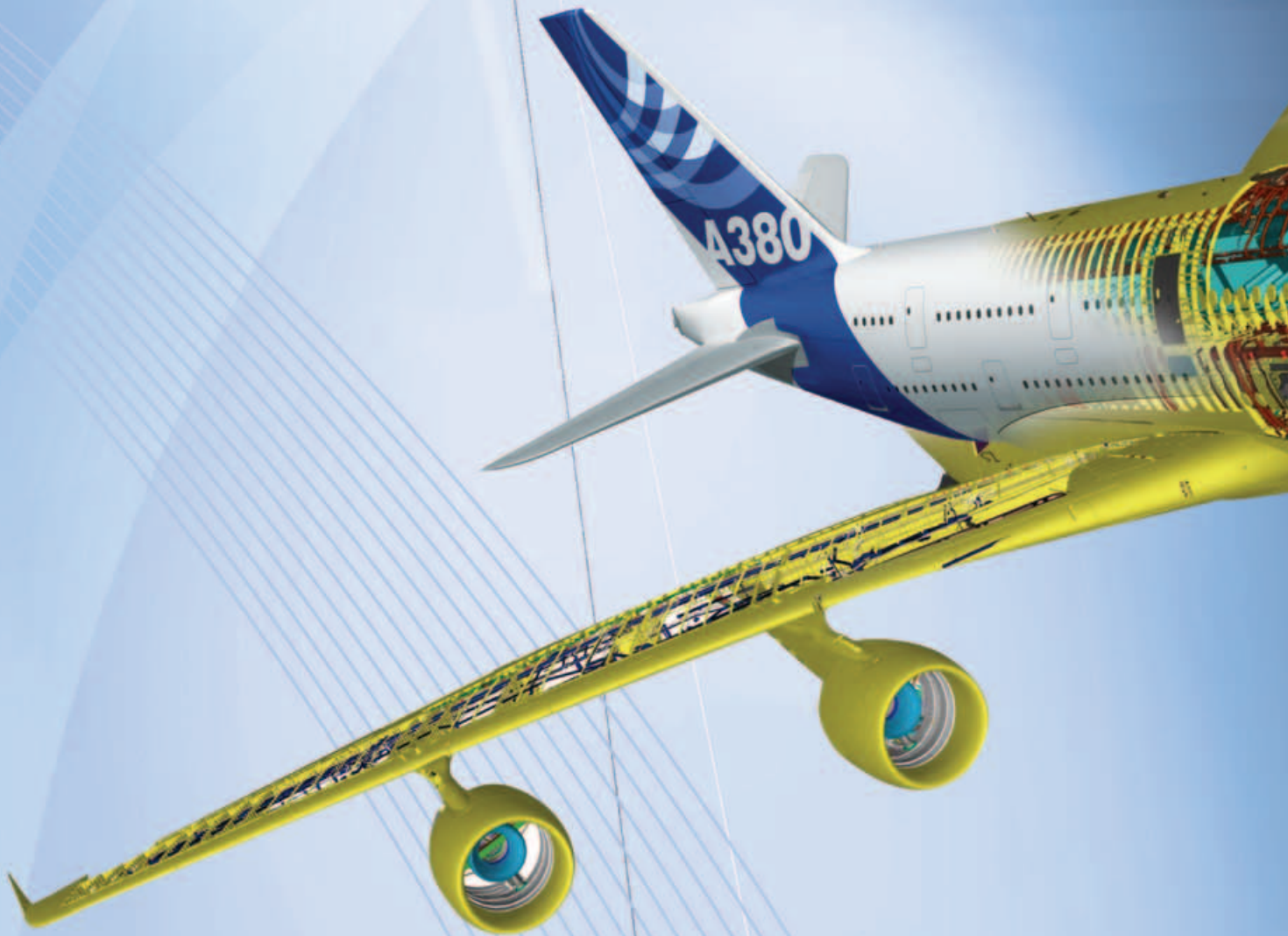


LEICHTBAU

THEMENHEFT FORSCHUNG · N° 3 · 2007



Universität Stuttgart



Unser Fortschritt, Ihr Talent.

Wir starten.

Pioniergeist ist die Quintessenz unserer Geschichte, Freiraum für Ihre Ideen die Grundlage unseres gemeinsamen Erfolgs. Gestalten Sie zusammen mit weltweit anerkannten Experten die Zukunft der Luftfahrt. Kommen Sie zu Airbus.

Hamburg · Bremen · Stade · Buxtehude · Nordenham · Varel · **Laupheim** · Filton
Broughton · Saint Nazaire · Méaulte · Nantes · Toulouse · Madrid · Illescas · Puerto Real

www.airbus-careers.com
Airbus. Setting the standards.



THEMENHEFT FORSCHUNG

Leichtbau

Universität Stuttgart • 2007

Editorial

Liebe Leserinnen und Leser,

die dritte Ausgabe des THEMENHEFT FORSCHUNG stellt das facettenreiche Forschungsfeld des Leichtbaus vor. Leichtbau ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Methoden, Materialien, Produkten und Anwendungsgebieten, die von der Grundlagenforschung bis in die industrielle Praxis reichen. „Es hat“, wie Werner Sobek in seinem Beitrag schreibt, „zu tun mit der Ästhetik des Minimalen, mit der Suche nach dem Unbekannten, und mit dem Überschreiten von durch Wissenschaftsdisziplinen gezogenen Grenzen.“ Nach den Forschungsgebieten der Systembiologie und der Photonik stellt das THEMENHEFT FORSCHUNG damit erneut eine breite und ausgewiesene Profillinie der Universität Stuttgart vor, die sich über bestehende Fach- und Organisationsgrenzen hinweg ausgebildet hat.

Mit dem dritten Heft der Reihe hat sich ein Standard etabliert, der in den weiteren Heften fortgeführt werden soll. Der Dank geht an alle Autorinnen und Autoren, die sich auf das schwierige Terrain des Public Understanding of Science begeben haben. Das Themenheft Forschung soll aber nicht nur ein Mittel der Öffentlichkeitsarbeit sein, sondern auch als eine Komponente der Forschungsförderung wirken. Denn

die publizistische Sichtbarmachung der disziplinen- und organisationsübergreifenden Forschungsthemen dient auch der internen Selbstverständigung. Nicht immer gibt es auf der Arbeitsebene ausreichend Zeit und Gelegenheit zum Austausch, trotz sachlicher Nähe. In diesem Sinne ruft die Redaktion des Themenheftes besonders auch junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dazu auf, neue Gebiete und Felder anzusteuern und vorzustellen, die zwar schon entdeckt, aber noch nicht erkundet sind. •



Dr. Ulrich Engler

Impressum

Das Themenheft Forschung wird herausgegeben im Auftrag des Rektorats der Universität Stuttgart.

Konzeption und Koordination Themenheft Forschung: Ulrich Engler, Tel. 0711/6858-2205,
E-Mail: ulrich.engler@verwaltung.uni-stuttgart.de

Wissenschaftlicher Koordinator Leichtbau:
Klaus Drechsler

Autoren Leichtbau: Horst Bansemir, Klaus Drechsler, Horst Friedrich, Rainer Gadow, Ingo Karb, Rainer Kehrlé, Frank Kern, Jan Knippers, Gundolf Kopp, Bernd Kröplin, Konstantin von Niessen, Roland Schöll, Werner Sobek, Martin Wenzelburger, Volker Witzel

Titelseite und Grundlayout Themenheft Forschung:
Zimmermann Visuelle Kommunikation, Gutenbergstraße 94 A, 70197 Stuttgart

Druck und Anzeigenverwaltung: Alpha Informationsgesellschaft mbH, Finkenstraße 10, 68623 Lampertheim, Tel. 06206/939-0, Fax 06206/939-232, Internet: <http://www.alphawerbung.de>
Verkaufsleitung: Peter Asel

© Universität Stuttgart 2007

ISSN 1861-0269

Grußwort des Rektors

Die aktuelle Ausgabe des THEMENHEFT FORSCHUNG zeigt, dass der Leichtbau an der Universität Stuttgart ein besonderes disziplinenübergreifendes Schwerpunktthema darstellt. Im gegenwärtigen ökonomischen Kontext knapper Ressourcen und unter dem Gesichtspunkt langfristiger Nachhaltigkeit erweist sich das flexible Forschungskonzept „Leichtbau“ als ein ausgewachsenes wissenschaftliches Schwergewicht. Mit der Arbeit am Forschungsprofil des Leichtbaus stellen die Wissenschaftler der Universität Stuttgart wieder einmal unter Beweis, dass sie ihr Ohr am Puls der Zeit haben. Und dies mit Tradition: Auch der Leichtbau hat erste und vielleicht entscheidende Impulse aus Stuttgart erfahren. In den Bauten und Werken von Frei Otto überzeugt der Leichtbau als ästhetisches und ökonomisches Konzept. In den 90er Jahren haben die Wissenschaftler der Universität Stuttgart mit dem damaligen Sonderforschungsbereich „Natürliche Konstruktionen“ bundesweit Maßstäbe gesetzt.

Auch die heutigen Arbeiten zeigen, dass die Natur ein anregender Ausgangspunkt für Konstruktionen und Konzepte sein kann. Aber sie zeigen auch, wie die ingenieurwissenschaftlichen Aufgabenstellungen diesen Ausgangspunkt aufnehmen und nach wissenschaftlichen Optimierungen hin überschreiten müssen. Standen früher die konstruktiven Formen der Natur dem Wissenschaftler Modell, so werden heute ihre dynamischen Prinzipien in adaptiven Strukturen weiterentwickelt.

Die vorliegende Ausgabe des THEMENHEFT FORSCHUNG kann nur eine Auswahl wiedergeben, und doch beeindruckt die Vielfalt der Anwendungsbereiche des Leichtbaus. Es sind besonders die Faserverbundstoffe, deren Einsatz in Natur und Technik dargestellt wird und die alle Bereiche des Verkehrs von der Luftfahrt bis zu modernen Fahrzeugkonzepten beeinflusst. Aber der stoffliche Leichtbau kennt

noch weitere Materialien, die dem jeweiligen Anwendungszweck entsprechend maßgeschneidert werden können. Und schließlich bestimmen die Möglichkeiten modernen Leichtbaus auch die Architektur und das Bauwesen und reformieren dabei auch den Prozess des Entwerfens in diesen Bereichen.

Allen Autoren dieses Heftes möchte ich für ihre zusätzliche Mühe danken, ihre wissenschaftliche Forschungsarbeit verständlich in der universitätseigenen Publikationsreihe vorzustellen und damit einen wichtigen Beitrag zur Profilbildung der Universität zu leisten. Mein besonderer Dank geht an den Kollegen Klaus Drechsler, der als wissenschaftlicher Koordinator des Bandes nicht nur die Autoren aus der Wissenschaft, sondern auch die Beiträger aus der Wirtschaft zur Teilnahme motivieren konnte. Ich bin davon überzeugt, dass der Leichtbau an unserer Universität nicht nur eine große Tradition, sondern auch eine viel versprechende Zukunft hat. •



A handwritten signature in black ink that reads "Wolfram Ressel". The signature is written in a cursive, flowing style.

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel

Inhalt

Editorial 2

Impressum 2

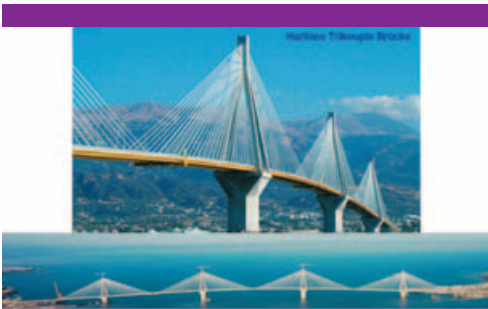
Grußwort des Rektors 3

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel

Überblick 6

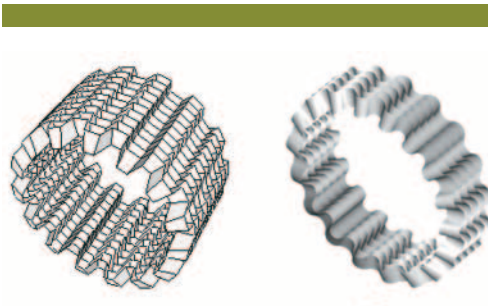
Leichtbau - Entwicklung, Bedeutung und Disziplinen

Klaus Drechsler



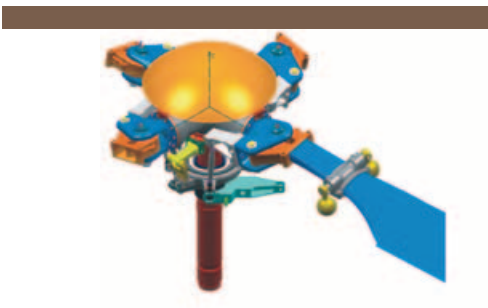
Faserverbundstrukturen – Leichtbau in Natur
und Technik 14

Klaus Drechsler, Ingo Karb, Rainer Kehrle, Volker Witzel



Leichtbau im Hubschrauber unter
Berücksichtigung multifunktionaler
Eigenschaften 22

Horst Bansemir



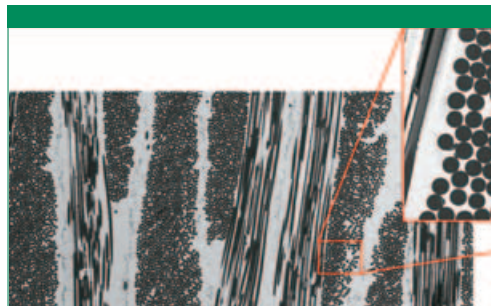
Neue Werkstoffe und Bauweisen für neuartige Fahrzeugkonzepte 32

Horst Friedrich, Gundolf Kopp, Roland Schöll



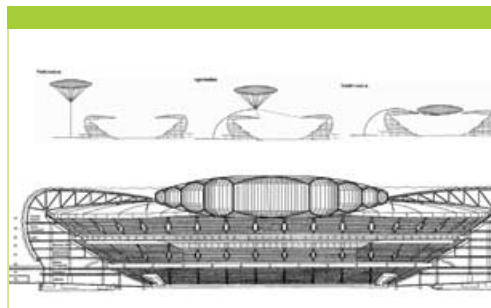
Stofflicher Leichtbau mit Sinterkohlenstoff und Verbundwerkstoffen 38

Rainer Gadow, Frank Kern, Konstantin von Niessen, Martin Wenzelburger



Neue Wege im Leichtbau 52

Bernd Kröplin



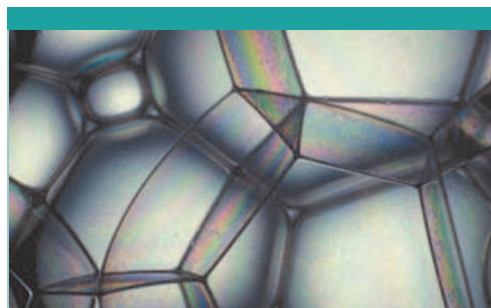
Faserverbundwerkstoffe in Architektur und Bauwesen 58

Jan Knippers et al.



Entwerfen im Leichtbau 70

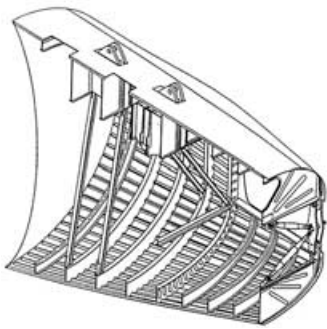
Werner Sobek



Leichtbau

Entwicklung, Bedeutung und Disziplinen

Immer größere Nutzlast bei immer geringerem Flugzeuglärm, immer höhere Fahrzeugsicherheit bei gleichzeitiger Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, immer längere Brückenspannweite bei immer höherer Tragfähigkeit – wann immer solch widersprüchliche Anforderungen zu erfüllen sind, kommt einer Disziplin eine entscheidende Bedeutung zu: dem Leichtbau. Besonders gut lässt sich die Entwicklung und Bedeutung des Leichtbaus am Beispiel des Flugzeugbaus darstellen. Zunächst standen als Werkstoff im Wesentlichen nur Holz und Seide zur Verfügung. Die Flugzeuge bestanden aus Holzfachwerken, die mit Seide bespannt waren. Später kam Stahl in Form von Klavierseiten für die Abspannung der Spanntürme und für die Fachwerkstäbe des Rumpfes hinzu.



Ein Vorteil dieser Bauweise war, dass man die Strukturen auch mit den damals verfügbaren Mitteln berechnen konnte. Die Dimensionierung erfolgte auf Zugbelastung, Druckbelastung und Eulerknicken der Stäbe. Auch die Inspektion und die Reparatur waren mit einfachen Mitteln möglich. Mit der Entwicklung des Duraluminiums wurden völlig neue Bauweisen möglich, die vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten, z.B. zur Verbesserung der Aerodynamik, boten. Das Wellblechdesign der Ju52 ist ein typisches Beispiel hierfür. Neue Verbindungstechniken wie das Nieten und verbesserte Berechnungsmöglichkeiten, z.B. das Verständnis von Schubfeldern oder der Instabilität von Platten, ermöglichten deutliche Leistungssteigerungen.

Die metallischen Werkstoffe und Fertigungsverfahren nahmen in den folgenden Jah-

ren eine stürmische Entwicklung, die eine kontinuierliche Verbesserung der Flugleistungen ermöglichte. Hochfeste Aluminiumlegierungen, Titan, Integralfräsen und optimierte Gießverfahren sind nur einige Beispiele. Der nächste große Entwicklungssprung war durch die Entwicklung der Faserverbundwerkstoffe möglich. Die belastungsgerechte Anordnung von Verstärkungsfasern in einer Kunststoffmatrix eröffnete dem Designer völlig neue Möglichkeiten, z.B. zur Herstellung anisotroper Werkstoffe mit richtungsabhängigen Eigenschaften.

Bahnbrechende Entwicklungen hierzu wurden in Stuttgart Ende der Fünfzigerjahre durchgeführt. In Zusammenarbeit verschiedener Universitätsinstitute und der Akaflieg entstand mit dem „Phönix“ das erste Segelflugzeug aus glasfaserverstärk-

tem Kunststoff. Nicht nur ein geringeres Gewicht, sondern vor allem eine verbesserte aerodynamische Güte öffneten den Weg zu Flugleistungen, die bis dahin undenkbar waren.

Erreichten die ersten Segelflugzeuge nicht einmal Gleitzahlen von 20 (20 Kilometer Gleitstrecke aus 1.000 Metern Höhe), kamen die besten Holzflugzeuge auf Werte von rund 30. Mit der Einführung der Faserverbundwerkstoffe wurden schnell Gleitzahlen von über 40 erreicht. Den Stand der Technik markiert heute das Segelflugzeug ETA, das mit Kohlenstofffasern und optimierten Fertigungsverfahren aus 1.000 Metern Höhe ohne Thermikeinfluss nicht weniger als 60 Kilometer gleiten kann (Gleitzahl 60). Insbesondere die hochsteifen Kohlenstofffasern ermöglichen trotz extrem dünner, aerodynamisch optimierter Profile und einer Spannweite von 30 Metern ausreichende Steifigkeiten, um ein Flattern der Tragflügel bei hoher Geschwindigkeit zu verhindern.

Parallel zu den werkstoff- und fertigungstechnischen Entwicklungen wurden auch die strukturmechanischen Berechnungsmöglichkeiten immer weiter optimiert. Bruchmechanik, Lebensdauervorhersagen, „Post-Failure-Analysis“ oder neue Verfahren wie die Methode der Finite Elemente ermöglichten eine immer bessere Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften und damit eine weitere Gewichtsreduzierung.

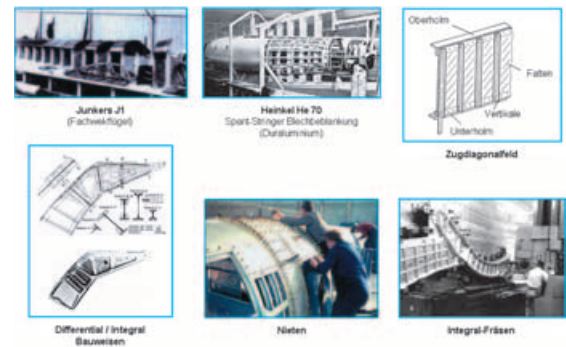
Der konsequente Einsatz der Werkstoffe aus der Luft- und Raumfahrttechnik, wie z.B. Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe, würde auch im Automobilbau zu gewaltigen Gewichtseinsparungen, verbunden mit einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, führen. Man geht davon aus, dass 100 Kilogramm Gewichtsreduzierung zu einer Reduzierung des Verbrauchs um 0,3 bis 0,4 Liter pro 100 Kilometer führt. Studien zeigen, dass ein viersitziger Mittelklassewagen unter Einhaltung aller Sicherheitsstandards mit einem Leergewicht von 500 Kilogramm realisiert werden könnte. Dies ist ein Schlüssel zum Einliterauto. Der Einsatz dieser Werkstoffe in der Großserie scheidet derzeit jedoch noch an den im Vergleich zu Stahl hohen Werkstoffkosten, der aufwändigen Fertigung aber auch an den Recyclingmöglichkeiten. Interessante Entwicklungen gibt es jedoch im Bereich der Nischenfahrzeuge.

Hier ist neben dem Leichtbaupotential auch von großem Interesse, dass die Werkzeugkosten für die Herstellung von Verbundwerkstoffbauteilen im Vergleich zur Stahlbauweise sehr niedrig sind.

Ein interessanter Weg ist daher der selektive Einsatz von Faserverbundwerkstoffen. Dies führt zu einem „Multimaterial-Design“, das auch im Flugzeugbau immer wichtiger wird. (03) zeigt beispielsweise die Vielzahl der Werkstoffe im Airbus A380.

Die neueste Entwicklung im Bereich des Leichtbaus orientiert sich am Vorbild der Natur und ist mit den Schlagworten „Smart Materials“, Adaptive Strukturen oder Multifunktionale Bauweisen beschrieben. Gekennzeichnet sind diese Leichtbauweisen durch sensorische und aktuatorische Eigenschaften, die eine Anpassung der mechanischen Eigenschaften oder der Bauteilform an die jeweiligen Anforderungen ermöglicht. Beispiele sind der adaptive Tragflügel, der dem Vogel nachempfunden ist und eine Anpassung der Struktur an die jeweiligen Flugzustände ermöglicht oder das adaptive Hubschrauberrotorblatt, das vor allem Lärmreduzierung zum Ziel hat.

Ein großes Potential bietet auch die Strukturüberwachung („Structural Health Monitoring“), die darauf beruht, dass Sensoren in die Struktur integriert werden, die Schäden (Risse, Korrosion, Delaminationen) erkennen und rechtzeitig vor einem katastrophalen Versagen der Struktur warnen. Dadurch könnten Sicherheitsfaktoren reduziert und Wartungskosten eingespart werden.



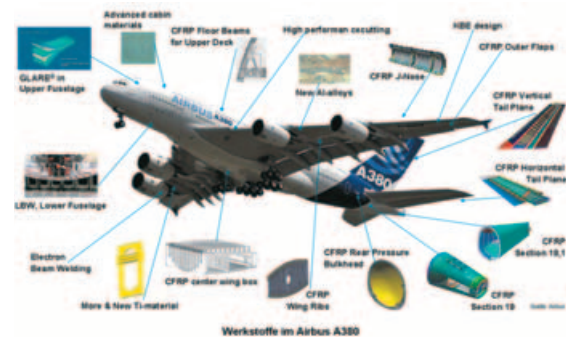
01

Die Geschichte des Flugzeugbaus



02

Leichtbau im Fahrzeugbau



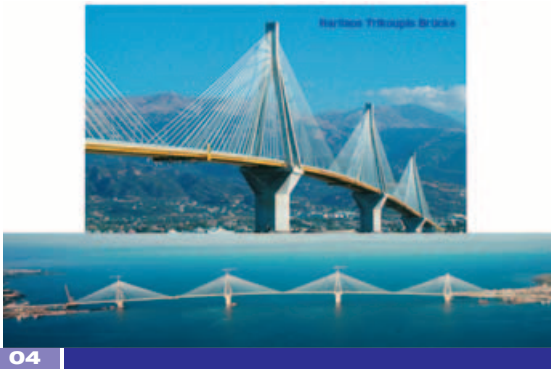
03

Werkstoffe im A380

Adaptive Bauweisen und integrierte Strukturüberwachung sind auch wichtige Entwicklungsziele in der Architektur und im Bauwesen. Völlig neue Funktionalitäten, Erhöhung der Lebensdauer, Reduzierung der Inspektions- und Wartungskosten oder

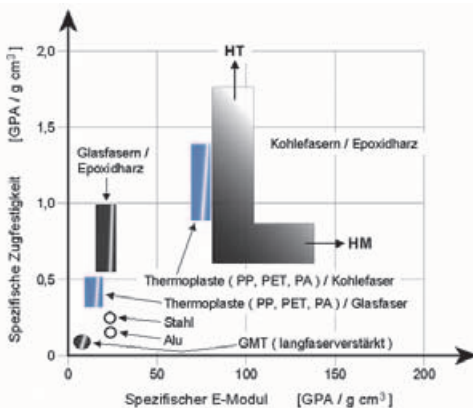
erdbebensichere Bauten sind nur einige Beispiele hierfür. Die Entwicklung des Leichtbaus im Flugzeugbau führt zu verschiedenen Disziplinen, die generell bei der Entwicklung von Leichtbaustrukturen zu berücksichtigen sind:

- Werkstofftechnologie
- Fertigungstechnik
- Konzeption und Konstruktion
- Auslegung und Berechnung
- Fügetechnik
- Wartung
- Reparatur



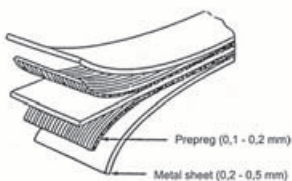
04

Leichtbau in der Architektur



05

Gewichtsspezifische Festigkeit und Steifigkeit verschiedener Werkstoffe



Metall-Faserverbund-Laminare (GLARE)



Glare Rumpfsektion (Quelle Airbus)

06

Metall-Faserverbund-Laminare (GLARE)

einigen Satelliten in einer geostationären Bahn fesselt. Die gewichtsspezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten verschiedener Werkstoffe sind in (05) dargestellt.

Bei Faserverbundwerkstoffen ist jedoch zu beachten, dass die mechanischen Eigenschaften stark von der gewählten Faserorientierung abhängen. Die hohen Zugfestigkeiten und Steifigkeiten werden nur erreicht, wenn alle Fasern „unidirektional“, das heißt parallel in Belastungsrichtung, angeordnet werden. Der Konstrukteur hat damit die Möglichkeit einen Werkstoff so zu gestalten, dass er optimal den Belastungen angepasst ist. Ein hoher Anteil an Fasern in 45-Grad Richtung wird z.B. gewählt, wenn hohe Schubfestigkeiten nötig sind.

Dieser Vergleich der Festigkeit und Steifigkeit kann jedoch nur zu einer ersten Abschätzung des Leichtbaupotentials verschiedener Werkstoffe dienen. In der Praxis sind häufig die Temperaturbeständigkeit oder die Medienbeständigkeit zu berücksichtigen. Auch die Bewertung der Kerbempfindlichkeit, der Schadenstoleranz, des Langzeitverhaltens oder des Energieaufnahmevermögens kann zu ganz anderen Potentialaussagen führen.

So sind Kerben in metallischen Werkstoffen bei rein statischer Belastung relativ unkritisch, da Spannungsspitzen durch eine Plastifizierung abgebaut werden können. Bei dynamischer Belastung können ausgehend von der Kerbe jedoch relativ schnell Risse entstehen, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können. Bei Faserverbundwerkstoffen gilt dagegen, dass statische Belastungen aufgrund des relativ spröden Werkstoffverhaltens eher kritisch sind, dafür aber kein Risswachstum bei dynamischer Belastung zu befürchten ist.

Ein wichtiger strukturmechanischer Aspekt ist die Berücksichtigung von Bauraumbeschränkungen. Steht aus funktionalen Gründen nur ein begrenzter Platz zur Verfügung, kann durchaus Stahl leichter bauen als Aluminium. Generell kann festgestellt werden, dass die Vielfalt der Werkstoffe ständig zunimmt. Neue Entwicklungen aber auch immer weiter steigende Anforderungen führen zu Hybridbauweisen, bei denen verschiedene Aluminiumlegierungen (hochfest, schadenstolerant, schweißbar, korrosionsbeständig) z.B. mit verschiedenen Verbundwerkstoffen (glasfaserverstärkt, kohlenstofffaserverstärkt) kombiniert werden.

ABSTRACT

Lightweight Design has a long history in engineering. Also in aerospace, architecture and automotive industry it has often been the driving force for big development steps. Advanced materials, design concepts or calculation methods offered higher payloads, higher safety or better performance.

In materials technology the competition between new metals and for example composite material leads to optimised hybrid designs. New manufacturing methods based on welding or textile technology offer a further weight reduction and manufacturing time reduction. This is the key for an application of optimised light weight structures also in the automotive industry. Optimised lightweight design requires a multifunctional design, where not only structural but also functional requirements are met. Advanced sand-

wich structures with high stiffness and additional physical functionalities are interesting examples.

Big steps forward have been realised by the development of simulation technologies based on the method of finite elements. They can simulate complex material behaviour as well as manufacturing processes. Together with Computer-Aided Design and optimisation tools mighty tools have been developed during the last years in order to support the engineer in developing optimised lightweight structures.

Nevertheless, lightweight design is a highly interdisciplinary process integrating material science as well as manufacturing technologies, design and calculation.

Auch Hybridwerkstoffe, die die positiven Eigenschaften verschiedener Werkstoffklassen in sich vereinen, finden immer mehr Bedeutung. Ein Beispiel sind „Fibre-Metal-Laminates“ (z.B. GLARE), bei denen Aluminiumfolien und Faserverbundlaminat miteinander kombiniert werden – siehe (06). Das Resultat sind ausgewogene Festigkeiten und Steifigkeiten kombiniert mit guten Langzeiteigenschaften, hoher Durchschlagfestigkeit und gutem Durchbrandverhalten.

Bei den Hybridbauweisen gewinnt auch die Verbindungstechnik eine immer größere Bedeutung. Kleben und neue Schweißverfahren ermöglichen die Herstellung hochintegraler Bauteile, wobei immer auf die Kompatibilität der Werkstoffe geachtet werden muss (z.B. unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten oder Kontaktkorrosion).

Es gibt jedoch keinen werkstoffoptimierten Leichtbau ohne Betrachtung der Fertigungstechnik und des Gestaltleichtbaus. Ist die erforderliche Wandstärke überhaupt herstellbar? Muss man durch die Herstellung mit Reduzierungen der Werkstoffkennwerte rechnen (Beispiel Gussfaktor)? Sind die konstruierten Tiefziehverhältnisse überhaupt ohne Faltenbildung darstellbar?

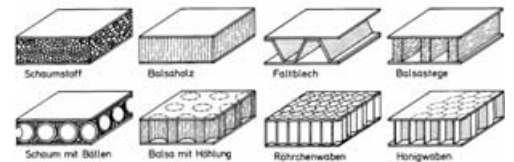
Ein typisches Beispiel für die enge Verzahnung von Werkstofftechnologie und Gestaltleichtbau sind Sandwichstrukturen, die die Herstellung hochsteifer Leichtbaustrukturen mit vielfältigen zusätzlichen Funktionalitäten ermöglichen. Das Prinzip besteht darin, auf einen leichten Kern zwei

steife Decklagen zu kleben. Einige Beispiele sind in (07) dargestellt. Der Kern hat neben der Aufgabe, die beiden Decklagen fest und schubsteif zu verbinden, häufig zusätzliche Anforderungen, wie akustische Isolation oder Wärmedämmung, zu erfüllen. Neue Konzepte wie Faltwabensandwichstrukturen ermöglichen zusätzlich eine automatisierte Fertigung und weitere Funktionalitäten wie eine Belüftbarkeit.

2. Gestaltleichtbau

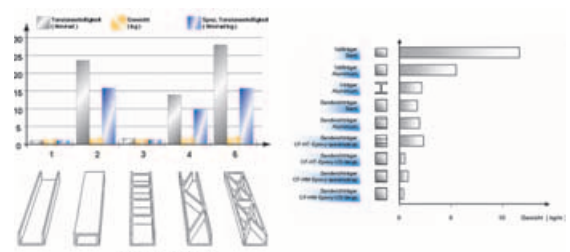
Neben der optimalen Werkstoffauswahl ist die geometrische Gestaltung einer Struktur ausschlaggebend für das Leichtbaupotential. (08) zeigt dies am Beispiel von biegebelasteten bzw. torsionsbelasteten Bauteilen.

Die Formoptimierung ist ein komplexer Prozess, bei dem es z.B. darum geht, zur Erreichung einer hohen Festigkeit möglichst homogene Spannungen im gesamten Bauteil zu erzeugen. Lokale Spannungsspitzen können vor allem bei dynamischer Belastung zu einem vorzeitigen Strukturversagen führen. Zur Erzielung hoher Steifigkeiten ist ein möglichst hohes Trägheitsmoment erforderlich. Bei optimierten Leichtbaustrukturen, die in der Regel sehr dünnwandig gestaltet werden, können aber häufig auch ver-



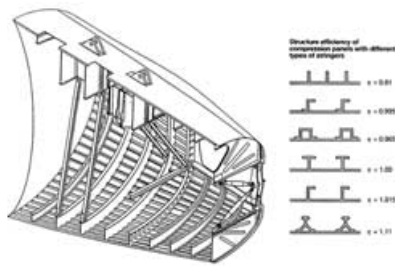
07

Verschiedene Sandwichbauweisen für hochsteife, multifunktionale Leichtbaustrukturen



08

Gewichtsspezifische Eigenschaften verschiedener Strukturen



09

Effektivität verschiedener Versteifungsprofile

schiedene Instabilitätsversagen für die Dimensionierung Ausschlag geben. So kann bei druckbelasteten Profilen bei bestimmten geometrischen Verhältnissen das Biegedrillknicken zum Versagen führen. Bei Biegeträgern kann unter Umständen ein Kippen die Tragfähigkeit deutlich vermindern.

Auch bei den im Flugzeugbau wichtigen versteiften Platten können verschiedenste Instabilitätsformen auftreten. Lokales Beulen wird hierbei sogar häufig toleriert. Am Beispiel der Versteifungsprofile für einen Verkehrsflugzeugrumpf kann die Vielfalt und Effektivität der Gestaltungsmöglichkeiten gut verdeutlicht werden – siehe (09).

Neben den strukturmechanischen Betrachtungen müssen natürlich auch hier wieder fertigungstechnische und funktionale Aspekte berücksichtigt werden. Spätestens bei der Abwägung der Fertigungskosten müssen häufig Kompromisse zwischen optimalem Leichtbau und Bauteilkosten gefunden werden.

In vielen Fällen sind rohrförmige Hohlstrukturen aus strukturmechanischer Sicht ideal, da sie z.B. im Gegensatz zu Profilen unkritischer in Bezug auf lokale Instabilitäten sind und die höchste Torsionssteifigkeit haben. Im Großserienautomobilbau bietet sich aus fertigungstechnischer Sicht dagegen die Verwendung von gepressten Halbschalen an, die in einem zweiten Schritt durch Punktschweißen verbunden werden. Dies ist jedoch aufgrund der notwendigen Überlappungen mit erheblichem Mehrgewicht verbunden.

Auch im Flugzeugbau wären geschlossene Profile strukturmechanisch von Vorteil (z.B. Omega-Profile anstatt T-Profilen). Nachteilig sind jedoch die schlechte Inspizierbarkeit und die Gefahr der Bildung von Kondenswasser. Aus diesen Beispielen wird schon erkennbar, dass der Gestaltleichtbau untrennbar mit den anderen Disziplinen wie der Fertigungstechnik verbunden ist.

3. Fertigungstechnik

Nirgends wird der ständige Wettstreit zwischen optimalem Leichtbau und vertretbaren Kosten deutlicher als bei der Ferti-

gungstechnik. Man kann davon ausgehen, dass ein Kilogramm eingespartes Gewicht im Automobilbau lediglich rund fünf Euro Mehrkosten verursachen darf. Im Flugzeugbau können es schon einige Hundert Euro und in der Raumfahrt sogar einige Tausend Euro sein.

Das Ziel ist daher in jedem Fall eine möglichst kostengünstige, automatisierbare Fertigung, die dennoch das theoretische Leichtbaupotential der eingesetzten Werkstoffe optimal nutzt und möglichst große Gestaltungsmöglichkeiten bietet. Von großem Interesse sind insbesondere Fertigungsverfahren, die die Herstellung hochintegraler, endkonturnaher Bauteile in einem Schritt ermöglichen, um folgende Montage- und Nachbearbeitungsschritte zu minimieren.

Im Bereich der metallischen Bauweisen wurden hierzu beispielsweise interessante Entwicklungen zum Gießen durchgeführt. (10) zeigt beispielsweise eine im Feingussverfahren hergestellte Tür eines Verkehrsflugzeuges. Im Vergleich zur konkurrierenden Differentialbauweise konnte die Zahl der Einzelteile und damit die Montagekosten drastisch reduziert werden.

Man muss jedoch berücksichtigen, dass Integralstrukturen schwieriger zu reparieren und die Werkzeugkosten deutlich höher sind. Daher sind die neuen Entwicklungen im Bereich der Fügetechnik von großer Bedeutung. Laserstrahlschweißen hält im Automobil- und im Flugzeugbau immer mehr Einzug, und neue Verfahren wie das Rührreißschweißen versprechen weitere Verbesserungen im Hinblick auf das Leichtbaupotential.

Ein wichtiges Forschungs- und Entwicklungsthema ist die automatisierbare, großserientaugliche Fertigung von Faserverbundwerkstoffen. Ein viel versprechendes Verfahren besteht darin, die Fasern automatisiert, endkonturnah und belastungsgerecht mit geeigneten Textiltechniken anzuordnen. In einem zweiten Schritt wird die trockene Faserstruktur mit Epoxidharz imprägniert, das anschließend ausgehärtet wird.

Im Flugzeugbau geht es vor allem darum, die Fasern möglichst optimal, im Bedarfsfall auch dreidimensional, abzulegen und



10

Beispiel für eine hochintegrierte Feingussstruktur

hohe Faservolumengehalte zu erreichen. Das Ziel im Automobilbau besteht dagegen darin, jeden einzelnen Arbeitsschritt in Bezug auf die Zykluszeiten zu optimieren, konkurriert man doch mit Fertigungsprozessen, die im Minutenbereich liegen.

Im Bereich der Textiltechnik haben Multi-axialgelege für flächige Halbzeuge, Geflechte für Profile und Hohlstrukturen, Gestricke für komplexe, belastungsgerechte Lokalverstärkungen und Nähtechniken zur Verbindung von einzelnen Textilien sowie zur Realisierung von 3D-Verstärkungen besondere Bedeutung. Typische Textilmaschinen und einige Anwendungsbeispiele sind in (11) dargestellt.

Interessante Entwicklungen zeichnen sich im Bereich der Aushärtung ab. Kommen bisher in erster Linie Umluftöfen zum Einsatz, könnten in Zukunft Mikrowellenhärtungsanlagen zu einer Verkürzung der Aushärtezeit und einer Reduzierung der erforderlichen Energie beitragen.

4. Systemleichtbau

Eine interessante Möglichkeit zur Realisierung optimierter Leichtbaustrukturen besteht darin, neben der reinen Tragfunktion gleichzeitig funktionale Anforderungen zu erfüllen. Beispiele aus dem Flugzeugbau sind der Integraltank oder die aerodynamische Flügelnase, die gleichzeitig zur Erhöhung der Torsionssteifigkeit und zur aerodynamischen Formgebung dient.

Zukünftige Entwicklungen gehen noch wesentlich weiter. Man stellt sich vor, dass Flugzeugrümpfe in Zukunft als Doppelschaler-Sandwich ausgeführt werden. Dies wäre eine strukturmechanisch bessere Lösung als die bisher eingesetzten versteiften Schalen. Zusätzlich könnte jedoch noch weiteres Gewicht eingespart werden, wenn der Sandwichkern zusätzliche Funktionen wie Wärmeisolation oder Schalldämmung übernehmen würde. Ein viel versprechendes Konzept (VESCO – Ventilated Shear Core), das auf den Faltschalenkern basiert, ist in (12) dargestellt.

Ähnliche Prinzipien wären auch für die Architektur zur Herstellung multifunktionaler Fassadenwände vorstellbar, die gleich-

zeitig optische, funktionale und tragende Funktionen übernehmen.

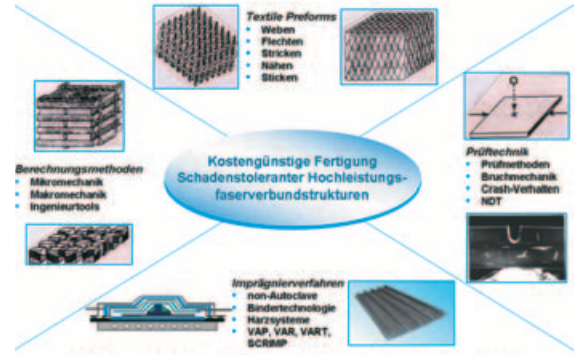
Eng verbunden ist der Systemleichtbau auch mit den multifunktionalen Werkstoffsystemen, mit den Möglichkeiten der Strukturüberwachung oder der Formadaptivität. Schon heute ermöglicht die Regelungstechnik eine adaptive Steuerung der Flugzeugsteuerflächen zur Reduzierung der Böenlasten, wodurch die Struktur leichter ausgelegt werden kann. Ein weiterer Effekt ist die Erhöhung der Lebensdauer.

5. Berechnungsverfahren

Eine optimale Gestaltung von Leichtbaustrukturen setzt voraus, dass man Berechnungsverfahren und Simulationstools zur Verfügung hat, die eine detaillierte und realitätsnahe Beschreibung der werkstoffkundlichen, fertigungstechnischen und strukturmechanischen Effekte ermöglicht.

Zunächst stand die Erarbeitung analytischer Verfahren im Mittelpunkt, die auch heute noch im Vorentwurf eine wichtige Rolle spielen. Nur durch ein grundlegendes theoretisches Verständnis ist es möglich, Sensitivitäten zu beschreiben und verschiedene grundsätzliche Lösungen zu bewerten. Die Entwicklung des Schubfeldschemas, die Beschreibung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens oder die Simulation des Umformverhaltens von Blechen sind nur einige exemplarische Beispiele.

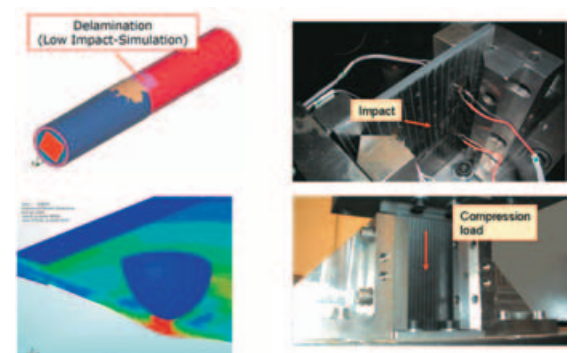
Eine der wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Simulationstools ist jedoch die Methode der Finiten Elemente, die auch die



Textiltechniken zur rationellen Herstellung optimierter Faserverbundstrukturen



Multifunktionales Leichtbaukonzept für einen Verkehrsflugzeugrumpf



Finite Elemente Simulation des Impactverhaltens und der Restfestigkeit einer Faserverbundstruktur

Berechnung der Festigkeit und Steifigkeit komplexer Strukturen ermöglicht. Diese Methode wurde in den letzten Jahren entscheidend weiterentwickelt. Eine detaillierte Modellierung des Werkstoffverhaltens ist ebenso möglich, wie die Simulation fertigungstechnischer Effekte und hochdynamischer Belastungen (Impact und Crash).

In Kombination mit Optimierungsmethoden und CAD-Programmen sind sehr mächtige, integrierte Tools entstanden, die eine umfassende Simulation aller Schritte zur Entwicklung einer Leichtbaustruktur ermöglichen. Herausforderungen bestehen z.B. noch im Bereich der Crashesimulation (insbesondere bei

Faserverbundwerkstoffen) und der Lebensdauervorhersage. **(13)** zeigt die Finite-Elemente-Simulation des Impactverhaltens und der Restfestigkeit einer Faserverbundstruktur.

Alle geschilderten Aspekte verdeutlichen, welche komplexe aber auch faszinierende Rolle der Leichtbau in den Ingenieurwissenschaften spielt. Werkstofftechnologie, Fertigungstechnik, Simulations- und Berechnungsverfahren sowie Konstruktionsmethodik müssen bei der Entwicklung einer Leichtbaustruktur optimal zusammenspielen, um zu funktionsgerechten, aber auch bezahlbaren Lösungen zu kommen.

