelen.  
(Quelle: Institut für Flugsystemtechnik).

# Publikationen und Patente 2005 - 2006

## Patente:

### Breitbach, B.:

"Aktiver Tilger", DE 102006015, 2006.

### Brosinger, A., Herbeck, L.:

„Festkörpergelenk“,  
DP 10 2005 034 542.5, 2005.

### Eberth, U., Friedrich, M.:

„Werkzeug für Resin-Transfer-Moulding-Verfahren“, DP 10 2005 053 691.3, 2005.

### Eberth, U., Friedrich, M., Krafft, H.-M.:

„Verfahren und Vorrichtung zum Aufbringen dünner Materiallagen auf eine Reliefform“, DP 10 2005 044 823.2, 2005.

### Eberth, U., M. Friedrich, M.:

„Verfahren zum Handhaben einer Flüssigkeit“, DP 10 2005 053 695.6, 2005.

### Eberth, U., Friedrich, M., Krafft, H.-M.:

„An- und Abdockung Flüssigkeit führender Leitungen an und von einem Andockkörper“, DP 10 2005 045 845.9, 2005.

### Eberth, U., Friedrich, M.:

„Werkzeug, Anordnung und Verfahren zum Herstellen eines Bauteils“, DP 10 2005 053 690.5, 2005.

### Fink, A., Kolesnikov B., Herbeck L.:

„Verbundwerkstoff“, DP, AP 149/105, 2005.

### Hanke, M. Herbeck L., Berger, T.:

„Kennzeichnungssystem für Hochleistungsfaserverbundstrukturen auf Basis strukturintegrierter Transponderchips“, DP 10 2006 018 461.0, 2005.

### Hanke, M., Brandt, C.:

„Mehrschichtige Werkstoffverbundstruktur und Verfahren zur Herstellung hierzu“, DP 10 2006 005 902.6, 2006.

### Kaps, R., Hanke M.:

„Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Faserverbundbauteilen“, DP 10 2005 031 280.2, 04.07.2005.

### Kaps, R., Herbeck L., Herrmann A.:

„Faserverbund-Bauelement und Verfahren zur Herstellung eines Faserverbund-Bauelementes“, DP 10 2005 008 252.1, 2005.

### Lura, F., Biering, B., Gerstung, H.:

„Thermalmanagement für Scheinwerfer mit Luminisenzdioden“, DP, AP 12/105, 2005.

### Lura, F.:

„Wasserstoffspeicher“, DP, AP 61/105, 2005.

### Melcher, J., Keimer, R.:

„Kraftfahrzeug mit Schwingungsunterdrückungssystem“, DP, AP 62/99, 2005.

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

„Verfahren zur Herstellung keramischer Konstruktionselemente im Nano- bis Zentimeter-Bereich“, DE 10 2005 025 367.9, 2005.

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

„Nanostrukturen für das Adsorbieren von Wasserstoff“, EP 1 642 640 A2, 2005.

### Melcher, J., Riemenschneider, J., Mahrholz, T., Mosch, J.:

„Aktuator mit nanoskaligen Strukturen“, DP 10 2006 005 930.1, 2006.

### Melcher, J.:

„Verfahren und Vorrichtung zur Magnetresonanzuntersuchung“, DE 597 12 434.5-08, EP 928426, 2005.

### Meyer M., Gräber, M.:

„Mikrowellenautoklav“, DE 10 2005 050 528.7, 2005.

### Riemenschneider, J., Mahrholz, T., Mosch, J.:

„Aktuator mit Nanotubes“, DE 10 2005 034 323.6, 2005.

## Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

### Bürmann, P., Rolfes, R., Teßmer und J., Schagerl, M.:

„A semi-analytical model for local post-buckling analysis of stringer- and frame-stiffened cylindrical panels“, Thin-Walled Structures, Volume 44, Issue 1.

### Kärger, L., Baaran, J., Teßmer, J., 2006:

„Rapid Simulation of Impacts on Composite Sandwich Panels Inducing Barely Visible Damage“, Composite Structures, im Druck.

### Kärger, L., Wetzler, A., Rolfes, R., Rohwer, K.:

„A three-layered sandwich element with improved transverse shear stiffness and stresses based on FSDT“, Computers and Structures, Vol. 84, Issues 13-14, 843-854.

### Keye, S.:

„Improving the Performance of Model-Based Damage Detection Methods through the Use of an Updated Analytical Model“, Aerospace Science and Technology, im Druck, 2006.

### Kling, A., Degenhardt, R., Zimmermann, R.:

„A Hybrid Subspace Analysis Procedure for Non-Linear Postbuckling Calculation“, Composite Structures, Volume 73,(2006-05), 162-170.

### Kovalovs, A., Gluhih, S., Barkanov, S., Masarati, P., Morandini, M., Muffo, D., Riemenschneider, J.:

„Active twist design of helicopter rotor blades“, in Mechanics of Composite Materials, 2006.

### Riedel, U., Mahrholz, T., Herbeck, L., Mosch, J., Röstermundt, D.:

„Faserverstärkte Nanocomposites Stand der Technik und Perspektiven“, Gummi Faser Kunststoff 3 (2005), 161-166.

### Riemenschneider, J., Mahrholz, T., Mosch, J., Monner, H. P., Melcher, J.:

„System Response of Nanotube based Actuators“, Mechanics of Advanced Materials and Structures, im Druck, 2006.

### 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, angenommen, 2006.

### Heintze, O., Seelecke, S., Shaw, J. A.:

„Experimental Investigation of the Thermo-Electro-Mechanical Behavior of a Shape Memory MEMS Actuator“, Journal of Micromechanics and Microengineering, angenommen, 2006

### Sickinger, C., Herbeck, L., Breitbach, E.:

„Structural engineering on deployable CFRP booms for a solar propelled sailcraft“, Acta Astronautica 58 (2006) 185-196.

### Sinapius, M., Göge, D.:

„Experiences with Dynamic Load Simulation by Means of Modal Forces in the Presence of Structural Non-Linearities“, Aerospace Science and Technology, Vol. 10, 411-419, 2006.

# Impressum

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

Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik

**Titelmotiv** Innovationsmotore 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 2006

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

[www.DLR.de](http://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-Standes 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](http://www.DLR.de/fa)