

# Liebe Leserin, lieber Leser,



wer möchte nicht leicht bauen? Bei der Antwort auf diese Frage fallen die vielen Aspekte auf, die leichtes Bauen anspricht. Ist es der Vorgang des Bauens an sich – möglichst problemlos und unbehindert, also frei und leicht? Oder ist es der leichte, am liebsten gewichtslose Werkstoff? Sind optisch filigrane Strukturen gemeint, die mit einem vielleicht sehr schweren Werkstoff die Frage nach dem Leichtbau beantworten? Es könnten auch leichte Einzelelemente, also Körper sein, die durch findiges Formen oder geschicktes Fügen verschiedener Werkstoffe zum leichten Bauteil werden. Und selbst noch bei dem Begriff des leichten Körpers gilt es, zwischen dem Verständnis des Biologen und dem des Ingenieurs zu unterscheiden.

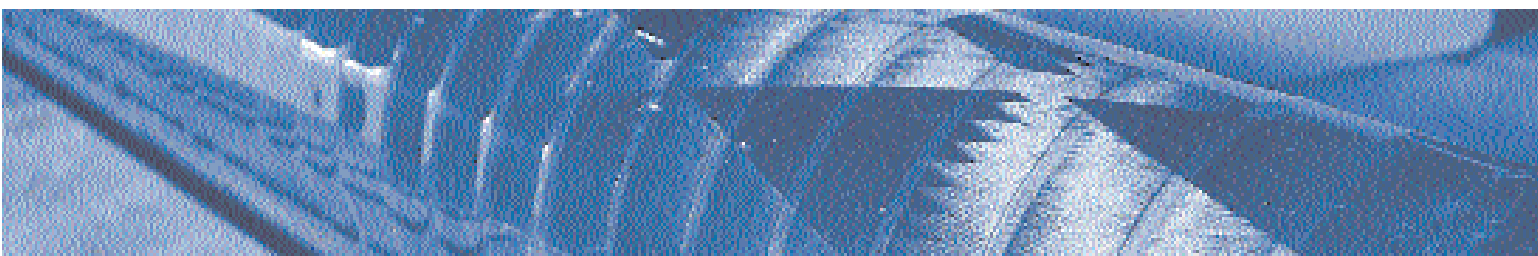
Auf jeden Fall ist die Kombination der Worte leicht und bauen positiv belegt. Es schwingt bei ihrer Nennung etwas Gutes mit, das sicher auch einige der Wissenschaftler, die in diesem Heft vertreten sind, motiviert hat, sich dieser Materie anzunehmen. In sieben Fachbereichen der TU Darmstadt ist entstan-

den, worüber wir hier berichten. Der Bogen wird dabei fast immer von allgemeinen Fragestellungen zu aktuellen Forschungsprojekten geschlagen und es zeigt sich, dass die unterschiedlichen Projekte zu sehr unterschiedlichen Realisierungen kommen. Es zeigen sich jedoch auch vielfältige Parallelen und Berührungspunkte, an denen man sich im besten universitären Sinne ergänzen kann.

Beachten Sie bei der Lektüre bitte das Thema Energieeinsparung, dass in verschiedenen Betrachtungsweisen immer wieder eine Rolle spielt. In fast jedem Beitrag spielen energieeffizientes Entwerfen, die energiesparende Leichtbauweise oder der geringe Einsatz von Energie bei der Herstellung von leichten Strukturen eine Rolle. In Zeiten kontinuierlich steigender Kosten für Erdöl und Gas ist der sparsame Umgang mit den Ressourcen ein wichtiges Thema, auch in der Forschung. Da das Erscheinungsdatum dieser Ausgabe von thema forschung im Frühling liegt, in dem die Tage länger und wärmer werden, tritt dieser Aspekt vielleicht in den Hintergrund – von Bedeutung bleibt er trotzdem.

Eine interessante Lektüre mit möglichst vielen neuen Erkenntnissen wünscht Ihnen

Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange



# Inhaltsverzeichnis

## Leichtes Bauen in der Natur

Paul G. Layer

Mit bionischem Blick kann der Ingenieur verstehen, wie in der belebten Natur zwar eher ungenau, aber gleichzeitig hoch adaptiv „gebaut“ wird, um so zeitlich und räumlich robuste Systeme zu generieren.

Seite 4

## Das Zusammenspiel von Gestaltung und Tragfähigkeit im Leichtbau

Dietger Weischede/Markus Dietz

Optimales Material, ausgewogene geometrische Formen und hoch funktionale Bauteile – all das macht gute Architektur aus.

Seite 10

## Die Ästhetik des Leichtbaus

Stefan Schäfer

Eine Annäherung an die ästhetischen und konstruktiven Aspekte von leichten Bauwerken: Besonders aus dem konzeptionellen Leichtbau lassen sich wichtige konstruktive Regeln ableiten.

Seite 16

## Leicht bauen mit Public Private Partnership?

Andreas Pfnür

Das Kürzel PPP ist aktuell das Thema schlechthin im Hochbau. Ist es nur ein Instrument, um die Staatsverschuldung auszudehnen oder doch eine Chance, um öffentliche Bauaufgaben zu erleichtern?