Klaus Drechsler

DER AUTOR



PROFESSOR DR.-ING. KLAUS DRECHSLER

hat an der Universität Stuttgart Luft- und Raumfahrttechnik studiert und am Institut für Flugzeugbau auf dem Gebiet „Neue Strukturkonzepte für Faserverbundwerkstoffe“ promoviert. Im Anschluss arbeitete er im Forschungslabor der EADS (vormals DaimlerChrysler-Forschung) in Ottobrunn als Leiter der „Prüf- und Verfahrenstechnik“ in vielen Projekten des Automobilbaus und des Flugzeugbaus mit dem Ziel kostengünstiger Bauweisen und Fertigungstechniken für Leichtbaustrukturen. Seit 2001 leitet er das Institut für Flugzeugbau an der Universität Stuttgart. Er ist Past-President der SAMPE Europe (Society for the Advancement of Materials and Process Engineering).

Kontakt

Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-62411, Fax 0711/685-62449
E-Mail: sekretariat@ifb.uni-stuttgart.de, Internet: www.ifb.uni-stuttgart.de

*Um weiter zu kommen als andere,
muss man seine Energie richtig einsetzen.*



Was übrigens nicht nur auf der Straße gilt. Willkommen bei Audi. Dem Erfinder von FSI®

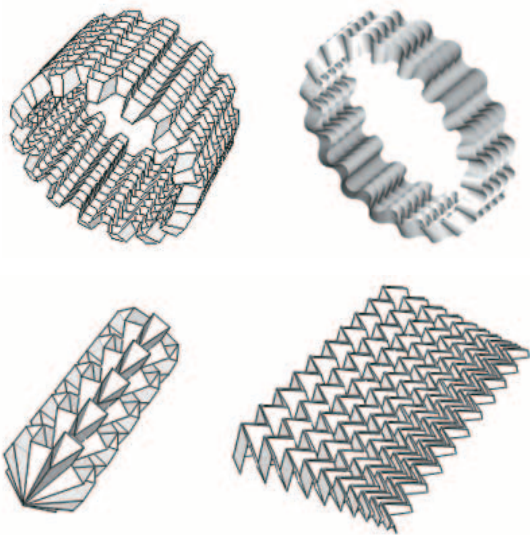
Mit FSI® haben wir eine bahnbrechende Technologie entwickelt, die Automobilen mit Otto-Motor sportliche Fahrleistungen bei niedrigem Verbrauch ermöglicht. Typisch für Audi – wir suchen stets nach ganzheitlichen Lösungen mit hohem innovativen Potenzial. Das gilt nicht nur für unsere technischen Innovationen, sondern auch für unsere Personalentwicklung und Unternehmenskultur.

Ihnen als Berufseinsteiger eröffnen sich dadurch ungewöhnliche Chancen. In welcher Position Sie nach dem erfolgreich absolvierten Hochschulstudium auch bei uns anfangen: Durch eigenständige Arbeit im Team bzw. in Projekten übernehmen Sie vom Start weg Verantwortung und können sich mit Ihren Ideen optimal einbringen. Wo und wie Sie Ihren Weg bei uns am besten beginnen, hängt ganz von Ihren Zielvorstellungen ab. Informieren Sie sich im Detail unter www.audi.de/karriere

Meine Zukunft bei Audi. Absolventen gesucht.



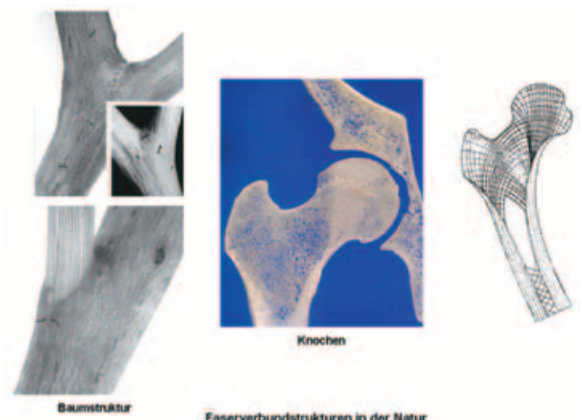
Faserverbundstrukturen – Leichtbau in Natur und Technik



Die Natur verfolgt bei der Gestaltung von Strukturen in der Pflanzen- und Tierwelt immer ein Prinzip: Minimaler Einsatz von Energie und Material bei bestmöglicher Erfüllung der Funktion. Hierzu wurden in Jahrmillionen optimale Werkstoffe, Bauweisen und Geometrien entwickelt, die das Überleben einer Spezies sicherten. Eine weitere Strategie in Flora und Fauna ist die Adaptivität, sprich die Anpassung von Werkstoffeigenschaften und Form an die jeweiligen Belastungen und Umwelanforderungen. Als „Strukturwerkstoff“ kommen in der Natur fast ausschließlich Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz. Diese bestehen aus einer „Matrix“, in die belastungsgerecht „Verstärkungsfasern“ eingebettet werden. Bäume und Pflanzen nutzen die einzigartigen Optimierungsmöglichkeiten durch die Wahl der Ausgangswerkstoffe und der verstärkenden Fasergeometrie ebenso wie Knochen. (01) zeigt einige exemplarische Beispiele.

Das gleiche Prinzip macht man sich bei den faserverstärkten Kunststoffen, Metallen und Keramiken zu Nutze. Fasern mit höchster Festigkeit und Steifigkeit werden entsprechend der äußeren Lasten in eine Matrix eingebettet, die vor allem die Funktion hat, die Fasern zu schützen und in ihrer Form zu halten.

Die wichtigsten Vertreter sind kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, die seit vielen Jahren vor allem im Flugzeugbau eingesetzt werden und aufgrund ihres hohen Leichtbaupotentials zur Steigerung der Flugleistungen und der Sicherheit beige-



01

Faserverbundstrukturen in der Natur

tragen haben. Bei modernen Flugzeugen hat ihr Anteil am Strukturgewicht inzwischen über 50 Prozent erreicht. Sie ermöglichen ein Leichtbaupotential von über 25 Prozent gegenüber Aluminium und 60 Prozent gegenüber Stahl.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Entwicklungen im Bereich der Verstärkungsfasern, der Eigenschaften, der Gestaltung und der Anwendung der Verbundwerkstoffe beschrieben und die Analogie zur Natur dargestellt werden.

1. Fasertechnologie: Spinnseide und Nanotubes

Ein Meister in der Herstellung und Anwendung von Fasern ist die Spinne. Aus Proteinen stellt sie in ihren Spinnrühen Fäden verschiedener Steifigkeit, Bruchdehnung und Oberflächenbeschaffenheit her. Optimal „verwebt“ stellt die Spinne daraus ein perfektes Netz zum Fang von Beute her. Die hochsteifen Fasern garantieren die notwendige Stabilität, die duktilen Fasern mit ihrer hohen Bruchdehnung bremsen die einfliegende Beute ab und verhindern ein Reißen des Netzes, und die klebrigen Fangfäden halten die Insekten fest. Sobald das Netz ausgedient hat, frisst die Spinne die Fäden auf – ein perfektes Recycling und eine optimale Nutzung der eingesetzten Energie.

Es ist kein Wunder, dass es vielfältige Bemühungen gibt, die Spinnseide für technische Anwendungen einzusetzen oder, noch besser, die Fäden künstlich herzustellen. Viel versprechend ist z. B. die Transferierung des Spinnseide-Proteins, das inzwischen identifiziert wurde, in Bakterienzellen, die dadurch Spinnseide produzieren. Interessante Anwendungen könnten sich hierbei z. B. für die Herstellung von medizinischen Nähfäden ergeben.

Eher ernüchternd sind bisher jedoch die Bemühungen, die Fäden für strukturelle Anwendungen im Bereich des Leichtbaus einzusetzen. Wie häufig muss man feststellen, dass ein Material zwar für die Zwecke der Natur optimiert ist und phantastische Eigenschaften besitzt, sich für die Belange technischer Anwendungen dage-

gen als ungeeignet erweist. An die Temperaturbeständigkeit, die Medienbeständigkeit, das Langzeitverhalten oder die Konstanz der Eigenschaften werden z. B. an Verstärkungsfasern für Hochleistungsverbundwerkstoffe Anforderungen gestellt, die von der Spinnseide aber auch von Naturfasern wie Hanf oder Sisal kaum zu erfüllen sind.

Für Anwendungen im Leichtbau ist die Kohlenstofffaser unschlagbar. Sie wird in einem aufwändigen Prozess durch die Pyrolyse von Polyacrylnitril oder Pech gewonnen und bietet je nach Prozessparameter höchste Festigkeit (HT-Fasern), höchste Steifigkeit (HM-Fasern) oder ausgewogene Eigenschaften (IM-Fasern). Die gewichtsspezifischen Kennwerte verschiedener Fasern sind in **(02)** dargestellt.

Von Interesse sind neben den mechanischen auch die funktionalen Eigenschaften, wie gute Strom- und Wärmeleitung sowie die sehr geringe Wärmeausdehnung. In Zukunft könnten diese Eigenschaften noch um Größenordnungen durch Fasern auf der Basis von Carbon-Nanotubes (CNT) geschlagen werden **(03)**. Diese auf den Fullerenen basierenden Nanowerkstoffe besitzen Eigenschaften, die dem theoretischen Potential der Kohlenstoffverbindung sehr nahe kommen. Ist die Herstellung der Nanopartikel schon aufwändig und teuer, gestaltet sich die Fertigung endloser Fasern, wie sie für die Verbundwerkstofftechnologie

ABSTRACT

In nature all structures are optimised in material and design in order to save energy in fulfilling the specific requirements.

In most cases multifunctional composite materials are the basis, because they offer the highest lightweight potential and the best possibilities for function integration.

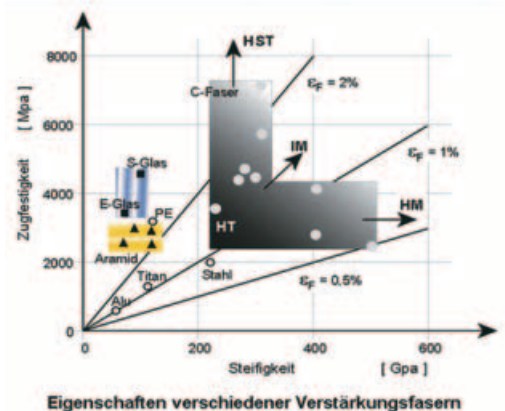
It is therefore no wonder that this material class, mainly based on carbon fibres, finds more and more interest in aerospace and automotive applications.

Their weight specific properties are very high and can be adjusted according to the structural requirements in a wide range. New manufacturing technologies based on textile technologies allow not only cost reduction and automated processing but also further improvement of mechanical properties by a three-dimensional fibre reinforcement.

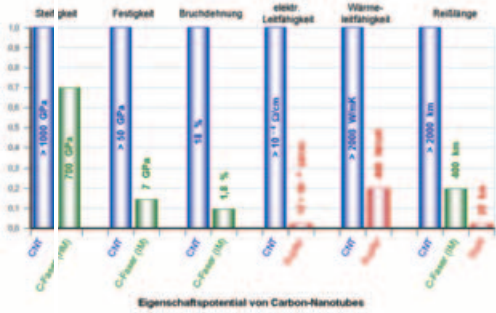
Another development with a strong link to nature are sandwich structures. A very efficient design is based on honeycomb cores, allowing the realisation of very stiff lightweight structures. Nevertheless, their design, based on closed hexagonal cells, which is optimised for the needs of the bees, is not the best solution for all engineering requirements.

Newly developed foldcore structures can be, for example for future aircraft fuselage concepts, the much better and more affordable solution.

This example shows, that not always bionic structures are the best solution for engineering requirements, but it is always of interest to study the design of nature and to follow its strategies for optimisation, adaptivity and multifunctionality.



Eigenschaften verschiedener Verstärkungsfasern



03

Eigenschaftspotential von Carbon-Nanotubes

erforderlich wären, als größte technologische Herausforderung. Durch das sogenannte Elektrospleinverfahren können beispielsweise bisher lediglich Längen von einigen Zentimetern erreicht werden. Und diese „Carbon-Nanogarne“ liegen in ihren Eigenschaften noch weit hinter den Werten der CNT zurück.

Aber auch als Füllstoff in der Polymermatrix kohlenstofffaserverstärkter Verbundwerkstoffe leisten die Nanopartikel Erstaunliches. Nur geringe Volumenanteile reichen aus, um eine Eigenschaftsmodifikation um mehrere Größenordnungen zu erreichen. Beispiele sind die elektrische Leitfähigkeit, die Viskosität, die Zähigkeit oder das Brandverhalten.

2. Gestaltung und Fertigung: Strukturoptimierung und Textiltechnik

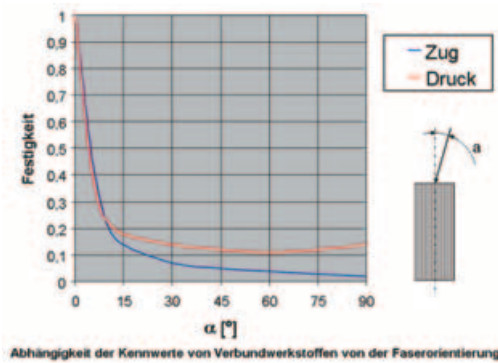
Gute mechanische Eigenschaften der Fasern sind jedoch nur eine Voraussetzung für gute mechanische Eigenschaften und ein hohes Leichtbaupotential. Noch wichtiger ist die belastungsgerechte Anordnung der Fasern in der Matrix. (04) zeigt die Abhängigkeit der Festigkeit eines Verbundwerkstoffs von der Faserorientierung.

In der Natur wird dies von jeher beherzigt. Die Fasern in Pflanzen und Knochen liegen in aller Regel entlang der Hauptspannungsrichtungen und können so die äußeren Belastungen optimal tragen. Auch die Ana-

lyse der Form natürlicher Konstruktionen verblüfft immer wieder, lässt sich doch zeigen, dass diese so optimiert sind, dass Spannungsspitzen vermieden werden und alles Material zum Tragverhalten beiträgt. (05) zeigt einige Beispiele.

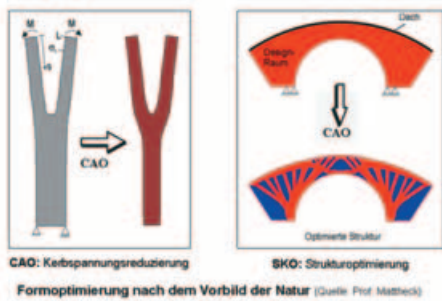
Am Forschungszentrum Karlsruhe wurden von Professor Mattheck auf Basis des Studiums natürlicher Strukturen verschiedene Berechnungsverfahren entwickelt, die eine Formoptimierung durch die Simulation des bionischen Wachstums bzw. eine Optimierung der Faserorientierung durch eine iterative Anpassung der Verstärkungsgeometrie an die Hauptspannungsrichtung ermöglicht (06).

Bei der Herstellung von Faserverbundstrukturen musste man lange Zeit einen Kompromiss zwischen Fertigbarkeit und mechanischen Eigenschaften eingehen. Eine optimale Verstärkungsgeometrie war nur bei einfachen Geometrien oder Lastfällen möglich, da als Halbzeug nur mit Harz vorimprägnierte unidirektionale Kohlenstofffaserlagen zur Verfügung stan-



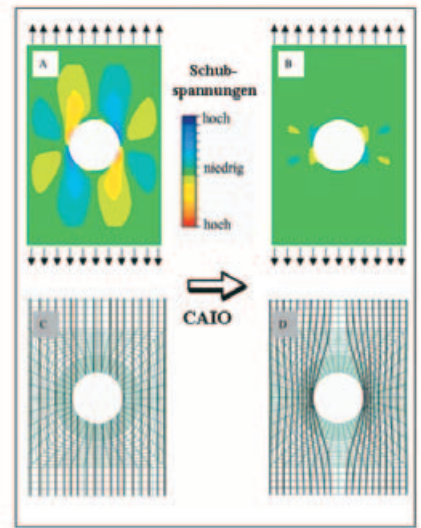
04

Abhängigkeit der Kennwerte von Verbundwerkstoffen von der Faserorientierung



Formoptimierung nach dem Vorbild der Natur (Quelle: Prof. Mattheck)

05



CAIO: Faserausrichtung nach Hauptspannungslinien
Iterative Optimierung der Verstärkungsgeometrie von Verbundwerkstoffen (Quelle: Prof. Mattheck)

06

Iterative Optimierung der Verstärkungsgeometrie von Verbundwerkstoffen (Quelle: Prof. Mattheck)

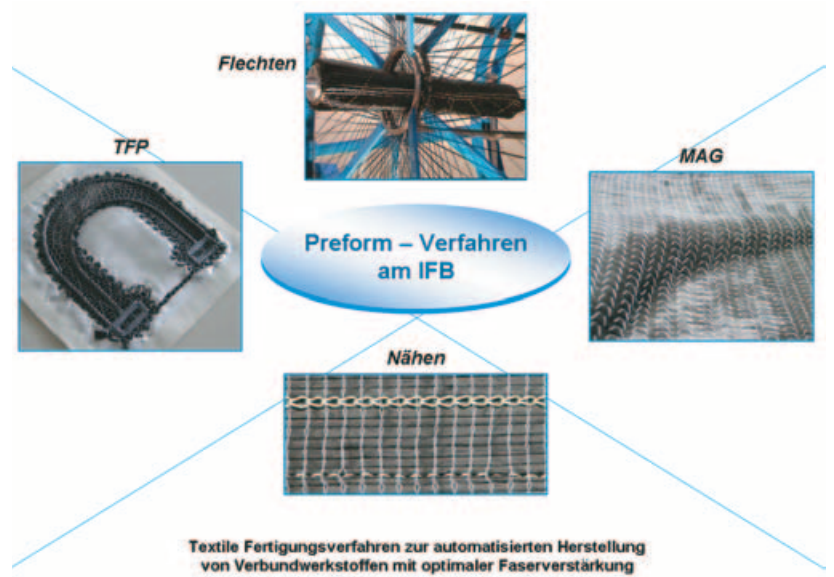
den. Um die Konstruktion und die Fertigung zu vereinfachen, werden die parallel in einer Matrix angeordneten Fasern außerdem nur in den Verstärkungsrichtungen 0, 90 und +45 Grad eingesetzt.

Eine Automatisierung dieser „Prepregtechnologie“ erfolgte in den letzten Jahren durch Tapelegeroboter, die jedoch nur für die Herstellung einfach geformter, großflächiger Strukturen wie Hautfelder geeignet sind. Erst der Einsatz in den letzten Jahren entwickelter textiler Fertigungsverfahren wie Sticken, Nähen oder Flechten ermöglicht bei hoher Produktivität und Automatisierbarkeit belastungsgerechte und endkonturnahe Verstärkungsgeometrien nach dem Vorbild der Natur. Zwei typische Beispiele sind das roboterunterstützte Rundflechten und das auf dem Stickprozess basierende TFP (Textile Fibre Placement). Die Anlagentechnik und einige Anwendungsbeispiele sind in (07) dargestellt.

(08) zeigt am Beispiel eines Fahrrad-Brakeboosters das Leichtbaupotential der neuen Technologien. Das gestickte Bauteil ist gegenüber der Aluminiumstruktur und dem konventionell gefertigten Faserverbundbauteil nicht nur leichter, sondern auch um den Faktor drei steifer.

Von besonderem Interesse ist die Möglichkeit, durch textile Fertigungsverfahren wie dem Nähen, eine dreidimensionale Faserverstärkung zu realisieren. Gegenüber den konventionellen Laminaten zeichnen sich die 3D-verstärkten Verbundwerkstoffe durch eine viel höhere Schadenstoleranz und strukturelle Integrität aus.

Die Herstellung der Faserstruktur ist natürlich nur der erste Schritt der Fertigung von Faserverbundwerkstoffen. Im Anschluss erfolgt die Imprägnierung mit der Matrix, z.B. in einem Harzinjektionsverfahren, und die Aushärtung in einem Umluftofen. Zur Erzielung eines hohen Faservolumenanteils wird häufig ein zusätzlicher Überdruck in einem Autoklaven aufgebracht. Neueste Entwicklungen zielen auf die Nutzung der Mikrowellentechnologie zur schnellen und energieoptimierten Aushärtung der Polymermatrix.



07

Textile Fertigungsverfahren zur automatisierten Herstellung von Verbundwerkstoffen mit optimaler Faserverstärkung

Während in der Natur „Hochleistungs-Biopolymere“ wie Cellulose oder Lignin als Matrixwerkstoff zur Stützung der Verstärkungsfasern zum Einsatz kommen, verwendet man bei den Faserverbundwerkstoffen meistens duromere oder thermoplastische Matrixsysteme. Gefordert

Aluminium	Kohlefaser - TFP	CF-Gewebe Prepreg
Gewicht: 52 g	Gewicht: 28 g	Gewicht: 29 g
Steifigkeit absolut: 116 N/mm	Steifigkeit absolut: 180,0 N/mm	Steifigkeit absolut: 65 N/mm
Steifigkeit spezif.: 2,26 N/mm/g	Steifigkeit spezif.: 6,4 N/mm/g	Steifigkeit spezif.: 2,25 N/mm/g



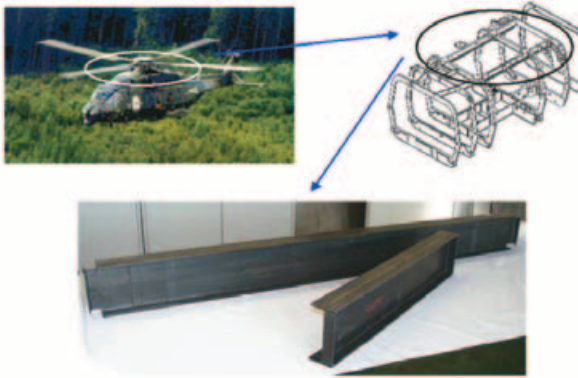
Fahrrad-Brakebooster aus Metall, konventionellen und gestickten Verbundwerkstoffen



TFP am Beispiel Mountain Bike Brake Booster

08

Fahrrad-Brakebooster aus Metall, konventionellen und gestickten Verbundwerkstoffen



Gestickter Rumpfspant des Transporthubschraubers NH90

09

Gestickter Spant einer Hubschrauberzelle

sind neben guten mechanischen Eigenschaften häufig auch eine Beständigkeit gegenüber verschiedensten Medien oder gute FST-Eigenschaften (geringe Rauchentwicklung, keine toxischen Gase bei der Verbrennung).

Generell liegt das Leichtbaupotential kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe bei optimaler Gestaltung und Fertigung bei rund 25 Prozent im Vergleich zu Alumi-



Textiles Struktur- und Fertigungskonzept für energieabsorbierende Automobil-Crashelemente (Quelle DaimlerChrysler)

10

Textiles Struktur- und Fertigungskonzept für energieabsorbierende Automobil-Crashelemente

nium und bei rund 60 Prozent im Vergleich zu Stahl. Besonders effektiv sind die Verbundwerkstoffe, wenn energieabsorbierende Eigenschaften oder gutes Langzeitverhalten bei dynamischer Belastung gefordert sind. Dreidimensional verstärkte Verbundwerkstoffe erreichen ein Energieaufnahmevermögen von bis zu 120 Kilojoule pro Kilogramm. Das Potential sinkt

bei höheren Temperaturen, insbesondere in feuchter Umgebung, da die Polymermatrix durch Wasseraufnahme degradiert. Für Hochtemperaturanwendungen kommen anstatt polymerer Werkstoffe metallische oder keramische Matrixsysteme zum Einsatz.

3. Faserverbundstrukturen in der Technik

Erste Anwendungen der Textiltechnik für Faserverbundwerkstoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik sind beispielsweise die Druckkalotte des Airbus A 380, die aus vernähten „Multiaxialgelegen“ besteht, sowie gestickte Spante der Zellenstruktur des Transporthubschraubers NH 90 (09). Viele weitere Strukturbauteile sind derzeit in der Entwicklung.

Die Technologie ist durch das hohe Automatisierungspotential auch ein Schlüssel für die Nutzung des Leichtbaupotentials der Faserverbundwerkstoffe in der Automobilindustrie. Ein Beispiel, wenn auch noch im Bereich der Nischenfahrzeuge, sind die energieabsorbierenden Crashelemente des McLaren-Mercedes SLR. Diese bestehen aus verschiedenen, miteinander vernähten Textilverstärkungen, die im RTM-Verfahren (Resin-Transfer-Molding) mit Harz getränkt werden. Die einzelnen Fertigungsschritte sind in (10) dargestellt. Bei einer Optimierung aller Fertigungsschritte sind Taktzeiten von unter zehn Minuten durchaus realistisch. Damit ist der Weg zu größeren Stückzahlen geöffnet.

Die integrale Textilverstärkung ist nicht nur bezüglich der statischen Lasten optimiert. Sie ermöglicht gleichzeitig eine gute strukturelle Integrität und selbst beim kritischen Schrägaufprall eine hohe gewichtsspezifische Energieaufnahme.

4. Sandwichstrukturen: Honigwaben und Origami

Besonders steife und leichte Strukturen können in der so genannten Sandwichbauweise realisiert werden. Das Prinzip beruht darauf, dass steife Decklagen auf einen leichten Kern aufgeklebt werden, der vielfältige Aufgaben hat (11). Er muss nicht nur schubsteif die Decklagen verbinden

und auf Abstand halten, häufig wird von ihm auch eine gute Wärmeisolierung, Schalldämmung und Impactfestigkeit verlangt.

Typische Kernwerkstoffe sind Polymer-schäume oder auch Balsaholz. Wenn ein besonders hohes Leichtbaupotential gefordert ist, kommen jedoch fast ausschließlich Honigwaben zum Einsatz. Diese hexagonalen Kammerstrukturen dienen in der Natur der Biene als perfektes, vielfältig nutzbares System zur Lagerung des Honigs und zur Aufzucht der Brut. Auch strukturellmechanisch sind die Wabenstrukturen höchst effizient. Sie bieten durch die beulsteifen Strukturelemente bei geringstem Gewicht (typischerweise liegt die Dichte bei 30 bis 60 Kilogramm pro Kubikmeter) ein Höchstmaß an Druckfestigkeit und Schubsteifigkeit. Aufgebaut sind sie aus Aluminiumfolien oder so genanntem Nomex-Papier (mit Phenolharz beschichtetes Aramidpapier).

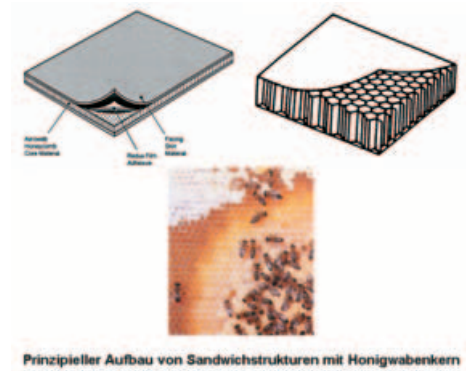
Diese Folien werden linienförmig verklebt und in einem aufwändigen Prozess expandiert. Dieser Prozess dauert relativ lange und ermöglicht keine kontinuierliche Fertigung, wodurch die Kernstrukturen relativ teuer sind. Für manche Anwendungen in der Technik wirkt sich die für die Biene so interessante Kammerstruktur außerdem nachteilig aus. Bei einem Einsatz der Waben in einem zukünftigen Leichtbaurumpf für Verkehrsflugzeuge würde in den nach dem Verkleben mit den Decklagen abgeschlossenen Kammern Kondenswasser entstehen, das mit der Zeit zu einem Mehrgewicht führt und Korrosion begünstigt.

Dies ist wieder ein Beispiel dafür, dass die Natur nach anderen Gesichtspunkten als das Ingenieurwesen optimiert und eine Übertragung der Philosophien eins zu eins nicht unbedingt zielführend ist.

Für Anwendungen in der Technik wurde in den letzten Jahren ein neues Konzept entwickelt, das ebenfalls auf dünnen Metall- oder Papierfolien basiert, die aber in einem Faltprozess in die dreidimensionale Kontur gebracht werden. Die Kerne nennt man daher Falzwaben. Einige Beispiele sind in

(12) dargestellt. Im Gegensatz zu den Honigwaben können die Falzwaben in einem kontinuierlichen Prozess kostengünstig hergestellt werden. Weitere Vorteile sind die viel größere Vielfalt an Geometrien zur Anpassung der mechanischen Eigenschaften an die jeweiligen Anforderungen sowie die Möglichkeit, ähnlich der Origamikunst, ohne Nachbearbeitung komplexe Geometrien herstellen zu können. Die Druck- und Schubkennwerte können in einem weiten Bereich variiert werden und überschreiten teilweise das Niveau der Honigwaben.

Da die Falzwabenstrukturen offen und damit belüftbar beziehungsweise drainagefähig sind, besteht keine Gefahr des Kondenswassereinschlusses. Sie sind daher eine viel versprechende Basis für zukünftige Verkehrsflugzeugrumpfe, die neben einem geringeren Gewicht auch das Potential für mehr Passagierkomfort durch geringeren Kabinenlärm und angenehmeres Raumklima bieten.



Prinzipieller Aufbau von Sandwichstrukturen mit Honigwabenkern

Prinzipieller Aufbau von Sandwichstrukturen mit Honigwabenkern



Beispiele für Falzwaben-Sandwichkerne

Beispiele für Falzwaben-Sandwichkerne

5. Smart Structures: Sensor- und Aktuatorintegration in Verbundwerkstoffe

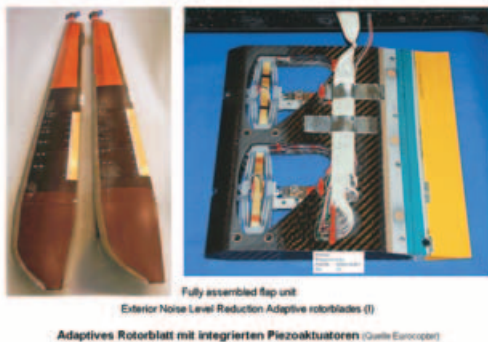
Auch wenn ein Ingenieur ein Bauteil nach den Regeln der „Bionik“ optimal gestaltet und ausgelegt hat - eines haben natürliche Strukturen dennoch voraus. Sie sind adaptiv und können ihre Form oder ihre Eigenschaften den jeweiligen Anforderungen anpassen. Muskeln, die Substanz aufbauen, wenn sie besonders belastet werden; Bäume, die in die Form des geringsten aerodynamischen Widerstandes wachsen, um ihre Belastung zu reduzieren;



Integrierter Bragg-Gitter-Sensor zur Strukturüberwachung in einem Faserverbundlaminat

13

Integrierter Bragg-Gitter-Sensor zur Strukturüberwachung in einem Faserverbundlaminat



14

Adaptives Rotorblatt mit integrierten Piezoaktuatoren

Knochen, die nach einer Überlastung wieder zusammenwachsen und sich quasi selbst reparieren, sind nur einige Beispiele.

Erforderlich ist für diese „Intelligenz“ in jedem Fall eine Sensorik, eine Aktuatorik und eine Signalverarbeitung. Seit einigen Jahren versucht man, diese Philosophie auch für Leichtbaustrukturen in der Technik umzusetzen und Smart Structures beziehungsweise adaptive Strukturen zu entwickeln. Inzwischen stehen die erforderlichen Basistechnologien auch zur Verfügung.

Als Sensoren eignen sich beispielsweise Bragg-Gitter-Sensoren, spezielle Lichtleitfasern, mit denen sehr genau lokale Dehnungen gemessen werden können, oder piezoelektrische Fasern, die Dehnungen in Spannungen umwandeln. Die entsprechenden Signale können von leistungsfähigen Computern verarbeitet und interpretiert werden. Hierbei geht es darum zu erkennen, ob in der Struktur ein bleibender Schaden, z.B. durch eine Schlagbeanspruchung, entstanden ist, der zu einem Versagen des Bauteils führen kann. Die Technologie wird als „Health-Monitoring“ bezeichnet.

Piezoelektrische Keramiken können auch als Aktuatoren eingesetzt

werden. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung entstehen sehr schnell steuerbare, jedoch sehr kleine Dehnungen.

Wesentlich effektivere Aktuatoren sind Formgedächtnislegierungen (Shape-Memory Alloys), die ober- bzw. unterhalb einer bestimmten „Schalttemperatur“ unterschiedliche Formen annehmen und ihre Steifigkeit stark ändern. Die Dehnungen können hierbei sehr groß sein, die Schaltgeschwindigkeit ist jedoch im Vergleich zu Piezos sehr gering, da die notwendige Gefügeänderung durch eine Temperaturänderung vonstatten geht, die nur relativ langsam, z.B. durch eine Widerstandsheizung, zu realisieren ist.

Prädestiniert zur Realisierung von „Smart Structures“ sind Faserverbundwerkstoffe, da in diese die Sensoren und Aktuatoren perfekt integriert werden können. (13) zeigt beispielhaft eine einlamierte Bragg-Gitter-Faser in einem Kohlenstofffaserlaminat.

Insbesondere Luftfahrtingenieure sind seit jeher fasziniert vom Vogelflug und versuchen die strukturellen und aerodynamischen Konzepte der Vögel zu kopieren. Nicht nur die perfekte „Leichtbaustruktur“ dient als Vorbild, sondern auch die adaptive Aerodynamik, die eine Anpassung des Flügelprofils an die jeweiligen Flugzustände (Start, Landung, Reiseflug bei sich ändernden Fluggewichten) ermöglicht.

Geringerer Treibstoffverbrauch, bessere Flugleistungen, reduzierter Lärm oder höherer Komfort von Hubschraubern oder Verkehrsflugzeugen wären durch adaptive Flügel oder Rotorblätter möglich. Weit ist man hiervon auch nicht mehr entfernt, wie das Beispiel eines adaptiven Rotorblattes zeigt, das vor kurzem in einem ersten Erprobungsflug seine Leistungsfähigkeit demonstrierte (14). Eine schnelle, „höherharmonische“ Verwindung des Rotorblattes während der Rotation durch piezoelektrische Aktuatoren verbessert die Aerodynamik des gesamten Rotorblattsystems und reduziert z.B. den Lärm, der entsteht, wenn das

nachfolgende Blatt in die Wirbel des vorlaufenden Blattes schlägt.

Die Entwicklungsarbeiten haben aber gezeigt, dass eine Integration der Piezoaktuatoren in die Faserverbundstruktur in diesem Fall nicht optimal ist. Stattdessen kommen piezoelektrisch angetriebene Endkantenklappen zum Einsatz, die durch das Ausschlagen nach oben oder unten die Verwindung des Rotorblattes hervorrufen.

Dieses Beispiel zeigt wieder, dass es für die Entwicklung von Leichtbaustrukturen zwar immer sehr interessant ist, sich vom Beispiel der Natur inspirieren zu lassen, eine ingenieurwissenschaftliche Vorgehensweise, die auch Randbedingungen wie Werkstoff- oder Fertigungskosten, Wartbarkeit oder Reparierbarkeit berücksichtigt, aber dennoch zu anderen Lösungen kommen kann. •

*Klaus Drechsler, Ingo Karb, Rainer Kehrlé,
Volker Witzel*

DIE AUTOREN

PROF. DR.-ING. KLAUS DRECHSLER

hat an der Universität Stuttgart Luft- und Raumfahrttechnik studiert und am Institut für Flugzeugbau auf dem Gebiet „Neue Strukturkonzepte für Faserverbundwerkstoffe“ promoviert. Im Anschluss arbeitete er im Forschungslabor der EADS (vormals DaimlerChrysler-Forschung) in Ottobrunn als Leiter der „Prüf- und Verfahrenstechnik“ in vielen Projekten des Automobilbaus und des Flugzeugbaus mit dem Ziel kostengünstiger Bauweisen und Fertigungstechniken für Leichtbaustrukturen. Seit 2001 leitet er das Institut für Flugzeugbau an der Universität Stuttgart.



INGO KARB

hat an der Universität Kaiserslautern Maschinenbau studiert und ist derzeit wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeugbau. Er leitet das BMBF-Projekt BIOTEX, in dem Strukturkonzepte aus der Natur mit neuartigen Fertigungsverfahren, wie der Textiltechnik für Faserverbundwerkstoffe, kombiniert werden. Ziel ist die kostengünstige Herstellung von optimierten Leichtbaustrukturen.



RAINER KEHRLÉ

hat an der Universität Stuttgart Luft- und Raumfahrttechnik studiert und ist derzeit wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeugbau. Er leitet außerdem das Forschungsprojekt „Faltwaben-Sandwichstrukturen“ und ist Geschäftsführer der Spin-off Firma FOLDCORE.



VOLKER WITZEL

hat an der Universität Stuttgart Luft- und Raumfahrttechnik studiert und ist derzeit wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeugbau. Er leitet das europäische Projekt I-TOOL, in dessen Rahmen ein integriertes Simulationstool zur Berechnung textiltechnisch verstärkter Faserverbundwerkstoffe entwickelt wird.



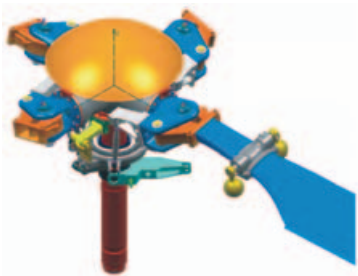
Kontakt:

Universität Stuttgart, Institut für Flugzeugbau, Pfaffenwaldring 31,
70569 Stuttgart, Tel. 0711/685-62411, Fax 0711/685-62449

E-Mail: sekretariat@ifb.uni-stuttgart.de, Internet: www.ifb.uni-stuttgart.de

Leichtbau im Hubschrauber

unter Berücksichtigung multifunktionaler Eigenschaften



Was bedeutet eigentlich Leichtbau im Hubschrauber? Es handelt sich hier um ein Zusammenwirken mehrerer Fachgebiete, die die vielen speziellen Funktionen im Hubschrauber beschreiben, um ein möglichst geringes Strukturgewicht zu erzielen. Im Idealfall können ganze Baugruppen entfallen, deren Eigenschaften durch eine erhöhte Multifunktionalität in andere Strukturen integriert werden. Unterschiedliche Probleme sind zu lösen: Festigkeit, Lebensdauer unter dynamischen Lasten, Schadenstoleranz nach Schlagbeanspruchung, Steifigkeit, Vibrationen, Frequenzen und Dämpfung, Crashfähigkeit der Zellenstruktur, Außenlärm, Innenkomfort sowie geringe Betriebs- und Herstellkosten.

1. Einführung

Hier soll die Evolution des Leichtbaus im Hubschrauber anhand der Entwicklung von Rotorsystemen und Zellenstrukturen bei Eurocopter Deutschland (ECD) gezeigt werden. Ähnliche Entwicklungen finden wir z.B. auch in England, Frankreich, Italien und USA. Die frühen Entwicklungen der späten 50er Jahre bei MBB zeigen eine intensive Verbindung zum Forschungsstandort Stuttgart, wurden doch dortige Ergebnisse der Faserverbundentwicklung in die Konstruktion der Rotorblätter eingebracht. Die Serienausführung des Helitrainers Bölkow BO 102, dessen Vorführgerät Mitte 1959 fertig gestellt wurde, besaß einen Einblattrotor mit Gegengewicht. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass bei diesem Projekt zum ersten Male Rotorblätter aus Glasfaserverbundwerkstoff serienmäßig ohne Beanstandungen über längere Betriebszeiten verwendet werden konnten.

Damit begann der Einsatz von Faserverbundblättern für die Rotoren der Bölkow-Hub-

schrauber BO 103, BO 105, BO 106 und BK 117. Die von Hütter und Hänle entwickelten Schlaufenkrafteinleitungen wurden damals übernommen und weiterentwickelt. Der Leichtbau-Effekt ergab sich durch konstruktive Vereinfachungen aufgrund der Einsparung der gelenkigen Anschlüsse. Damit besitzen die Faserverbundblätter eine wesentlich erhöhte Lebensdauer gegenüber den Metallblättern.

Der Startschuss zur Entwicklung der BO 105 fiel 1963, der Erstflug erfolgte am 17.2.1967. Das herausragende Merkmal dieses Hubschraubers, von dem etwa 1.500 Einheiten gebaut wurden, ist der gelenklose Rotor mit Titanrotorkopf und GFK-Blättern. Diese Blätter haben eine lange Lebensdauer und integrieren die Funktionen des Schlag- und Schwenkgelenkes im biegeelastischen Blatthals. (Schlagen bedeutet eine Blattbewegung nach oben und unten, Schwenken eine Bewegung nach vorne und hinten.) Hier wird die Multifunktionalität des Rotorblattes deutlich. Bei einer konsequenten Weiterentwicklung

blieb noch die Aufgabe, die Drehlager zur Blattverstellung zu ersetzen und als Drillgelenk in das Blatt zu integrieren. Diese Aufgabe wurde mit der Blattentwicklung der EC 135 gelöst. Damit wurde auch der etwa 60 kg schwere Titanrotorkopf überflüssig. Inzwischen, nach dem Erstflug am 15.2.1994, wurden bereits mehr als 500 Hubschrauber ausgeliefert und über 2.000 Blätter gefertigt.

Der multifunktionale Leichtbau kann auch im Zellenbau durch die Verwendung von Faserverbunden zur Anwendung kommen. Hier werden die Forderungen bezüglich Crashesicherheit in Leichtbaustrukturen eingearbeitet. Auch hier konnte das Wissen der Stuttgarter Forschungsinstitutionen genutzt werden. Die intensive Zusammenarbeit mit Herrn Kindervater beim DLR führte zu crashtoleranten Leichtbauweisen, die in die Hubschrauber TIGER, ALH und NH90-Zelle eingeführt wurden.

Die crashtolerante kohlefaserverstärkte Sandwichstruktur bewährte sich im Crashversuch der NH90 Zelle. Der Erstflug dieses militärischen Transporthubschraubers NH90 fand am 18.12.1995 statt. Die Eigenschaften der Hubschrauberstrukturen werden in den folgenden Kapiteln anhand von Beispielen der Entwicklung gezeigt. Dabei ist die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen von großer Bedeutung.

2. Faserverbunde als wichtigster Leichtbauwerkstoff im Hubschrauber

In (01) sind die mechanischen Eigenschaften von unidirektionalen Laminaten mit einem Faservolumenanteil von 60 Prozent dargestellt. Sie stellen die werkstoffseitige Basis des Leichtbaus dar. Bei den auf das Gewicht bezogenen Eigenschaften erkennt man, dass die spezifische Zugfestigkeit bedeutend höher ist als die der Metalle und von Holz. Die Werte für die Faserverbunde sind hingegen annähernd gleich hoch. Dies gilt jedoch nicht für die Druckfestigkeit, haben doch Aramidfaser- und hochmodulige Kohlefaserverbunde nur eine geringe Druckfestigkeit. Nur bei Glasfasern und hochfesten Kohlefaserverbunden entspricht die Druckfestigkeit der Zugfestigkeit.

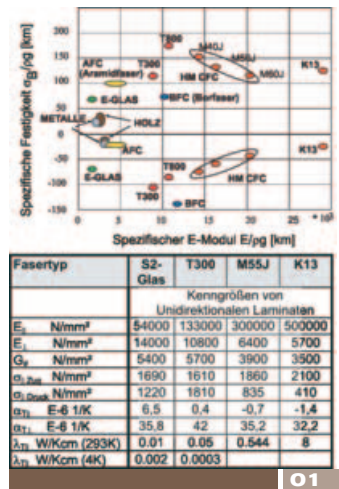
Die absoluten Steifigkeiten sind stark abhängig von der Faserart, bei Glasfaserverbunden sind sie wesentlich geringer als z. B. bei dem K13 Kohlefaserverbund. Der Elastizitätsmodul des K13-Verbundes ist mit 500.000 N/mm^2 mehr als doppelt so hoch wie der von Stahl. Der Wärmeausdehnungskoeffizient sinkt mit der Erhöhung der Steifigkeit und beträgt $-1,4 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ bei dem K13-Verbund in Faserrichtung. Beachtenswert ist die außerordentlich hohe Wärmeleitfähigkeit des K13-Verbundes. Gerade für Strukturen unter hoher Temperaturbelastung ist eine hohe Wärmeleitung vorteilhaft. Die dynamische Festigkeit der Faserverbunde ist sehr hoch und entsprechend flach verlaufene Wöhlerkurven. Weiterhin ergeben Kerben nur geringe Abminderungen bei der Festigkeit.

Ein Nachteil der Faserverbunde gegenüber Metallen besteht in der Empfindlichkeit gegenüber Schlagbelastung. Außerdem können hohe Temperaturen und Feuchte die Steifigkeit und Festigkeit deutlich mindern.

3. Die Entwicklung der Rotoren

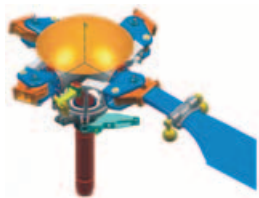
Bei der BO 105 kam der weltweit erste gelenklose Serienrotor zum Einsatz. Dessen Weiterentwicklung führte zum Rotor der BK 117. Dieser Hubschrauber wurde gemeinsam von MBB und KAWASAKI entwickelt und flog 1979 zum ersten Mal. Einige wesentliche Änderungen wurden insbesondere bei der Konstruktion des Blattes eingeführt. Um die Torsionssteifigkeit der Blattspitze zu erhöhen, wurde für die Blatthaut Kohlefaserverbundgewebe anstelle von Glasgewebe verwendet. Die BK 117 wurde inzwischen zur Eurocopter EC 145 weiterentwickelt, die im Jahre 2000 ihren Erstflug hatte. Auch hier war der BO 105 Rotor der Ausgangspunkt für die Entwicklung des Rotors für die EC 145.

Für die Unidirektionallagen wurde jetzt R-Glas anstelle von E-Glas verwendet, um den höheren Lasten zu begegnen. Der Blatt-Krafteinleitungsbeschlag wurde modifiziert und mit einem Teflon-Liner belegt, um eine langfristig konstante Schwenkdämpfung zu gewährleisten. Die neue Blattformgeometrie entspricht den heutigen Aerodynamik-Anforderungen. Inzwischen wurden etwa 100 Einheiten



Mechanische Eigenschaften von unidirektionalen Laminaten mit einem Faservolumenanteil von 60 Prozent.

ausgeliefert und mehr als 300 Hubschrauber in einem Großauftrag vom amerikanischen Heer bestellt. Eine andere wesentliche Neuentwicklung war die EC 135 mit dem lagerlosen Flexbeamrotor, hier konnte das Gewicht des Titanmittelteiles entfallen (**02 s. Kap. 3.2**). Eine Weiterentwicklung der EC 145 mit einem neuen Rotor für ein erhöhtes Abfluggewicht stellt der ATR (Advanced Technology Rotor) dar. Dieser 5-Blattrotor basiert auf dem Flexbeam-Rotor der EC 135. Ein entscheidender Meilenstein der Rotortechnologie konnte im April 2006 durch die erfolgreiche Flugerprobung erreicht werden. Durch die Verringerung des Vibrationsniveaus kann auf die schweren sonst notwendigen Tilger verzichtet werden. Damit wird durch Systemänderung Leichtbau erzielt.



3.1 Nachweismethoden für Faserverbundstrukturen zur Erfüllung von Zulassungsrichtlinien

Der Hubschrauber EC 135 wurde nach den Vorschriften JAR 27 bzw. FAR 27 „Small Rotorcraft“ der europäischen bzw. amerikanischen Luftfahrtbehörde zugelassen. Die EC 145 wurde dagegen nach der FAR 29 für Hubschrauber über 6.000 lbs. Gewicht [engl. Pfund] nachgewiesen. Ganz ähnliche Methoden der Nachweisführung haben militärische Hubschrauber, wie z.B. der NH90, zu erfüllen. Außerdem hat das deutsche Luftfahrt-Bundesamt Sonderbedingungen für die Anforderungen an Faserverbundstrukturen herausgegeben. Einige Bedingungen lauten:

- Fertigungsfehler und mögliche Schäden müssen bei der Festigkeit berücksichtigt werden.
- Die Inspektionszeiten und -methoden müssen bestimmt und nachgewiesen werden.
- Die Restfestigkeit des Bauteils muss nach dem dynamischen Versuch unter Berücksichtigung von Temperatur und Feuchte bestimmt werden.
- Die Material- und Fertigungsstreuung muss berücksichtigt werden.
- Klebungen müssen unter Berücksichtigung von Schadenstoleranz nachgewiesen werden.

Die Versuche sollten gemäß der so genannten Testpyramide vorgenommen werden. Mit kleinen Proben werden die Daten der Statistik und die Grundwerte der Festigkeit und Steifigkeit ermittelt. ECD verwendet standardisierte Kleinproben, das sind Lang- und Kurzbiegeproben, die unter Dreipunktbiegung belastet werden. Damit lassen sich die Biege- und die Schubfestigkeit der Faserverbundwerkstoffe ermitteln. Daraus werden die statistischen A- und B-Werte bestimmt. Temperatur und Feuchte werden bei den statischen Versuchen berücksichtigt. Mit immer umfangreicheren Strukturen werden weitere Daten erzeugt. Dann werden Teile der Gesamtstruktur bezüglich Steifigkeit und Festigkeit geprüft. Die dynamisch belasteten Bauteile werden heute nach dem „Flaw Tolerant Safe Life“ Prinzip oder gemäß der „Fail-Safe“ Methode nach §29 (§27).571 „Fatigue Tolerance Evaluation“ nachgewiesen. Bei Faserverbundblättern wird üblicherweise die „Flaw Tolerant Safe Life“ Methode verwendet. Dazu wird zunächst mit Hilfe von Versuchen eine Mittelwertwöhlerkurve für die Festigkeit ermittelt. Bei ECD wird mit Erfolg eine 4-parametrische Weibullfunktion für die Darstellung der Versuchswerte gewählt. Diese Kurve wird dann statistisch abgemindert, um die geforderte Sicherheit zu gewährleisten.

Mit Hilfe eines gegebenen Einsatzspektrums und dem daraus abgeleiteten Lastspektrum lässt sich durch die lineare Schadensakkumulation (Miner-Regel) die Lebensdauer bestimmen. Der abschließende Restfestigkeitsversuch ergibt den notwendigen Schadenstoleranznachweis. Die größeren Teststücke werden üblicherweise durch eine lokale Schlagbelastung mit einem vorgegebenen Impactor beansprucht. Die Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten wird dann geprüft.

Bei den Zellenstrukturen werden häufig ebenfalls Ermüdungsversuche durchgeführt (z. B. EC 135). Bei Strukturen aus Kohlefaser Verbunden, wie z. B. beim Transporthubschrauber NH90, ergibt sich nur eine geringe Schädigung durch dynamische Belastung, so dass auf einen Ermüdungstest der Zelle verzichtet werden konnte. Das gilt allerdings nicht für

Krafteinleitungen und Beschläge. Der statische Versuch berücksichtigt die Festigkeitsabminderungen bei Temperatur und Feuchte sowie Schäden durch Schlagbelastung.

Qualitätsprüfverfahren werden benutzt, um die Fertigung der Bauteile zu überwachen und deren Zustand zu prüfen. Seit 15 Jahren wird bei ECD in großem Umfang die Computertomographie für die Bestimmung von Fertigungsfehlern bei Rotorblättern eingesetzt. Harznester, Lufteinschlüsse und Wellen können gut erkannt werden. Die Porosität von Zellenstrukturen wird mit Hilfe der Ultraschallmethode bestimmt und die Festigkeitsminderung im Probenversuch ermittelt. Für die Güte der Fertigungsqualität der Strukturen ist die Qualitätssicherung insbesondere mit Hilfe der zerstörungsfreien Prüfung von großer Bedeutung und eine wichtige Grundlage für den ausreichend dimensionierten Leichtbau.

3.2 Das EC 135 Rotorblatt mit dem Flexbeam als Strukturelement

Bei dem Rotorblatt der EC 135 wird nicht nur auf die Gelenke verzichtet, sondern auch auf das Lager zur Blattwinkelverstellung. Diese Aufgabe übernimmt nun der als Flexbeam bezeichnete Blatthals, der biegeelastisch in Schlag- und Schwenkrichtung sowie drillelastisch ausgebildet ist. **(03)** zeigt die EC 135 im Rettungseinsatz und wesentliche Elemente des Blattes wie Blattanschluss, Flexbeam, Steuertüte und Schwenkdämpfer.

Die „Fail-Safe-Konstruktion“ des Flexbeams der EC 135 ist für dynamische Anforderungen und Lasten ausdimensioniert und enthält folgende Aufgabenelemente:

1. Blattanschluss
2. fiktives Schlaggelenk
3. drillelastisches Gelenk mit einbezogenem fiktivem Schwenkgelenk und
4. Übergangsbereich zum homogenen Blattbereich und zur Steuertüte

Der gesamte Flexbeam besteht aus unidirektionalen E-Glas-Prepreg-Lagen sowie Gewebe-Lagen für die Schubübertragung und Formerhaltung. Für die Lastübertragung am Blattanschluss werden vier Schlaufen

als zwei Doppelschlaufen ausgebildet, die die Schlag-, Schwenk- und Torsionsmomente sowie die Fliehkraft übertragen. Dieser relativ massive Anschluss verjüngt sich schnell in das blattfederartige Schlaggelenk, welches die vorgegebenen Schlagbewegungen überträgt. In einem kurzen Übergangsbereich werden die Faserlagen zu einem Kreuzprofil geformt. Dieses drillelastische Element ist als wölbfreies Profil konstruiert, um keine zusätzlichen Wölblängsspannungen auf den Gurt zu übertragen. Die verhältnismäßig hohen vertikalen Stege des Kreuzprofils übernehmen die Schlagquerkräfte und tragen wesentlich zu dem geringen statischen Durchhang bei. Damit kann der sonst übliche Schlagstop eingespart werden. Der Flexbeam soll besonders kurz sein, um die aerodynamische Güte des Rotors nicht zu beeinträchtigen. So ist insbesondere die Länge des Drillelementes von etwa 50 cm weitaus geringer als bei vergleichbaren Rotoren der Konkurrenz. Anschließend folgt der Übergangsbereich zum homogenen Blattbereich.

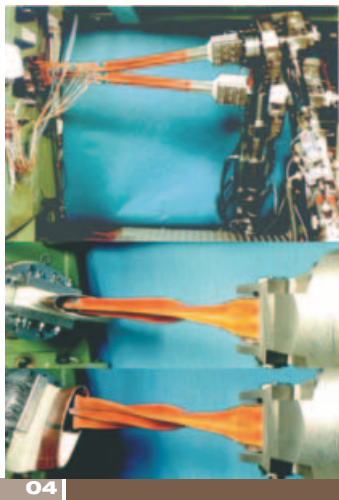
Die Steuertüte überträgt die Steuerwinkel auf das Rotorblatt. Sie wird mehrschnittig und formschlüssig mit dem veränderten Kreuzprofil verbunden. Zur Erzielung einer hohen Torsionssteifigkeit besteht sie aus einem Glasfaserverbandsandwich mit einer geringen Schlag- aber hohen Schwenkbiegesteifigkeit. Diese wird durch zusätzliche Kohlelagen erzielt. Am inneren Ende der Tüte befinden sich zwei Elastomerdämpfer, die in Schwenkrichtung wirken. Durch die Dämpfer wird die Steuertüte mit dem Flexbeam verbunden. Die Differenzverschiebung zwischen Dämpfer und Holm des Flexbeams wird zur Dämpfung genutzt. Um eine hohe Schadens-toleranz zu erhalten, geht die GFK-Haut der Tüte nahtlos in das homogene Blatt über. Damit wird eine wesentliche Kleb-trennstelle vermieden. Analog dazu stellt der Hauptgurt ebenfalls eine über die gesamte Länge des Blattes einheitliche Struktur dar.

Um das hohe Gewicht des Titanrotorkopfes der BO 105 einzusparen (60 kg) und um den Schlaggelenkabstand zu verringern, wurde der Flexbeam entwickelt. Der Schlaggelenkabstand ist das Maß für das fiktive Schlaggelenk in Prozent der Blattlänge. Er beträgt bei der BO 105 etwa 14,6



03

Das Hauptrotorblatt der EC 135 mit mehreren integrierten Funktionen.



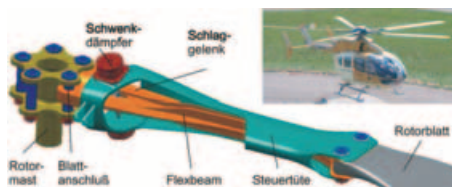
04

Der Flexbeam des EC 135 Blattes in der Prüfmaschine unter Biege- und Torsionsbelastung.

Prozent und bei der EC 135 etwa neun Prozent. Diese Reduktion wirkt sich positiv auf das Vibrationsverhalten des Hubschraubers aus und verbessert den Fluggastkomfort. Das anzustrebende Ziel, ein Kompromiss zwischen Steuerbarkeit und Komfort, beträgt etwa sechs Prozent. Dieser Wert konnte in etwa bei dem Advanced Technology Rotor (ATR) erreicht werden. Die Steuertüte der EC 135 wird mehrschnittig und formschlüssig mit dem veränderten Kreuzprofil verbunden. Beide Elemente formen dann das aerodynamische Blattprofil. Die Multifunktionalität des Blattes ist ein gutes Beispiel für den Leichtbau im Hubschrauber.

(04) zeigt den Flexbeam in der Prüfmaschine unter Biege- und Torsionsbelastung. Im oberen Teil des Bildes wird der Flexbeam am Blattanschluss eingespannt und in Schlag- und Schwenkrichtung gebogen, zusätzlich wird auch die Fliehkraft aufgebracht (150 kN). Im unteren Teil des Bildes ist das Drillelement unbelastet und verdreht dargestellt. Der Drillwinkel beträgt hier 100 Grad, wobei ebenfalls die Fliehkraft als Zusatzbelastung aufgebracht wurde. Der Prüfling blieb unbeschadet, der Drillwinkel war allein durch die Prüfmaschinenkapazität begrenzt.

3.3 Weiterentwicklung des lagerlosen Rotorsystems der EC 135 zum Advanced Technology Rotor (ATR)



05

Erprobungsflug der EC 145 mit einem 5-blättrigen Zukunftsrotor ATR.

Aufbauend auf dem innovativen Rotor der EC 135 wurde die „Lagerlose Hauptrotortechnologie“ in den vergangenen Jahren im Forschungsprojekt ATR weiterentwickelt. Wünschenswerte Merkmale der Bauweise und Auslegung waren:

- Geringes Gewicht für das Gesamtsystem „Hubschrauber“
- Ein geringerer Schlaggelenkabstand als bei der EC 135 zur Reduktion der Vibrationen
- Faltbarkeit aller Rotorblätter nach hinten
- Fünf statt der üblichen vier Rotorblätter zur Reduktion der Blatterregung
- Modularität der Einzelkomponenten
- Verbesserte aerodynamische Eigenschaften der Blätter
- Verringerter Außenlärm

Das Ziel der Entwicklung war ein leistungsfähiger Rotor für einen Hubschrauber zwischen 3.600 kg und 3.900 kg. Durch eine Verschiebung der wichtigsten Eigenfrequenzen reduziert sich die aerodynamische Anregung bei einem 5-Blatt-Rotor. Gegenüber einem 4-Blatt-Rotor sinkt die Zellenerregung um etwa 70 Prozent. Nach Auslegung, Konstruktion und Test der Komponenten wurde 2006 die Erprobung im Flug mit Erfolg durchgeführt. In (05) erkennt man die EC 145 S/N9001 mit dem ATR-Rotor beim Erstflug im April 2006 in Donauwörth. Die Auswertung von Flugmessungen ergibt einen Schlaggelenksabstand von 6,6 Prozent des Radius. Weiterhin sind folgende Konstruktionselemente dargestellt:

- Rotorkopf mit Rotormast und Blattanschluss
- Flexbeam mit Schlaggelenk und Trennstelle zum Rotorblatt
- Steuertüte mit Schwenkdämpfer und Bolzenanschluss zum Blatt

Der Rotorkopf des ATR enthält nur fünf Bolzen für fünf Blätter statt acht Bolzen für vier Blätter bei der EC 135. Das wird dadurch erreicht, dass die Anschlussarme gestuft angeordnet sind. Bei dem Konzept greift jeweils eine Anschlusschlaufe zwischen zwei Schlaufen des benachbarten Blattes. Die Befestigung am Rotorkopf erfolgt mit einem gemeinsamen Anschlussbolzen für jeweils zwei Blätterhälften. Durch den gewählten Anschluss der Blätter halbiert sich die Anzahl der Bolzen und damit verringern sich der Schlaggelenksabstand und zusätzlich das Gewicht.

Der Flexbeam wurde mit R-Glas-Unidirektionallagen und dem Prepregsystem M12 hergestellt. Durch den kompakten Aufbau des Rotorkopfes rückt das Schlaggelenk in Richtung des Rotormittelpunktes. Die Steuertüte hat wesentliche Merkmale der EC 135, zur Erhöhung der Schwenksteifigkeit wurden ebenfalls Kohlegurte angeordnet. Die Trennstelle ist ein zusätzliches Strukturelement, das eine Blattfaltung auch bei einem 5-Blattroter erlaubt. Der Vorteil dieser Anordnung gegenüber der EC 135 besteht darin, dass die Steuerstangen von der Faltung nicht beeinflusst werden. Außerdem liegt die Trennstelle in einem Bereich geringer Belastung.

Das Vibrationsniveau der EC 135 wird durch die Anordnung eines etwa 35 kg schweren Antiresonanz-Rotor-Isolations-Systems (ARIS) auf ein geringes Maß reduziert. Dieses Niveau wird beim ATR ohne Tilger erreicht, das bedeutet eine Einsparung von etwa 35 kg. Damit wird das Gewicht des fünften Blattes kompensiert. Damit wird wiederum beim Hubschrauber durch Systemveränderungen und multifunktionale Eigenschaften des Rotors notwendiger Leichtbau ermöglicht.

3.4. Entwicklung einer piezoelektrisch angetriebenen aktiven Blatt-Hinterkantenklappe zur Minderung der Vibrationen und des Außenlärms

Die Ziele und Visionen für die Einführung einer aktiven Blattsteuerung lauten:

- Unterdrückung der Kabinenvibrationen
- Verringerung des Außenlärms
- Verbesserung der aeromechanischen Stabilität
- Lastbegrenzung
- Minderung der benötigten Leistung im Reiseflug
- Ersetzen der Hydraulik und Taumelscheibe

Am 8. September 2005 fand bei Eurocopter in Donauwörth der Erstflug eines EC 145 Hubschraubers mit piezoelektrischer Rotorklappensteuerung statt. Im (06) ist das Basisblatt der EC 145 mit drei adaptiven Klappen dargestellt. Der klassischen Rotorsteuerung wird ein hochfrequenter Anteil kleiner Amplituden überlagert, so dass die einzelnen Rotorblätter während einer Umdrehung ständig an die jeweils vorherrschenden Strömungsbedingungen angepasst werden können. Ein Regler in Verbindung mit Sensoren an Kabinenstruktur und Rotorblättern sorgt dann für eine Lärm- und Vibrationsreduktion. Die einzelnen Rotorblätter werden mit Hilfe von Piezo-Technik gesteuert. Im Blatt befindliche Piezokeramik-Elemente treiben kleine Servoklappen an der Hinterkante an. Unter sich ändernder elektrischer Spannung, die dem Bordnetz des Hubschraubers entnommen wird, verändern die Elemente ihre Länge und verändern damit den Klappenausschlag. Die Entwicklung ist eine Zusammenarbeit mit EADS Corporate Research Center,

DaimlerCrysler und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Adaptive Rotorsysteme“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit gefördert.

Die Blätter entsprechen denen der EC 145, wurden jedoch bezüglich der Massen geändert. Weiterhin wurden die Kohlefasergewebe in der Blatthaut durch Glasfasergewebe ersetzt, um die Torsionssteifigkeit gezielt zu verringern. Es wird allerdings noch einige Jahre dauern, bis die adaptiven Klappensysteme zum Serieneinsatz kommen. Die Konsequenzen einer solchen Systemänderung im Hubschrauber sind weitreichend. Die Systemänderung bedeutet aber auch wiederum eine weitere Chance für den Leichtbau.

4. Die crashsichere Kohlefaser-verbundzelle des Transporthubschraubers NH90

In der Anfangszeit der Hubschrauberentwicklung bei Eurocopter Deutschland wurde der Faserverbundwerkstoff - abgesehen von den Rotorblättern - hauptsächlich für gering belastete Bauteile wie Heckausleger und Höhenleitwerke angewendet.

Die Hauptforderungen der Kunden an Zellenstrukturen sind:

- geringes Gewicht
- Korrosionsbeständigkeit
- geringer Wartungsaufwand
- hohe Nutzlast
- Crash – Sicherheit
- hohe Schadenstoleranz
- hoher Komfort

Die Entwicklung einer Faserzelle für den Hubschrauber BK 117 brachte grundlegende Erkenntnisse auf diesem Gebiet. Der Erstflug des Hubschraubers erfolgte im Frühjahr 1989. Die gewonnenen Erfahrungen führten zu den Entwicklungen der Faserzelle für den Tiger und NH90. Die Zelle des Hubschraubers NH90 besteht weitgehend aus Kohle- und Kevlarverbunden. Für die gesamte Struktur wurde ein bei 180 Grad aushärtendes Prepregsystem gewählt. Die Gesamtabmessungen der Zelle sind etwa 16 m Länge, 3,8 m Höhe und 4,4 m Breite. Die Zelle ist in drei Module eingeteilt: Cockpit, Rumpfmittelteil und Heckmodul (07). Die Struktur



06

Forschungsrotorblatt der EC 145 mit piezoelektrisch angetriebenen Klappen.



07

Kohlefaserverbundzelle für den militärischen Hubschrauber NH90 mit sehr guten Crasheigenschaften.

besteht im Wesentlichen aus Spanten, Längsträgern und Sandwichpanelen, die aus CFK-Geweben und NOMEX-Waben aufgebaut sind.

Der dimensionierende Versagensfall der Sandwichstrukturen ist die lokale Stabilität (Knittern) der Deckhäute. Die angegebenen Formeln zeigen die Einflussfaktoren für dieses Instabilitätsversagen:

$$\sigma_{kns} = k \frac{\sqrt{12}}{t_f} \sqrt{\frac{E_f}{12} B} \quad \text{mit} \quad B = \frac{K_1 K_2}{1 + \nu_{xy} \nu_{yx}}$$

Vereinfachte Formel für homogene Steifigkeit der Deckhäute über die Dicke:

$$\sigma_{kns} = f \sqrt{\frac{E_f}{12} K_1 K_2}$$

Bezeichnungen:

σ_{kns}	= Symmetrische Knitterspannung
t_f	= Dicke der Deckhaut
t_c	= Dicke der Wabe
E_f	= E-Modul der Faser
E_c	= E-Modul der Wabe
k, f	= Faktoren zwischen 0.33 und 0.81 abhängig vom Versuchsergebnis
B	= Plattenbiegesteifigkeit
ν_{xy}, ν_{yx}	= Querkontraktionen

Die Formel für das Knittern basiert auf dem druckbelasteten Balken auf elastischer Bettung unter Berücksichtigung der anisotropen Waben. Der ideale Vorfaktor von 0.81 wird jedoch in der Praxis nicht erreicht. Testergebnisse liefern Vorfaktoren von 0.33 bis 0.5. Der Einfluss von Temperatur und Feuchte sowie die Auswirkung von Schlagschäden liefern eine weitere Abminderung der erreichbaren Festigkeit, die weit unter der Faserfestigkeit liegt. Der Grenzwert der zulässigen Dehnung wird nach diesen Ergebnissen festgelegt.

Die Crashesicherheit war eine wesentliche Bedingung für den Entwurf des militärischen Transporters NH 90. Für den Serientransporter mit einem maximalen Abfluggewicht von 9.45 t wird eine überlebende vertikale Geschwindigkeit von 10.6 m/sec für den Aufschlag gefordert. Bei dieser Belastung ist das Landwerk ausgefahren. Für den Hubschrauber mit eingefahrenem Landwerk ist eine Geschwindigkeit von 7.7 m/sec vorgesehen. Der Hubschrauber soll außerdem fähig sein, einen Crash bei

einem Anstellwinkel von 15 Grad und einem Rollwinkel von fünf Grad zu überstehen.

Die Crash-Forderungen für Insassen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Schutz der Insassen durch Reduktion der Lastfaktoren auf ein erträgliches Maß.
- Schutz der Insassen vor Schäden, die durch Einbrechen der Rotor- und Getriebemassen erzeugt werden.
- Schutz der Insassen vor umher fliegenden Massen.
- Schutz vor Feuer. Das Tanksystem soll ein Auslaufen von Treibstoff verhindern.
- Insassen sollen nach dem Crash die Zelle verlassen können.

Die Nachweisversuche wurden gemäß der Methode der Versuchspyramide durchgeführt. Kleine Versuchsproben ergaben Grundlagen, die dann bei größeren Strukturen angewendet wurden. Der Hauptcrashtest wurde am Rumpfmittelteil durchgeführt, das aus Rumpfunter- und Rumpfoberteil, dem installierten Tank, Getriebe und Triebwerken sowie den Sitzen der Insassen bestand. Eine Fülle von Analysen wurde mit Hilfe der Rechenprogramme KRASH, DYTRAN usw. durchgeführt. Die umfangreichen Rechnungen ergaben ein gutes Verständnis des Crashverhaltens der Zelle. Der Rumpfmittelteiltest war erfolgreich und bestätigte die Auslegung der NH90 Zelle.

Die Crashforderungen an die Zellen von Hubschraubern können hervorragend durch Leichtbauentwürfe in Kohlefaserverbundbauweise erfüllt werden. Selbst zusätzliche Komfortbedingungen können eingebracht werden, ohne die guten Crasheigenschaften zu beeinträchtigen.

5. Die schnell laufende Kohlefaserheckrotorwelle der EC 135

Drei hintereinander geschaltete Heckrotorwellen übertragen die für den Fenestron notwendige Leistung bei einer Drehzahl von 5.000 U/min. Ursprünglich waren zwei Wellen aus Aluminium und eine aus Stahl. Am Anfang der Serienauslieferung ergaben sich Schwierigkeiten mit den Lagern und den Aluminiumwellen. Bei Fernwellen, die mit hoher Drehzahl laufen,

beeinflussen Gewicht und Biegesteifigkeit die kritische Drehzahl. Ein großer Abstand zu dieser Instabilität wird, wie beim Knicken von Stäben, durch die Erhöhung der Biegesteifigkeit und Reduktion der Masse erreicht. Die Auslegung einer Kohlefaser-verbundwelle mit Hilfe von Unidirektionallagen und Torsionsgewebe ergab einen ausreichenden Abstand zur kritischen Drehzahl bei geringem Gewicht und löste damit das aufgetretene Problem. Nach den Forderungen des Luftfahrtbundesamtes mussten Schläge bis zu 25 Joule aufgebracht werden und deren Einfluss auf das ertragbare Rest-Torsionsmoment bestimmt werden. Ein maximal auftretendes Torsionsmoment (Limit Load) mit einem Sicherheitsfaktor von 1.5 und einem Temperatur- und Feuchtefaktor von 1.28 wurde nachgewiesen. Inzwischen wurden etwa 1.000 Heckrotorwellen gebaut und in der EC 135 erfolgreich eingesetzt. Die Entwicklung dieser Struktur zeigt ebenfalls die Bedeutung des Leichtbaus im Hubschrauber, insbesondere wenn schwer verträgliche Forderungen zu erfüllen sind.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Leichtbau im Hubschrauber hat eine herausragende Bedeutung; er kann jedoch meist nur in Verbindung mit dem Teil- oder Gesamtsystem erreicht werden. Die Faserverbunde haben im Hubschrauberbereich von MBB, jetzt Eurocopter, immer eine entscheidende Rolle gespielt. Die modernen gelenk- und lagerlosen Rotor-konzepte konnten erst durch die Verwendung von Rotorblättern in FVW-Bauweise verwirklicht werden.

Für zukünftige Ansprüche muss die Gesamtauslegung des Hubschraubers bezüglich folgender Kriterien verbessert werden:

- Das Gesamtstrukturgewicht sollte weiter reduziert werden, das kann durch die Verringerung der dynamischen Lasten geschehen. Die Beanspruchungen können aufgezeichnet und die Lebensdauer den tatsächlichen, im Betrieb auftretenden Lasten angepasst werden. Verschiedene Health and Usage Monitoring Systeme (HUMS) ermöglichen die Zuordnung zwischen Betrieb eines Hubschraubers und den möglichen Schäden aus den Betriebslasten. Piezoelektrisch angetriebene

aktive Blatt-Hinterkantenklappen ermöglichen über den Blattumlauf Steuereingaben, die die dynamischen Lasten verringern. Solche Klappen können auch die hydraulische Steuerung mit Hilfe von Metallteilen, wie z. B. der Taumelscheibe, in ferner Zukunft ersetzen.

- Komfortbedingungen müssen verstärkt schon im Entwurf der Zelle berücksichtigt werden. Sind doch die Lärm dämmenden Strukturen schwer und werden nicht bei der Festigkeit berücksichtigt. Damit entstehen teilweise unnötige Zusatzgewichte.
- Großer Wert muss auf einen niedrigen Kabinen-Vibrationspegel gelegt werden, der nicht durch schwere Kabinenlifter erreicht werden sollte, sondern durch gut ausgelegte 5-Blattrotoren.
- Die Sicherheit sollte durch den Entwurf schadenstoleranter Bauteile weiter gesteigert werden.
- Der Lärmreduzierung muss eine hohe Priorität eingeräumt werden.
- Eine Erweiterung des Geschwindigkeitsbereiches wäre für den Kunden wünschenswert, bedingt aber eine spezielle Auslegung der Rotoren und eventuell neue Rotorkonzepte.
- Der Tilt-Rotor wäre eine Möglichkeit, in der Zukunft den Flugbereich und die Geschwindigkeit des Hubschraubers zu vergrößern.

Die Leichtbaustrukturen des heutigen Hubschraubers haben bereits einen hohen Entwicklungsstand. Sie können aber durch den Einsatz von neuen Technologien noch wesentlich verbessert werden. •

SUMMARY

Light weight structures are of main importance for helicopters, specially when they are related to rotor systems and fuselage structures. Helicopter rotor systems are dynamically loaded with many composite components such as main and tail rotor blades and rotor hubs. The civil helicopter EC 135 has a bearingless rotor system certified according to the "Special Condition for Primary Structures Designed with Composite Material" of the German airworthiness LBA containing increased safety demands. More than 500 EC 135 helicopters are in service until now. The design of composite rotor blades have a long tradition at MBB and Eurocopter.

A cooperation with Stuttgart research institutes led to the first helicopter composite rotor blade for the heli trainer BO 102. Later the BO 105 helicopter was designed with a hingeless main rotor equipped with composite rotor blades. More than 1500 helicopters have been in service after the first flight took place in 1967. Recent research developments are the 5-bladed ATR (Advanced Technology Rotor) and the "Active Flap Rotor". First flight of this outstanding rotor with piezo-electrical driven flaps was in 2005 on an experimental EC 145.

The military transport helicopter NH90 contract requires crashworthiness, based on MIL 1290 and Weapon System Requirements. The overall crashworthiness requirements are: Survivability of pilots and troops, limiting g-loads to tolerable load factors, prevent masses from disconnection from supporting structure and prevent post-crash fire. In an outstanding test with the middle section of the NH90 fuselage these features were proven.

Horst Bansemir

Literatur

- 1 H. Dörner: Drei Welten – ein Leben, Prof. Dr. Ulrich Hütter, Hochschullehrer – Konstrukteur - Künstler. Heiner Dörner, Heilbronn, 1995. ISBN 3-00-000067-4
- 2 K. v. Gersdorff, K. Knobling: Die deutsche Luftfahrt, Hubschrauber und Trag-schrauber. Bernard & Graefe Verlag, 3. Auflage 1999, ISBN 3-7637-6115-2
- 3 Johannes Wiedemann: Leichtbau Band 1 und 2. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo 1986
- 4 D. Paul, L. Kelly, V. Venkayya and T. Hess: Evolution of U.S Military Aircraft Structures Technology. Journal of Aircraft, Vol. 39, No. 1, January-February 2002.
- 5 Oster, R.: Computed Tomography as a Non Destructive Test Method for Fiber Main Rotor Blades in Development, Series and Maintenance, 23rd European Rotorcraft Forum, Dresden, Germany, 16-18 September 1997
- 6 Attfellner, S.: Eurocopter EC 135 Qualification for the Market. 22nd European Rotorcraft Forum, Brighton, UK., 17-19 September 1996
- 7 Bansemir, H., and Mueller, R.: The EC 135- Applied Advanced Technology. AHS, 53rd Annual Forum, Virginia Beach, USA, 29 April – 1 May 1997
- 8 Pfeifer, K.: Der Faserverbund – Hauptrotor des Mehrzweckhubschraubers EC 135. ECD-0060-96-PUB, DGLR-Tagung des Fachbereiches T1 Strukturen, Daimler-Benz Aerospace, München, 27./28. Nov. 1996
- 9 H. Bansemir, S. Emmerling: Fatigue Substantiation and Damage Tolerance Evaluation of Fiber Composite Helicopter Components. Applied Vehicle Technology Panel: Applications of Damage Tolerance Principles for Improved Airworthiness of Rotorcraft, Corfu Greece, 1999
- 10 B. Enekl, M. Bebesel, S. Mangelsdorf, G. Roth: ATR (Advanced Technology Rotor) – Flugerprobung des neuartigen lagerlosen 5-Blattrotors. ECD-156-06-PUB, DGLR-Jahrestagung in Braunschweig, Nov. 2006
- 11 Dieterich, O., Enekl, B., Roth, D.: „Trailing Edge Flaps for Active Rotor Control, Aeroelastic Characteristics of the ADASYS Rotor System“. 62nd AHS Annual Forum, Phoenix, AZ, USA, May 2006
- 12 A. Engleder, W. Koletzko: The Development of a Composite Helicopter Fuselage as exemplified on the BK 117. Mailand, 1988
- 13 C. M. Kindervater: Crash Resistant Composite Airframe Structures: Design Concepts and Experimental Evaluation. DGLR Tagung “Faserverbundwerkstoffe und –bauweisen in der Luft- und Raumfahrt”, Daimler-Benz Aerospace, Ottobrunn, 27. und 28. November 1996
- 14 D. Müller, R. Oster, J.-P. Scheitle: Analysis and Full-Scale Test of the NH90 Transport Helicopter Fuselage. DGLR-Jahrestagung 2003 (173)

DER AUTOR

DR.-ING. HORST BANSE MIR

erwarb sein Hauptdiplom an der Technischen Universität München an der Fakultät für Bauwesen. Die Vertiefungsrichtung waren Statik und Stahlbau. Anschließend wurde Horst Bansemir Assistent am Lehrstuhl und Institut für Leichtbau und Flugzeugbau an der Technischen Universität München, Fakultät Maschinenbau. Dort führte er Übungen durch und promovierte mit dem Thema „Krafteinleitung in Sandwichstrukturen“ zum Dr.-Ing.. Nach der Promotion wurde er zunächst Mitarbeiter und dann Abteilungsleiter für Strukturtheorie bei der Firma MBB in München. Seit 1973 führte er statische Berechnungen insbesondere auf dem Gebiet der Faserverbundtechnik durch. Die Ergebnisse flossen in die Entwicklung des Rotors der EC 135 ein. In der weiteren Zeit führte er auch Analysen zu großen flächigen Solargeneratoren für die Raumfahrt durch. Im Januar 2000 wurde er Hauptabteilungsleiter für Konstruktion und Statik des dynamischen Systems der Eurocoptergruppe. Anschließend leitete er die länderübergreifende Hauptabteilung Statik in Frankreich und Deutschland. Seine Pensionierung erfolgte im Jahr 2005. Seit dieser Zeit berät er die Firma Eurocopter in Fragen der Strukturtheorie. Viele Veröffentlichungen und Patente beziehen sich auf Rotorentwicklungen.

*Kontakt*

*Dr.-Ing. Horst Bansemir, Eurocopter Deutschland GmbH, 81663 München
e-mail: horst.bansemir@eurocopter.com*

Neue Werkstoffe und Bauweisen für neuartige Fahrzeugkonzepte



01

Mercedes Benz SSKL



02

Porsche 904 Coupé

Der Raum Stuttgart stand in der Vergangenheit immer wieder für neue Fahrzeugkonzepte und Leichtbau. Die (01) zeigt den Mercedes Benz SSKL aus den 30er Jahren als ein Fahrzeugbeispiel. Die Abkürzung „SSKL“ stand für Sport, Super, kurzer Radstand und Leicht. Der SSKL sparte ca. 125 kg Gewicht, indem massive Fahrzeugrahmenteile wie die Holme und Traversen mit kreisrunden Bohrungen versehen wurden. Des Weiteren zeigt der Porsche 904 Coupé in (02) durch seine Kunststoffkarosserie ebenfalls Gewichtseinsparungspotential durch die Verwendung damals neuer Materialien.

In der Vergangenheit stand hauptsächlich die Sportlichkeit eines Fahrzeuges als Treiber für den Leichtbau in Fahrzeugkonzepten. Herausragende Motivation für die Entwicklung heutiger, neuer Fahrzeugstrukturen ist neben der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs die Verringerung klimawirksamer Emissionen. Dies zielt vor allem auf die Reduzierung der Fahrzeugmasse und damit die verschiedenen Strategien zum Leichtbau. Anhand verschiedener Leichtbauarten werden die technisch relevanten Kriterien für Bauweisen und Werkstoffkonzepte herausgear-

beitet. Im Zentrum heutiger Bemühungen steht dabei vielfach die Synthese von Bauweisen- und Werkstoffentwicklung mit dem Ziel eines Multi-Material-Designs [1, 2].

Modularisierung ist ein weiterer wirtschaftlicher Ansatz, um die Diversifizierung der Fahrzeugkonzepte zu gestalten und effektiv umzusetzen [3]. Für Hybrid- und später auch Brennstoffzellen-Antriebe werden durch die Modularisierung die Voraussetzungen geschaffen, unterschiedliche Fahrzeugantriebe innerhalb einer Fahr-

zeugklasse darzustellen. Allerdings kann die Modularisierung teilweise einer hohen Integrationsdichte auch entgegenstehen. Das modulare Leichtbaukonzept des DLR verfolgt demzufolge das Ziel, Antriebsstrangevolutionen skalierbar und wirtschaftlich gestaltbar zu machen und dabei die Konzeptflexibilität zu erhalten oder fallweise sogar zu erhöhen.

Diese Ansätze führen zur Strategie „Hybrid³“. Hierbei werden nicht nur 1. unterschiedliche Werkstoffe und 2. verschiedene Bauweisen aufeinander abgestimmt, sondern auch 3. wird die Integration funktionaler Effekte oder Funktionen berücksichtigt. Dies bedeutet z. B., dünnwandige Bauteile in ihrem Schwingungs- oder akustischen Verhalten mit strukturintegrierten, aktiven Materialien optimal zu gestalten. Weitere Beispiele für die Ansätze mit „Hybrid³“-Effekten könnten schaltbare Oberflächen oder integrierte Energiewandlung sein. Der am DLR bearbeitete Compressed Natural Gas Drucktank (CNG- Tank) in Wabenbauweise beinhaltet auf Grund seiner Konzeption das Potential, die Funktion Tank strukturintegriert zu realisieren. Ziel ist es, einen Tank zu entwickeln, der leicht, sicher, packagingvariabel, großserientauglich und kostengünstig ist (03).

Die verschiedenen Entwicklungsrichtungen werden in einer Roadmap dargestellt und anhand zukunftsweisender Beispiele aus dem Fahrzeugbau diskutiert.

2. Bauweisen und Werkstoffkonzepte

Das Ziel der Reduzierung von CO₂-Emissionen kann u.a. durch eine Reduzierung der Fahrwiderstände erreicht werden. Mit gezieltem Leichtbau können die Massen und damit Beschleunigungs-, Roll- und Steigungswiderstände reduziert werden. Die Karosseriebauweisen Monocoque, Schale, Space-Frame und deren Hybridformen aus Schale und Space-Frame, haben einen großen Einfluss auf die Eigenschaften und Gestaltung des Fahrzeuges. Die Space-Frame-Bauweise ermöglicht zum Beispiel durch die Anpassung der Halbzeugelemente ein einfacheres Skalieren der Karosserieform.

	Monocoque-Bauweise	Schalenbauweise	Space-Frame-Bauweise	Mischformen Schale/Space-Frame
Tragstruktur	2D- und 3D-Schalenelemente	3D-Rahmen aus Halbschalen	3D-Rahmenstruktur aus geschlossenen Profilen	3D-Rahmenstruktur aus geschlossenen Profilen und partielle Schalenelemente
Verbindungs-technik	Form- und Stoffschluss	i.d.R. Stoffschluss	i.d.R. Stoffschluss	i.d.R. Stoffschluss
Außenhaut	nicht mittragend	mittragend, in Karosseriestruktur integriert	nicht mittragend oder teilweise mittragend	Mittragend, in Karosseriestruktur integriert
Halbzeuge	Blechplattinen, Sandwichmaterial	Blechplattinen	Profile, Gusselemente, Bleche	Profile, Gusselemente, Blechplattinen
Serieneinsatz	Kleinstserie	Großserie	Mittlere Serie	Mittlere Serie bis Großserie

Vergleich heutiger Bauweisenkonzepte

Die unterschiedlichen Bauweisen stellen konzeptbestimmende Anforderungen an die Werkstoff- und Fertigungstechnologien. Ein Beispiel ist der Audi A8 mit seiner Space-Frame-Bauweise und dem Werkstoff Aluminium. Die Verbindung der einzelnen Profile durch komplexe Gussbauteile erforderten neue bzw. verbesserte Werkstoff- und Fertigungskonzepte.

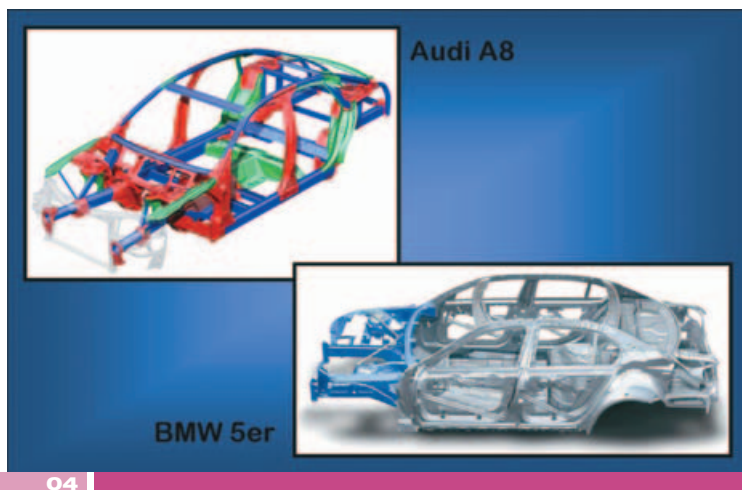
3. Anforderungen und technische Kriterien

Die Bauweisen- und Werkstoffkonzepte werden von unterschiedlichen Anforderungen getrieben. Diese Anforderungen resultieren aus Vorgaben der Gesellschaft, Politik und Gesetzgebung sowie den internationalen Märkten. Als Vorgaben aus Markt und Gesellschaft können Begriffe wie z.B. Verbrauch, Fahrspaß oder Gebrauchsnutzen: aus der Politik und Gesetzgebung z. B. Emissionen und Recycling genannt werden.

Die Erfüllung aller Anforderungen stellt eine Herausforderung für die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Automobilhersteller dar. Beispielhaft können einige Anforderungen genannt werden [4]:



DLR GasTank



04

Vertreter zweier unterschiedlicher Bauweisen

(BMW 5er, Quelle: BMW AG;

Audi A8 D3 2003, Quelle: Audi AG)

- Konzept (z. B. Package, Design, Außenabmessungen, Antriebskonzept, Aerodynamik usw.)
- Sicherheit (Crash, Insassenschutz)
- Belastungen (Betrieb, Missbrauch)
- Umgebung (Temperatur, Klima, Medien)
- Formgebung (z. B. Geometrie, Oberflächen)
- Leichtbau (Werkstoff, Konstruktion)
- Herstellbarkeit (Umformung, Fügetechnik, Fertigung)

Diese Anforderungen müssen in technisch relevante Kriterien übergeleitet werden, wie z.B. Biegesteifigkeit, Torsionssteifigkeit oder Karosseriegewicht.

Im Segment der Premium- und Volumenfahrzeuge ist in den letzten Jahren eine Tendenz zu höherfesten und höchstfesten Stahlwerkstoffgüten zu erkennen. Dies resultiert auch aus den steigenden Anforderungen an die Sicherheit und die Forderung nach einer Gewichtsreduzierung. Im Entwicklungsstadium befinden sich zurzeit so genannte Leichtbaustähle auf Basis von Eisen-Mangan-Legierungen, welche bei hohen Festigkeiten deutlich höhere Dehnraten als heutige Stahlwerkstoffe aufweisen.

Ebenfalls ist in den letzten Jahren ein Trend zu Hybridbauweisen, teilweise auch als Mischbauweisen bezeichnet, zu erkennen. Dieser Trend hat stufenweise Einzug gehalten und begann mit dem Einbau von z.B. Klappen und Deckel. Ein strukturelles

Beispiel hierfür ist der BMW 5er mit seinem Vorderwagen aus Aluminium und der restlichen Karosserie aus dem Werkstoff Stahl. Es bleibt abzuwarten, ob sich die Entwickler weiter an ganze Module wagen.

Im Karosseriebereich ist eine Zunahme von Kunststoffen vorwiegend nur im Bereich der Bepunktung zu erkennen. Dieser Trend ist jedoch eher gering, wohingegen im Premium-Segment der Einsatz von Hochleistungskunststoffen, wie Kohlenstofffaserverbund, immer mehr für insbesondere hochbelastete Bauteile zunimmt. Beispiele für dieses Segment sind der Bugatti Veyron, der Porsche Carrera GT und der McLaren SLR [5].

Heutige Forschungsaktivitäten liegen vorwiegend auf dem Gebiet des Multi-Material-Designs mit dem Ziel, den Werkstoff mit den besten Eigenschaften für die gegebenen Bauteilanforderungen an der richtigen Stelle zu platzieren. So kann beispielsweise durch den gezielten, partiellen Einsatz von Hochleistungskunststoffen wie Kohlenstofffaserwerkstoffen als Crash-Element, eine Leistungssteigerung mit gleichzeitiger Gewichtsreduzierung erreicht werden.

4. Modularisierung

Wie zuvor beschrieben, ist durch die unterschiedlichen Anforderungen der hoch entwickelten Märkte eine immer größer werdende Derivatbildung innerhalb der Fahrzeugklassen zu erkennen [3], was eine sinkende Einzelstückzahl in der Produktion zur Folge hat. Um dennoch die Wirtschaftlichkeit zu wahren, kann die Modularisierung als ein wirtschaftlicher Ansatz eingesetzt werden: durch eine in Bezug auf Fahrzeuggeometrie und -leistung skalierbare Struktur ergeben sich damit neue Differenzierungspotentiale.

Hybrid- und Brennstoffzellenantrieb ergeben künftig zusätzliche Anforderungen an z.B. Speicherung des Kraftstoffes im Fahrzeug oder an das Fahrzeugsicherheitskonzept. Der Schutz von Kraftstoffspeicher oder komplexen Steuer-Regelungseinrichtungen, z.B. beim Seitencrash, kann durch Crash-Elemente aus Faserverbundkunststoff erfolgen [6]. Ein DLR-Konzept für die

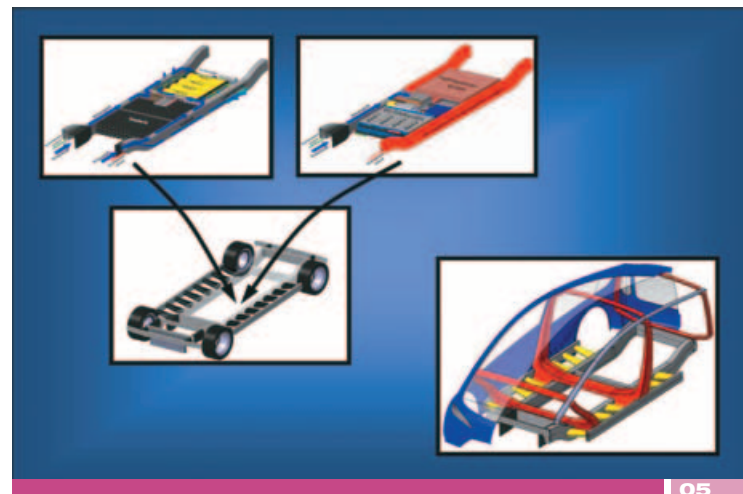
Modularisierung neuer Antriebskonzepte mit einem Sicherheits-Compartment, welches partiell Faserverbundwerkstoffe als Crash-Elemente im Bereich der Schweller einsetzt, ist in (5) zu sehen. Der Einsatz von Crash-Elementen aus Faserverbund und metallischen Space-Frame-Elementen ermöglicht somit anpassbare Eigenschaften und Geometrien.

Dementsprechend besteht z. B. der zentrale B-Säulenknoten aus Kohlenstofffaserverbund mit einem integrierten Crash-Element und wiegt als Forschungs-demonstrator insgesamt 1,8 kg. Dieser B-Säulenknoten setzt sich aus einzelnen, angepassten Elementen zusammen, die jeweils spezielle Funktionen, wie Energieaufnahme beim Crash, übernehmen. Die einzelnen Elemente sind aus acht bis zwölf Faserverbundgewebelagen aufgebaut. Der symmetrische Aufbau aus Kohlenstoff- und Glasfaserlagen sorgt für eine gute Performance, wobei die Glasfaserlagen zur Steigerung der Zähigkeit mit eingebracht sind. Weitere Abschätzungen dieses Sicherheits-Compartment ergeben eine Gewichtsreduzierung durch Multi-Material-Design von bis zu 40 Prozent im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen.

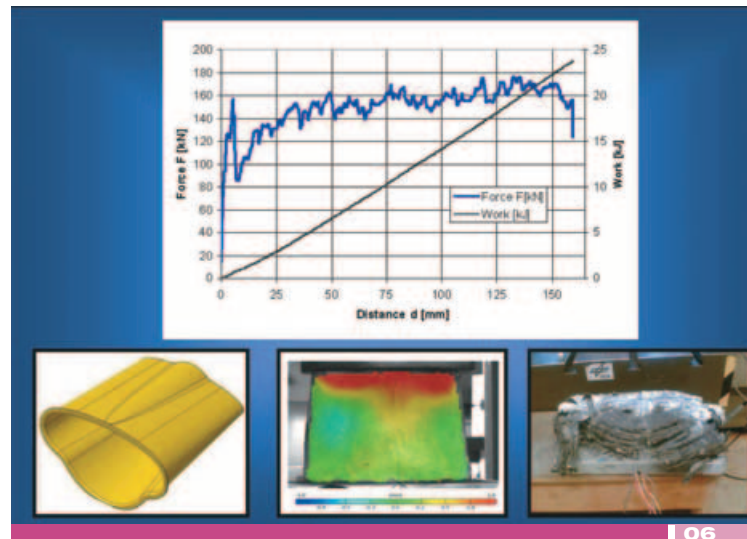
Die Ergebnisse eines statischen Druckversuches (200 mm/min) zur Auslegung der Parameter für einen anschließenden, dynamischen Crashversuch haben gezeigt, dass die Auslegung der Bauteilgeometrie und Werkstoffparameter richtig dimensioniert wurden, vgl. (6).

Das Diagramm zeigt im Kraftverlauf eine hohe Anfangskraft bis zur Einleitung des Crushings, wie (6) zeigt. Ebenfalls ist ein ansteigendes Kraftniveau aufgrund des konischen Verlaufs des Crashelementes zu erkennen. Die aufgewendete Arbeit zeigt einen sehr gleichmäßigen, ansteigenden Verlauf.

Weiterführend zur Antriebsmodularisierung und einer gesteigerten Nutzungsflexibilität der Fahrzeugkonzepte forscht das DLR an modularisierten Vorderwagenkonzepten im Multi-Material-Design. Durch den partiellen Einsatz von Faserverbundwerkstoffen und einer leichtmetallintensiven Bauweise ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Gewichtsreduzierung.

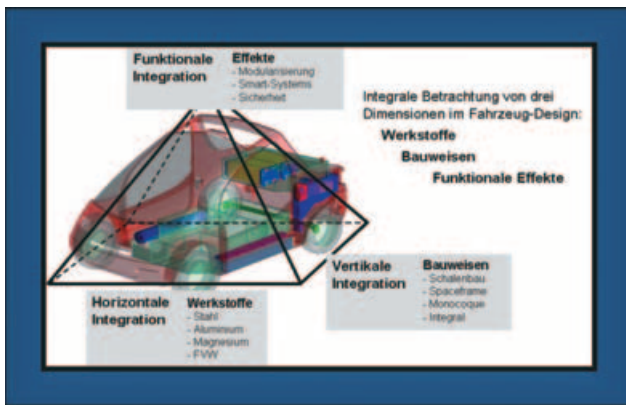

05

DLR-Leichtbaukonzept eines Fahrzeuges mit modularem Containment, eingebunden in eine Sicherheitsstruktur mit Crash-Elementen aus Faserverbundwerkstoff


06

Erprobung eines B-Säulen Crash-Elementes

Hier kann als Beispiel ein Federbeindom mit einem Gewicht von 2,5 kg und damit einer Reduzierung des Gewichts um bis zu 50 Prozent zu vergleichbaren Stahlstrukturen genannt werden. Der Federbeindom ist aus p-CBT mit unidirektionaler Kohlefaserverstärkung (Tailored Fiber Placement) vorgeschlagen. Cyclic Butylene Terephthalate (CBT®) ist ein neuentwickeltes thermoplastisches Materialsystem auf Basis von PBT, das die Vorteile von thermoplastischen sowie duroplastischen Matrizen kombiniert. Die Anwendungsbereiche für das Materialsystem sind vielfältig und auch geeignet für Strukturbauteile im Automobilbau. Die geringe Viskosität bei der Verarbeitung ermöglicht es, Bauteile mit



07 Strategie des Hybrid

thermoplastischer Matrix und einem hohen Faservolumen-gehalt zu produzieren [7].

5. Hybrid³

Die beschriebenen Ansätze führen zur zuvor schon genannten Strategie des Hybrid³, vgl. (07), welche eine integrale Betrachtung der drei Dimensionen

1. Werkstoffe,
2. Bauweisen und
3. funktionale Effekte im Fahrzeug-Design darstellt.

Ein Konzeptentwurf für teiltransparente Strukturen basiert z. B. auf Kohlefasersträngen für hochbelastete Bereiche sowie auf Nanopartikelgefüllte Kunststoffe für vorrangig zur Sicht genutzte Bereiche, siehe (08). Diese teiltransparenten Strukturen sind z. B. in der A-Säule denkbar. Ein Effekt wäre die Erweiterung des Sichtfeldes des Fahrers und damit eine Verbesserung der Sicherheit sowie neuartige Designelemente in Fahrzeugkonzepten.

Hierbei liegen die Forschungsschwerpunkte auf der Verbesserung der Anbindung der unterschiedlichen Bereiche, sowie der Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der nano-

partikelgefüllten Kunststoffe. Erste Untersuchungen des DLR belegen bei Werkstoffen eine E-Modulsteigerung von +26 Prozent bei einer Zumischung von drei Gewichts-Prozent Nanoschicht-silikaten [8].

Die Integration von funktionellen Effekten bedeutet die Einbringung von z. B. aktiven Materialien in die Struktur zur Erhöhung des Komforts durch die Dämpfung von dünnen, leichten Strukturen. Weitere Beispiele für den Ansatz mit "Hybrid³-Effekten könnten schaltbare Oberflächen oder integrierte Energiewandlung sein [9].

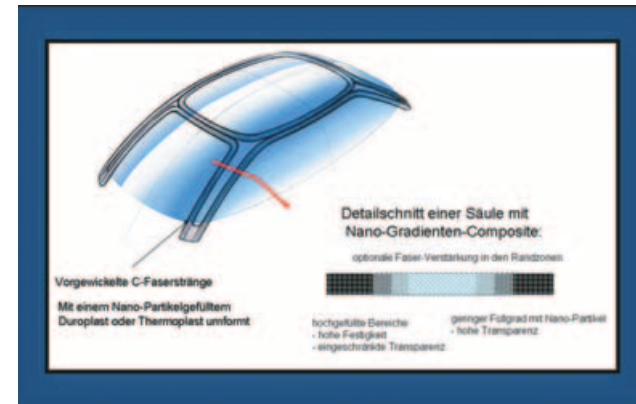
6. Zusammenfassung

Die Diversifikation der einzelnen Fahrzeugklassen wird in den hoch entwickelten Märkten weiter zunehmen. Bedingt durch die steigenden Anforderungen der einzelnen Klassen und deren jeweiligen Stückzahlen wird künftig eine größere Anzahl von Werkstoffen und Bauweisenkonzepten entstehen, vgl. (08). Die Modularisierung wird zu einer Synthese der einzelnen Konzepte beitragen. Durch die Umsetzung der Hybrid³-Strategie mit der Integration von funktionalen Effekten ergeben sich neuartige Designaspekte für zukünftige Fahrzeugkonzepte.

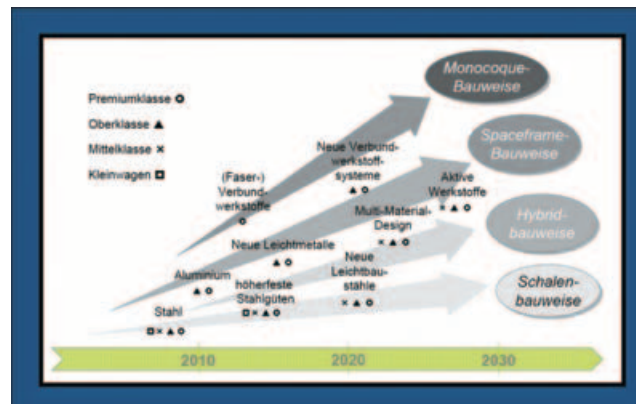
Horst E. Friedrich, Gundolf Kopp, Roland Schöll

Literatur

- 1 Timm, H.: *Entwicklungsstrategien für wirtschaftlichen Leichtbau in Mischbauweisen*, 8. Dresdner Leichtbausymposium 2004, Dresden, (2004)
- 2 Friedrich, H. E.: *Leichtbau und Werkstoffinnovationen im Fahrzeugbau*, ATZ, Vol. 3, p.258-266 (2002)
- 3 Krusche, T., Leyers, J., Oehmke, T. and Parr, T.: *Bewertung von Modularisierungsstrategien für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte am Beispiel des Vorderwagens*, ATZ, Vol. 10, p. 928-933, (2004)
- 4 Goede, M.; Ferkel, H.; Stieg, J. and Dröder, K.: *Mischbauweisen Karosseriekonzepte – Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau*, 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, (2005)
- 5 Bechtold, M.: *FVK-Rohbau für Hochleistungssportwagen – Mercedes-Ben SLR MCLaren, Vison Kunststoffkarosserie 2010*, Bad Nauheim, (2004)



08 Transparente Strukturen mit Kombination von Faserverbundwerkstoffen und Nanopartikel-Werkstoffen



09 Roadmap Werkstoffe und Bauweistrends

- 6 Friedrich, H. E. and Kopp, G.: *Werkstofftechnische Innovationen für die Fahrzeugkonzepte der Zukunft*, Handelsblatt-Tagung, München, (2005)
- 7 Krause, W.; Geiger, O.; Henning, F.; Eyerer, P.: *Development of a Technology for Large Scale Production of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites*, SPE-Conference, Boston, (2005)
- 8 Riedel U.: *Untersuchungen an Nanoverstärkten Compositen*, AVK Tagung Baden-Baden, (2004)
- 9 Friedrich, H. E.: *Werkstofftechniken als Treiber von Innovationen im Automobilbau, Composites in Automotive und Aerospace*, 1. Materialica Kongress, München, (2005)

SUMMARY

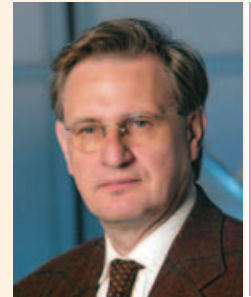
The diversification of the various vehicle classes will further increase in the highly developed markets. Caused by the rising requirements of the individual classes and their respective number of components, an increasing number of materials and construction method concepts will be developed (08). The modularisation will contribute to a synthesis of the single concepts. By the implementation of the Hybrid-Strategy with the integration of functional effects, new design aspects will arise for future vehicle concepts.

Die Diversifikation der einzelnen Fahrzeugklassen wird in den hoch entwickelten Märkten weiter zunehmen. Bedingt durch die steigenden Anforderungen der einzelnen Klassen und deren jeweilige Stückzahlen wird künftig eine größere Anzahl von Werkstoffen und Bauweisenkonzepten entstehen (08). Die Modularisierung wird zu einer Synthese der einzelnen Konzepte beitragen. Durch die Umsetzung der Hybrid-Strategie mit der Integration von funktionalen Effekten ergeben sich neuartige Designaspekte für zukünftige Fahrzeugkonzepte.

DIE AUTOREN

PROF. DR. H. E. FRIEDRICH

studierte Maschinenwesen an der Technischen Universität München. Nach Tätigkeiten in der Maschinenbauindustrie und der Unternehmensberatung wechselte er 1986 in die Luftfahrtindustrie. In leitenden Funktionen arbeitete er u. a. an neuen Bauweisen für Werkstoffe für Flugzeuge sowie an Flugtriebwerken und der Verkürzung der Produkteinführungszeiten. 1996 ging Prof. Friedrich als Leiter der Fahrzeug-Forschung zu VW nach Wolfsburg, wo er zuletzt als Leiter der Konzernforschung Werkstofftechnik und Fahrzeugkonzepte arbeitete. Seit März 2004 ist er Direktor des neu gegründeten Institutes für Fahrzeugkonzepte beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Stuttgart und Professor an der Universität Stuttgart.



DIPL.-ING. GUNDOLF KOPP

schloss sein Studium an der Universität Stuttgart im Jahre 2000 mit dem Diplom-Ingenieur für Luft- und Raumfahrttechnik ab. Von Dezember 2000 bis Oktober 2002 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Fraunhofer Technologie-Entwicklungsgruppe in Stuttgart in der Gruppe „Fertigungstechnik und Anwendung neuer Werkstoffe“. Von November 2002 bis zum Juli 2004 war er Leiter dieser Gruppe.

Seit August 2004 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. am Institut für Fahrzeugkonzepte im Forschungsfeld „Leichtbau und Hybridbauweisen“ in Stuttgart. Ab September 2006 ist Gundolf Kopp kommissarischer Leiter dieses Forschungsfeldes.



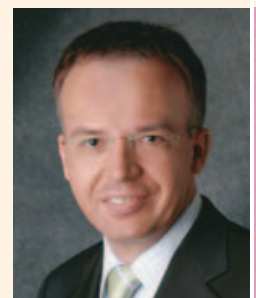
DIPL.-ING.(FH) ROLAND SCHÖLL

absolvierte das Ingenieursstudium an der Höheren Technischen Lehranstalt (HTL) in Fulpmes (Österreich) und später das berufsbegleitende Aufbaustudium Maschinenbau Konstruktion an der Hochschule für Technik und Wirtschaft in Mittweida.

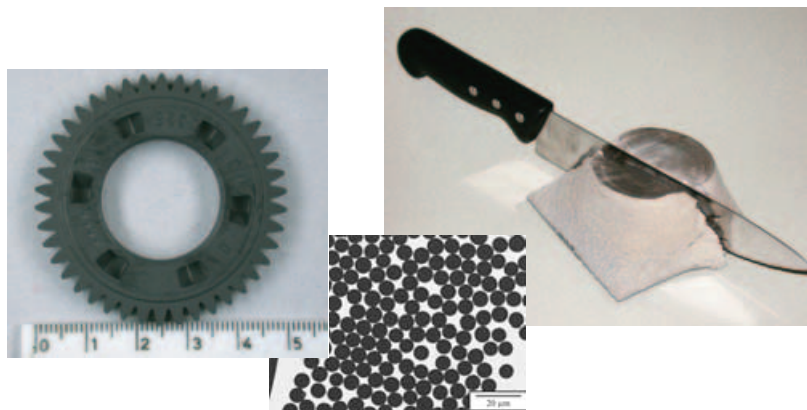
Nach vierjähriger Tätigkeit im Bereich der Konstruktion in der Automobilzulieferindustrie wechselte Roland Schöll 2001 in den Automobilrennsport. Bei der Firma Abt Sportsline GmbH in Kempten war er im Bereich Konstruktion Gesamtfahrzeug für den Audi TT-R in der Deutschen Tourenwagen Meisterschaft zuständig. Seit Juli 2004 arbeitet Roland Schöll als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. am Institut für Fahrzeugkonzepte im Forschungsfeld „Leichtbau und Hybridbauweisen“ in Stuttgart und leitet seit dem 1. August 2006 die Gruppe Konstruktion und Berechnung.

Kontakt

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Fahrzeugkonzepte, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Tel. +49 711 6862-255, Fax +49 711 6862-1255, e-mail: ifk@dlr.de, Internet: www.dlr.de/ffk/



Stofflicher Leichtbau mit Sinterkohlenstoff und Verbundwerkstoffen



1. Leichtbau – Anforderungen und Möglichkeiten

In den Anwendungen des Leichtbaus sind die Anforderungen an die verwendeten Materialien in der Regel auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen: (ultra-) leicht, präzise, steif. Die Materialeigenschaften, die bei diesem stark vereinfachten Lastenheft betrachtet werden müssen, sind hauptsächlich

- Dichte ρ bzw. spezifisches Volumen v
- Elastizitäts- ($\sigma_{0,01}$) & Streckgrenze ($\sigma_{0,2}$)
- Bruchfestigkeit σ_B bzw. σ_{max}
- Dauerfestigkeit σ_D
- Bruchdehnung δ bzw. A
- E-Modul & G-Modul (Schubmodul)
- Korrosionsbeständigkeit

Die am weitesten verbreitete Gruppe von Konstruktionswerkstoffen für strukturelle Anwendungen sind die Metalle. Als sog. Leichtmetalle aufgrund ihrer im Vergleich zu Stahl niedrigen Dichten und damit als Leichtbaumaterialien besitzen dabei Aluminium, Magnesium und Titan sowie ihre Legierungen technische und ökonomische Bedeutung. Allerdings lässt sich die

Gewichtseinsparung durch Anwendung von Leichtmetallen nicht allein vom Stoffwert Dichte ableiten. Vielmehr müssen die erzielbaren mechanischen Eigenschaften mit der Dichte der Materialien korreliert und der tatsächlich mögliche Gewichtseffekt anhand dieser spezifischen Eigenschaften abgeschätzt werden. Dabei sind nicht nur die statischen mechanischen Eigenschaften zu beachten, sondern u. a. auch Dauerfestigkeit, Kriechneigung, Temperaturfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit etc. in Abhängigkeit des fraglichen Anwendungsfalles.

Die Leichtmetalle weisen zwar geringere Dichten auf als Stahl, ermöglichen allerdings bezüglich der spezifischen mechanischen Eigenschaften kaum signifikante Gewichtseinsparungen. Dazu ein Rechenbeispiel: Aluminiumwerkstoffe haben Dichten von ca. $\rho_{Al} = 2,8 \text{ g/cm}^3$, Magnesium von $\rho_{Mg} = 1,8 \text{ g/cm}^3$, Titan von ca. $\rho_{Ti} = 4,4 \text{ g/cm}^3$ und Stahl von $\rho_{St} = 7,8 \text{ g/cm}^3$. Bei Festigkeiten von 500 MPa ($E_{Al} \approx 80 \text{ GPa}$) für gute vergütete Al-Gusslegierungen bzw. 350 MPa ($E_{Mg} \approx 45 \text{ GPa}$) für Mg-Legierungen sowie bis zu 1.400 MPa

($E_{St} \approx 210$ GPa) für Stahl relativiert sich der Gewichtsvorteil der Leichtmetalle. Für Titan mit Festigkeiten bis zu 1.000 MPa ($E_{Ti} \approx 115$ GPa) ist ein signifikanter Gewichtsvorteil gegeben (bei leicht geringerer spezifischer Steifigkeit). Allerdings ist dafür die Verarbeitung von Titan durch die hohe Reaktivität der Schmelze, hohe Schmelztemperaturen (1.660 °C) und problematisches Verhalten bei der Zerspannung stark erschwert. Hinzu kommen stark erhöhte Kosten. Nicht von ungefähr wird im konstruktiven Leichtbau der Einsatz herkömmlicher Konstruktionsmaterialien in Kombination mit intelligenter Bauteilgestaltung zur Reduzierung von Massenanhäufungen und damit Gewicht praktiziert.

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Dauerfestigkeit, die selbst bei maßgeschneiderten pulvermetallurgisch hergestellten Aluminiumwerkstoffen nicht über 200 MPa liegt und bei steigenden Temperaturen bis 350 °C auf Werte bis max. 100 MPa absinkt. Die höchsten zulässigen Dauerbetriebstemperaturen für Aluminiumlegierungen liegen dementsprechend unter 200 °C. Das Dauerfestigkeitsverhalten der Mg-Legierungen ist mit demjenigen der Al-Legierungen vergleichbar, weist allerdings ein ungünstiges Verhalten des E-Moduls unter Druck auf. Außerdem wirkt sich die Korrosionsneigung des Magnesiums ungünstig auf seine Verwendbarkeit aus. Für Titan und seine Legierungen ist das Verhalten bei erhöhten Temperaturen aufgrund des hohen Schmelzpunktes sehr gut. Festigkeit und E-Modul nehmen bis 430 °C nur wenig ab, so dass Bruchfestigkeiten bis ca. 800 MPa erreicht werden. Ab 430 °C kommt es zu starkem Kriechen, so dass es ab dieser Temperatur zu einem signifikanten Abfall der Dauerstandfestigkeit kommt. Bei geringeren Temperaturen ist die Dauerfestigkeit von Titan bei ca. 60 Prozent der statischen Bruchfestigkeit.

Im Vergleich dazu weisen warmfeste Stähle Dauerfestigkeiten bis in Bereiche um 200 MPa bei Temperaturen bis ca. 500 °C auf, und hochlegierte austenitische Stähle erreichen vergleichbare Werte sogar bei Temperaturen oberhalb von 700 °C.

Insbesondere für hoch beanspruchte Bauteile sind daher Werkstoffkonzepte not-

wendig, die niedriges Gewicht mit erhöhter Festigkeit und den Stählen vergleichbarer Steifigkeit bei erhöhten Temperaturen vereinbaren. Der Begriff Hochtemperaturfestigkeit wird hier übrigens nicht verwendet, da der HT-Bereich in der Regel Temperaturen oberhalb von 1.000 °C bezeichnet, bei denen nur die sog. Superlegierungen (Nickelbasislegierungen) im Bereich der Stähle oder keramische Werkstoffe bzw. Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (CMC) eingesetzt werden.

Da reine Leichtmetalle und ihre Legierungen den Anforderungen nicht gerecht werden, besteht ein Lösungsansatz darin, Verbundwerkstoffe mit hochfesten und hochsteifen Verstärkungselementen zu entwickeln. Auf der anderen Seite ergeben die hohe Warmfestigkeit sowie die chemische und Verschleißbeständigkeit der modernen Strukturkeramiken in Verbindung mit deren geringem spezifischem Gewicht völlig neue und extreme Anwendungsmöglichkeiten. Eine besondere Stellung nehmen die technischen Kohlenstoffe und Graphite sowie deren arteigene Faserverbundwerkstoffe (CFC) als Ultraleichtwerkstoffe mit Dichten unter 1,9 g/cm³ ein.

Die Möglichkeit von Hybrid- bzw. Sandwichbauweisen soll hier in den Bereich des konstruktiven Leichtbaus gezählt und daher nicht explizit besprochen werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Leichtbaukonzepte basieren im Wesentlichen auf der konstruktiven Berechnung und Berücksichtigung von Belastungen zur Vermeidung von Überdimensionierung (konstruktiver Leichtbau) sowie auf der Verwendung von Materialien, welche die erforderlichen mechanischen und sonstigen Eigenschaften bei entsprechend geringer Dichte (gute spezifische Eigenschaften!) und somit geringem Gewicht ermöglichen (stofflicher Leichtbau). In der anwendungsrelevanten Praxis sind beide Varianten in Einklang zu bringen, um neue oder verbesserte Komponenten oder ganze Systeme für Leichtbauanwendungen zu qualifizieren.

Stofflicher und konstruktiver Leichtbau sind heute zentrale Aufgabenstellungen und Herausforderungen im modernen Maschinenbau, insbesondere für Anwendungen im Fahrzeug- und Motorenbau, in der Luft- und Raumfahrttechnik aber auch in vielen anderen dynamisch hoch beanspruchten Maschinensystemen wie in der Druck- und Textilmaschinen-technik.

Leichtmetalle standen am Anfang dieser Entwicklung, Faserverbundwerkstoffe mit Polymermatrix traten in den 1970er Jahren dazu und dominieren heute z. B. den Markt für leichte Flächentragwerke im Flugzeugbau. Mechanisch, thermisch und tribologisch hoch beanspruchte Strukturen wurden in den vergangenen Jahrzehnten auch mit Keramik- und Glasmatrix entwickelt, so dass dem Konstrukteur heute eine breite Palette von leichten und steifen Verbundwerkstoffen für eine Vielzahl von Anwendungen zur Verfügung steht.

SUMMARY

Lightweight engineering is mainly based on load calculation and component design aimed on lean structures, and on the utilization of materials with appropriate mechanical and functional properties at low density (good specific properties). In industrial applications, both aspects have to be taken into account in lightweight component design to develop new or improved products. Lightweight materials and lightweight engineering by design are central challenges in today's engineering business, particularly with regard to automotive, engine, and aerospace applications. However, more traditional industries like e. g. printing or textile machines with highly dynamic loads on components will also benefit from lightweight engineering progress.

First lightweight materials were light metals. From the 1970s, fiber compounds with polymer matrix started to conquer the market for light aircraft surface structures, and nowadays, a broad variety of materials for special applications are available for design engineers. Some of them are presented in this paper.

Neben der technischen Leistungsfähigkeit spielen die Zielkosten, und damit im Kern natürlich die Verfahrens- und Fertigungstechnik solcher Leichtbauweisen und Werkstoffe, im modernen Maschinenbau eine entscheidende Rolle. Dies hat zu neuen Bauweisen, insbesondere auch zu Schichtverbundwerkstoffen mit funktionaler Trennung von Struktur- und Oberflächeneigenschaften geführt. Aber auch neue Fertigungstechniken mit Innovationen über die gesamte Abfolge der Prozesskette sind zentrale Gegenstände von Forschung und Entwicklung. Im Folgenden wird dies anhand aktueller Entwicklungsarbeiten des Instituts für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile der Universität Stuttgart in den Bereichen Leichtmetall-MMC sowie sinterfähige Kohlenstoffe verdeutlicht.

2. Verbundwerkstoffe mit metallischer Matrix (MMC – metal matrix composites)

2.1 Einlagerung hochfester und hochsteifer Verstärkungsphasen

Im Bereich der Anwendungen bei Raumtemperatur haben sich in breiten Gebieten faserverstärkte Kunststoffe (PMC, z. B. glasfaserverstärkter Kunststoff, GFK) etabliert. PMC-Bauteile mit Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfaserverstärkung erreichen gute spezifische Eigenschaften und werden daher beispielsweise für großflächige Strukturelemente (Behälter, Tanks, Kabinen, Binnenschiffahrt, Flächentragwerke, usw.), Abwasser- und Rohrleitungstechnik, Schutzvorrichtungen, Sportgeräte, u.v.a.m. eingesetzt. Dabei werden bei Fasergehalten bis zu 60 Vol.-Prozent und Dichten von 1,4 - 2,1 g/cm³ Festigkeiten bis 1.400 MPa und E-Moduln im Bereich von 70 GPa, für Borfasern sogar bis 215 GPa erreicht (für gängige PMCs allerdings geringere Werte).

Allen faserverstärkten Kunststoffen gemeinsam ist der begrenzte Anwendungsbereich auf Temperaturen zwischen -50 °C bis max. 300 °C bei Bruchdehnungen kleiner 1,5 Prozent. Für den Anwendungsbereich bei erhöhten Temperaturen fehlt demnach ein struktureller Leichtbauwerkstoff mit ausreichender Steifigkeit, Zähigkeit und Dauerfestigkeit, der geringe Bauteil-

gewichte ermöglichen würde. Verbundwerkstoffe mit Leichtmetallmatrix sind geeignet, diese Lücke zu schließen.

Metallmatrix-Systeme mit keramischen oder metallischen Verstärkungsphasen in Form von Fasern, Whiskern oder Partikeln (z. B. Kohlenstoff, SiC, Al₂O₃, Bor) weisen für strukturelle, aber auch funktionelle Anwendungen eine Reihe von vorteilhaften Eigenschaften auf. Dazu gehören:

- verbesserte mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur (E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit)
- verbesserte mechanische Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen (E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit, Dauerfestigkeit, Ermüdungsverhalten, Kriechfestigkeit)
- verbesserte Temperaturwechselbeständigkeit
- bessere Verschleißbeständigkeit
- veränderte thermophysikalische Eigenschaften (z. B. reduzierte thermische Dehnung)

Durch die Wahl der Verstärkungsphase lassen sich die Eigenschaften von MMC - Verbundmaterialien gezielt beeinflussen (z. B. niedrige Dichte und hohe spezifische mechanische Kennwerte von C-Fasern, geringe thermische Dehnung von Kohlenstoff und Keramik). Zudem bieten MMC das Potential sowohl für maßgeschneiderte nicht-isotrope Werkstoffe (mit kontinuierlicher Faserverstärkung) als auch für isotrope Werkstoffe (durch Kurzfaserverstärkung oder Partikelverstärkung).

Die erzielbaren mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur sollen anhand einiger Beispiele aus der Literatur für kontinuierlich faserverstärktes Aluminium illustriert werden. Da eine komplette Beschreibung der mechanischen Eigenschaften hier schwer dargestellt werden kann, sind nur Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit als Referenzkennwerte angegeben:

- B/Al: $E = 210\text{GPa}$, $\sigma_{\max} = 1500\text{MPa}$
- SiC/Al: $E = 310\text{GPa}$, $\sigma_{\max} = 250\text{MPa}$
- Al₂O₃/Al: $E = 140\text{GPa}$, $\sigma_{\max} = 950\text{MPa}$
- C/Al: $E = 160\text{GPa}$, $\sigma_{\max} = 690\text{MPa}$

Dabei handelt es sich um Werte in Faser- richtung bei Faservolumengehalten von 30 bis 50 Prozent. Die Kennwerte quer zur Faserrichtung hängen stark vom Faservolumen- gehalt, der Art der Fasern und dem Charakter des Faser/Matrix-Interfaces ab und variieren dementsprechend in weiten Grenzen. Die Dichten der Faser/Al- Matrix-Verbundwerkstoffe liegen im Bereich $\rho_{MMC} = 2,2-3,4 \text{ g/cm}^3$, je nach Fasermaterial und -gehalt.

Die Bruchdehnungen faserverstärkter MMC liegen in der Regel unterhalb ein Prozent, und auch die Bruchzähigkeiten sind geringer als ohne Verstärkungsphasen. Für kurzfaser-, whisker- und partikelverstärkte Materialien sind die Bruchdehnungen höher als für kontinuierliche Faserverstärkung, dafür die Steifigkeiten geringer und die absoluten Festigkeiten hängen stark von der Matrixlegierung ab (z. B. SiC/Al: $E = 130 \text{ GPa}$, $\sigma_{\max} = 585 \text{ MPa}$).

Einer der Gründe für die Anwendung von MMC-Materialien sind die verbesserten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen. Beispielsweise sinkt die Dauerfestigkeit der unverstärkten Kolbenlegierung AlSi12-CuMgNi bei 350-400 °C auf 25 MPa. Dieser Wert lässt sich durch Al₂O₃-Kurzfaserverstärkung verdoppeln, bei gleichzeitiger dramatischer Erhöhung der Temperaturwechselbeständigkeit, was die Gruppe der MMCs speziell für Anwendungen bei erhöhten Temperaturen befähigt.

2.2 Innovationstreiber Produktionskosten

Bisher führt die Einlagerung von faserförmigen Verstärkungskomponenten zu einer signifikanten Erhöhung der Herstellungskosten aufgrund der zeitaufwendigen Prozesse und hohen Werkzeug- sowie Investitionskosten. Die wichtigsten Fertigungsverfahren für faserverstärkte MMC sind

- Druckinfiltration metallischer Schmelzen in Faservorkörper (Preforms) unter geringem Druck (Squeeze-Casting) oder vakuumunterstützt (Vacural-Verfahren),
- Gasdruckverfahren (Eintauchen in Schmelze im Autoklaven und Infiltration unter Druck zur Verringerung

mech. Belastung & für komplexe Geometrien),

- axiales bzw. isostatisches Heißpressen (pulvermetallurgisches Verfahren),
- Heißpressen von Faser/Folien-Laminaten (Diffusion Bonding).

Bei der Flüssigphaseninfiltration in Faserpreforms werden die Fasern den chemisch aggressiven Metallschmelzen exponiert, wodurch es insbesondere bei C-Fasern zu Grenzflächenreaktionen und Carbidbildung kommt. Aluminiumcarbidphasen am Faser/Matrix-Interface können durch ihre Sprödbuchanfälligkeit und mangelnde Korrosionsbeständigkeit zu einem vorzeitigen Versagen des Verbundes unter Beanspruchung führen, wodurch eine optimale Ausnutzung der Faserfestigkeit verhindert wird. Zur Vermeidung dieser Effekte müssen zusätzliche Schutzschichten auf den Verstärkungsfasern appliziert werden. Zudem kann es zu Löse- und Ausscheidungsprozessen am Formwerkzeug sowie wärmeübergangsbedingten Gefügeausbildungen im Randbereich kommen.

Durch die vergleichsweise niedrigen Temperaturen bei den Diffusionsprozessen in fester Phase wird das Problem der Faserschädigung vermieden. Allerdings ist die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren wegen der langen Prozesszeiten eingeschränkt, und auch die Bauteilgeometrien beschränken sich auf relativ einfache Formkörper, die durch zerspannende Verfahren weiterbearbeitet werden müssen.

Ein neues Herstellungsverfahren für MMC-Komponenten, welches an der Universität Stuttgart im Rahmen des Kompetenzzentrums Gießen und Thixoschmieden, CCT, entwickelt wurde, arbeitet mit der Lamination von Prepregs aus Fasergeweben bzw. -gelegen mit thermokinetisch abgeschiedenem Matrixmetall und anschließenden



Lichtbogendrahtgespritzter Bolzen aus AlSi6, erhitzt in das Thixo-2-Phasengebiet und mit geringer Kraft zerteilt.

der Verdichtung der Komposite durch Schmieden im teilflüssigen Zustand.

Durch kurze Fertigungszyklen, reduzierten Werkzeugverschleiß und die Herstellung endabmessungsnaher Bauteile (near net-shape forming) können die Fertigungskosten in diesem Verfahren reduziert und somit Anwendungen nicht nur in der Luftfahrt, sondern auch im Fahrzeugbau und im allgemeinen Maschinenbau erschlossen werden.

Es bleibt anzumerken, dass die Kosten von MMC-Materialien im direkten Vergleich mit konventionellen Leichtmetall-Guss- oder -Schmiedelegerungen auch in Zukunft höher sind. Dies ist aufgrund der größeren Anzahl an Prozessschritten und höheren Halbzeugkosten der Verstärkungsphasen unumgänglich. Aus diesem Grund bleibt diese Werkstoffklasse auf Anwendungen beschränkt, für welche die Machbarkeit bzw. die technischen Kennwerte Priorität besitzen oder sich aus den verbesserten Kennwerten im Betrieb ein Amortisationseffekt ergibt. Insbesondere im Bereich des Leichtbaus zur Reduzierung bewegter Massen, nicht nur im Fahrzeugbau, sondern auch für Maschinenelemente, kann dieser Gesichtspunkt zu einer guten Wettbewerbsfähigkeit von MMC-Materialien führen.

2.3 Formgebung durch Umformen im teilflüssigen Zustand: Thixoschmieden/Thixogießen

Thixoschmieden, oder Schmieden im teilflüssigen Zustand (Semi-Solid Forging), ist das Umformen eines mehrphasigen metallischen Werkstoffes in einem Temperaturbereich, in welchem das Material teilflüssig zwischen Liquidus- und Solidus-Linie im Zweiphasengebiet vorliegt. Dabei soll die feste Phase in ausreichender Konzentration vorliegen (40 bis 80 Prozent), so dass sie ein Festkörperskelett bildet, welches erst unter Einwirkung von Scherkräften im Formwerkzeug zerfällt, wodurch die Viskosität des Materials abrupt abfällt und es sich leicht umformen lässt, siehe (01) am Beispiel eines thermokinetisch abgeschiedenen Massivkörpers aus der Zweiphasenlegierung AlSi6. Durch das thixotrope (scherverdünnende) Materialverhalten wiederum lassen sich bei relativ geringen Kräften hohe

Umformraten und geringe Wandstärken der Bauteile erreichen. Ähnliches gilt für den Thixogießprozess, bei dem der Anteil an Flüssigphase höher liegt.

Das Thixo-Schmieden zeichnet sich im Vergleich zum herkömmlichen Schmieden durch niedrigere Verschlusskräfte, niedrigeren Werkzeugverschleiß, hohe Oberflächengüten und die Ermöglichung komplexerer Bauteilgeometrien aus. Im Vergleich zum Gießen ergeben sich weniger Poren und Lunker, kürzere Zykluszeiten, bessere Oberflächengüten, eine feinkörnige Gefügestruktur sowie eine größere Variabilität in der Legierungswahl. Nachteile sind höhere Rohstoffkosten, die zusätzliche Schwierigkeit der Halbzeugerwärmung in den geeigneten Temperaturbereich sowie eine kompliziertere Prozesstechnik, da nur eine exakte Temperaturführung und schnelle Bearbeitung die erwünschten Gefügeeigenschaften während und nach dem Umformen gewährleisten.

Für die Herstellung von Verbundmaterialien empfiehlt sich das Umformen im teilflüssigen Zustand insbesondere auch durch die im Vergleich zur Flüssigphaseninfiltration geringeren Temperaturen des Matrixmetalls während der Verdichtung. Für das System Al-Si sind typische Verarbeitungstemperaturen beim Schmieden 500-540 °C und beim Gießen 660-700 °C. Für die bereits erwähnte Legierung AlSi6, aber auch andere Gusslegierungen wie AlSi7Mg, liegen die Prozesstemperaturen für das Umformen im teilflüssigen Zustand im Bereich um 580 °C. Für typische Schmiedelegerungen mit geringerem Siliziumgehalt, z. B. AlMgSi1, beträgt die Verarbeitungstemperatur für den Thixoschmiedeprozess ca. 640 °C. Das bedeutet, je nach Legierung liegen die Temperaturen um bis zu 100 °C niedriger als bei der Flüssigphaseninfiltration. Hinzu kommt der limitierte Anteil an flüssiger Phase, welche mit der Verstärkungsphase reagieren könnte. Da aufgrund der relativ geringen Preise und guten mechanischen Eigenschaften die Verwendung der in Kontakt mit Metallschmelzen empfindlichen C-Faser angestrebt wird, führen geringere Temperaturen und reduzierter Schmelzeanteil zu einer Verringerung der chemischen Fasergrenzflächenreaktionen und damit zu besseren MMC-Eigen-

schaften. Ein weiterer Vorteil der reduzierten Temperaturen und des Festphasenanteils ist die geringere thermische Schrumpfung der Matrix bei der Bauteilerkaltung, wodurch sich die Eigenspannungsentstehung reduziert.

Um dieses Verfahren zur Herstellung von Verbundwerkstoffen anwenden zu können, müssen die Matrixlegierungen in globularer Gefügeausbildung vorliegen. Ein herkömmliches Gussgefüge ist dendritisch, was bei der Erwärmung zu einem Verhaken der Körner führt, so dass das erwünschte thixotrope Verhalten ausbleibt. In globularen Gefügen sind die einzelnen Körner lediglich durch Diffusionshälse miteinander verbunden, welche unter Einwirkung von Scherkräften versagen und dadurch ein freies Abgleiten ermöglichen. Die Herstellung von Gefügen feinkörniger globularer Mikrostruktur ist eine zusätzliche Aufwendung, welche allerdings Bauteile ermöglicht, die aufgrund der Feinkörnigkeit des Gefüges verbesserte mechanische Eigenschaften gegenüber Gussgefügen aufweisen, die in der Regel als Wettbewerber betrachtet werden können.

2.4 Matrixapplikation durch thermokinetische Abscheidung und Beschichtung

Konventionelle Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen für das Umformen im teilflüssigen Zustand sind Rheostrangguss, Kornfeinung durch chemische Zusätze sowie Sprühkompaktieren. Bei diesen Verfahren wird die Dendritenbildung verhindert, indem die Schmelze während der Erstarrung gerührt, die Anzahl der Erstarrungskeime erhöht oder die Schmelze verdüst und die Tropfenform durch schnelle Erstarrung konserviert wird. Allerdings führen diese Technologien zu Massivkörpern, welche nicht für die Infiltration von Faserstrukturen geeignet sind, da lange Fließwege der festen Phase die Faserorientierung beeinträchtigen und zur Schädigung einzelner Fasern führen könnten.

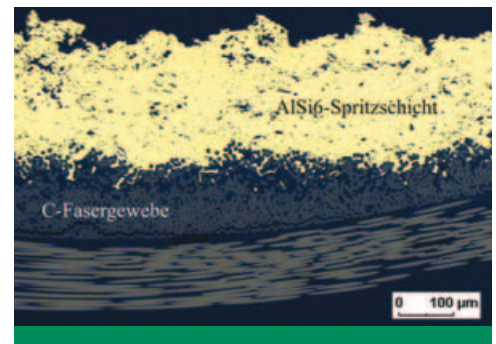
Als Vorkörper für eine Thixo-Umformung faserhaltiger Leichtmetalle kommen Lamine aus Fasergeweben und Metallblechen in einer geeigneten Legierungszusammensetzung in Frage, so dass die

Fließwege des Matrixmaterials während der Verdichtung kurz sind. Zur Verbesserung der Handhabbarkeit beim Einlegen des Vorkörpers in das Umformwerkzeug können auch Gewebelamine verwendet werden, die mit einer Metallschicht definierter Dicke versehen sind. Diese Schicht kann vorzugsweise über thermokinetische Abscheidung (Thermisches Spritzen) aufgebracht werden, und das beschichtete, vorimprägnierte Gewebe- oder Gelegelaminat wird Prepreg (pre-impregnated) genannt (02).

Die thermisch gespritzten Metallschichten bieten den Vorteil einer äußerst feinkörnigen Gefügeausbildung. Während die Korngrößen bei den thixotrop umformbaren Al-Si-Blechen 5-20 μm betragen, liegen die Abmessungen der einzelnen Phasen in thermisch gespritzten Schichtgefügen durch die hohe Abkühlgeschwindigkeit beim Schichtauftrag im Submikronbereich. Dadurch kann bei der Umformung und Verdichtung eine verbesserte Infiltration der metallischen Phase in das Fasergerüst erreicht werden. Insbesondere bei UD-Fasergelegen, die im Falle hoher Faservolumenanteile und Monofilamentdurchmessern der C-Fasern von 6-7 μm nur minimale Zwischenräume für die Matrixinfiltration bieten, sind möglichst kleine Korngrößen der metallischen Festphase wichtig.

Vorteile der Matrixapplikation durch thermokinetische Abscheidung sind

- dichte, bereits teilweise imprägnierende Schichten auf den Geweben,
- vollständige, porenfreie Imprägnierung der Verstärkungsphase beim Thixo-Schmieden durch kurze Fließwege und kleine Korngrößen,
- maßgeschneiderte Mikrostruktur durch schnelle Erstarrung für dendritenfreie Matrix nach dem Umformen,
- schnelle, kostengünstige und prozessstabile Abscheidetechnik für die Prepregs,
- Einstellung des Faservolumenanteils über die Schichtdicke möglich,
- Einsatz von einfachen und komplexen Legierungen möglich,



Mikrostruktur, $C_{2D-F}/AlSi_6$ -MMC; Kohlenstofffasergewebe beschichtet/imprägniert mit $AlSi_6$ durch Lichtbogendrahtspritzen.

- alternatives Verfahren zur Herstellung ultra-feinkörniger Massivbolzen.

Um die Verfahren der thermokinetischen Beschichtung (Lichtbogendrahtspritzen, atmosphärisches Plasmaspritzen APS) mit Prozesstemperaturen der schmelzflüssigen Spritzstoffe bis über 2.000 °C zur Metallabscheidung auf temperaturempfindlichen Fasermaterialien wie C-Fasern anwenden zu können, müssen charakteristische Eigenschaften der Prozesse beachtet werden. Die hohen Gasflussraten bedingen Spannung und Fixierung der zu beschichtenden Gewebe oder Gelege. Zu diesem Zweck wurde eine Pilotanlage zur Spannung von Gewebbahnen bis zu einer Breite von 1,5 m und zum Transport von Rolle zu Rolle über eine Beschichtungsfläche entwickelt und in Betrieb genommen.

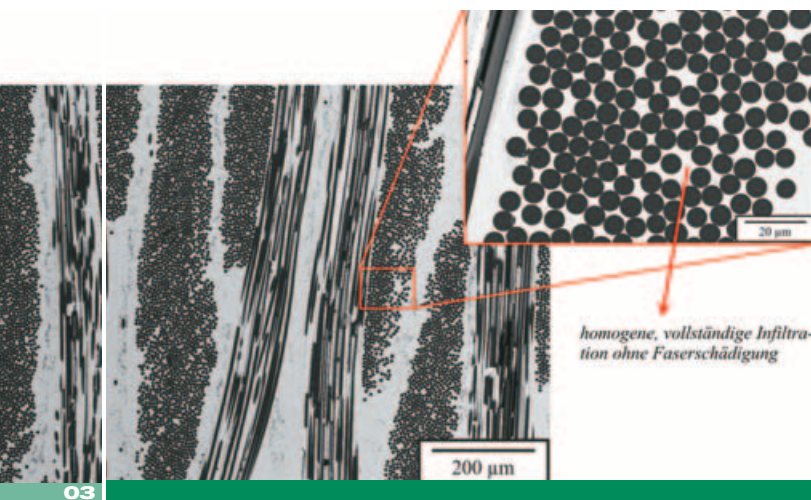
Weiterhin muss verhindert werden, dass die Fasern durch die hohe thermische Energie der Spritzpartikel beschädigt werden. Dies wird durch eine optimierte Brennerkinematik, hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen Brenner und Substrat sowie zusätzliche Oberflächenkühlungen ermöglicht. Durch optimierte Prozessführung können Oberflächentemperaturen der beschichteten Gewebe unterhalb von 150 °C realisiert werden, und nur an der unmittelbaren Beschichtungsstelle sind

die Temperaturen für die Dauer von 0,02 Sekunden oberhalb von 220 °C.

Das Gefüge thermokinetisch abgeschiedener Schichten ist sehr inhomogen und weist unterschiedlich deformierte Splats sowie Poren und Oxideinschlüsse auf. Der Oxidgehalt ist bei Aluminiumlegierungen durch die Passivierung jedoch sehr gering und führt zu einer leichten Erhöhung des E-Moduls. Nach dem Erhitzen in das Zweiphasengebiet und Verdichtung durch Thixoschmieden stellt sich ein feinkörniges, homogenes globulares und dichtes Gefüge ein und die Faserprepregs sind vollständig infiltriert. Ein Schliff durch einen solchen Gewebe-MMC ist in **(03)** dargestellt.

2.5 Thermisch gespritzte und thixogeschmiedete Leichtmetall-MMC

Bei der Umformung bzw. Verdichtung im Schmiedewerkzeug muss versucht werden, das thixotrope Temperaturfenster aufrecht zu erhalten, bis das Leichtmetall in die Lücken zwischen den Geweben und einzelnen Fasern infiltriert und das Bauteil vollständig verdichtet ist. Das bedeutet, dass der Schmiedeprozess möglichst schnell (< 16 Sekunden) abgeschlossen wird. Gleichzeitig führen kurze Zykluszeiten zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Produktionsprozessen. Um Faserschädigung und eine Verringerung des Orientierungsgrades zu vermeiden, sollten die Fließwege bei hohen Kolbengeschwindigkeiten der Presse kurz sein. Dies wird durch thermokinetisch applizierte Schichten gewährleistet, welche die oberen Faserlagen bereits vorimprägnieren und zudem kleine Korngrößen aufweisen. Dies bedeutet aber auch, dass keine beliebigen Schichtdicken abgeschieden werden können, da sich sonst die Fließwege verlängern. Daher müssen die Prepregs vor dem Umformprozess zugeschnitten und gestapelt werden. Typischerweise lassen sich durch diese Technik einfacher flächige als kompakte Bauteile herstellen. Aktuelle Entwicklungsarbeiten beschäftigen sich mit der Übertragung auf komplexer geformte Komponenten mit lokal eingebrachter Faserverstärkung.



$C_{2D-F}/AlSi_6-MMC$;

Thermokinetisch abgeschiedene AlSi₆-Matrix und C-Faser-Gewebeverstärkung,

Verdichtung durch Thixoschmieden.

Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen (TEM) und Elektronen-

beugungsexperimente zeigen im Fall von C-Faserverstärkung trotz der geringeren Temperaturen die Entstehung von Aluminiumcarbiden an den Faser/Matrix-Grenzflächen, allerdings in einem stark reduzierten Ausmaß. Um auf die Anwendung von Fasercoatings zur Verhinderung dieser Schädigungen verzichten zu können, wird an verbesserten Erwärmungskonzepten gearbeitet, durch welche die Aufheiz- und Haltezeit reduziert werden. Gleichzeitig wird das Faserbeschichtungsverfahren weiter untersucht und hinsichtlich einer Übertragung in industrielle Anwendungen optimiert.

Durch Verwendung des elektrischen Lichtbogendrahtspritzverfahrens (Arc-Wire) zur Faserbeschichtung ist eine hohe Wirtschaftlichkeit der Leichtmetallapplikation gewährleistet, wobei verschiedene Legierungen als Drahtmaterial kommerziell verfügbar sind. Bei einer industriellen Umsetzung der Technologie sind der Auswahl an Matrixmaterialien kaum Grenzen gesetzt. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die Schichtabscheidung unter atmosphärischen Bedingungen, wodurch kostenintensive Vakuumkammern entfallen.

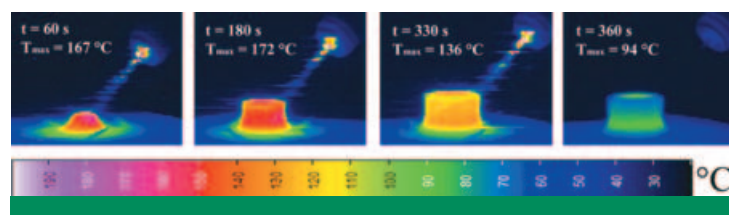
2.6 Partikelverstärkung: Low-Cost-Alternative für komplexe Bauteilgeometrien

Für partikelverstärkte MMC (auch: PRM - particle reinforced metal) stehen eine Anzahl keramischer Verstärkungsphasen zur Verfügung, wie z. B. SiC, Al₂O₃, B₄C, BN, AlN und TiB₂, und auch metallische Partikel werden in PRM eingesetzt. Die Zugabe von Partikeln führt zu einer Erhöhung von Härte und Verschleißbeständigkeit, einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit) insbesondere auch bei erhöhten Temperaturen und einer Verringerung der thermischen Ausdehnung.

Für Bauteile, deren Zielkosten die Verwendung teurer hochfester Fasern nicht erlauben, stellen isotrope MMC aufgrund der in der Regel günstigeren Rohstoffe und Fertigungsprozesse eine sinnvolle Alternative dar. Darüber hinaus sind mit diesen Materialien komplexere Bauteilgeometrien zu ermöglichen als mit kontinuierlicher Faserverstärkung. Die genannten Vorteile des Umformens im teilflüssigen

Zustand hinsichtlich reduzierter Schädigung der Verstärkungsphase und vorteilhaften Matrixgefüges lassen sich auch bei der Herstellung partikelverstärkter MMC-Komponenten nutzen. Darüber hinaus lässt sich dabei auch das Gießen im teilflüssigen Zustand anwenden.

Die Ähnlichkeit des thermokinetischen Abscheideprozesses mit dem Sprühkompaktierprozess legen das Abscheiden massiver, rotationssymmetrischer Bolzen durch Lichtbogendrahtspritzen nahe. Der Arc-Wire-Prozess zeichnet sich durch



Al₂O_{3,p}/A2017-MMC-Bolzen; Thermografie des Abscheideprozesses.

hohe Abscheideraten aus und eignet sich damit für die Herstellung schwerer Massivkörper. Für die Abscheidung partikelverstärkter Leichtmetallhalbzeuge werden gefüllte Drähte benutzt, bei denen das Mantelmaterial die Matrix und das Füllpulver die Verstärkungsphase liefert. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde die Legierung AlCu4MgSi (A2017) als Matrixmaterial verwendet.

Eine Schwierigkeit bei der Herstellung geeigneter Gefüge für das Thixoschmieden oder Thixogießen liegt wiederum in der Temperaturführung des Prozesses, da die Abscheidung großer Bolzen zu Zykluszeiten bis zu 20 Minuten führt, wobei es zu Rekristallisation und Kornwachstum kommen kann. Für ungekühlte Prozesse führt dies zu Korngrößen des Matrixmaterials von 50-200 µm. Durch intensive Druckluftkühlung der Substratplatte lässt sich die Temperatur jedoch dauerhaft auf Werte unterhalb 200 °C begrenzen, (04), so dass die durchschnittliche Korngröße kleiner 10 µm bleibt.

Aktuelle Untersuchungen zur Herstellung von PRM-Halbzeugen konzentrieren sich

auf Parameteruntersuchungen der thermokinetischen Abscheidung mit dem Arc-Wire-Verfahren zur Reduzierung der thermischen Energie der Spritzpartikel. Durch partielles Aufschmelzen der keramischen Verstärkungsphasen kommt es zu Partikelagglomeration, welche die mechanischen Eigenschaften der MMC einschränkt.

3. Sinterkohlenstoffe als Ultraleichtbauwerkstoff

Einer der Forschungsschwerpunkte des IFKB ist die Entwicklung von so genannten sinterfähigen Kohlenstoffen, die als ultraleichte Strukturwerkstoffe enormes Potential besitzen. Diese Materialklasse bietet eine sehr ungewöhnliche Kombination von Materialeigenschaften. Die Materialien sind einerseits ideale trocken-schmierfähige Lagerwerkstoffe im Normaltemperaturbereich, andererseits aber auch hochfeste Strukturwerkstoffe für den Hochtemperaturbereich. Die sinterfähigen Kohlenstoffe sind verglichen mit herkömmlichen Feinkorngraphit extrem hochfest und hochmodulig, außerdem eigenschmierfähig; die Härte der Materialien lässt sich durch die Auswahl der Rohstoffe und die Wärmebehandlung von graphitartig weich bis glasartig spröde einstellen. Die Materialien sind unter Abwesenheit von Sauerstoff hochtemperaturbeständig bis ca. 2.000 °C und weisen dabei auch keinen Abfall der Festigkeit und keine messbare Kriechneigung auf. Daher sind sie insbesondere für mechanisch hochbelastete Hochtemperaturanwendungen attraktiv.

3.1 Motivation der Werkstoffentwicklung und Anwendungsprofil für Bauteile aus Sinterkohlenstoff

Im Rahmen des Teilprojektes Tribochem des integrierten EU-Projektes JP Nanoker werden im IFKB derzeit in Kooperation mit SGL Carbon near-net-shape Fertigungsprozesse zur Herstellung von Sinterkohlenstoffen für tribologische Anwendungen entwickelt. Dies sind insbesondere komplex geformte Kohlenstoff-Gleitringe und Lagerwerkstoffe für den Trockenreibungs- und Mischreibungsbereich. Durch die hohe strukturelle Festigkeit und Kantenbruchfestigkeit lassen sich Reibpaarungen

mit Metall- oder Keramikwerkstoffen herstellen, die bei extrem hohen Flächenpressungen ungeschmiert und dabei praktisch verschleißfrei arbeiten.

Eine weitere wichtige Anwendung könnte im Bereich von Behälterwerkstoffen und Heizelementen für die Elektronikindustrie entstehen. Auch hier werden heute schon Feinkorngraphite eingesetzt, die extrem aufwendig chemisch gereinigt werden müssen, um die hohen Anforderungen zum Beispiel bei der Herstellung von halbleiterfähigem Silizium zu erfüllen. Diese Nachreinigung könnte im Falle der sinterfähigen Kohlenstoffe entfallen. Die Verbindung mit der Möglichkeit, solche Behälter in endkonturnaher Qualität herzustellen, kann den Sinterkohlenstoffen in Zukunft ein großes, bislang ungenutztes Potential eröffnen.

Ausgangspunkt für die Entwicklungsarbeit war ein konkreter Bedarf für neue Kohlenstoffwerkstoffe als Ersatz für Feinkorngraphit. Der Bedarf begründete sich damit, dass die herkömmlichen Materialien sowohl hinsichtlich ihrer Eigenschaften als auch in Bezug auf die Fertigungstechnik weitgehend ausgereizt sind.

Klassische Feinkorngraphite haben eine Binder-Füller-Architektur. Füllstoffe wie Koks, Graphit und Ruß werden durch eine Binderphase zusammengehalten, die durch Verkoken von Pech erzeugt wird. Dadurch bilden sich an den Korngrenzen Mikrorisse im Gefüge, welche die Festigkeit der Materialien limitieren. Da sich am prinzipiellen Aufbau der Graphitmaterialien seit mehr als hundert Jahren nichts geändert hat, basierte die bisherige Weiterentwicklung im Bereich von hochfesten Feinkorngraphiten darauf, die Füllstoffe immer feiner zu vermahlen und auf diese Weise die Defektgröße zu minimieren und die Festigkeit zu steigern. Mittlerweile wurde für Sonderwerkstoffe wie EDM-Elektroden schon die 1 µm Grenze für die Primärkorngöße unterschritten. Dieses Vorgehen stößt allerdings nun an seine technischen und ökonomischen Grenzen, da die Mahlprozesse sehr zeit- und energieaufwendig und somit für breite Anwendungen vollkommen unwirtschaftlich werden. Aus diesem Grunde wurden im Bereich anspruchsvoller Gleit-

paarungen die Feinkorngraphite teilweise durch andere Werkstoffe wie SiC aus den angestammten Märkten verdrängt. Um dem Kohlenstoff Marktsegmente zu erhalten und das verloren gegangene Terrain zurück zu gewinnen, war ein neuer Ansatz erforderlich, der eine vollkommene Abkehr von der überlieferten Technologie bedeutete. Die sinterfähigen Kohlenstoffe basieren auf anderen Rohstoffen, deren Verarbeitung wiederum mit neuen, an die keramische Fertigungstechnik angelehnten Prozesstechniken erfolgt.

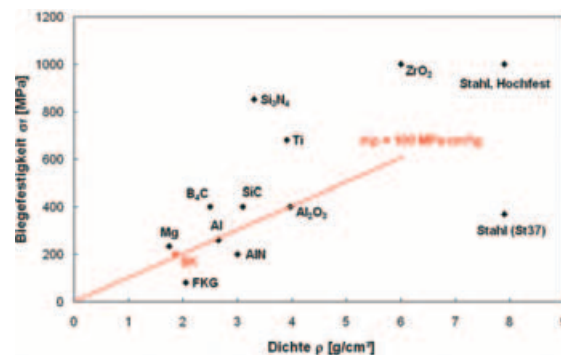
Neben den material- und prozessspezifischen Vorteilen konnten weitere sehr positive Nebeneffekte im arbeitsmedizinischen Bereich herausgearbeitet werden. Bei der konventionellen Feinkorngraphitherstellung wird das Rohcompound durch Heißmischen von Füllstoffen und Steinkohlenteerpech hergestellt. Dabei werden gesundheitsgefährdende Dämpfe von polyzyklischen Kohlenwasserstoffen freigesetzt, die am Arbeitsplatz aufwendig aufgefangen und abgesaugt werden müssen. Dies kann bei den neu entwickelten Verfahren komplett entfallen, da die Rohstoffe schon so aufbereitet sind, dass keine gesundheitsgefährdenden Substanzen mehr freigesetzt werden.

Ein weiterer, indirekter Vorteil ist die Möglichkeit, auf eine Nachimprägnierung der Dichtungen mit Salz, Kunstharzen und Metallen zu verzichten. Die Nachimprägnierungen sind zum Zwecke der Dichte- und Festigkeitssteigerung Stand der Technik. Insbesondere Antimon-Imprägnierungen sind immer mehr in die Kritik geraten, da das Schwermetall im Laufe des Gebrauchs und bei der Entsorgung freigesetzt wird und nicht recycelt werden kann.

Durch die langjährige Erfahrung im IFKB mit faserverstärkten Keramik- und Kohlenstoffwerkstoffen beeinflusst, rückte mit fortschreitender Verbesserung der Materialeigenschaften alsbald die Verwendung der Sinterkohlenstoffe als ultraleichter Hochtemperaturstrukturwerkstoff ins Blickfeld. Bei einer Dichte von 1,6-1,95 g/cm³ sind die neu entwickelten Kohlenstoffmaterialien nicht nur „leichter“ als Aluminium oder Magnesium, sondern auch „leichter“ als alle Strukturkera-

miken. Die auf den ersten Blick bescheidene absolute Festigkeit von derzeit 100-200 MPa relativiert sich, wenn man sie auf die Dichte normiert. Die spezifische Festigkeit der neuen Werkstoffe liegt, wie (05) zeigt, im Bereich von Leichtmetallen oder Standardingenieurkeramiken wie Aluminiumoxid und Siliciumcarbid, sie übertrifft jedoch auch die hochwertigsten Feinkorngraphite um mehr als das Doppelte. Eines der spektakulärsten Produkte, die bislang aus Kohlenstoffwerkstoffen entwickelt wurden, ist sicherlich der Kohlenstoffkolben für Verbrennungsmotoren. Durch die Verwendung des Leichtbauwerkstoffes konnte die träge Masse des Motors verringert, dessen Ansprechverhalten und die Leistungsausbeute durch höhere Drehzahlen verbessert werden. Wenngleich von den Firmen Schunk und Sintec schon Produkte am Markt waren oder sind, scheiterte die großtechnische Umsetzung bisher an den hohen Kosten. Diese sind allerdings nicht eigentlich werkstoffspezifisch, sondern wegen der Komplexität des Bauteils durch den hohen Zerspannungsaufwand durch Fräsen aus dem Vollen heraus bedingt.

Mag dieses aus fertigungstechnischer Sicht archaisch anmutende Formgebungsverfahren auch bei Kleinserien oder zur Herstellung von Demonstratoren sinnvoll sein, so ist dies in einem derartig kompetitiven und durch Preisdruck geprägten Geschäft wie der Automobilindustrie von vornherein zum Scheitern verurteilt. Sollte es gelingen, über ein endkonturnahes Verfahren einen Kohlenstoffkolben abzuformen, der ohne oder mit nur geringem Nachbearbeitungsaufwand zum fertigen Produkt verarbeitet werden kann, so wird dieser mit Sicherheit eine attraktive Marktnische finden. In diesem Sinne sind auch die Vorarbeiten des IFKB zur endkonturnahen Fertigung von Kleinteilen für Triboanwendungen für die Entwicklung



Spezifische Festigkeiten von ausgewählten Materialien (FKG: Feinkorngraphit; SK: sinterfähiger Kohlenstoff).



Zahnrad aus sinterfähigem Kohlenstoff, gepresst auf Hydraulikpresse mit Mehrebenenwerkzeug.

des notwendigen fertigungstechnischen Know-hows sehr wertvoll, da die Ergebnisse mit leichten Abwandlungen auch auf größere Bauteile übertragen werden können.

Erfahrungen bestehen im IFKB insbesondere im Bereich der Pressformgebung (06) sowie im thermoplastischen Spritzguss. Prinzipiell sind alle aus der keramischen Technologie oder Pulvermetallurgie bekannten Fertigungsverfahren denkbar. Voraussetzung hierfür ist allerdings die Beherrschung aller Teilschritte der fertigungstechnischen Kette von der Rohstoffaufbereitung bis zur Wärmebehandlung und Endbearbeitung. Im IFKB wurden Sinterkohlenstoffe auch erstmals über die Verfahren des Gelcastings und durch elektrophoretische Abscheidung hergestellt.

3.2 Ausgangsmaterialien für Sinterkohlenstoffe

Rohstoffbasis für die sinterfähigen Kohlenstoffe sind hochpolymere Peche, die entweder vollsynthetisch oder aber auf der Basis von Erdöl oder Steinkohlenteerpech gewonnen werden. Dabei werden alle leichtflüchtigen Bestandteile durch Destillation entfernt, der Destillationsrückstand wird wärmebehandelt und gegebenenfalls oxidativ vernetzt und fein gemahlen. Die so erhaltenen Rohpulver besitzen oft flüssigkristalline Eigenschaften und werden oft pauschal als „Mesophasenpeche“ bezeichnet. Wichtige Anwendung dieser Mesophasenpeche ist die Herstellung von ultrahoch moduligen Kohlenstofffasern für Luft- und Raumfahrtanwendungen. Die Mesophasenpeche werden bei Temperaturen von 1.000-1.200 °C pyrolytisch, d. h. unter Luftabschluss, zu Kohlenstoff und flüchtigen Spaltprodukten – im Wesentlichen Wasserstoff – zersetzt und dabei gesintert. Sinterfähige Kohlenstoffe sind einphasige Werkstoffe, beim Sinterprozess verbinden sich die Körner des Ausgangspulvers zu einem durchgehenden, nahezu isotropen Gefüge, das im Gegensatz zur Keramik keine Korngrenzen besitzt. Da die Spaltprodukte dabei entweichen müssen, besitzen die Werkstoffe stets noch eine Restporosität von fünf bis zehn Prozent.

Auf die spezielle Verwendung als Rohmaterial für massive Strukturwerkstoffe ist kein kommerziell erhältliches Ausgangspulver optimiert, so dass die Versorgung mit hinreichenden Mengen geeigneter Rohstoffe eines der Hauptprobleme bei der technischen Umsetzung darstellte. Versuche mit kommerziellem Rohmaterial führten bislang stets zu suboptimalen Ergebnissen. Durch die Kooperation mit Rütgers Chemicals, dem europaweit größten Hersteller von Steinkohlenteerpech, standen erstmals reproduzierbare Chargen im 100 kg-Maßstab zur Verfügung, die geeignet waren, fertigungstechnische Entwicklung im Technikumsmaßstab zu betreiben. Zudem ermöglichte die bei RC vorhandene Pilotanlage die verfahrensspezifische Anpassung der Rohstoffe.

3.3 Fertigungstechnologien für Sinterkohlenstoffe

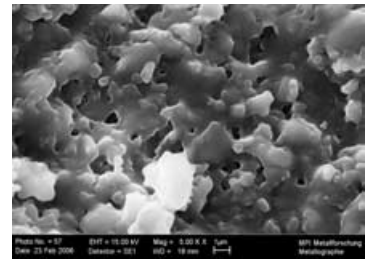
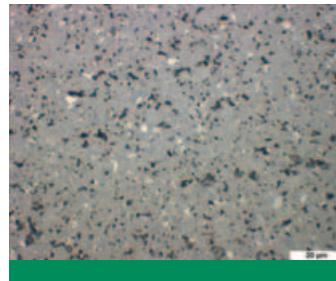
Grundlage der keramischen Fertigungstechnologie ist die Aufbereitung der Rohstoffe und die Herstellung von Masseversätzen, die auf die jeweils verwendete Formgebungstechnik hin optimiert sind. Dies beinhaltet die Anpassung der Korngrößenverteilung durch Feinmahltechnik sowie die Auswahl und exakte Dosierung von Additiven wie Dispergierhilfsmitteln, Bindern, Plastifizierern, etc. In den vergangenen Jahren konnten verarbeitungsfähige Feedstocks für das Spritzgießen, das isostatische und axiale Trockenpressen sowie für einige neue keramische Fertigungstechnologien wie das Gelcasting und die elektrophoretische Abscheidung hergestellt werden.

Die Auswahl der Fertigungstechnik von Bauteilen aus sinterfähigen Kohlenstoffen muss unter Berücksichtigung des Lastenhefts und unter Minimierung der Herstellungskosten erfolgen. So werden geometrisch einfache Bauteile wie Ringe beispielsweise in Gesenkpressen, etwas anspruchsvollere Geometrien wie Ringe mit mehreren Absätzen durch hydraulisches, mehrstufiges Axialpressen hergestellt. Noch komplexer gestaltete Bauteile werden in großer Stückzahl im Spritzgießverfahren hergestellt, kleinere Losgrößen und sehr große Bauteile werden wohl auch weiterhin durch Zerspanen von

isostatisch gepressten Rohlingen gefertigt werden.

Nach der Urformgebung der Bauteile folgt eine thermische Nachbehandlung, die die Entfernung der Bindemittel sowie den eigentlichen Sintervorgang einschließt. In der keramischen Technologie werden Bindemittel meist durch Glühen an Luft entfernt. Diese Methode ist bei sinterfähigen Kohlenstoffen nicht möglich, da die Mesophasen bei dieser oxidierenden Behandlung verbrennen oder aber zumindest eine starke Veränderung ihrer Zusammensetzung erfahren, die mit dem Verlust der Sinterfähigkeit einhergeht. Aus diesem Grund muss die Entbinderung pyrolytisch unter Luftabschluss erfolgen. Die verwendeten Bindemittel sind daher auch so auszuwählen, dass sie sich bei der Pyrolyse möglichst vollständig zersetzen und keinen artfremden Kohlenstoffrückstand auf den Korngrenzen hinterlassen, der die Sinterverdichtung behindert oder im fertig gebrannten Zustand zu verminderter Festigkeit führt.

Das Sintern der Pulver gehorcht nicht den Gesetzen der klassischen Sintertheorie, vielmehr findet bei niedrigen Temperaturen ein teilweises Erweichen der Pulver statt, das mit der Zersetzung der hochmolekularen Kohlenwasserstoffe zu Kohlenstoff, Wasserstoff und niedrigen Kohlenwasserstoffen wie Methan, niederen Aromaten sowie Wasser und Kohlenmonoxid einhergeht. Eine optimale Verdichtung ist nur dann möglich, wenn die Temperaturführung und Vorbehandlung der Rohpulver exakt aufeinander abgestimmt sind. Wurde das Mesophasenpulver zu stark stabilisiert - d. h. voroxidiert - verdichten die Bauteile schlecht und es entsteht ein sehr poröses Gefüge. Wurde das Pulver zu wenig voroxidiert, so Sintern die Bauteile im ersten Schritt so dicht zusammen, dass die Zersetzungsprodukte nicht mehr durch die offene Porosität entweichen können. Die Folge sind aufgeblähte Bauteile. Es ist jedoch auch möglich, sich diese Eigenschaft zunutze zu machen und Kohlenstoffschäume herzustellen, die in der Katalyse oder als Hochtemperaturdämmmaterialien verwendet werden können. Unter optimalen Bedingungen lassen sich Strukturwerkstoffe mit ca. fünf bis acht Prozent Restporosität herstellen, die flüssigkeitsdicht und nahezu gasdicht sind

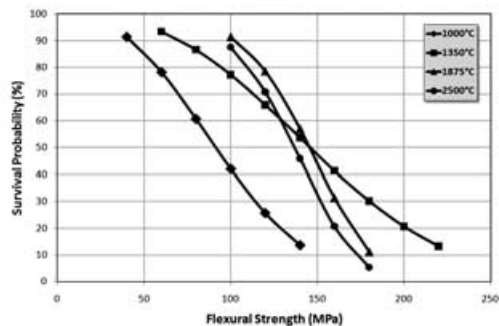


(07). Eine vollständige Elimination der Porosität wie bei Keramiken ist werkstoffbedingt leider nicht möglich.

Wie bereits erwähnt lassen sich die Eigenschaften der Sinterkohlenstoffe durch die Art der Wärmebehandlung in weiten Grenzen variieren. Im Bereich von Triboanwendungen werden harte und extrem abriebfeste Materialien verlangt, die trotzdem eigenschmierfähig sind. Diese Materialien werden bei niedrigen Sinter Temperaturen hergestellt. Man erhält einen nahezu isotropen Graphit, der hochfest aber glasartig spröde ist und eine breite Streuung der mechanischen Parameter aufweist. Da die Bauteile meist nur druckbelastet sind, kann dies akzeptiert werden. Sollten solche Bauteile als Strukturwerkstoffe eingesetzt werden, müssten die Gefüge absolut defektfrei und die Oberflächen perfekt bearbeitet sein, was bei realen Bauteilen im praktischen Einsatz nahezu unmöglich ist. Deshalb müssen derartige Bauteile durch eine veränderte Wärmebehandlung auf die robustesten Anforderungen optimiert werden.

Bei Maschinenelementen, die dynamisch wechselbeansprucht sind, ist neben der absoluten Festigkeit auch die Zuverlässigkeit der Bauteile von großer Wichtigkeit, um insbesondere unterkritisches Risswachstum zu unterdrücken. Die Herstellparameter sind daher so zu wählen, dass eine sehr enge Festigkeitsverteilung erreicht wird. Dies wird erreicht, wenn die Materialien graphitiert werden, d. h. wenn nach der Pyrolyse noch eine Wärmebehandlung bei $> 1.800\text{ °C}$ erfolgt. Diese „teilgraphitierten“ Materialien verlieren dann zwar etwas von ihrer Elastizität, werden aber duktiler und weniger kerbempfindlich, siehe **(08)**. Voll graphitierte Bauteile besitzen ebenfalls eine akzeptable

Lichtmikroskopische Aufnahme des Gefüges von sinterfähigem Kohlenstoff (links) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche von sinterfähigem Kohlenstoff (rechts).



Festigkeit und enge Festigkeitsverteilung, weisen aber eine sehr geringe Steifigkeit sowie sehr geringe Verschleißbeständigkeit auf. Sie lassen sich allerdings, verglichen mit den anderen Werkstoffen, am besten zerspannen.

Ziel der derzeit laufenden Arbeiten ist, die Fertigungsverfahren des Spritzgießens und des Pressens durch Optimierung aller Teilprozesse so zu verbessern, dass die Materialien unter industriellen Bedingungen prozessstabil gefertigt werden können. Zu diesem Zweck werden die Verfahren mit statistischen Prozessplanungsmethoden untersucht.

Daneben werden neue Fertigungsverfahren entwickelt, die derzeit noch nicht industriell nachgefragt werden, die aber ein gewisses Potential haben und von wissenschaftlichem Interesse sind.

Danksagungen

Die Autoren bedanken sich für die Zusammenarbeit bei den Mitarbeitern des Instituts für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart, des Max-Planck-Instituts für Metallforschung Stuttgart (MPI-MF) sowie des Steinbeis Transferzentrums Gießerei Technologie Aalen (GTA) an der Hochschule Aalen. Für finanzielle Unterstützung danken wir dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg sowie der Europäischen Union.

Frank Kern
Martin Wenzelburger
Konstantin von Niessen
Rainer Gadow

Literatur

- 1 H. Hertel: Leichtbau - Flugzeuge und andere Leichtbauwerke. Berlin/Göttingen/Heidelberg : Springer, 1960.
- 2 Schriftenreihe zu den DGM-Symposien „Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde“. Oberursel : DGM Informationsges., 1992-2006.
- 3 K. K. Chawla: Composite Materials - Science and Engineering; 2nd ed. New York : Springer, 1998.
- 4 T. W. Clyne and P. J. Withers: An Introduction to Metal Matrix Composites. Cambridge : University Press, 1993.
- 5 K. U. Kainer: Metallische Verbundwerkstoffe. Weinheim : Wiley-VCH, 2003.
- 6 J. Haag: Mechanische und thermodynamische Eigenschaften eines Kolbens aus Feinkornkohlenstoff im 4-Ventil-Ottomotor. Dissertation, Universität Stuttgart, 1998.
- 7 F. Kern, R. Gadow: Nanostructured carbon and graphite – ultra lightweight engineering materials. Adv. Sci. Technol. 45 (2006) 1495-504.
- 8 R. Gadow, F. Kern, E. Türedi: High performance carbon components derived from mesophase pitch precursors. Proc. 10th Europ. Inter-regional Conf. on Ceramics, CIEC 10. Hrsg. B. Wilshire, M. R. Bache, Swansea Materials Research Centre, 2006, p. 89-98.
- 9 W. R. Hoffmann; Dissertation, Fakultät für Chemie, Universität Karlsruhe, 1991.

DIE AUTOREN

FRANK KERN

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile und leitet die Abteilung II Funktionskeramik und Chemische Technik. Er hat in Karlsruhe im Fach Technische Chemie promoviert. Im Rahmen seiner Industrietätigkeit bei Aluminium Rheinfelden war er zuerst im Bereich der Entwicklung und Qualitätskontrolle von Kohlenstoffprodukten für die Elektrometallurgie, dann bis 2000 als Betriebsleiter im Bereich Sekundäraluminiumrecycling tätig. Derzeitige Forschungsschwerpunkte sind die Fertigung technischer Kohlenstoffe, faserverstärkte Verbundwerkstoffe und Faserbeschichtungen auf Basis präkeramischer Precursoren sowie die Fertigung von keramischen Nanocompositmaterialien für die biomedizinische Technik und für Maschinenbauanwendungen.

Kontakt: Tel. 0711/685-68233, E-Mail: frank.kern@ifkb.uni-stuttgart.de

**MARTIN WENZELBURGER**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile der Universität Stuttgart und Projektleiter im Rahmen des Kompetenzzentrums Gießen und Thixoschmieden - CCT ‚Novus‘. Er leitet die Abteilung für Werkstoffmechanik, Modellierung und Simulation. Er studierte von 1995 bis 2002 in Stuttgart Maschinenwesen und ist seither am IFKB beschäftigt. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf dem Gebiet der Prozess- und Fertigungstechnik von faser- und partikelverstärkten Leichtmetallen, auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik von Schicht- und Verbundwerkstoffen und bei der Modellierung und Simulation von Fertigungsprozessen.

Kontakt: Tel. 0711/685-68228, E-Mail: martin.wenzelburger@ifkb.uni-stuttgart.de

**KONSTANTIN VON NIESSEN**

promovierte nach einem Studium des Maschinenwesens in Stuttgart von 2002 bis 2006 am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile auf dem Gebiet der Gewebebeschichtung durch Thermisches Spritzen. In dieser Zeit war er Projektleiter im Kompetenzzentrum Gießen und Thixoschmieden - CCT, und verantwortlich für eine Reihe von Drittmittelprojekten der öffentlichen Hand sowie industrieller Kooperationspartner. Gleichzeitig hatte er zeitweise die Funktion eines Fakultätsassistenten der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart inne. Seit 2006 ist er Projektmanager bei der Sulzer Metco AG, Sulzer Metco AG, Rigackerstraße 16, 5610 Wohlen, Schweiz

Kontakt: Tel. +41(0)56/618-81-60, E-Mail: Konstantin.vonNiessen@sulzer.com

**RAINER GADOW**

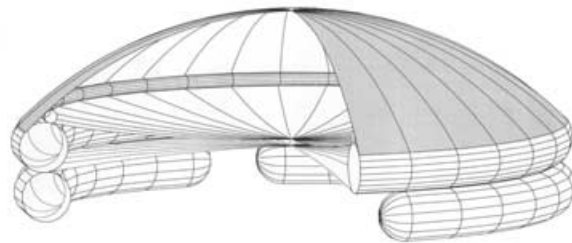
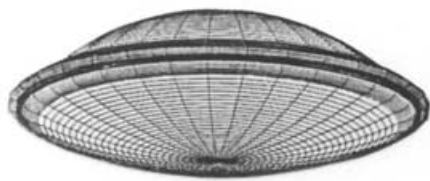
ist Ordinarius für Fertigungstechnik und geschäftsführender Direktor des Instituts für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile. Er promovierte nach dem Studium der Chemie auf dem Gebiet der faserverstärkten Keramik an der Universität Karlsruhe (T.H.). Faserverstärkte Gläser, Oxid- und Nichtoxidkeramiken sowie refraktär-metallurgische und keramische Schichten waren sein Forschungsschwerpunkt am Institut für Chemische Technik in Karlsruhe. Nach Tätigkeiten als Leiter Forschung und Entwicklung sowie als Geschäftsführer von W. Haldenwanger Techn. Keramik übernahm er verschiedene Geschäftsführungsaufgaben im Konzernkreis der Deutsche Babcock-Borsig AG sowie der Balcke-Dürr AG. Seit 1995 Leiter des neu gegründeten Universitätsinstituts in Stuttgart, liegt sein fachlicher Schwerpunkt in der Produktentwicklung mit neuen Werkstoffen, Bauweisen und Fertigungstechniken sowie auf dem Gebiet der Oberflächentechnik mit hocheenergetischen Beschichtungsverfahren. Die Prozess- und Fertigungstechnik mit nanokeramischen und cermetischen Werkstoffen wurde seit 2004 im IFKB aufgebaut und zur Anwendungsreife gebracht. Die werkstoff- und fertigungstechnische Entwicklung, insbesondere von Leichtbau- und Verbundwerkstoffen, wird bis zur automatisierten Pilotfertigung betrieben und durch Forschungen auf dem Gebiet der Modellierung und Simulation ergänzt.

Kontakt: Tel. 0711/685-68301, E-Mail: rainer.gadow@ifkb.uni-stuttgart.de



Universität Stuttgart, Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile,
Allmandring 7b, 70569 Stuttgart
Tel. 0711/685-68301, Fax 0711/685-68299
E-Mail: ifkb@ifkb.uni-stuttgart.de
Internet: www.uni-stuttgart.de/IFKB

Neue Wege im Leichtbau



01

Leichtbau spart Energie, insbesondere bei Land- und Luftfahrzeugen durch die kleinere zu bewegende Masse, aber auch beim Transport und beim Auf- und Abbau von Leichtbauten. Spart Leichtbau auch Kosten? Diese Frage ist weitaus schwieriger zu beantworten. Extrem leichte Konstruktionen entstehen, indem leichte, hochfeste Materia-

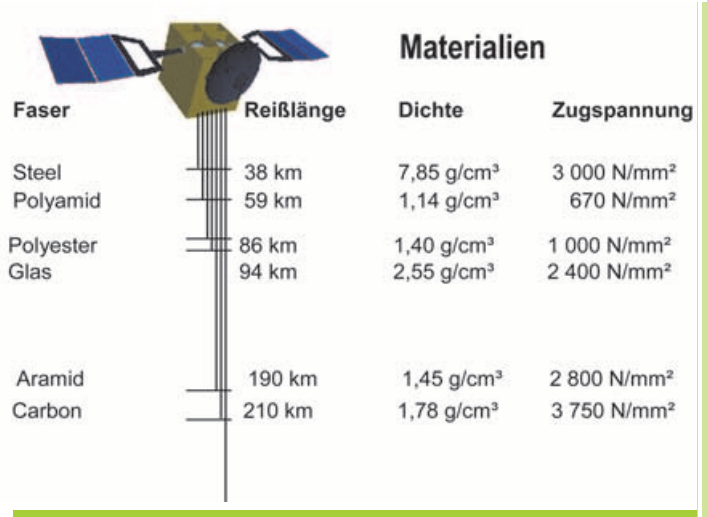
lien in eine optimale, trotz ihrer Dünnwandigkeit nicht stabilitätsgefährdete Form gebracht werden. Damit entstehen oft filigrane Konstruktionen. Sowohl die Materialien als auch die Herstellung sind aber kostenintensiv. Dieser Beitrag gibt einige Beispiele über traditionelle und zur Zeit eingeschlagene Wege und legt den Schwerpunkt dabei auf innendruckgestützte und fliegende Konstruktionen.

1. Stoff und Form

Leichtbau entsteht, wenn man möglichst wenig Stoff im Raum so anordnet, dass er eine vorbestimmte Funktion bestmöglich erfüllt. Aus diesem Satz kann man unmittelbar einige Grundsätze ablesen:

Leichtbau wird nicht allein durch das hochfeste und leichte Material bestimmt. Hochfeste leichte Materialien sind als Fasern seit mehr als zehn Jahren mit einer ca. dreißigfachen Reißlänge von Stahl entwickelt, so dass eine an einen erdnahen Satelliten gehängte Faser bis zur Erdoberfläche hinabreichen würde (01). Der Einsatz dieser Materialien ist jedoch schwierig, da sie sich nicht ohne weiteres zu einem duktilen, weiterreißfesten Gewebe verarbeiten lassen. Sprödigkeit und Feuchtigkeitsempfindlichkeit, UV-Empfindlichkeit sind einige der Hindernisse. So sieht man in (02), dass in nahezu allen bisher realisierten Projekten nicht die neuen hochfesten Materialien Verwendung fanden. Nur drei Projekte, die japanischen Projekte HAA und LAS sowie der CargoLifter Prototyp CL75 verwenden das hochfeste Vectran.

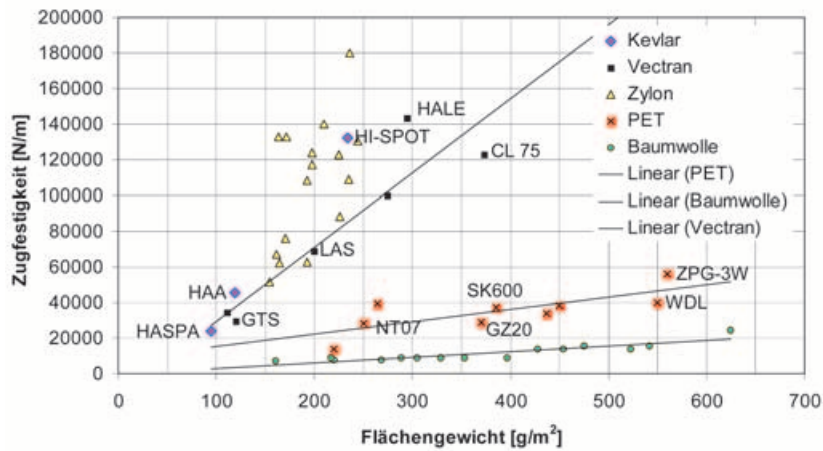
Leichtbau nutzt die Verteilung der Masse im Raum zum Transport der Kräfte und zerlegt das Tragwerk in Zug- und Druckglieder. Dies ist uns von Raumfachwerken bekannt. Wir sehen die klassische Form verwirklicht im Zeppelin von 1936 (03) und dessen moderne Weiterentwicklung im geplanten CargoLifter (04). Andere Formen des Leichtbaus sind zelluläre



Reißlänge einiger Materialien

01

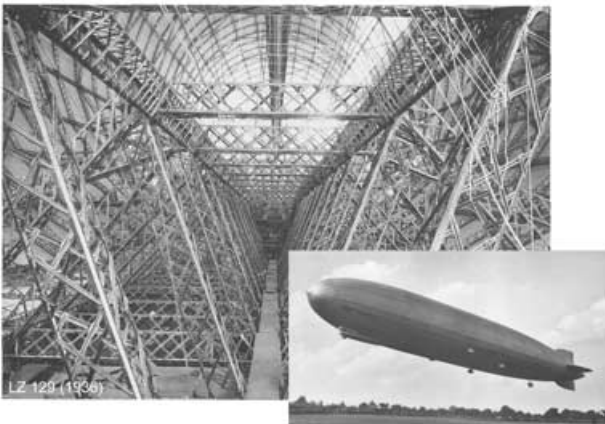
Luftschiffmembranen



Luftschiffmembranen

02

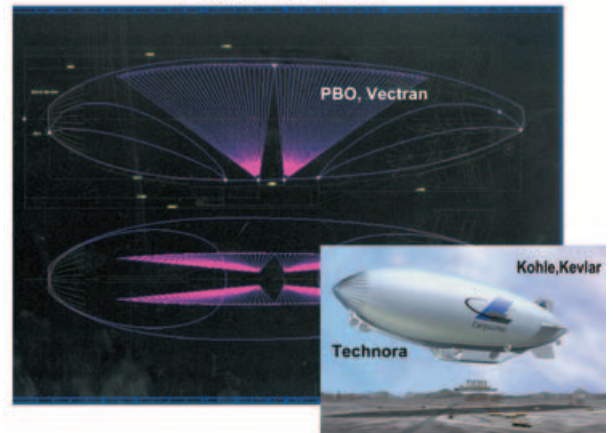
Laufgang (LZ 129 - „Hindenburg“)



03

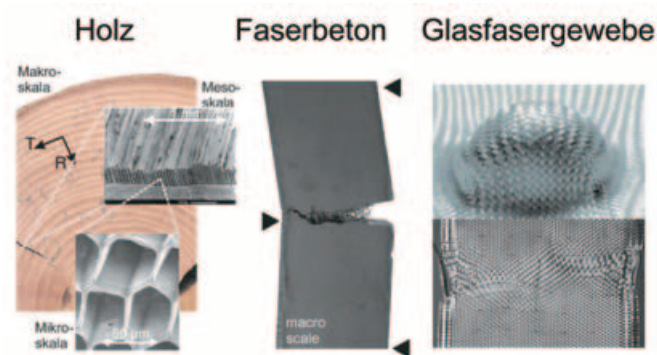
Aluminiumleichtbau im Zeppelin LZ 129, 1936

CL-Hülle-Überblick



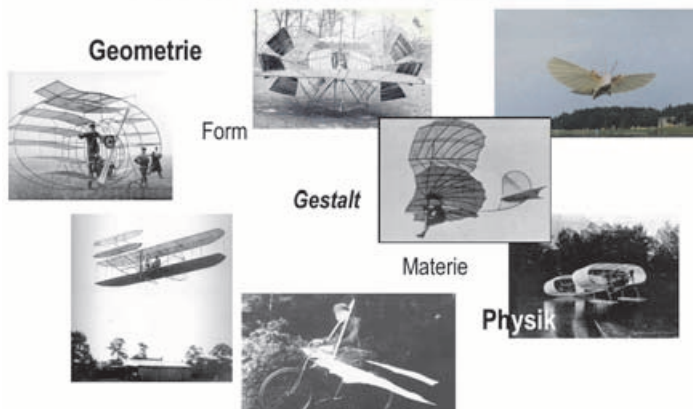
04

Trag- und Hüllenstruktur des CargoLifter CL 160, 2000

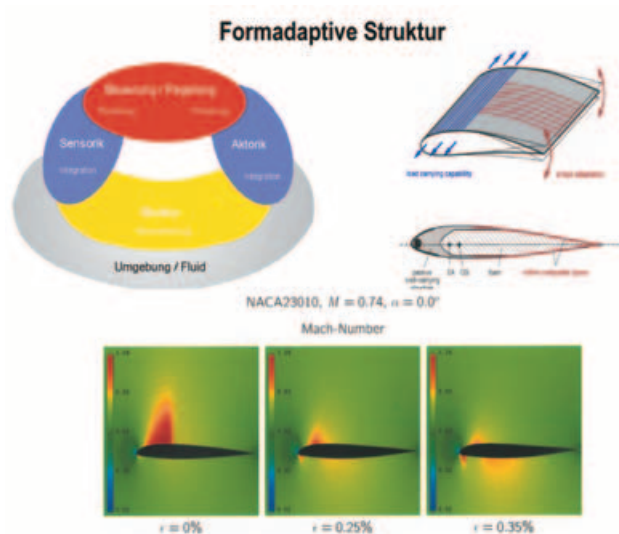


05 Holz, Faserbeton, Glasfasergewebe

Der mühsame Weg zur Gestalt



06 Formensuche bei frühen Fluggeräten



Strukturen, wie Holz, Faserverstärkungen, wie Kurzfaserbeton oder Gewebe (05).

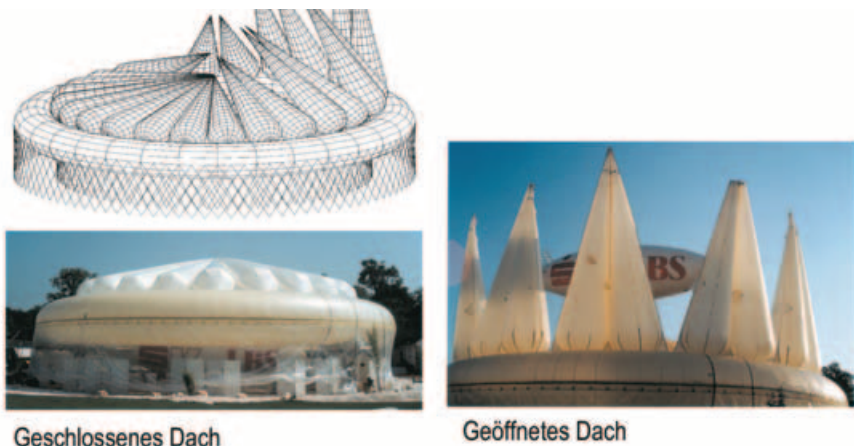
Je genauer die Funktion vorbestimmt ist, desto gezielter kann die Formfindung geschehen. Ein Gebäude, das während des Lebens häufige Umnutzung erfährt, wird viel weniger in einer expliziten Form zu

gestalten sein als ein Flugzeug, das immer dem Transport von einhundert Passagieren über Kurzstrecken dient. Interessant ist, dass in der Frühzeit einer Entwicklung sowohl in der Natur wie in der Technik immer eine große Formenvielfalt beobachtet werden kann. (06) zeigt dies für die Flugzeuge. Erst wenn die Physik hinreichend verstanden ist, setzen sich funktionale Formen durch. In der Luftfahrt allgemein sind dies die Flugzeuge, die Hubschrauber und die Luftschiffe, wobei letztere noch auf die ihnen vorhergesagte Renaissance warten.

2. Form und Funktion

Nun kann die Anordnung des Stoffs aber auch durch aktiv geregelte Prozesse erfolgen. Der Vogelflügel wird während des Fluges nach aerodynamischen und flugmechanischen Bedürfnissen verformt, um die Auftriebsverteilung oder die Randwirbelablösung zu beeinflussen. Überträgt man dieses Prinzip auf die Technik, so spricht man von „Adaptiven Strukturen“. Beispiele sind der Adaptive Flügel, der durch aktivierbare piezoelektrische Fasern seine Kontur ändert und damit die Umströmung beeinflusst (07). Beispiele sind aber auch pneumatische Konstruktionen, die sich durch veränderten Innendruck den Temperatur- und Witterungsverhältnissen anpassen. Hierbei übernimmt der Innendruck die Aufgabe der Übertragung der Druckkräfte und umgeht das sonst für Leichtbauten so gefährliche

07 Formadaptiver Flügel



08 Helion, das erste Gebäude, das an der Erde „hängt“

Stabilitätsversagen durch Knicken oder Beulen. Ein Beispiel dafür ist das „Helion“, das 1992 in Stuttgart gebaut wurde. Es war das erste Gebäude, das ganz durch den Auftrieb von Helium getragen wurde und in Form einer großen Blume auf der Internationalen Gartenbauausstellung als Luftschiffhangar für das erste Solarluftschiff „Lotte“ diente (08).

Konstruktionen dieser Art haben einen sehr geringen planmäßigen Innendruck zur Formerhaltung. Wenn der Druck durch Temperatur- oder äußere Druckschwankungen zunimmt, sind sie in Gefahr, zu platzen; wenn er abnimmt, verlieren sie die Stabilität. Aus diesem Grunde ist hier eine adaptive Drucksteuerung unerlässlich. Wie wir wissen, besteht das Problem bei Hochdruckkonstruktionen viel weniger. Ein Autoreifen benötigt beim Betrieb keine Adaption; er hat aber auch ca. den zweihundertfachen Innendruck eines Luftschiffs.

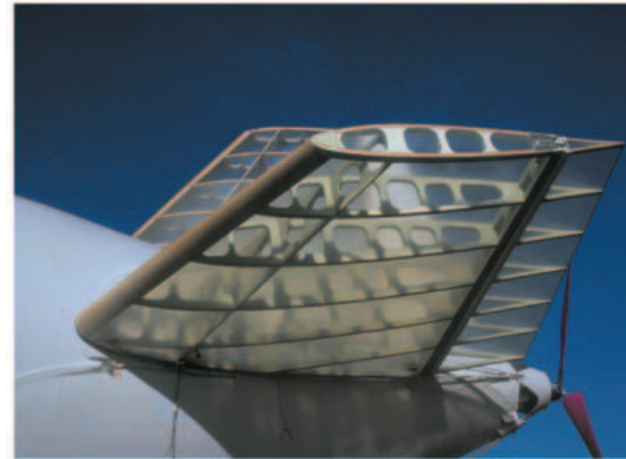
3. Konstruktionsbeispiele

Zur Erzielung einer extrem leichten Konstruktion werden je nach Anforderung viele Materialien kombiniert. So wurden für das Leitwerk des oben genannten Solarluftschiffs (09), die Materialien PE, Kevlar, Kohle und Balsaholz verwendet. Das führt für das 1,80 m hohe Leitwerk zu einer Masse von weniger als zwei Kilogramm.

(10) zeigt einen Entwurf für eine Basketballsporthalle. Das Dach besteht aus einem mit Luft gefüllten Membrankissen aus transluzentem Material. In der Mitte befindet sich ein Druckball, in dem Druckluft zwischengespeichert wird, um bei kurzzeitigen Anforderungen, zum Beispiel Schneefall, den Druck in der Membran zu erhöhen.

Ein temporäres Dach für das Fußballstadion in München ist in (11) gezeigt. Das fliegende, mit Helium gefüllte Dach, das wie ein Drachen stabilisiert wird, steht in ca. 150 m Höhe neben dem Stadion und wird in ca. dreißig Minuten auf das Stadion abgesenkt, wenn dieses verschlossen werden soll. Auch hier

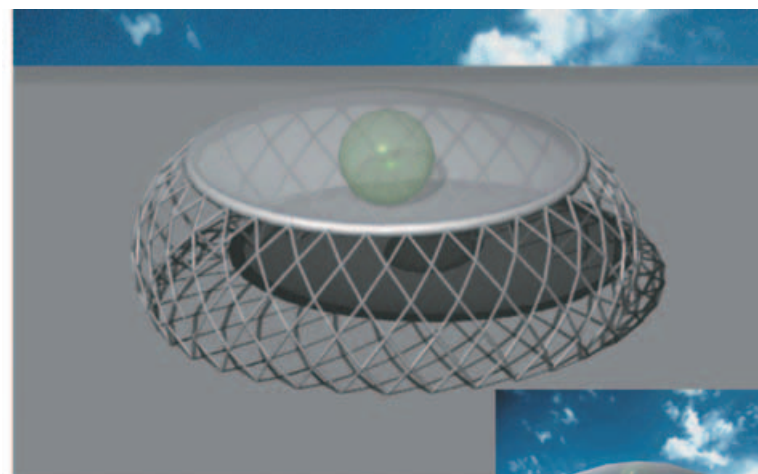
Leitwerk von „Lotte“



Materialien: PE, Glas, Kohle, Kevlar, Schaum, Holz

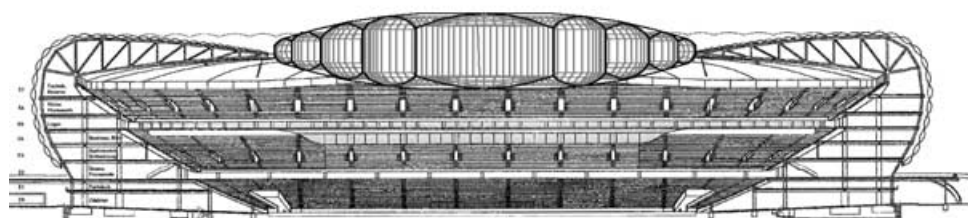
09

Leitwerk von „Lotte“



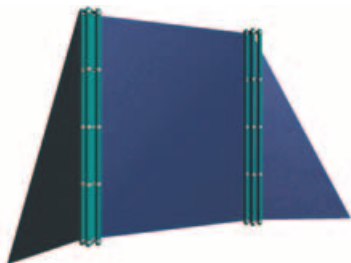
10

Basketballhalle mit Druckspeicher



11

Fliegendes Dach



12

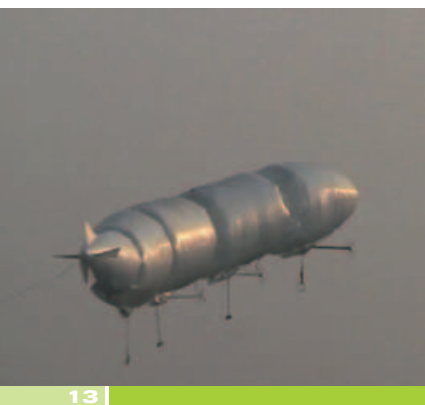
UV-erhärtendes Sonnensegel

sind die die aktive Drucksteuerung und die aerodynamische Stabilität grundlegende Eigenschaften.

(12) zeigt ein Sonnensegel für Weltraumanwendungen. Die Membranen und Schläuche werden am Boden in einem kleinen Behälter verpackt.

Nach Öffnen des Behälters im Weltraum werden die Schläuche vom in ihnen befindlichen Restluftdruck aufgeblasen. In den doppelwandigen Schläuchen befindet sich mit Harz getränktes Glasfasergewebe. Sobald dies dem UV-Licht ausgesetzt wird, erhärtet das Harz und es entsteht eine große steife Struktur, der auch die Mikrometeoriten nichts anhaben können, da ihre Steifigkeit nicht mehr auf Luftdruck beruht.

Höhenplattformen sind eine technische Herausforderung unserer Zeit. Diese sollen in 20.000 m Höhe in der unteren



13

Stuttgarter SkyChain



14

Flying Hotel oder „Workspace in hostile environment“

ZUSAMMENFASSUNG

Extremer Leichtbau ist durch Materialentwicklung allein nicht möglich. Vielmehr müssen Geometrie und Physik mit dem Material und der, vielleicht adaptiven, Konstruktion eine gegläuckte Symbiose bilden, um den Zweck zu erfüllen. Gelingt dies, so entsteht in den allermeisten Fällen ein technisches Artefakt von ästhetischem Genuss.

Stratosphäre stationiert werden, um von dort als Relaisstationen die Telekommunikation für Katastrophengebiete, bei Erdbeben oder Tsunamis zu übernehmen. Dies stellt extreme Anforderungen an den Leichtbau, da die Geräte wegen des geringen Luftdrucks etwa 25 mal so leicht sein müssen, wie die leichtesten Fluggeräte für bodennahe Anwendungen. (13) zeigt ein für diese Zwecke in Stuttgart entworfenes Fluggerät, das kurz vor seiner Höherprobung steht. Es ist ein fliegender Gliederkörper, eine Mischung aus Höhenballon und Luftschiff. Besondere Verhältnisse erfordern besondere Wege.

Abschließend noch eine Vision für das stets höchste Hotel der Welt oder einen Arbeitsraum in einer feindlichen Umgebung, in der Wüste oder auf dem Meer (14). Eine fliegende Linse von 0,5-3 km Durchmesser wird durch Kohlerringe, die gleichzeitig die Unterkünfte sind, stabilisiert und fliegt zum Einsatzort, um dort das schützende Dach für die Arbeiten zu bilden.

PROF. DR. BERND KRÖPLIN

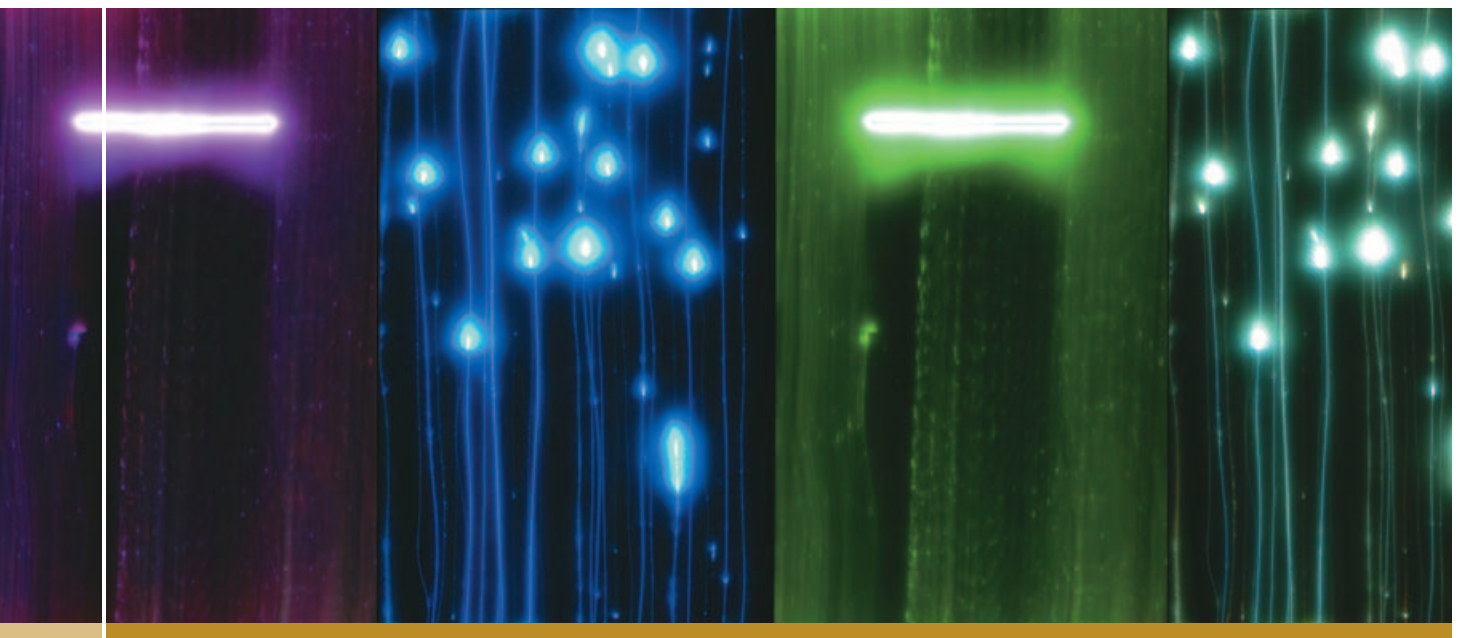
wurde 1944 in Schleswig geboren, studierte nach einer Handwerkslehre Bauingenieurwesen in Braunschweig, promovierte 1977 mit dem Thema „Elastoplastische Stabilität stählerner Brücken“, erhielt 1979 ein Heisenberg-Stipendium der deutschen Forschungsgemeinschaft, wurde 1982 in Dortmund Professor für „Anwendung numerischer Methoden“, leitet seit 1988 das Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen in Stuttgart, gewann 2000 den Körber-Preis für „Höhenplattformen für Telekommunikation“ und ist seit 2000 Mitglied der Academia Europea.



Kontakt: Universität Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen
Pfaffenwaldring 27, 70569 Stuttgart, Tel. 0711/ 685-63612
Fax 0711/ 685-63706, E-Mail: office@isd.uni-stuttgart.de

Faserverbundwerkstoffe in Architektur und Bauwesen

Die Entwicklung der Faserverbundwerkstoffe begann in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Meilensteine waren die ersten Karosserieteile für die Corvette im Jahr 1953 oder das erste Segelflugzeug aus glasfaserverstärktem Kunststoff, das 1954 an der Universität Stuttgart gebaut wurde. Schon sehr bald wurden Faserverbundwerkstoffe auch in die Architektur eingeführt, vor allem auf Betreiben der chemischen Industrie, die sich im Bauwesen riesige Absatzmärkte erhoffte. Zwischen 1956 und 1970 wurden ca. 70 unterschiedliche Kunststoffhaustypen entwickelt. Eines der frühesten und berühmtesten ist das Monsanto-Haus, das 1957 im Auftrag der amerikanischen Chemiefirma Monsanto auf einer Bootswerft gebaut und im Disneyland in Kalifornien aufgestellt wurde (01).



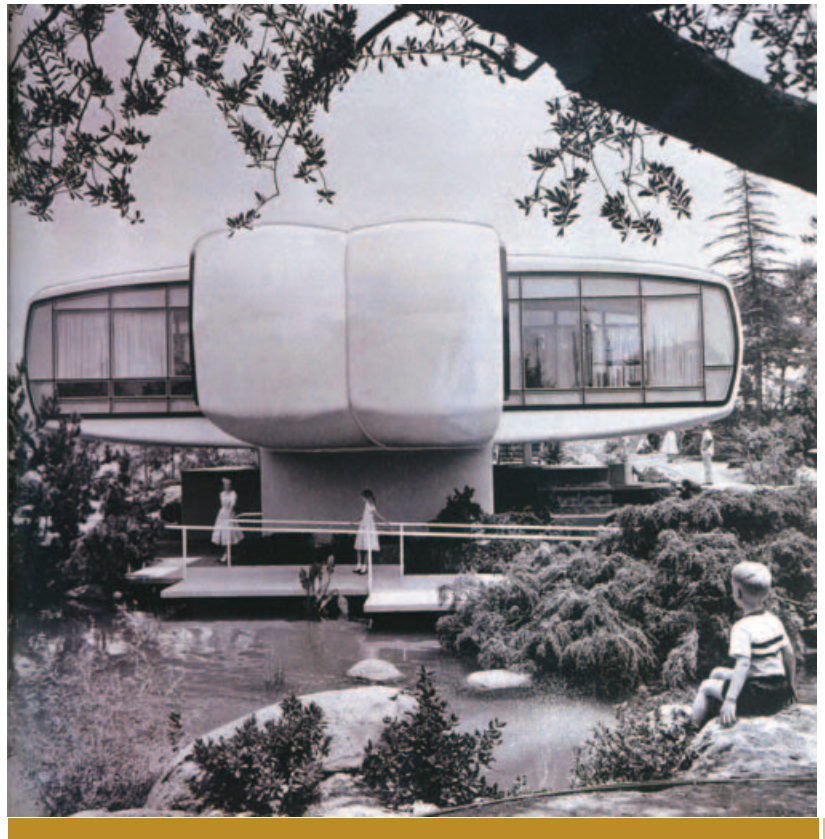
Trotz der enormen Resonanz in der Öffentlichkeit war diesen Bauten kein nachhaltiger Erfolg beschieden. Zum Teil mag das an den baukonstruktiven und bauphysikalischen Problemen gelegen haben, mit denen diese frühen Pionierbauten zu kämpfen hatten. Letztlich ausschlaggebend war aber das Fehlen einer angemessenen architektonischen Umsetzung. Das Bauen mit Kunststoffen wurde vor allem von der chemischen Industrie propagiert, die eine industrielle Massenproduktion von Wohneinheiten zum Ziel hatte. Bedürfnisse nach individueller Gestaltung wurden weitgehend ignoriert, was verständlicherweise auf wenig Gegenliebe stieß.

In der öffentlichen Architekturdebatte waren Faserverbundwerkstoffe untrennbar mit dieser Haltung verknüpft, so dass sie trotz offenkundiger technischer Vorteile Ende der siebziger Jahre nahezu vollständig aus dem Baugeschehen verschwanden. Aus der damaligen Entwicklung kann man heute lernen, dass die Einführung von neuen Werkstoffen nur dann auf Dauer erfolgreich sein kann, wenn sie sich gezielt auf Anwendungen beschränkt, in denen sie Vorteile gegenüber etablierten Baustoffen einbringen kann.

Für das Bauwesen sind vor allem folgende Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen interessant:

1. Hohe mechanische Festigkeiten bei niedrigem Gewicht.
2. Beständigkeit gegen Korrosion und Ermüdung.
3. Niedrige Wärmeleitfähigkeit der polymeren Kunststoffmatrix.
4. Vielfältige architektonische Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Transparenz, Form und Farbe und vielfältige Kombinationsmöglichkeiten der Werkstoffkomponenten.

Im Folgenden wird anhand von Projekten des Instituts für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (itke) der Universität Stuttgart gezeigt, wo auf Grundlage dieser Eigenschaften ein Potential für vermehrte Anwendungen von Faserverbundwerkstoffen in Architektur und Bauwesen gesehen wird. Das Institut versteht sich als Schnittstelle zwischen den Material- und Ingenieurwissenschaften einerseits und der architektonischen und bautechnischen Anwendung andererseits.



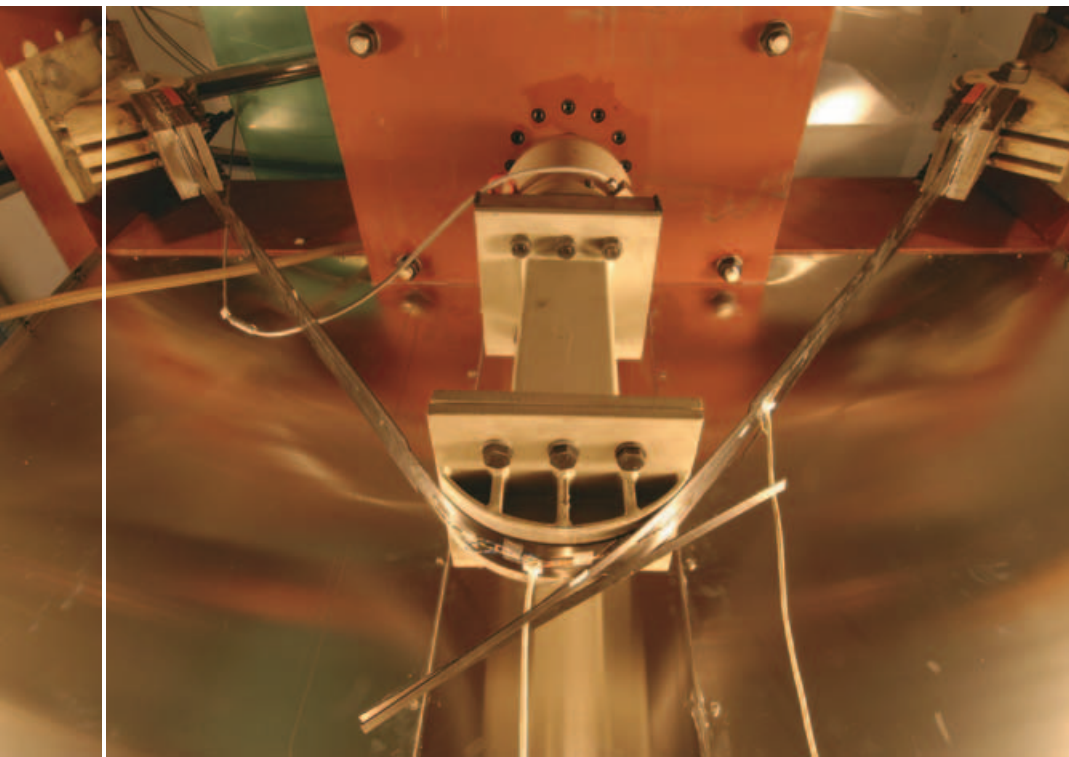
Monsanto Haus 1957: Eines der ersten Häuser mit einer Hülle aus glasfaserverstärktem Kunststoff.

Daher spielen Demonstrationsobjekte, wie sie im folgenden gezeigt werden, eine wesentliche Rolle in der Arbeit des Instituts.

1. Hohe mechanische Festigkeit: Seile und Zugglieder aus kohlefaserverstärktem Kunststoff

Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK) hat eine Verformungssteifigkeit, d.h. einen E-Modul, der in der Größenordnung von Baustahl liegt, bei einer deutlich höheren Zugfestigkeit und einem deutlich niedrigeren Gewicht. Allerdings ist CFK um ein vielfaches teurer als Stahl und erst recht als der billige Massenbaustoff Stahlbeton. Konzepte von Hochhäusern aus CFK, wie sie gelegentlich durch Architekturmagazine kursieren, werden daher wohl noch auf sehr lange Zeit Visionen bleiben. Heute ist der Einsatz von CFK im Bauwesen nur da möglich, wo dessen hohe Festigkeit ganz gezielt und in geringen Mengen benötigt wird.

Dies ist zum Beispiel bei der Instandsetzung und nachträglichen Verstärkung von Stahlbetonbauteilen der Fall. Dort werden



02

*Umlenkversuch an einer Lamelle aus kohlefaserverstärktem Kunststoff
(Foto: Heyer/Miklautsch, idg1).*

Kohlefaserslamellen mit Breiten zwischen 50 mm und 120 mm und Dicken von 1,2 mm und 1,4 mm verwendet. Sie haben nicht nur eine hohe Steifigkeit und Zugfestigkeit, sondern sind zudem wegen ihres geringen Gewichts und ihrer Flexibilität auf der Baustelle deutlich besser handhabbar als die Stahllamellen, die bisher zur Verstärkung von Betonbauteilen verwendet wurden. Die CFK-Lamellen werden im so genannten Pultrusionsverfahren hergestellt, bei dem die Fasern in einem Arbeitsgang von der Rolle durch ein Harzbad und anschließend durch eine Form gezogen werden. Sie sind also unidirektional mit einem Fasergehalt von ca. 68 Volumenprozent verstärkt. Die Lamellen werden mit einem Epoxidharzmörtel schlaff auf die Stahlbetonkonstruktion aufgeklebt. Diese Technologie ist seit einigen Jahren bauaufsichtlich geregelt, also allgemein anerkannter Stand der Technik.

Inzwischen konzentrieren sich die Entwicklungen darauf, die Lamellen unter Vorspannung auf die Stahlbetonkonstruktion aufzukleben, um ihre hohe Festigkeit effektiver auszunutzen. Dazu benötigt man jedoch Endverankerungen, die die Vorspannkraft am Lamellenende örtlich konzentriert mit Klemmen im Bauteil verankern. Wegen der Empfindlichkeit der Kohlefasern auf Querpressung ist dies

nicht einfach. Derzeit wird an verschiedenen Hochschulen an parallelen Entwicklungen für Klemmverankerungen von CFK-Lamellen gearbeitet. Der Gedanke liegt nahe, diese CFK-Lamellen nicht nur als Verstärkung auf Beton zu kleben, sondern auch als freie Zug- und Spannglieder im Hoch- und Brückenbau zu verwenden. Neuere Konzepte für Brücken, wie z.B. extern vorgespannte Spannbetonbrücken, bei denen die Spannglieder nicht mehr wie früher im Brückenüberbau einbetoniert werden, sondern außerhalb von diesem geführt werden, damit sie inspiziert und notfalls ausgetauscht werden können, oder die so genannten ‚extradosed bridges‘, Schrägseilbrücken mit extrem flach geneigten Seilen und biegesteifem Überbau, verwenden Zug-

glieder unter sehr hohen Zugkräften. Bisher werden dafür Spannritzten aus hochfesten Stählen verwendet.

Denkbar sind auch Zugglieder aus CFK, die neben der hohen Zugfestigkeit eine verbesserte Beständigkeit gegen Ermüdung und Korrosion haben. Es wurden auch bereits erste Schrägseilbrücken und Spannbetonbrücken mit CFK Litzenkabeln ausgestattet.

Einfacher, sowohl in der Herstellung als auch in der konstruktiven Umsetzung, ist jedoch der Einsatz von unidirektional verstärkten CFK-Lamellen. Wegen des flachen und breiten Querschnittes sind die Querpressungen an Umlenkstellen und Endverankerungen geringer. Für die Konstruktion der Endverankerungen gibt es bereits einige Ansätze. Derzeit fehlen noch Kenntnisse über die Umlenkung der Lamellen, wie sie bei unterspannten bzw. extern vorgespannten Betonträgern, aber auch bei Schrägseilbrücken auftreten. Wie verändert sich die aufnehmbare Zugkraft, wenn die CFK-Lamellen auf einem Sattel umgelenkt und damit durch Querpressung beansprucht wird? Am itke werden hier erstmals Versuche durchgeführt, die dann in die konstruktive Gestaltung von zukunftsweisenden Brücken einfließen (02).

2. Korrosionsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit: Brücken und Brückenfahrbahnen aus glasfaserverstärktem Kunststoff

Etwa siebzig Prozent unserer Straßenbrücken sind Spannbetonkonstruktionen aus den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Die Spannglieder wurden in Hüllrohre eingezogen, die in den Überbau einbetoniert und mit Mörtel verpresst wurden. Sie sind weder kontrollier- noch auswechselbar, was zu ständig steigenden Ausgaben für die Brückeninstandhaltung führt.

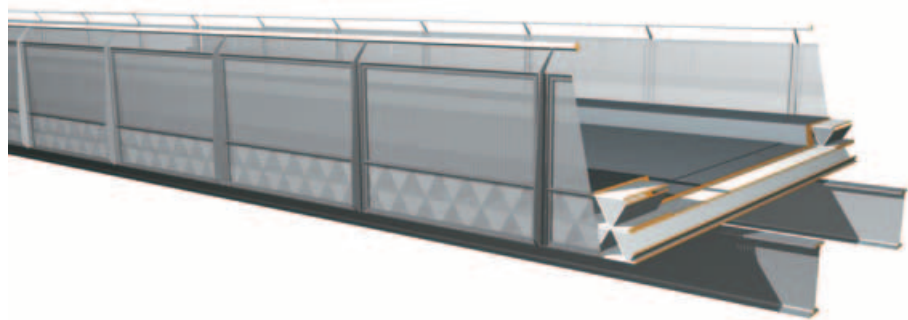
Eine Alternative stellt die Verwendung von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) für Brücken und Brückenfahrbahnen dar, denn dieser Werkstoff ist gegen Frost und Tausalze beständig, das Hauptproblem unserer Betonbrücken. Der zweite wesentliche Vorteil ist das geringe Gewicht: Eine Kunststoffbrücke wiegt etwa vierzig Prozent einer Stahlverbund- und weniger als dreißig Prozent einer Spannbetonbrücke und kann daher in deutlich größeren Längen vorgefertigt und mit dem Kran eingehoben werden. Da der Überbau zudem vollständig vorgefertigt werden kann, weil die Fahrbahnplatte nicht wie üblich vor Ort auf einem Gerüst betoniert werden muss, lassen sich die Montagezeiten erheblich reduzieren. Im verkehrsreichen und staugeplagten Deutschland ist dies das zweite wichtige Argument für diese neue Technologie.

Derzeit wird in den USA, Japan und der Schweiz intensiv an der Entwicklung von GFK-Brücken gearbeitet. Die Mehrzahl der GFK-Fahrbahnen besteht aus stranggezogenen (pultrudierten) Hohlprofilen mit Trapez-, Dreiecks- oder Vierecksförmigem Querschnitt. Die Profilhöhe liegt in der Regel um die 200 mm, womit Hauptträgerabstände von zwei bis drei Metern möglich sind. Die Forschung konzentriert sich auf die Erkundung der Materialeigenschaften solcher Fahrbahnen. Die Entwicklung einer werkstoffgerechten konstruktiven Umsetzung steht dagegen noch ganz am Anfang. Die wenigen, bisher vor allem in den USA gebauten GFK-Straßenbrücken können nicht überzeugen, weil sie sich noch zu sehr an den Vorbildern des Stahl- und Stahlverbundbaus orientieren. Beispielsweise werden für

den Anschluss des GFK-Decks an die Hauptträger häufig Kopfbolzendübel verwendet, die mit Mörtel vergossen werden. Dazu müssen Löcher und somit potentielle Schwachstellen in die GFK-Fahrbahn geschnitten werden. Ob eine solche Lösung wirklich dauerhaft ist, darf daher bezweifelt werden. Im britischen Oxfordshire wurde 2002 eine Straßenbrücke errichtet, bei der nicht nur die Fahrbahn, sondern auch die Längs- bzw. Hauptträger aus Kunststoff sind.

In Deutschland hat nun das hessische Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen begonnen, den Werkstoff GFK in einem Pilotprojekt zu erproben. Bei Friedberg soll eine einspurige Straßenbrücke mit 22 Metern die Bundesstraße B 455 überspannen. Der Entwurf, der am itke entwickelt wurde, geht in einigen wesentlichen Punkten über die angelsächsischen Vorbilder hinaus.

Eine Brücke, die wie das englische Bauwerk vollständig aus GFK besteht, ist auf sehr kleine Spannweiten beschränkt, da der Werkstoff gegenüber Stahl oder Beton eine geringe Verformungssteifigkeit hat: der E Modul pultrudierter GFK Profile liegt bei etwa 14.000 MN/m², beträgt also weniger als 1/10 des E-Moduls von Stahl. Der sehr



Brücke Friedberg: Stahlhaupttragwerk mit aufgeklebter GFK-Fahrbahn.

viel steifere Kohlefaserverstärkte Kunststoff ist derzeit aus wirtschaftlichen Gründen als Konstruktionswerkstoff nicht möglich.

Bei der hessischen Brücke wird daher die Fahrbahntafel aus stranggezogenen GFK-Profilen mit Epoxidharz auf ein Haupttragwerk aus Stahl geklebt, eine werkstoff- und beanspruchungsgerechte Verbindungstechnik. Zusätzlich ergibt sich so eine Verbundtragwirkung von GFK-Fahrbahn und Haupttragwerk, die das Stahltragwerk aussteift und die Gesamtverformungen der Brücke reduziert. Diese Konzeption ermöglicht auch viel größere Spannweiten und könnte, im Gegensatz zur Brücke in England, bald auch wirtschaftlich mit den Betonbrücken konkurrieren. Zudem wird bei der hessischen Brücke auf Ortbetonrandkappen verzichtet. Anders als bei allen bisher gebauten GFK-Brücken, wird die innovative Technologie damit auch sichtbar (03).

Für die GFK Profile lagen bereits Tragfähigkeits- und Ermüdungsversuche für Beanspruchungen in Längsrichtung der Profile, d.h. in Pultrusions- bzw. Faserrichtung vor. Die Verbundwirkung führt allerdings zusätzlich zu Beanspruchungen in Quer-

sowie die Klebeverbindung und die Haftung des Fahrbahnbelages untersucht.

Die Realisierung der Brücke ist für Ende 2007 vorgesehen. Mit dem Bauwerk sollen Erfahrungen über das Langzeitverhalten der Werkstoffe und der Bauweise gesammelt werden. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit der MPA der Universität Stuttgart ein Monitoring Konzept entwickelt.

3. Niedrige Wärmeleitfähigkeit: Fenster und Fassaden aus GFK und Glas

Faserverstärkte Kunststoffe haben aber außer den hohen mechanischen Festigkeitswerten noch weitere Eigenschaften, die in ganz anderen Bereichen des Bauwesens vorteilhaft genutzt werden können, z. B.: ihre niedrige Wärmeleitfähigkeit, die vor allem bei der Gebäudehülle eine wichtige Rolle spielt.

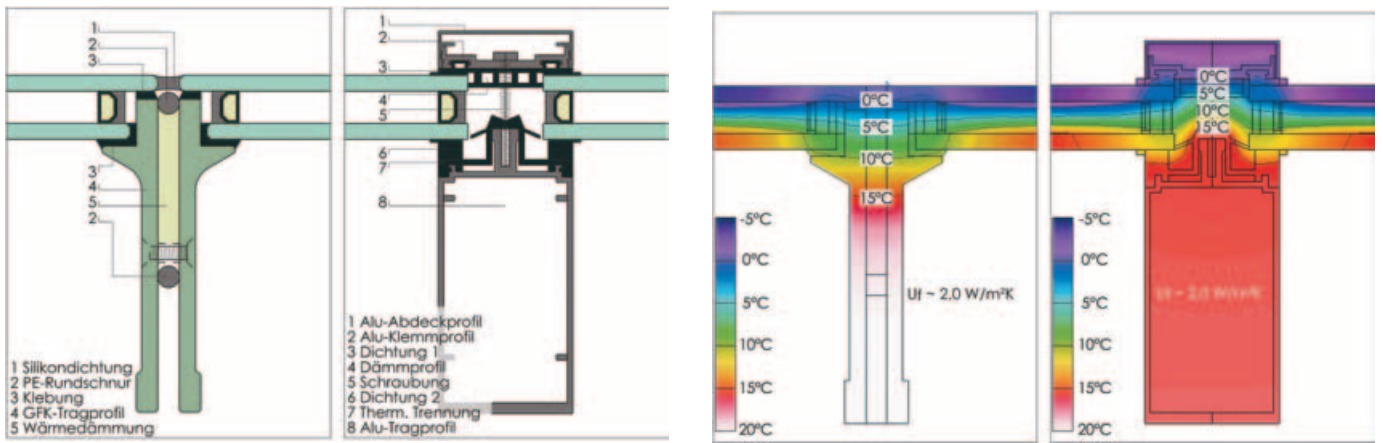
Der Aufbau konventioneller Metallfassaden wird nämlich wesentlich von der thermischen Trennung des Innenraums von der Umgebung bestimmt. Auch wenn die konstruktive Durchbildung schon lange sicher beherrscht wird, ist sie doch im Detail aufwendig. Neben den komplizierten Profilgeometrien sind Kunststoffelemente zur thermisch getrennten mechanischen Fixierung der Verglasung erforderlich sowie elastische Zwischenschichten, um die unterschiedliche Temperaturdehnung von Verglasung und Unterkonstruktion aufzunehmen. Alternativ werden Fassaden auch aus Holz oder Thermoplasten hergestellt, da beide Werkstoffe schlechte Wärmeleiter sind. Allerdings ist bei Holz die Dauerhaftigkeit und bei Thermoplasten die Tragfähigkeit bzw. Formbeständigkeit problematisch, weshalb Thermoplaste nur für kleinere Fenster verwendet werden und selbst dann oft mit Metalleinlagen verstärkt werden müssen.

GFK ermöglicht neue Herangehensweisen, da es nicht nur eine niedrige Wärmeleitfähigkeit hat, sondern gleichzeitig tragfähig und dauerhaft ist. Eine tragende Struktur aus GFK kann wie eine Holzkonstruktion die thermische Hülle durchdringen. Dabei ist noch eine weitere Materialeigenschaft von Bedeutung: strang-



GFK-Pavillon auf der glasstec 2002 aus acht Glasscheiben 6 m x 2,50 m und sechs aufgeklebten GFK-Trägern (Entwurf und Herstellung itke).

richtung. Daher wurden in den Zulassungsversuchen, die am itke durchgeführt wurden, vor allem die Tragfähigkeit der Profile senkrecht zur Faserrichtung



gezogene (pultrudierte) Profile aus GFK haben einen Glasfaseranteil von etwa siebenzig Prozent. Die Temperaturdehnung dieser Elemente ist daher der Verglasung sehr ähnlich. Somit ist ein direkter Verbund zwischen Verglasung und GFK-Pfosten mittels einer starren Verklebung möglich, ohne dass größere Zwängungsspannungen infolge unterschiedlicher Temperaturdehnungen zu befürchten sind. Die Notwendigkeit elastischer Schichten zwischen Glas und Pfosten zum Ausgleich von Dehnungsdifferenzen entfällt.

Erstmals wurde diese Idee des statisch wirksamen Verbundes von Glas und GFK mit einem Glaspavillon im Jahr 2002 auf der ‚glas-tec‘, der weltgrößten Messe für die Glas produzierende und verarbeitende Industrie demonstriert. Dieser bestand aus acht Verbundsicherheits-scheiben (VSG) mit Abmessungen von 6,0 m x 2,5 m. Vier davon bildeten die Wände und vier das Dach des Pavillons. Die Dachscheiben wurden mit aufgeklebten GFK-Profilen für die Spannweite von fast sechs Metern verstärkt, um die Biegebeanspruchung aus Eigengewicht im Verbund zu tragen. Das spröde und druckfeste Glas wurde mit Druckspannungen beansprucht, während das zugfeste GFK die Zugspannungen tragen musste. Auch Wand und Dach wurden miteinander verklebt. Außer den GFK-Profilen und den acht Glasscheiben hatte der Pavillon keine weiteren konstruktiven Elemente (04).

Für den Pavillon wurde noch Silikon verwendet, ein nachgiebiger Klebstoff mit niedrigen Festigkeiten und dicken Klebe-

fugen. Um im nächsten Schritt Fassaden aus Glas und GFK zu entwickeln, das eigentliche Ziel dieser Arbeit, wurden zunächst grundlegende Kenntnisse über die Klebeverbindung der beiden Fügepartner gesammelt. Dazu wurden mehrere Vertreter der vier großen Klebstoffgruppen Silikone, Polyurethane, Acrylate und Epoxidharze getestet. Einige der Klebstoffe waren handelsübliche Produkte, andere wurden speziell für diese Anwendung entwickelt. Besonderes Augenmerk muss dabei auf die Dauerhaftigkeit der Klebeverbindung gelegt werden. Die Tragfähigkeit der Klebproben wurde nach neunwöchiger Lagerung in einem Klimaschrank und Beanspruchung mit Feuchte- und Temperaturzyklen sowie UV Strahlung ermittelt. Parallel dazu wurden die Probekörper nach zweijähriger Außenlagerung getestet. Außer dem bauaufsichtlich zugelassenen Silikon, das üblicherweise für auf Aluminium geklebte Glaskonstruktionen (structural-glazing) verwendet wird, konnten starre Dünnschichtsysteme ermittelt werden, die höhere Festigkeiten, kleinere Klebeflächen, Transparenz und kürzere Aushärtungszeit ermöglichen.

Auf dieser Grundlage wurde dann ein Fassadenelement entwickelt, bei dem Profilquerschnitte aus GFK direkt mit Stufenisoliervgläsern verklebt werden. Die Klebefugen mit beiden Scheiben des Isolierglases stabilisiert gleichzeitig die

GFK-Fassade (links) und konventionelle Pfosten-Riegelkonstruktion (rechts): Regelschnitt und Isothermendarstellung.



Prototyp Fassadenelement glas-tec 2004 (Entwurf und Herstellung itke).

Flachprofile gegen Kippen. Die Elemente können anschließend nebeneinander aufgestellt und miteinander verschraubt werden. Die konstruktive Ausbildung der Fassade ist sehr einfach. Die Anzahl der verwendeten Bauteile ist im Vergleich zu konventionellen Fassadensystemen stark reduziert (05). Entwickelt wurden diese Elemente für zwei Bauprojekte in Dänemark. Im Entwurf der Architekten 3xNielsen für ein Glasmuseum in Ebeltoft sind Fassadenelemente aus GFK und Glas mit den Abmessungen 3,80 m x 1,90 m vorgesehen. Die dänischen Architekten Schmidt, Hammer & Lassen planen bei ihrem Entwurf eines Sport- und Kulturzentrums in Kopenhagen acht Meter hohe Fassadenelemente dieser Bauart. Ein Prototyp dieser Fassade wurde auf der BAU2005 mit dem Innovationspreis Architektur und Bauwesen ausgezeichnet (06). Der Wärmedurchgang entspricht dem einer konventionellen Pfosten-Riegel-Fassade, bei einer vereinfachten Konstruktion mit einem deutlich schlankeren Rahmen, aus architektonischer Sicht ein wichtiger Vorteil.

Auf diesen Grundlagen wurde dann im nächsten Schritt ein mehrschaliges Verbundelement entwickelt, bei dem zwei Scheiben aus Einscheiben Sicherheitsglas (ESG) 8 mm mit einem Scheibenzwischenraum von 92 mm eine wärmedämmende Luftschicht bilden. Dieses Kastenfenster mit den Abmessungen von ca. 2,40 m x 1,95 m und einem Gesamtgewicht von etwa 230 kg ist als Wendeflügel mit einer asymmetrisch angeordneten vertikalen Drehachse ausgeführt. Die Aussteifung des Fensters erfolgt über die Glasscheiben selbst, die hierzu an den Rändern mit dem GFK-Rahmen kraftschlüssig verklebt sind

(07). Ein hochfester Klebstoff erlaubt die Ausbildung dünner Klebefugen und somit von außerordentlich schlanken Rahmenprofilen. Um die Konstruktion zunächst einfach und das Gewicht niedrig zu halten sind zwei Einfachgläser verwendet worden. Eine low-e-Beschichtung an Position 2 führt in Verbindung mit der dämmenden Luftschicht zwischen den beiden Scheiben insgesamt zu einem U_w -Wert von etwa 1,7 W/m^2K .

Momentan wird an der bauphysikalischen Optimierung dieser Konstruktionen gearbeitet. Dabei wird im ersten Schritt die innere Scheibe durch eine Isolierglaseinheit ersetzt. Die äußere, low-e beschichtete Scheibe und die Luftschicht bleiben entsprechend der ursprünglichen Version bestehen. Mit dieser Konfiguration werden passivhaustaugliche Werte erreicht ($U_w < 0,8 W/m^2K$), also höchste Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz erfüllt. In einem weiteren Prototyp wird in ein Fassadenelement ein schwimmendes Öffnungselement mit GFK-Rahmen eingeklebt, um in festverglasten Fassaden Öffnungsflügel mit minimalem Rahmenanteil einzubauen.

Das wärmetechnische Verhalten der beschriebenen Konstruktionen wurde zunächst per Simulation und anschließend anhand von Prototypen am Fraunhofer Institut für Bauphysik experimentell untersucht. Dabei wurde der Wärmedurchgangskoeffizient ermittelt und die raumseitigen Oberflächentemperaturen gemessen, um die Bildung von Kondenswasser auszuschließen. Die Ergebnisse bestätigen das Potential dieser Konstruktionen und ermutigen uns, diese Entwicklungen weiter voranzutreiben. In Kürze werden die ersten GFK-Fassadenelemente bei größeren Bauvorhaben eingesetzt.

4. Vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Transparenz, Form und Farbe

In den Faserverbundwerkstoffen werden verschiedenartige Materialien für einen bestimmten Anwendungszweck jeweils neu kombiniert. Dabei gibt es nicht nur für die Matrix und die Verstärkungsfasern zahlreiche Optionen. Mit Additiven und Füllstoffen werden die chemischen und



07

Prototyp Kastenfenster mit sehr schlankem Rahmen auf der glasstec 2004 (Entwurf und Herstellung itke).

physikalischen Eigenschaften beeinflusst. Für den konstruktiven Aufbau der Lamine gibt es von der eindimensional verstärkten Einzelschicht bis zu mehrachsig und sogar dreidimensional bewehrten Sandwichkonstruktionen mit verschiedenen Ausführungen für die Kernlage zahlreiche Varianten. Auch die Verarbeitungstechnologie hat vom Handlaminat bis zum vollindustriellen Pultrudieren Einfluss auf Faserorientierung und Fasergehalt und damit nicht nur auf die Formgebung, sondern auch auf die mechanischen Eigenschaften der Halbzeuge. Außer Matrix und Verstärkungsfasern lassen sich noch andere Komponenten in den Verbundwerkstoff integrieren. Dies können zum Beispiel lichtlenkende und lichtleitende Fasern, Glasfasern zur optischen Datenübertragung oder piezoelektrische Sensoren zur Überwachung und Steuerung des Spannungs- und Verformungszustandes sein.

Für den entwerfenden Architekten und Ingenieur bedeutet dies einen Paradigmenwechsel: Traditionell werden Bauteile mit definierten Materialeigenschaften zu einer Gesamtkonstruktion gefügt. Bei Faserverbundwerkstoffen ist dagegen zunächst der Werkstoff selbst zu entwerfen. Die Materialforschung konzentriert sich dabei in der Regel auf die Optimierung der mechanischen Eigenschaften. In der Architektur haben dagegen auch die visuellen und taktilen Qualitäten der Werkstoffe eine wesentliche Bedeutung. Am itke werden daher auch diese Eigenschaften systematisch untersucht und dokumentiert.

Die üblicherweise verwendeten Polyester-, Vinylester- oder Epoxidharze sind transluzent. Anders als von traditionellen Bauweisen gewohnt, können daher mit Faserverbundwerkstoffen lastabtragende Bauteile lichtdurchlässig hergestellt werden, wobei die Transluzenz nicht nur vom Harztyp, sondern vor allem vom Glasfasergehalt abhängt (08). Die verwendeten Glasfasertextilien erzeugen eine sichtbare Textur im Bauteil. Transluzente Paneele können als großformatige, hinterleuchtete und dauerhaft formstabile Fassadenverkleidung eingesetzt werden.

Die optischen Eigenschaften der Lamine können durch Pigmente und Additive vielfältig gesteuert werden. Anders als bei

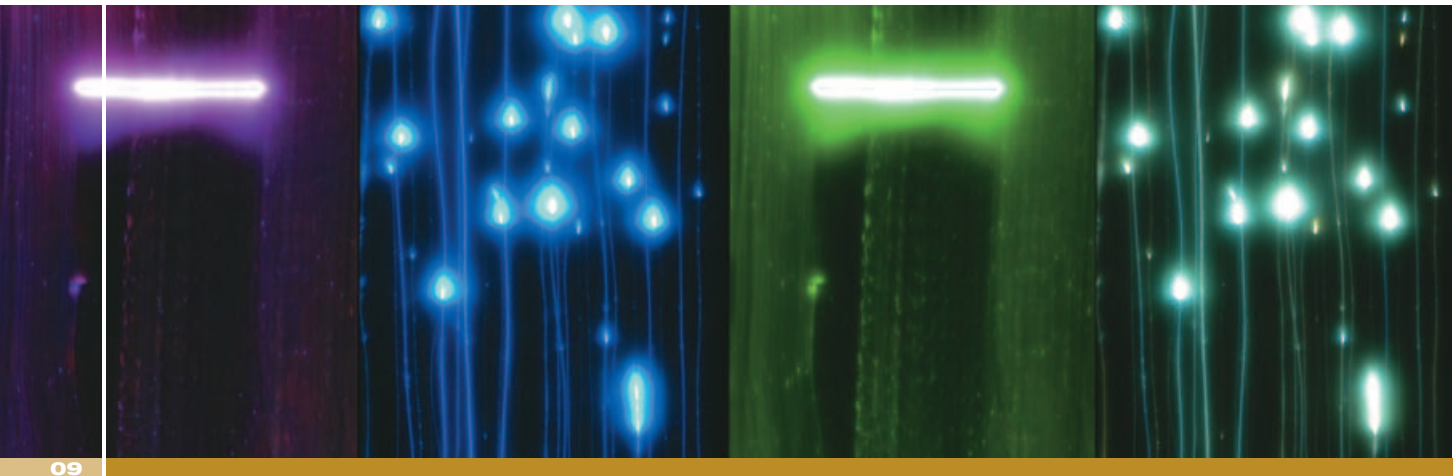


08

Tisch glasstec 2004: Transluzenter GFK-Körper mit eingeklebter Tischplatte aus Glas. Beide Komponenten spannen im Verbund über vier Meter (Entwurf itk2, Konstruktion und Herstellung itke).

den bekannten Beschichtungs- oder Bedruckungsverfahren für Glasscheiben sind sie in den Werkstoff integriert und somit von der Matrix gegen äußere Einwirkungen geschützt. Außer Farbpigmenten sind zum Beispiel phosphoreszierende Harze möglich, mit denen sich in der Nacht leuchtende Fassadenelemente herstellen lassen, ohne dass Energie zugeführt werden muss. Das „Aufladen“ erfolgt durch Tageslicht oder mittels künstlicher Beleuchtung. Am itke wurden phosphoreszierende Pigmente untersucht, die der Matrix Leuchtkraft für eine ganze Nacht geben. Neben vollflächig leuchtenden Platten sind auch gezielte Motive in der Deckschicht möglich.

Weiterhin können Pigmente mit thermochromen Eigenschaften integriert werden. Thermochrome sind Stoffe oder Substanzen, deren Kristallstruktur und somit auch Farbe sich in Abhängigkeit von der Temperatur ändert. Die in den Versuchen verwendeten Pigmente ergeben einen Wechsel von farbig/opak zu farblos/transluzent bei 31° C. Der Effekt ist reversibel. Für die Anwendungen in Fassaden ist allerdings der umgekehrte Effekt, also eine Reduzierung der Lichtdurchlässigkeit bei steigender Temperatur oder UV Strahlung von größerem Interesse: Eine solche von der UV-Strahlung abhängige Änderung



GFK-Platten mit einlamierten lichtleitenden Fasern.

des Lichtdurchgangs ist von der photochromen Beschichtung von Glas bekannt. Diese Beschichtungen sind instabil. Sie ändern im Laufe der Zeit ihre chemische Struktur. Je länger und öfter die Farben UV-Licht ausgesetzt werden umso weniger kehren sie in den durchsichtigen Zustand zurück. Bei GFK befinden sich die Pigmente allerdings in der Matrix oder der Deckschicht und nicht auf der Bauteiloberfläche und sind damit gegen mechanischen Abrieb geschützt. In weiteren Versuchen des itke am Fraunhofer Institut für Silicatformforschung in Würzburg werden Bauteilmuster auf ihre UV-Beständigkeit und Lebensdauer hin getestet.

Der mehrschichtige Aufbau der faserverstärkten Kunststoffe erlaubt es weiterhin, verschiedene Lichtquellen zwischen den Lagen der Verstärkungsfasern einzulaminieren. Diese dürfen allerdings nur wenig Wärme entwickeln, um das Laminat keiner dauerhaften Temperaturbeanspruchung auszusetzen. Dafür eignen sich beispielsweise Leuchtdioden (LED's) oder lichtleitende Fasern. Mit LED's können die Bauteile in einem gezielten Muster zum Leuchten gebracht werden. Die sichere und dauerhafte Fixierung der LED's im Faserverbund erweist sich in der Praxis allerdings als schwierig. Sie sind zudem druckempfindlich, so dass ein ungestörtes Auswalzen des Laminats behindert ist. Praktikabler ist die Integration von synthetischen lichtleitenden Fasern, die durch einen externen Projektor angesteuert werden (09). Mit diesem Verfahren lassen sich lastabtragende Bauteile und Fassadenelemente zum Leuchten bringen, ohne deren statische Tragfähigkeit zu beein-

trächtigen. Da die lichtleitenden Fasern wartungsfrei sind und von der Matrix gegen Umwelteinflüsse geschützt werden, kann der Leuchteffekt dauerhaft genutzt werden.

5. Offene Fragen und Themen für künftige Projekte

Natürlich gibt es noch viele weitere Themen, die an dieser Stelle nicht vertieft werden können und die entweder in laufenden Projekten bearbeitet werden oder die Ideen für künftige Arbeiten bieten:

- Brandschutz: Für alle Hochbauten ist die Feuerwiderstandsdauer der Tragkonstruktion bzw. der Brandschutz, von elementarer Bedeutung. Polyester-, Vinylester- und Epoxidharze basieren auf organischen Polymeren und sind daher grundsätzlich brennbar. Zwar gibt es Phenolharze mit besseren Brandeigenschaften oder Brandschutzadditive, aber dennoch bleibt der Feuerwiderstand der Schwachpunkt von Faserverbundwerkstoffen. Dies führt dazu, dass tragende Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen, d.h. Stützen und Decken aus GFK, derzeit kaum möglich sind. Die Ermittlung, Bewertung und Verbesserung der Brandeigenschaften stellt daher ein wichtige Voraussetzung für den breiteren Einsatz von GFK und CFK als Konstruktionswerkstoff im Hochbau dar. Derzeit werden am itke im Rahmen eines DFG-geförderten Projektes erste Grundlagen für die Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von GFK-Profilen unter thermischer und me-

chanischer Beanspruchung ermittelt. Dabei werden verschiedene Harzsysteme betrachtet.

- Formgebung: aus architektonischer Sicht sind die dreidimensional geformten Bauteile, die sich mit Faserverbundwerkstoffen im Handlaminierverfahren herstellen lassen, ein weiterer sehr interessanter Aspekt. Allerdings zeigt sich leider immer wieder, dass die Modellkosten für frei geformte Bauteile sehr hoch sind und sich im realen Baugeschehen nur in Ausnahmefällen oder bei hohem Wiederholungsgrad durchsetzen lassen. Erforderlich sind daher neue Verfahren, möglicherweise auf Grundlage aktueller rapid-prototyping-Technologien, um die Modellbaukosten für dreidimensionale geformte Bauteile zu reduzieren (10).
- GFK-Beton-Hybrid-Konstruktionen: GFK hat eine hohe Zugfestigkeit und ist korrosionsbeständig. Deswegen liegt der Gedanke nahe, GFK als Schalung und Umschnürung für den druckfesten und billigen Massenbaustoff Beton zu verwenden. Betongefüllte GFK-Rohre werden in den USA zum Beispiel als Gründung Pfeiler im Wasser oder als Oberleitungsmaste eingesetzt. Wickeltechnik, Flechtverfahren oder andere Methoden erlauben jedoch auch die Herstellung von komplexen Geometrien wie z. B. Verzweigungsknoten. Betongefüllte GFK-Hohlkörper können daher für Betonfachwerke oder andere geometrisch anspruchsvolle Betonkonstruktionen verwendet werden, deren Herstellung mit konventionellen Schalungen sehr aufwendig ist. Zu klären ist, inwieweit sich der im Vergleich zu einer konventionellen Stahlbewehrung weiche GFK-Mantel am Lastabtrag beteiligt.
- Füge- und Verbindungstechnik: die werkstoffgerechte Fügemethode für Bauteile aus faserverstärktem Kunststoff ist die Klebetechnik, die allerdings kontrollierte Umgebungsbedingungen erfordert wie sie in der Regel nur in der Werkstatt gegeben sind. Konstruktionen des Bauwesens müssen häufig in größeren Abschnitten auf der Baustelle gefügt werden. Dazu sind lösbare Verbindungen erforderlich. Bisher werden dafür meist Schraubverbindungen verwendet, die wie im

Stahlbau die Kräfte über Abscheren und Lochleibung übertragen. Im Gegensatz zum Stahl sind im Faserverbundwerkstoff weder der isotrope Spannungsfluss um das Schraubloch noch der duktile Abbau von Spannungsspitzen möglich, was in der Regel zum frühzeitigen spröden Versagen der Verbindung führt. Daher werden derzeit am itke neue Formschlussverbindungen untersucht, die die Kräfte flächig übertragen und eine höhere Tragfähigkeit aufweisen.

- Bemessungs- und Nachweisverfahren: das mechanische Verhalten der Verbundwerkstoffe ist außerordentlich komplex. Die Werk-

SUMMARY

Fibre reinforced polymers (FRP) were introduced in architecture in the late fifties of the last century with the intention of mass production of housing units. Despite the initial great attention and perceived potential of these structures, it did not meet the expectations of the wider and FRP disappeared completely from public architecture already 20 years later. However, the properties of FRP offer some advantages, which are of particular interest and lead today to new applications in very different fields of architecture and building technology e.g.: high tensile strength of cords and strips made from carbon fibre reinforced polymers enables its application in cable-stayed or pre-stressed bridges, the corrosion and fatigue resistance of FRP makes it suitable for bridge deck systems, and the low thermal conductivity of glass fibre reinforced plastics makes possible the development of new types of façade structures with a very few components and a superior thermal behaviour. Besides these technological advantages, FRP offers a variety of possibilities for the architectural design regarding the shape as well as material qualities like transparency, colours and the possibility of integrating lighting systems and other components into the composite material. This article shows some innovative applications of FRP in today's building technology based on demonstration and research projects at the Institute of Building Structures and Structural Design (itke).



Messestand Lange und Ritter rohima 2006: GFK-Laminat auf geformtem Hartschaumkern (Entwurf und Herstellung itke).

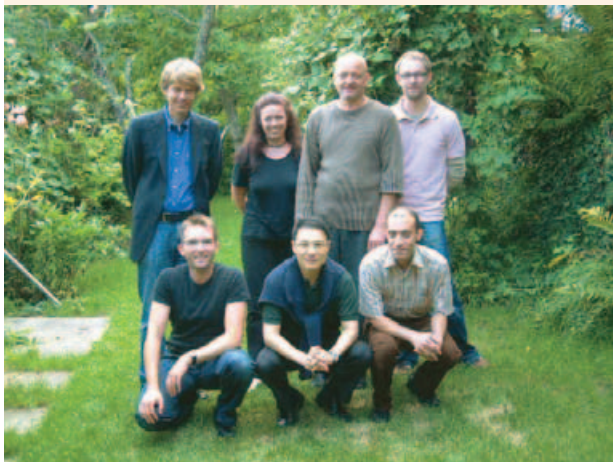
stoffkenngrößen sind anisotrop und zeitabhängig. Hinzu kommen vielfältige Versagensmechanismen: nicht nur der Bruch von Faser und Matrix, sondern insbesondere Delamination und Grenzschichtversagen spielen häufig eine wesentliche Rolle. Die analytische und numerische Erfassung dieser Effekte ist sehr aufwendig. Für das Bauwesen sind einfache Nachweisverfahren erforderlich, die die relevanten Versagensmechanismen mit praktisch handhabbaren Modellen erfassen. Diese sollten sich an den gängigen

Bemessungsverfahren des Bauwesens orientieren und zum Beispiel Grenzschnittgrößen und Interaktionsformeln angeben.

Bei der Bearbeitung dieser Themen wäre für uns die Kooperation mit anderen Instituten der Universität hilfreich. Wir hoffen daher darauf, dass sich fakultätsübergreifende Verbünde ergeben, die die an der Universität vorhandenen Kompetenzen bündeln.

Jan Knippers et al.

DIE AUTOREN



hinten von links nach rechts: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers, Dipl.-Ing. (FH) Petra Heim, Michael Tondera, Dipl.-Ing. Claus-Peter Weller; vorn von links nach rechts: Dipl.-Ing. Alexander Hub, Dip.-Ing. Don-U Park, Dipl.-Ing. Mohamed Hwash (nicht abgebildet: Dr.-Ing Stefan Peters, Dipl.-Ing. Markus Gabler, Dipl.-Ing. Carsten Ludwig)

DIE AUTOREN UND MITARBEITER

Das Bauen mit faserverstärkten Kunststoffen ist ein Forschungsschwerpunkt am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, der mit der Berufung von Jan Knippers im Jahr 2001 aufgebaut wurde. Dabei werden im wesentlichen zwei Hauptthemen verfolgt: zum Einen die Entwicklung von innovativen Fassadenkonstruktionen und zum anderen Brücken und Brückenfahrbahnen aus GFK.

Die in diesem Aufsatz beschriebenen Projekte beruhen auf Arbeiten von Stefan Peters, Claus Peter Weller, Don-U Park, Mohamed Hwash, Markus Gabler, Alexander Hub und Carsten Ludwig, die in den letzten fünf Jahren als wissenschaftliche Mitarbeiter oder Doktoranden am Institut tätig waren oder noch sind.

Besonders wertvoll ist die Unterstützung von Michael Tondera in der Werkstatt und Petra Heim bei der Erstellung von Berichten und Postern. Geleitet wird das Institut von Jan Knippers, der an der TU Berlin Bauingenieurwesen studiert und dort auch promoviert hat. Vor seiner Berufung war er mehrere Jahre in einem international bekannten Ingenieurbüro tätig.

Kontakt

Universität Stuttgart, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen
Keplerstr. 11, 70174 Stuttgart
Tel. 0711/685 83280
Fax 0711/685 82756
E-Mail: info@itke.uni-stuttgart.de
Internet: www.itke.uni-stuttgart.de

ALUCORE® ALUCOBOND® KAPA®



Constructive Sandwich Material



KAPA®

Polyurethan Leichtstoffplatte

KAPA®inlay

- leicht
- hohe Druckfestigkeit und Wärmebeständigkeit
- leicht verarbeit- u. verformbar

KAPA®core

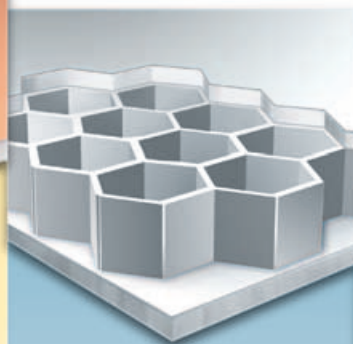
- offenzellig
- elastisch und verformbar

KAPA-Term®

- formbeständig bis 110°C
- gutes Wärmedämmvermögen
- optimal verformbar

KAPA-Term®DVD

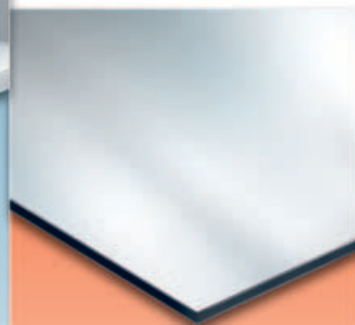
- sehr hohe Steifigkeit
- hohe Formstabilität
- geringes Gewicht



ALUCORE®

Aluminium-Wabenkern-
Verbundplatte

- hohe Biegesteifigkeit bei extrem niedrigem Gewicht
- besonders langlebig
- für innen und aussen
- hohe Druckfestigkeit
- vielseitige Befestigungs- und Verbindungsmöglichkeiten
- hohe Schälhaftung
- neu entwickeltes zähelastisches Klebesystem
- große Auswahl an Oberflächen, Farben u. Größen
- voll recyclebar und umweltfreundlich



ALUCOBOND®

Aluminium-Verbundplatte

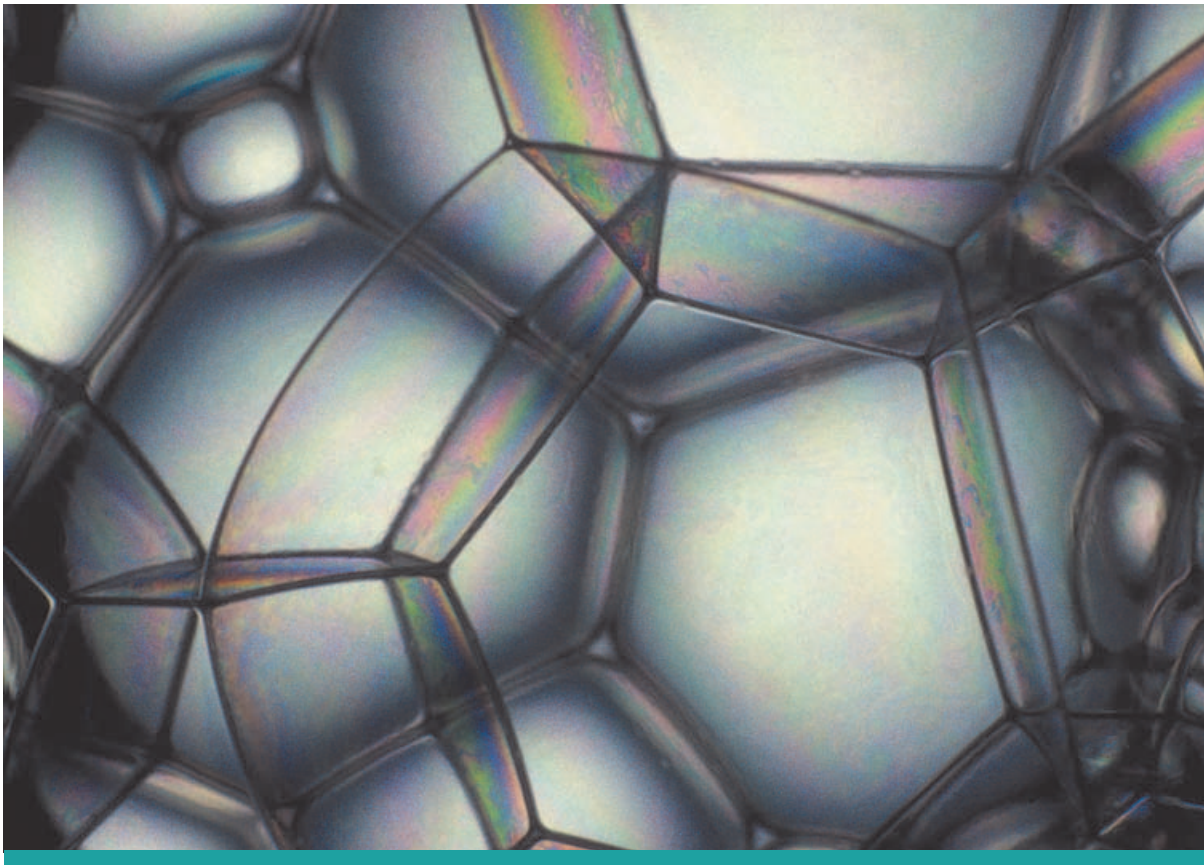
- hohe Biegefestigkeit, geringes Gewicht
- schwingungsdämpfend
- einfache Verarbeitung
- Großformate
- planeben
- Oberflächen in vielen Standard- und Ergänzungsfarben
- recyclebar
- nicht brennbar nach DIN 4120
- schnelles Verlegen

ALCAN COMPOSITES
Alcan Singen GmbH
D-78224 Singen, Germany
Tel.: + 49 7731 / 80 - 29 89
Fax + 49 7731 / 80 - 21 05
displayeu@alcan.com
www.alcancomposites.com

Entwerfen im Leichtbau

Warum Leichtbau? könnte man fragen, und eine Antwort jenseits der Erkenntnis der Notwendigkeit von Leichtbau im Bauwesen als Voraussetzung zur Überbrückung von Grenzhöhen und Grenzspanweiten würde lauten: Weil es keine bessere Schule für das Verstehen der tragenden Konstruktionen in der lebenden und der nicht lebenden Natur sowie in der von Menschen gestalteten Welt gibt.

Die Suche nach den leichten Konstruktionen ist die Suche nach den Grenzen. Das Entwerfen der leichtestmöglichen Konstruktionen ist das Herantasten an das physikalisch und das technisch Machbare. Es hat zu tun mit der Ästhetik des Minimalen, mit der Suche nach dem Unbekannten und mit dem Überschreiten von durch Wissenschaftsdisziplinen gezogenen Grenzen.



Bei Konstruktionen, die große Spannweiten überbrücken, die große Höhen erreichen oder die sich bewegen bzw. die bewegt werden, ist die Reduktion des Eigengewichtes ökonomischer Zwang, häufig genug auch Voraussetzung für die Realisierbarkeit selbst. Bei den eher alltäglicheren Konstruktionen kleinerer Abmessungen, bei temporären und ephemeren Bauten bedeutet Leichtbau eine Ersparnis an eingesetzter Masse, zumeist auch an eingesetzter Energie. Spätestens hier scheint der ökologische Aspekt auf: Leicht zu bauen wird zur Haltung.

Konsequenter Leichtbau bedingt deutliche Modifikationen in den tradierten Strukturen des Entwurfsprozesses: Die Festlegungen der Systemgeometrie, die Ausformung und die Proportionierung der tragenden Strukturen sowie deren Materialbelegung haben primär der Forderung nach Gewichtsersparnis und erst sekundär denjenigen Forderungen zu folgen, die sich beispielsweise aus architektonischen Überlegungen, aus Überlegungen zur Herstellungstechnik und aus Kostenüberlegungen ergeben. Darüber hinaus lässt sich der Entwurf gewichtsminimaler Tragsysteme nicht auf der Basis einer Addition bzw. gekonnter Kombination von Grundbausteinen wie Stützen, Balken, Bögen, Platten, Scheiben etc., allgemein gesagt also geometrisch determinierter Bauteile, gestalten. Vielmehr entwirft man im Leichtbau räumliche Kräftepfade, also ausschließlich statisch konditionierte Strukturen, die man anschließend mit geeigneten Werkstoffen belegt. Entwerfen als Projektion eines im Geist auf unterschiedlichste Weise geschaffenen, gesehenen Bildes, zusammengesetzt aus Bildern, Worten und Empfindungen, aus teilweise nichtverbaler, nichtvisueller oder nichtakustischer Information, wird im Leichtbau durch Einflechten der erstrangigen Forderung nach Gewichtsminimalität um einen weiteren, physikalisch fassbaren Komplexitätsgrad gesteigert.



Ein Beispiel aus der Natur: Das Netz einer Spinne als vorgespanntes, ausschließlich zugbeanspruchtes Fadensystem

2. Kategorien im Leichtbau

Es gibt drei grundlegend unterschiedliche Kategorien im Leichtbau, die beim Entwerfen von Leichtbaukonstruktionen auf unterschiedliche Art miteinander kombiniert werden: Materialeichtbau, Strukturleichtbau und Systemleichtbau. Ihre nachfolgende Erläuterung und Diskussion soll einer ersten Skizzierung der Leichtbauprinzipien dienen.

2.1 Materialeichtbau

Unter Materialeichtbau versteht man die Verwendung von Baustoffen mit einem günstigen Verhältnis von spezifischem Gewicht zur ausnutzbaren Festigkeit, zur ausnutzbaren Dehnung, zur ausnutzbaren Steifigkeit etc.. Ein Leichtbauwerkstoff ist dementsprechend durch mehr als eine Kennzahl, z.B. den Quotienten Steifigkeit/spez. Gewicht, gekennzeichnet; die Klassifizierung von Werkstoffen hat damit stets in einem mehrdimensionalen Feld zu erfolgen. Welcher Kenngrößenquotient maßgebend wird, hängt davon ab, ob die Dimensionierung eines Bauteils auf Festigkeit, Steifigkeit, Duktilität, Dämpfung, Stabilität etc. erfolgt. Zusätzlich ist gerade bei den Leichtbauwerkstoffen wie Kunststoffen oder Alu-

miniumlegierungen zu beachten, dass diese nicht nur gegen Spitzenwerte der Beanspruchung, sondern auch gegen ständig vorhandene Lasten, in ihrer zeitlichen Einwirkung zu akkumulierende Lastkollektive, gegen Grenzwerte der akkumulierten plastischen Deformationen etc. zu dimensionieren sind. Eine differenzierte Betrachtungsweise ist also nötig. Die Verhältnisse sind de facto komplexer als die immer wieder in die Diskussion gebrachten einfachen Verhältniszahlen über die „Leistungsfähigkeit“ von Werkstoffen, beispielsweise die sog. „Leichtbaukennzahl“, der „Bic“ oder die „Reißlänge“, dies suggerieren.

2.1.1 Der Bauweisenbegriff

Materialleichtbau muss prinzipiell unter Einbeziehung der konstruktiven Durchbildung der Bauteile diskutiert werden. Es genügt nicht, eine günstige Gesamtgeometrie und eine gewichtsoptimale Werkstoffbelegung eines Bauteils zu entwickeln, um danach aufgrund der teilweise erheblichen konstruktiven Probleme in den Kräfteinleitungsbereichen Massenerhöhungen infolge komplizierter und massebehafteter Details hinnehmen zu müssen. Den Fragen der Detaillierung, der Fügetechnik und der Werkstoffkombinationen kommt gerade im Leichtbau besondere Bedeutung zu.

Bedauerlicherweise fehlen im Bauwesen bis heute sowohl eine werkstoffübergreifende Konstruktions-, Entwurfs- und Bemessungslehre wie auch durchgehende Konzepte zum Recycling der Bauten und ihrer Einzelteile. Für die Behandlung der Fragen der Detaillierung, Fügetechnik und Werkstoffkombination, ansatzweise auch denen des Recycling im Leichtbau, hat der Autor deshalb bereits 1990 den in der Flugzeug- und Kraftfahrzeugtechnik angewandten Bauweisenbegriff in das Bauschaffen eingeführt. Als Bauweise wird dabei die Art und Weise bezeichnet, in der einzelne Werkstoffe geformt und miteinander zu Bauteilen (höhere Fügungsebene: Tragwerke) verbunden werden.

Die Einteilung in:

- Differentialbauweisen
- Integralbauweisen

- Integrierende Bauweisen
- Verbundbauweisen

ist Grundlegung für werkstoffübergreifendes Entwerfen und Konstruieren. Der Bauweisenbegriff erlaubt eine schnelle Bewertung der statisch-konstruktiven Eigenschaften eines Bauteils sowie der Besonderheiten seines Montage-, Demontage- und Rezyklierungsverhaltens.

Ein in Differentialbauweise hergestelltes Bauteil besteht aus mehreren, vergleichsweise einfach gestalteten Elementen. Die gegebenenfalls aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehenden Elemente werden durch punktförmige Verbindungen zu Bauteilen gefügt. Die punktuelle Fügung ist prinzipiell mit Spannungskonzentrationen im Verbindungsbereich verbunden, ein Effekt, den man im Leichtbau natürlich gern vermeiden würde und der sich nur mit entsprechend aufwendigen Methoden, wenn überhaupt, in seinen Auswirkungen reduzieren lässt. Dem grundlegenden statisch-konstruktiven Nachteil der Spannungskonzentration im Fügungsbereich stehen die Vorteile der einfachen Fügung (auch auf der Baustelle) und der optimalen Anpassbarkeit der unterschiedlichen Elemente an das jeweilige Anforderungsprofil entgegen. Demontage- und Rezyklierverhalten in Differentialbauweise erstellter Tragwerke sind grundsätzlich vorteilhaft, da punktuelle Verbindungen üblicherweise leicht lösbar sind und die anschließende Sortierung der Ein-Stoff-Elemente einfach ist.

Ein in Integralbauweise hergestelltes Bauteil ist ein zu einem Stück geformtes Einstoff-Bauteil. Mit entsprechenden Technologien wie Gießen, Schmieden oder spanabhebenden Verfahren können dabei sehr kompliziert geformte Bauteile hergestellt werden. Bauteilgeometrie und Wandstärkenverlauf sind optimal an den Kraftfluss anpassbar, wodurch eine sehr homogene Werkstoffausnutzung unter nahezu völligem Ausschluss von Spannungskonzentrationen innerhalb des Bauteils erzielt wird. Da ein in Integralbauweise hergestelltes Bauteil nur aus einem Werkstoff besteht, besitzt es entsprechend positive Rezyklieigenschaften.

Mit der integrierenden Bauweise versucht man, die fertigungstechnisch bedingte Beschränktheit der Stückgrößen durch kontinuierliches Fügen der Einzelemente zu einem quasi-homogenen Bauteil zu umgehen. Mit Fügetechniken wie Kleben oder Schweißen wird eine entsprechende Homogenisierung der Spannungsfelder innerhalb des Bauteils möglich. Das Rezyklierverhalten ist je nach Fügungsart unterschiedlich. Natürlich sind insbesondere Schweißverbindungen positiv zu bewerten; die Verwendung mengenmäßig hoch dosierter Leime und Kleber hingegen kann unter Umständen zu Rezyklierproblemen führen.

Bei der Verbundbauweise werden Bauteile aus mehreren unterschiedlichen Werkstoffen zu einem Stück zusammengesetzt. Im Gegensatz zur Integralbauweise werden jedoch mehrere Werkstoffe zu einem Mehrstoff-Bauteil kombiniert. Auswahl und Anordnung der Werkstoffe erfolgen dabei nach deren Eigenschaftsprofil und in Abhängigkeit vom Beanspruchungsverlauf innerhalb des Bauteils. Dies erlaubt die sehr effiziente Gestaltung von tragenden Teilen. Die Verbundbauweisen beinhalten die Kategorien

- Allgemeine Verbundbauweise,
- Faserverbund- und Hybridbauweise sowie
- Sandwichbauweise

Verbundkonstruktionen können genau dann sehr effizient und leicht gestaltet werden, wenn die eingesetzten Werkstoffe das an das Bauteil gestellte Anforderungsprofil im Verbund, also gemeinsam (!) bestmöglich erfüllen. Der Qualität des Verbundes zwischen den Werkstoffen, also z.B. der Qualität des Verbundes zwischen Armierungsfaser und Matrix, kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu: Je besser der Verbund, desto kürzer können beispielsweise die Krafteinleitungslängen gestaltet werden. Dies führt zu Gewichtseinsparungen. Andererseits kann eine zu hohe Haftung zwischen den Verbundpartnern zu einem ungünstigen Lastabtragungsverhalten führen. Eine

hohe Verbundwirkung führt darüber hinaus dazu, dass sich das Zweistoff-Bauteil nur schwer in seine Ausgangsstoffe zerlegen lässt. Am Beispiel des weltweit mengenmäßig am meisten verbreiteten Verbundwerkstoffes, des Stahlbetons, lässt sich dies sehr anschaulich erläutern: Infolge der extrem schlechten Verbundwirkung zwischen Bewehrungsstahl und Beton werden signifikant größere Mehr-längen (d.h. Mehrmassen), die sog. Verankerungslängen, an Bewehrungsstahl erforderlich, um den Kraftübertrag von der Betonmatrix in den Bewehrungsstahl bzw. umgekehrt zu gewährleisten. Diesem so gut wie nie ausgesprochenen, ökonomisch wie ökologisch nicht zu unterschätzenden Nachteil steht der große Vorteil eines einfachen Recyclings durch ein - infolge des schlechten Verbundes - prozesstechnisch einfaches Trennen der beiden Verbundpartner Beton und Stahl gegenüber.



02

2.2 Strukturleichtbau

Geht man von der Ebene der Werkstoffe sowie deren Kombination und Fügung zu derjenigen der Bauteile und der aus ihnen zusammengesetzten Tragwerke über, so stellt hier der Strukturleichtbau die Aufgabe, ein gegebenes Beanspruchungskollektiv mit einem Minimum an Eigen-

Strukturleichtbau: Die „Stuttgarter Schale“ ist lediglich 10 mm dick. Sie stellt mit einem Bauteildicken/Spaltenverhältnis von 1/850 die dünnste je gebaute Glasschale dar.

SUMMARY

Lightweight construction means the search for limits. The design of the lightest constructions approaches the physically and the technically feasible. Lightweight construction often is not only a precondition for demanding constructions; it also significantly reduces materials and energy employed and has therefore clear ecological consequences. The use of adaptive systems will further push the limits of the lightweight construction in the future and, at the same time, will enable optimizations in the area of conventional structures or components.

Leichtbau ist die Suche nach den Grenzen. Das Entwerfen der leichtestmöglichen Konstruktionen ist das Herantasten an das physikalisch und das technisch Machbare. Leichtbau ist bei vielen anspruchsvollen Konstruktionen nicht nur eine Grundvoraussetzung für deren Realisierbarkeit; er bedeutet in der Regel auch eine markante Ersparnis an eingesetzter Masse und Energie und hat somit klare ökologische Auswirkungen. Der Einsatz adaptiver Systeme wird in den kommenden Jahren die Grenzen des Leichtbaus noch weiter hinausschieben und gleichzeitig Optimierungen im Bereich konventioneller Strukturen oder Bauteile ermöglichen.

gewicht der Konstruktion unter Einhaltung einer Reihe vorgegebener Restriktionen zu gegebenen Auflagerpunkten zu leiten. Strukturleichtbau beschäftigt sich also mit Art, Anzahl und Anordnung der Bauteile, aus denen eine tragende Struktur minimalen Gewichts gebildet wird. Strukturleichtbau bedeutet deshalb letztendlich die Lösung eines Minimierungs-, d.h. Optimierungsproblems in einem mit Restriktionen versehenen Entwurfsraum. Das Tragwerk hat dabei ausschließlich die Funktion der Abtragung von Lasten.

2.3 Systemleichtbau

Unter Systemleichtbau versteht man das Prinzip, in einem Bauteil neben der lastabtragenden auch noch andere, wie zum Beispiel raumabschließende, spei-

chernde, dämmende oder vergleichbare Funktionen zu vereinigen. Die tragenden Bauteile werden somit multifunktional, eine im Bauwesen immer wieder, wenn auch nicht oft genug bewusst benutzte Lösung. Viele mögliche Anwendungsbereiche sind noch unerschlossen, wie das Beispiel einer Beteiligung der Glaseindeckung filigraner Stabkuppeln an der Lastabtragung zeigt – ein Konstruktionsprinzip, das man in der Kraftfahrzeugtechnik bereits vorfindet: Dort werden zunehmend die Glasscheiben als aussteifende Elemente herangezogen.

3. Entwerfen im Leichtbau

Entwerfen im Leichtbau bedeutet primär die Entwicklung räumlicher Kräftepfade und deren anschließende Materialisierung unter der Zielsetzung, ein möglichst niedriges oder sogar minimales Gewicht der Konstruktion zu erzielen. Gewichtsarme Konstruktionen lassen sich aber, von wenigen Sonderfällen abgesehen, nicht mehr mit den tradierten Entwurfs-

methoden, also quasi „von Hand“ entwickeln. Die tradierten Entwurfsmethoden ermöglichen zwar die Darstellung oder gar die Entwicklung geometrisch komplizierter Gebilde, versagen jedoch völlig bei der Aufgabe, im Gleichgewicht befindliche, gewichtsminimale räumliche Kraftsysteme zu entwickeln.

Wo immer man sich das Ziel setzte, gewichtsminimale Konstruktionen oder auch Konstruktionen, bei denen die tragende Struktur nur ganz bestimmten Spannungszuständen – wie beispielsweise einer ausschließlichen Druckbeanspruchung – ausgesetzt wird, zu entwerfen, verwendete man zumeist individuell entwickelte Methoden. Die Seifenhautstudien von Plateau im Zusammenhang mit der Erforschung der Minimalflächen, die berühmten Hängemodelle des spanischen Baumeisters Antonio Gaudi, die er unter anderem zur Erarbeitung der Geometrie der Kirche Sagrada Familia in Barcelona verwendete, die Analogieschlüsse von d'Arcy Thompson, in denen er das Tragverhalten lebender und nicht lebender Objekte analysierte, die Minimalstrukturen von Maxwell [1] und Mitchell [2] oder auch die berühmten Hängeversuche des Schweizer Ingenieurs Heinz Isler gehören zur Vielzahl der im Verlauf vieler Jahrzehnte unabhängig voneinander entwickelten Insellösungen.

Es war das Verdienst von Frei Otto, die auf experimentellem Arbeiten basierenden Methoden zusammenzutragen, diese um eine Reihe weiterer Methoden zu ergänzen und erstmals eine Kategorisierung der unterschiedlichen, von Frei Otto als „Formfindungsmethoden“ bezeichneten Methoden vorzulegen [3]. In den seither vergangenen fünf Jahrzehnten wurden diese Methoden insbesondere an der Universität Stuttgart detailliert untersucht, ergänzt und weiterentwickelt. Dass der Begriff „Formfindung“ etwas unglücklich gewählt ist, wird zwischenzeitlich allgemein akzeptiert. Der Term „Finden“ beinhaltet letztlich einen Zufallscharakter, der bei diesen nachstehend ausführlicher beschriebenen und wissenschaftlich allesamt fundierten Methoden, die man besser als „Formentwicklungsmethoden“ bezeichnet hätte, definitiv nicht vorhanden ist.

Neben den experimentellen Methoden haben die sog. mathematisch-numerischen Formfindungsmethoden in den vergangenen Jahren, insbesondere auch aufgrund der Leistungs- und Preisentwicklung in der Computertechnik, enorm an Wichtigkeit gewonnen. Die grundlegenden Arbeiten hierzu entstanden bereits in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts, ebenfalls an der Universität Stuttgart. Hier wurden die wenigen bis dato bekannten analytischen Methoden zur Entwicklung gewichtsminimaler oder spannungsrestringierter Strukturen aufgearbeitet und, insbesondere durch die bahnbrechenden Arbeiten von Linkwitz und Argyris, grundlegend erweitert.

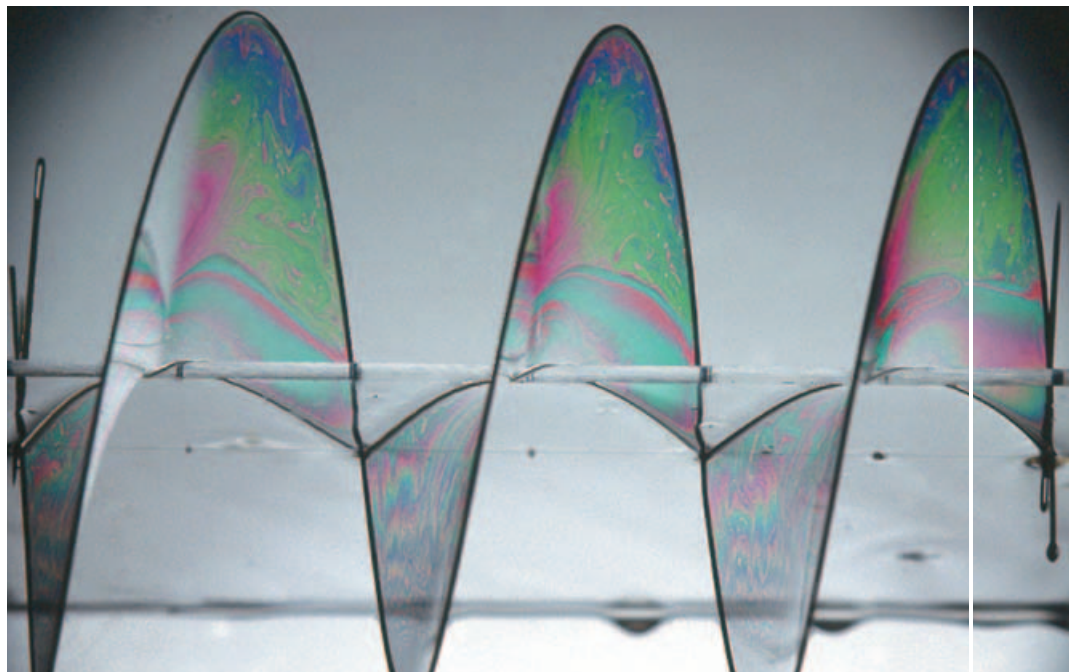
3.1 Experimentelle Formfindungsmethoden

Unter experimentellen Formfindungsmethoden versteht man die Gruppe derjenigen Methoden, bei denen die tragende Struktur einer Konstruktion durch Zuhilfenahme geeigneter physikalischer Modelle bei gleichzeitiger Beachtung von Maßstabs- und/oder Modelleffekten entwickelt wird.

Üblicherweise werden die experimentellen Methoden in folgende Gruppen eingeteilt:

- Hängemodelle
- mechanisch vorgespannte Strukturen
- pneumatisch gebildete Formen
- Fließformen

Während die Hängemodelle, die mechanisch aufgespannten und die pneumatisch aufgespannten Strukturen einer Einteilung nach der Art der Lastaufbringung folgen, stellt die Gruppe der Fließformen eine dazu nicht kompatible Kategorie dar. Fließformen, die mit Werkstoffen realisiert werden, die während der Formfindung ausgeprägt viskoelastisches bzw. viskoplastisches Verhalten zeigen, sind entsprechend mit den vorgenannten drei Methoden kombinierbar.



03

Experimentelle Formfindung am Beispiel einer Seifenhautlamelle. Seifenhautlamellen besitzen eine verschwindende mittlere Krümmung, sie sind Minimalflächen. Seifenhäute weisen isotensoidische Spannungsfelder auf.

Interessanterweise sind alle Ergebnisse der vorstehend genannten experimentellen Formfindungsmethoden zugbeanspruchte Konstruktionen. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich eine stabile Gleichgewichtsform bei einer zugbeanspruchten Struktur im Experiment sehr einfach, bei einer druckbeanspruchten Struktur aufgrund der stets vorhandenen (In-) Stabilitätsproblematik nur in sehr wenigen Fällen erarbeiten lässt: Die Modelle würden zumeist während der Formentwicklungsphase infolge von (In-) Stabilitätsproblemen versagen. Die Formfindung druckbeanspruchter Konstruktionen erfolgt deshalb üblicherweise über die so genannte „Umkehrform“. Der dabei zu Grunde gelegte Ansatz lautet: Eine unter einer bestimmten Belastung ausschließlich zugbeanspruchte Konstruktion steht bei Umkehr der Lastrichtung oder der Umkehr der Wirkungsrichtung des Gravitationsvektors unter einer ausschließlichen Druckbeanspruchung. Zur Formfindung einer Schale, die bei Eigengewichtsbelastung unter Druckbeanspruchung steht, genüge es also beispielsweise, die Form einer „auf dem Kopf“ stehenden, ausschließlich zugbeanspruchten Konstruktion zu ermitteln.

Die vorstehend beschriebene Methode der „Umkehrform“ liegt zunächst nahe. Dementsprechend war sie über Jahrzehnte hin Bestandteil der akademischen Lehrmeinung. Bedauerlicherweise wurde bei ihrer Formulierung jedoch ein grundlegender, erst 1987 in [6] entdeckter und später als „erweitertes Kompensationsproblem“ beschriebener Effekt übersehen (siehe Kap. 3.5). Die Entdeckung des erweiterten Kompensationsproblems bedeutete letztlich die Falsifikation der Methode der Umkehrform in ihrer bisherigen, als allgemeingültig postulierten Formulierung. Für einige Ausnahmefälle konnte gezeigt werden, dass die Anwendung des Prinzips, wenn auch eher zufälligerweise, zur prognostizierten Lösung führt. Für die Komplementärmenge der mit der Methode entwickelten Konstruktionen ist jedoch festzustellen, dass die diesen zugesprochenen Spannungsfelder nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

3.2 Mathematisch-numerische Formfindungsmethoden

Die computergestützten mathematisch-numerischen Formfindungsmethoden lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

- Indirekte Methoden (Deformationsmethoden)
- Direkte Methoden

Die indirekten oder Deformationsmethoden stellen faktisch eine numerische Simulation der experimentellen Methoden dar. Bei ihnen wird eine vorgegebene Ausgangsform durch Aufbringen einer Belastung so lange verformt, bis die sich einstellende Geometrie auch die übrigen Entwurfsanforderungen erfüllt. Durch die Art der Belastung und durch die Materialeigenschaften, die der zu verformenden Struktur gegeben sind, lassen sich Hängemodelle, Fließformen, mechanisch aufgespannte Strukturen oder pneumatisch vorgespannte Formen berechnen.

Die am häufigsten verwendete Deformationsmethode beruht auf der Methode der Finiten Elemente in der geometrisch nichtlinearen Formulierung. Verfahren auf der Basis der Vektoranalysis sowie auf Sonderformen beschränkte Algorithmen werden ebenfalls verwendet.

Ähnlich wie bei den experimentellen Methoden lässt sich bei den indirekten Methoden ein nicht vollständig befriedigendes Endergebnis einer Berechnung nur durch Änderung der Vorgabedaten und anschließende Neuberechnung, also auf indirektem Weg, verbessern. Dabei ist es schwierig, teilweise auch unmöglich, bestimmte Spannungszustände in der Struktur zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die Aufgabe, eine unter Eigengewicht isostatisch druckbeanspruchte Betonschale durch Verformen einer ursprünglich ebenen Haut zu berechnen. Zwar lässt sich durch Zuschalten eines Steuerungsalgorithmus die Ergebnisqualität verbessern, die indirekten Methoden sind allerdings vom Ansatz her zur Lösung derartiger Probleme weniger geeignet und deshalb den direkten Methoden weit unterlegen.

Mit den direkten Methoden wird versucht, eine Form, die – bei gegebenen geometrischen Randbedingungen – unter dem formbestimmenden Lastfall einen ganz bestimmten, vorgegebenen Spannungszustand besitzt, zu entwickeln. Die Ausgangsform im üblichen Sinn ist unbekannt oder ohne Belang, da sie lediglich als durch Überlegungen zur numerischen Stabilität bedingter „Startwert“ für die Berechnung vorgegeben werden muss und daher manchmal physikalisch nicht zulässig zu sein braucht (z. B. Verstoß gegen die Gleichgewichtsbedingungen).

Die bekanntesten der direkten Methoden sind:

- die Kraftdichtemethode, die von Linkwitz, Preuss und Schek entwickelt wurde;
- die numerische Lösung des die Membranschale beschreibenden Differentialgleichungssystems;
- indirekte Methoden in Kombination mit einer Optimierungsstrategie.

Mit den direkten Methoden lassen sich „spannungsoptimale“ Strukturen entwerfen, also beispielsweise Seifenhäute als Membranen gleicher Spannung (Isotensoiden), Türme mit konstanter Spannung im Schaft oder auch Fachwerkstrukturen, bei denen die einzelnen Elemente bestimmte Spannungsvorgaben erfüllen.

Prinzipiell gilt für die direkten Methoden, dass die Existenz einer Lösung nicht a priori vorhersagbar ist. Abhängig vom vorgegebenen, also vom „gewünschten“ Spannungszustand stellt sich vielmehr erst im Verlauf einer Berechnung heraus, ob das Problem keine, eine oder mehrere Lösungen besitzt. Im letzteren Fall lässt sich durch Hinzufügen der Forderung nach Gewichtsminimalität die 'leichteste' Lösung ermitteln. Interessanterweise gibt es häufig auch Mehrfachlösungen, wie beispielsweise zwei Seifenhautflächen innerhalb des gleichen Drahtrahmens, die alle das gleiche Minimalgewicht besitzen.

Prinzipiell lassen sich alle experimentellen Modelle in mathematisch-numerischen Modellen abbilden. Letztere haben allerdings neben dem Vorteil einer hohen Genauigkeit in der Aussage zu Kraft und Geometrie den Nachteil einer geringeren Anschaulichkeit; aus diesem Grund stellt man die experimentellen Methoden gern an den Anfang der Entwurfsarbeit und geht erst in der zweiten Phase des Entwurfs zu den mathematisch-numerischen Methoden über.

Bei vorgegebener Wahl eines Tragsystems oder -prinzips lassen sich mit den bekannten experimentellen Formfindungsmethoden gewichtsarme Tragwerke entwickeln. Zum Entwurf gewichtsminimaler Tragwerke erweisen sich die meisten experimentellen Methoden als untauglich. (Die Seifenhautmodelle stellen hier eine Ausnahme dar). Die mit einer zusätzlichen Minimalbedingung versehenen mathematisch-numerischen Methoden erfahren hierdurch eine besondere Bedeutung, denn nur in wenigen Fällen, wie z. B. bei den Maxwellstrukturen, lassen sich gewichtsminimale Tragwerke ohne sie entwickeln.

3.3 Der 'Formbestimmende Lastfall'

Die klassischen Formfindungsmethoden basieren alle auf der Vorgabe einer als „Formbestimmender Lastfall“ [6,7] bezeichneten Laststellung. Die während der Formfindung „gefundene“ Form besitzt die gewünschten Eigenschaften in genau diesem Lastfall. Der „richtigen“ Wahl des formbestimmenden Lastfalls fällt damit grundlegende Bedeutung zu. Im Bereich

der relativ massiven Konstruktionen, wie z. B. den Betonschalen, wurde häufig und völlig zurecht der Lastfall Eigengewicht als dominanter und damit formbestimmender Lastfall angesetzt. Im extremen Leichtbau jedoch entfällt häufig die Dominanz eines einzelnen Lastfalls. Ein Automobilkotflügel wiegt nur Bruchteile der auf ihn wirkenden Windlast, die textile Überdachung eines Stadions nur Bruchteile der von ihr abgetragenen Belastungen aus Wind und Schnee. Während die bisher publizierten Arbeiten für die Formfindung gewichtsarmer und gewichtsminimaler Konstruktionen stets die Existenz eines dominanten und deshalb als „formbestimmend“ verwendbaren Lastfalles voraussetzen, ist die eindeutige Existenz eines solchen Lastfalles bei den extrem leichten Konstruktionen üblicherweise gar nicht gegeben. Das Problem nichteindeutiger bzw. multipler formbestimmender Lastfälle führt in einen bisher wissenschaftlich noch nicht ausreichend untersuchten Problembereich, aus dem aus heutiger Sicht nur zwei Wege führen: Der erste benutzt die bekannte Vielparameteroptimierung, bei der unter Zugrundelegung aller möglicherweise auftretenden Lastfallkombinationen auch geringer Eintretenswahrscheinlichkeit eine Lösung des Formfindungsproblems ermittelt wird. Der zweite Weg wurde in Stuttgart entwickelt [10,11] und weist in eine völlig andere Richtung: Der Existenz multipler formbestimmender Lastfälle wird mit der „Formfindung“ (wobei der Begriff spätestens hier seine Sinnhaftigkeit endgültig verliert) einer adaptiven, d.h. in ihren Eigenschaften kontinuierlich manipulierbaren Strukturen begegnet. Wie in Kapitel 4 gezeigt werden wird, bedeutet dieser Ansatz nicht nur eine wesentlich elegantere Lösung des Problems – er führt vielmehr in eine vollkommen neue Dimension von Leichtigkeit.

3.4 Über die Mannigfaltigkeit von Spannungszuständen

In einer innerlich und/oder äußerlich statisch unbestimmten Struktur kann unter ein- und demselben Lastfall eine Mannigfaltigkeit innerer Kraft- bzw. Spannungsfelder existieren. Welches dieser möglichen Spannungsfelder sich in einer Struktur einstellt, ist abhängig von der Verteilung

der Steifigkeiten innerhalb der Struktur bzw. an deren Auflagern. Überträgt man diese Aussage auf das Formfindungsproblem, so gewinnt sie in zweierlei Hinsicht Bedeutung: Zunächst einmal erkennt man, dass man an einer auf experimentellem Wege gefundenen Form den inneren Beanspruchungszustand in den meisten Fällen nicht ablesen, d.h. keinen tieferen Aufschluss über deren inneren Beanspruchungszustand gewinnen kann. Bereits am denkbar einfachsten Fall einer in einen räumlich verwundenen Rahmen eingespannten Seifenhautlamelle, also eines Isotensoids, erkennt man, dass die Geometrie der Seifenhautlamelle unabhängig von der Oberflächenspannung der Seifenhautlösung selbst ist, oder, in anderen Worten, dass sich das Ergebnis des Formfindungsprozesses, also die Geometrie der Seifenhaut, bei Multiplikation des inneren Spannungszustandes der Lamelle mit einem Skalar nicht ändert. Die Multiplikation des Spannungsfeldes mit einem Skalar führt auch bei allen anderen mechanisch vorgespannten Konstruktionen, die – durch den Formfindungsprozess bedingt – üblicherweise vergleichsweise inhomogene, in keinem Fall jedoch isotensoidische Spannungsfelder aufweisen, zu keiner neuen Geometrie. Darüber hinaus lässt sich aufzeigen [6], dass in einer Membrane oder einer Schale allein durch Manipulation der Auflagersteifigkeiten und/oder der Struktursteifigkeiten eine Vielzahl unterschiedlicher Spannungsfelder in der Struktur eingestellt werden können, ohne dass dies eine andere Geometrie bedingt. Die Verunsicherung, die man durch die Erkenntnis der möglichen Mannigfaltigkeit der Spannungsfelder in einer „gefundenen“ Struktur erfährt, bedeutet Risiko und Chance zugleich, woraus sich auch die zweite Bedeutung der eingangs gewonnenen Erkenntnis ableitet: Bei der Realisierung, d.h. bei der bautechnischen Umsetzung einer in einem Formfindungsprozess entwickelten Struktur kommt es in entscheidender Weise darauf an, dass sich der in der Struktur erwartete, in der Formfindung entwickelte Spannungszustand auch tatsächlich einstellt. Dass letzteres eine nichttriviale Forderung ist, liegt auf der Hand: Nur innerhalb bestimmter Genauigkeiten erfassbare Auflagersteifigkeiten, zeitabhängige Phänomene wie Kriechen und Schwinden der

Werkstoffe und, nicht zuletzt und von besonderem Einfluss, der Baufortschritt selbst, beeinflussen, neben vielen anderen Einflussgrößen, den sich tatsächlich in einer Struktur einstellenden Beanspruchungszustand.

3.5 Das (klassische) Kompensationsproblem

Beim Bauen zugbeanspruchter Konstruktionen ist es seit langem bekannt, dass die in der Formfindung ermittelte Geometrie („Sollgeometrie“), die mit dem in der Formfindung entstandenen bzw. zugrunde gelegten Spannungszustand behaftet ist, zunächst in eine spannungsfreie Form („Nullgeometrie“) überführt werden muss, um hergestellt bzw. gebaut werden zu können. Die mit dem Entspannungsvorgang einhergehende Geometrieänderung wird als Kompensation bezeichnet. Bei den zugbeanspruchten Konstruktionen (Seilnetze, Membranen) weist die Nullgeometrie typischerweise einen kleineren Flächeninhalt als die Sollgeometrie auf: Beim Übergang vom unbelasteten in den belasteten, spannungsbehafteten Zugspannungszustand wird das Material üblicherweise gedehnt, indem die Konstruktion zu ihren Auflagern gezogen bzw. gegen diese verspannt wird.

Das bei Seilnetzen und Membranen bisher zur Anwendung gekommene Kompensationsverfahren besteht darin, die spannungsbehaftete Sollgeometrie mit geeigneten Verfahren und unter Zugrundelegung der (und hier liegt eine der Schwierigkeiten!) zutreffenden Werkstoffgesetze zu entspannen und sie dabei in eine – üblicherweise mit Falten behaftete – Nullgeometrie zu überführen. Man bezeichnet diese Vorgehensweise auch als „klassisches“ Kompensationsproblem.

3.6 Das erweiterte Kompensationsproblem

Die Arbeiten an unserem Institut zeigten bereits zu Anfang der 1990er Jahre, dass die lange vertretene Annahme, jede eigen-spannungsbehaftete (Formfindung!) Form könne durch eine Veränderung ihrer Geometrie in eine spannungsfreie Form überführt werden, falsch ist. Seilnetze und Membranen bilden eher zufälligerweise und wegen ihrer ganz besonderen Werk-

stoffeigenschaften eine Ausnahme von dieser Einschränkung. Sie sind stets kompensierbar. Bei Konstruktionen aus anderen Baustoffen, beispielsweise bei Schalentragerwerken aus Beton, tritt jedoch das Problem der Nichtexistenz einer durch Kompensation der Sollgeometrie abzuleitenden „spannungsfreien Nullgeometrie“ sehr häufig auf. Bei der planerischen und bautechnischen Umsetzung der in einem Formfindungsprozess entstandenen Form geht es in solchen Fällen darum, eine spannungsfreie Nullgeometrie so zu finden, dass beim Übergang dieser Nullgeometrie in die spannungsbehaftete Endform einerseits eine weitestgehende Annäherung an die in der Formfindung entwickelte Sollgeometrie stattfindet und sich andererseits eine möglichst geringe Abweichung von dem in der Formfindung fixierten Sollspannungszustand ergibt. Dieses alles andere als triviale Problem wird als „erweitertes“ Kompensationsproblem bezeichnet.

4. Adaptive Systeme

Die tragenden Konstruktionen in der nicht lebenden Natur und der Technik besitzen üblicherweise Bauteile mit invarianten physikalischen Eigenschaften, beispielsweise eine konstante Bruchfestigkeit oder - und dies ist für die nachfolgenden Überlegungen von Bedeutung - eine zeitunabhängige, also invariante Steifigkeit. Beim Entwurf einer Struktur mit invarianter Steifigkeitsbelegung sind die inneren Beanspruchungen der Konstruktion unter dem formbestimmenden Lastfall entwerfbar, d.h. wählbar. Mit der Festlegung des statischen Systems und dessen Steifigkeitsbelegung liegen gleichzeitig alle in den einzelnen Bauteilen unter der Einwirkung äußerer Lasten auftretenden Beanspruchungen fest, wobei die Dimensionierung der einzelnen Bauteile gegen die ungünstigsten Beanspruchungszustände, typischerweise Spannungsmaxima, erfolgt.

In der soeben beschriebenen, für den Tragwerksentwurf üblichen Vorgehensweise wird die Struktur also für innere Beanspruchungszustände als Ergebnis eines Strukturentwurfes ausgelegt, bei dessen Entstehen eine Ineffektivität der Struktur insgesamt oder einzelner Bauteile unter

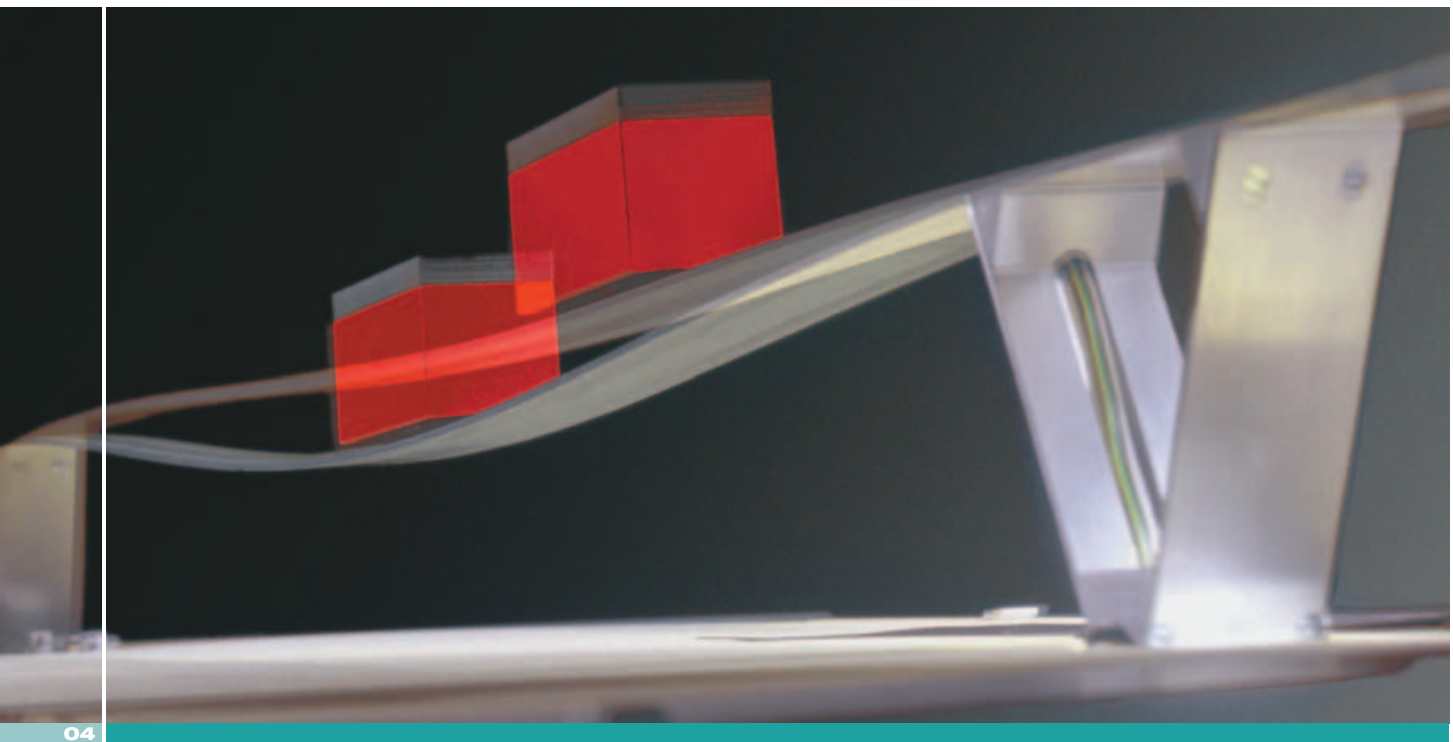
bestimmten Laststellungen üblicherweise nicht vorhersehbar waren oder die prinzipiell unvermeidbar sind. Andererseits wäre es nahe liegend, tragende Konstruktionen so zu konzipieren, dass sie die in ihnen entstehenden Beanspruchungszustände unter verschiedenen Einwirkungen auf der Basis selbststeuernder Prozesse manipulieren. Spitzenbeanspruchungen einzelner Bauteile oder Bauteilbereiche könnten dann zugunsten einer zeitgleichen Homogenisierung der Beanspruchungsverteilung insgesamt vermieden werden. Natürlich können auf diese Weise in teilweise erheblichem Umfang das Eigengewicht einer Konstruktion vermindert, Verformungen reduziert und Schwingungen unter dynamischer Beanspruchung gedämpft werden [9,10,11].

Systeme, die sich mit Hilfe selbstgesteuerter oder selbstorganisierter Vorgänge aktiv verändern, bezeichnet man als adaptive Systeme. Adaptive Systeme bestehen aus einer mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung stehenden Struktur. Anpassungsvorgänge der Struktur erfolgen durch sog. Aktuatoren, die durch einen übergeordneten Steuerungs-Regelungsprozess aktiviert werden. Der Steuerungs-Regelungsprozess selbst wiederum bezieht seine Eingangssignale von Sensoren, also Elementen, die physikalische Zustände oder deren Veränderung erkennen können. Idealerweise können Aktuatoren und Sensoren in einem multifunktionalen Element/Material vereint werden.

In Abhängigkeit von der Adaptionsschwindigkeit unterscheiden wir drei verschiedene Adaptionklassen [10]:

Kurzzeitadaption: Eine Anpassung der Struktur erfolgt durch sofortige Reaktion auf externe Einflüsse. Die Farbänderung eines Chamäleons als Anpassung auf farblich veränderte Umgebungsbedingungen gehört hierzu.

Langzeitadaption: Hierzu gehören Wachstumsprozesse, die über den gesamten oder teilweisen Lebenszeitraum (von Minuten zu Jahrzehnten) eines natürlichen Systems auftreten. Durch derartige Prozesse werden die Systemeigenschaften verbessert, z. B. werden in Bäumen Spannungsspitzen durch lokales Wachstum der hoch beanspruchten Bereiche abgebaut.



04

Der „Stuttgarter Träger“ stellt eine Brücke dar, deren Träger ein Bauhöhe/Spannweitenverhältnis von 1/600 aufweist. Dank der Adaptivität der Konstruktion weist die Brücke unter der sich bewegenden Last (Hier: Lokomotive) keine Verformung auf.

Evolutionäre Adaption: In evolutionären Prozessen werden die Eigenschaften natürlicher Systeme im Verlauf mehrerer Generationen optimiert, zumeist unter dem Gesichtspunkt einer Erhöhung der Überlebenschancen und/bzw. einer Steigerung der Reproduktionsrate. Veränderungen der Systeme erfolgen durch Mutations- und Selektionsprozesse. Diese Vorgänge können auf mathematisch-numerischer Basis simuliert werden, beispielsweise um so die gewichtsoptimale Geometrie eines Fachwerkkragträgers zu bestimmen.

Aus der Vielzahl denkbarer Anwendungsbereiche adaptiver Systeme in der Architektur werden an unserem Institut seit mehr als zehn Jahren zwei uns sehr interessant erscheinende Bereiche näher untersucht: Adaptive Gebäudehüllen und adaptive Tragwerke.

4.1 Adaptive Gebäudehüllen

Die derzeit in Bauwesen eingesetzten Dach- und Fassadensysteme, die wir hier verallgemeinernd als Gebäudehüllen bezeichnen wollen, besitzen im Regelfall konstante physikalische Eigenschaften. Sie können damit prinzipiell nur sehr bedingt auf Veränderungen im Außenbereich, also bei-

spielsweise jahreszeitliche, witterungs- oder umgebungsbedingte Veränderungen reagieren. Dasselbe gilt für Veränderungen im Gebäudeinneren. Letztere können aus Nutzungsänderungen, Veränderungen der Komfortansprüche, einem veränderten Emissionsniveau etc. bestehen.

Die Forschung im Bereich der adaptiven Gebäudehüllen befasst sich damit, wie Gebäudehüllen auf Veränderungen des Innen und des Außen reagieren können, wie man Wärme-/Kältespeicherqualitäten in die Gebäudehüllen einbauen kann und vieles mehr. Der Schwerpunkt der an unserem Institut hierzu gemachten Forschungen liegt hierbei auf der generellen Systementwicklung, der Entwicklung schaltbarer Gläser [12] und der Entwicklung reagibler und energiespeichernden textiler Gebäudehüllen [13].

4.2 Adaptive Tragwerke

Adaptive Tragwerke sind Konstruktionen, welche die in ihnen aufgrund äußerer wie innerer Einwirkungen entstehenden Kräfte (und damit auch zeitabhängige wie zeitunabhängige Verformungen) im Sinne der Adaptivität manipulieren können. Dabei ist zunächst zu unterscheiden zwi-

schen einer Manipulation der Einwirkung selbst sowie einer Manipulation der Reaktion der Konstruktion. Beide Manipulationen können gleichzeitig auftreten. Am Beispiel einer Brücke erläutert bedeutet dies z.B., dass die adaptive Konstruktion einerseits die auf sie wirkende Windwirkung durch gezielte Beeinflussung der Umströmung verändert (Beeinflussung der Einwirkung) und dass sie, ggf. gleichzeitig, durch interne Steifigkeitsveränderungen eine Homogenisierung des Beanspruchungszustandes in der Struktur herbeiführt.

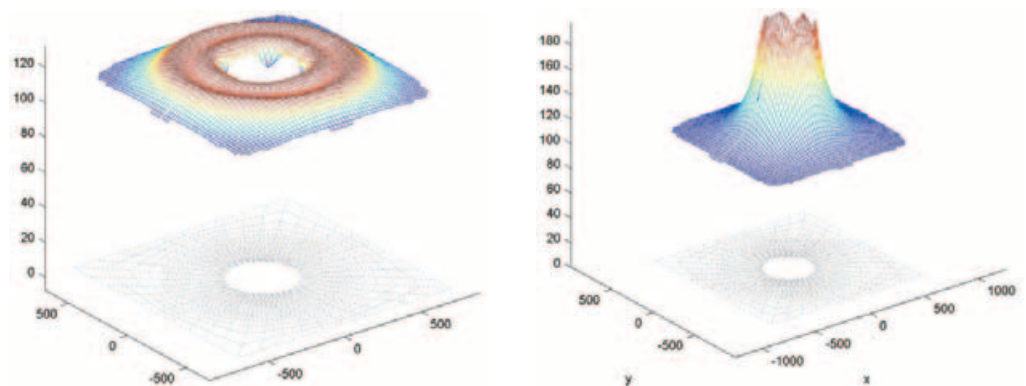
Durch die Manipulation der in der Struktur wirkenden Kraftzustände mit der Zielsetzung einer Homogenisierung der in ihr wirkenden Beanspruchungsverteilung lässt sich das Eigengewicht tragender Strukturen in bemerkenswerter Größenordnung reduzieren. Bei einigen der am Institut untersuchten Systeme konnten mehr als fünfzig Prozent des ursprünglichen Eigengewichts einer bereits unter Leichtbaugesichtspunkten entworfenen Konstruktion eingespart werden. Durch Einführen der Adaptivität lassen sich die Grenzen des Leichtbaus somit in bisher nicht gekannte Bereiche hinauschieben. Material wird eingespart und, bei Auftreten der Beanspruchung, in seiner Wirkung durch Energie ersetzt: Extremer Leichtbau ist Bauen mit Energie.

Selbstverständlich werden bei einer Manipulation der in der Struktur wirkenden Kraftzustände mit der Zielsetzung einer Homogenisierung der in der Struktur wirkenden Beanspruchungsverteilung auch die „natürlicherweise“ auftretenden Strukturverformungen verändert. Führt man eine Adaption einer tragenden Struktur mit dem (Optimierungs-) Ziel einer Minimierung des Eigengewichts der Struktur durch, so treten diese Verformungen als Nebeneffekt auf. Die genannten Verformungen lassen sich aber natürlich auch begrenzen, indem man sie als Nebenbedingungen der Optimierungsaufgabe einführt. Im Grenzfall kann so eine Verformungsnebenbedingung auch das

Verschwinden einer Verformung an gewissen Punkten einer Konstruktion fordern. So lässt sich beispielsweise erzielen, was in der Natur unmöglich ist: Keine Verformung. Der an unserem Institut entwickelte sog. „Stuttgarter Träger“ gilt heute als das Standardbeispiel für die Demonstration der Möglichkeiten einer Beeinflussung einer Konstruktion, die multiplen bzw. instationären Lastfällen ausgesetzt ist [10].

Adaptive Strukturen werden in wenigen Jahren ein fester Bestandteil des täglichen Lebens sein. Aktive Prothesen und Implantate mit sensorischen Funktionen und Aktuatoren sind in der Entwicklung; die Raumfahrt arbeitet an adaptiven Fachwerkstrukturen, bei denen aktive (z. B. piezokeramische) Elemente verwendet werden, um eine genaue Positionierung oder Schwingungsisolierung von Satellitenreflektoren zu erreichen. Die Arbeiten des Instituts werden zu adaptiven Tragwerken im Bauwesen führen, die zum einen die Grenzen des Leichtbaus weiter hinausschieben und zum anderen auch Optimierungen im Bereich konventioneller Strukturen oder Bauteile ermöglichen, seien es nun Augstäbe im Metallbau, dünne Glasscheiben oder Bauteile aus Beton.

Werner Sobek



Adaptivität im Kleinen: Wenige Aktuatoren genügen, um die Spannungskonzentrationen am Rand einer Bohrung, die in eine biaxial beanspruchte dünne Scheibe eingebracht wurden, deutlich zu dämpfen.

Literatur

- 1 Maxwell, C.: Scientific Papers II. Cambridge: Cambridge University Press (1869) 175.
- 2 Michell, A.G.M.: The limits of economy of material in frame structures. *Philosoph. Mag.* 8 (1904) 589-597.
- 3 Otto, F.: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Bd. 1+2. Berlin: Ullstein 1962.
- 4 Hertel, H.: Leichtbau. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1960.
- 5 Wiedenmann, J.: Leichtbau. Bd. 1+2. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer (1989).
- 6 Sobek, W.: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart (1987).
- 7 Sobek, W.: Zum Entwerfen im Leichtbau. *Bauingenieur* 70 (1995) S.323-329.
- 8 Klein, B.: Leichtbaukonstruktionen. Braunschweig/Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn (1997).
- 9 Janocha, H. Ed.: *Adaptronics and Smart Structures*, Berlin: Springer (1999).
- 10 Sobek, W.; Haase, W.; Teuffel, P.: "Adaptive Systeme", *Stahlbau* 69(7) (2000), 544-555.
- 11 Sobek, W.; Teuffel, P. (2001): "Adaptive Structures in Architecture and Structural Engineering", *Smart Structures and Materials – Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways (SPIE Vol. 4330): Proceedings of the SPIE 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 4-8 March 2001, Newport Beach, CA, USA*. Ed. Liu, S. C., Bellingham: SPIE.
- 12 Haase, W.: Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart (2004).
- 13 Holzbach, M.: Adaptive und konditionierende textile Gebäudehüllen auf Basis hochintegrativer Bauteile. Dissertation Universität Stuttgart (in Vorbereitung).

DER AUTOR



PROF. DR.-ING. WERNER SOBEK

studierte Bauingenieurwesen und Architektur an der Universität Stuttgart, unter anderem bei Prof. Frei Otto. In dieser Zeit begann seine Beschäftigung mit dem Leichtbau, insbesondere mit textilen Konstruktionen. Nach dem Diplom bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Schlaich arbeitete er in den USA und im Ingenieurbüro Schlaich, Bergermann und Partner in Stuttgart. Seit 1995 ist er Direktor des Instituts für Leichte Flächentragwerke und Nachfolger auf dem Lehrstuhl von Frei Otto. Im Jahr 2000 trat er auch die Nachfolge von Prof. Dr. Schlaich an und fusionierte die beiden Lehrstühle zum Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren. 1992 gründete er ein eigenes Ingenieurbüro, inzwischen mit Ablegern in New York und Frankfurt a. M., aus dem zahlreiche preisgekrönte Werke hervorgegangen sind. Einen Einblick vermittelte 2004 die Ausstellung "show me the future – engineering and design by werner sobek" in der Pinakothek der Moderne in München. Werner Sobek ist Vorsitzender des Hochschulrats der HafenCity-Universität in Hamburg und lehrt 2007 als Gastprofessor an der Harvard University in Cambridge/Massachusetts.

Kontakt

Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
 Pfaffenwaldring 7 und 14, 70569 Stuttgart
 Tel +49.711.685 6 62 26 | -6 35 99
 Fax +49.711.685 6 69 68 | -6 37 89
 E-Mail: werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de
<http://www.uni-stuttgart.de/ilek/>



MAHLE

Driven by performance

FÜR DIE PROFIS GAB ES MAHLE SCHON IMMER ...
**ABER WUSSTEN SIE, DASS
ES MAHLE AUCH FÜR
NEWCOMER
GIBT?**

Grundlage großer Erfolge ist Talent ... und eine fundierte Ausbildung. Und darin investieren wir gerne. Ob das nun der Studenten-Wettbewerb Formula Student ist, bei dem wir 4 Teams mit Motoren und Know-how unterstützen. Oder vor Ort bei uns, wo wir unserem Nachwuchs das Wissen für die Aufgaben von morgen vermitteln – entweder mittels Direkteinstieg oder innerhalb unseres Internationalen Traineeprogramms. Mehr Infos: www.jobs.mahle.com.



Dieser Hybridmotor gewinnt nicht nur Energie zurück.

1 TESTSIEGER
VCD Auto-Umweltliste
2006 · 2007



HYBRID

Technologie von Honda.

Wenn Sie das erste Mal im neuen Civic Hybrid von Honda fahren, wundern Sie sich vielleicht über das beinahe reglose Instrument hinter Ihrem Lenkrad.



Das ist Ihre Tankanzeige, und die ist in der Tat ungewöhnlich. Auf der Instrumententafel bildet sie den Ruhepol. Ein kurzer Blick darauf, und innerer Friede kehrt ein. Denn der Zeiger der Tankanzeige steht fast meditativ still – ganz anders als Drehzahlmesser und Tacho.

Doch auch wenn es so aussieht: Der Zeiger klemmt nicht. Sie verbrauchen wirklich wenig. Der Grund dafür ist die Hybridtechnologie in Hondas effizientestem Antriebssystem. Das erzeugt nicht nur Kraft, es gewinnt auch ungenutzte Energie wieder zurück. Denn der Hybridantrieb kombiniert Benzin- und Elektromotor. Bewegungsenergie, die Sie beim Bremsen nicht mehr nutzen können, wird in elektrische Energie umgewandelt und in einem Akku gespeichert. Für später, zum Beispiel fürs Beschleunigen. Wenn Sie sich diese Sparsamkeit vor Augen führen, wird Ihnen sicher klar, wieso

ein Blick auf die Tankanzeige beruhigend sein kann. Dieses beinahe reglose Instrument hebt auch die Stimmung, wenn Sie im Stop and go fast die Nerven verlieren. Denn je öfter Sie bremsen, desto mehr Energie kann wiedergewonnen werden. Beim Anfahren gibt Ihnen der Elektromotor dann zusätzlichen Schwung – ausschließlich mit der Kraft aus dem Akku. Daher kommt übrigens der Name IMA – Integrated Motor Assist. Wenn Sie langsam fahren, kann es sogar sein, dass sich der Verbrennungsmotor ausschaltet und nur noch der Elektromotor arbeitet. Dann verbrauchen Sie überhaupt keinen Kraftstoff, und Ihre Tankanzeige steht noch ein bisschen stiller. Sie zehren allein von der Bremsenergie.

Wenn Sie mit Kindern unterwegs sind, sollten Sie ein Spiel vorschlagen: Gewonnen hat, wer zuerst sieht, dass sich der Tankzeiger regt. Schon haben Sie stundenlang Ruhe auf der Rückbank. Sehen Sie derweil doch kurz auf den Auspuff Ihres Vordermanns: die ganzen Abgase. Ihre Tankanzeige versichert Ihnen, dass

Ihr Civic Hybrid da wesentlich sauberer ist. Wo wenig Benzin verbraucht wird, entstehen auch wenig Schadstoffe. Und im Stand läuft der Motor überhaupt nicht.

Das macht unsere Hybridtechnologie so sauber, dass der neue Civic Hybrid in diesem Jahr gleich zwei Umweltpreise erhalten hat. Die Experten vom Verkehrsclub Deutschland etwa haben für die VCD Umweltliste 2006/2007* die saubersten, sparsamsten und leisesten Autos miteinander verglichen – der Civic Hybrid steht als umweltfreundlichstes Auto auf dem ersten Platz dieser Liste. Und beim internationalen „World Car of the Year Award“ wurde der Civic Hybrid sogar zum „World Green Car 2006**“ gewählt.



* www.vcd.org und www.wcoty.com

Informationen unter 01805/20 20 90 (0,14 €/Min.) oder www.honda-hybrid.de