Seite 22

## Flexibles Profilieren für den Leichtbau

Peter Groche/Arnd Zettler

Die Profilierbranche bewegt sich – Neuentwicklungen versprechen eine spannende Zukunft dieser Technologie. Ein Einblick in die Herstellung von Bauteilen mit variablem Querschnitt.

Seite 26

## Sandwich am Bau

Jörg Lange/René Mertens

Die Idee des Earl of Sandwich erobert im Bauwesen einen neuen Markt. Deckschichten aus Metall und eine hoch wärmedämmende Füllung sorgen für große Tragfähigkeit und Energieeffizienz.

Seite 30

## Metallische Schäume

Dietmar Gross

Wie kann man das mechanische Verhalten von metallischen Schäumen aus den mikroskopischen Eigenschaften bestimmen?

Seite 38

## Beton und leichtes Bauen – ein Widerspruch?

Peter Grübl/Marcus Rühl

Zur Ästhetik eines Ingenieurbauwerks gehört auch eine gewisse Leichtigkeit im Erscheinungsbild. Diese Anmut kann man auch unter Verwendung des Baustoffs Beton erreichen.

Seite 44

## Lärminderung durch aktive Fassaden

Rainer Storm/Torsten Doll/Lothar Kurtze/  
Holger Hanselka

Den Straßenlärm stoppen: Ein Bericht über den Einsatz von aktiven, Schall schluckenden Fenstern und Paneelen. Eine Alternative im modernen Leichtbau.

Seite 48

## Kunststoff in der Architektur

Johann Eisele/Stephan Nicolay

Kunststoff, der unterschätzte polymere Werkstoff, hat sich als allgegenwärtiges Material etabliert. Ist Kunststoff endlich reif für die Architektur?

Seite 52

## Impressum

thema Forschung 1/2006

**Herausgeber:** Präsident  
der TU Darmstadt

**Redaktion:** Jörg Feuck

**Moderation:** Prof.  
Dr.-Ing. Jörg Lange

**Verlag:** Verlag für Marketing und Kommunikation  
GmbH & Co. KG, Faberstraße 17, 67590 Monsheim, Tel. 0 62 43/90 90

**Layout:** Kirberg Design,  
Hünfelden

**Druck:** VMK Druckerei,  
Monsheim

**Titel-Bild:** Prof.  
Dr.-Ing. Jörg Lange

## Besondere konstruktive Möglichkeiten der Faser-Kunststoff-Verbunde

Helmut Schürmann

Faser-Kunststoff-Verbunde stehen erst am Anfang ihrer Karriere als Konstruktionswerkstoffe. In ihnen stecken noch viele konstruktive Besonderheiten und Leichtbau-Potentiale.

Seite 56

## Betriebsfestigkeit und Leichtbau

Andreas Büter/Holger Hanselka

Eine klare Formel: Leichtbau bedeutet Realisierung einer Gewichtsminderung bei hinreichender Steifigkeit, dynamischer Stabilität und Betriebsfestigkeit.

Seite 64

## Leichtere Elektromotoren durch Hochausnutzung von Werkstoffen

Andreas Binder/Tobias Schneider

Fortschritte in den Materialwissenschaften und neue Motorenkonzepte machen es möglich, leichtere elektrische Antriebe zu bauen. Und es werden ungekannte Leistungs- und Drehmomentdichten erreicht.

Seite 68

## Mit Simulation zum schnelleren Sportski

Wilfried Becker/Jochen Hebel

Auch der Skibau verlangt stetige Innovation. Numerische Strukturanalysen erschließen noch großes Entwicklungspotential.

Seite 74

## Leicht bauen durch Transparenz

Johann-Dietrich Wörner/Christian Eckhardt

Leicht bauen bedeutet nicht unbedingt, an Gewicht zu sparen. Schon durch eine klare Struktur und transparente Materialien kann ein Bau „leicht“ wirken.

Seite 78

## Optimal verknüpft – Schulanfangszeiten und öffentlicher Personennahverkehr

Armin Fügenschuh

Im öffentlichen Personennahverkehr ließe sich viel an Steuergeldern sparen – wenn bei der Schülerbeförderung Touren optimal geplant, Fahrpläne und Schulbeginn besser abgestimmt würden.

Seite 82

## Rekeying Prozessor: Eine skalierbare Lösung für die Schlüsselverwaltung in Gruppenkommunikation

Abdulahadi Shoufan/Sorin A. Huss

An der TU Darmstadt wird erfolgreich an einer effizienten Hardware-Lösung für das Skalierbarkeitsproblem in Multicast Rekeying gearbeitet.

Seite 86

## Die eigenhändige Unterschrift im Multichannel Banking

Nicolas Repp/Rainer Berbner/  
Alejandro Pérez/Oliver Heckmann/  
Ralf Steinmetz

So kann eine Sicherheitslücke im Online-Banking geschlossen werden – mit der individuellen digitalisierten Unterschrift, die auf einem biometrischen Verfahren beruht.

Seite 90

## Phishing, Pharming & Co. im Zahlungsverkehr

Uwe H. Schneider/Heribert M. Anzinger

Wie hoch ist das Missbrauchsrisiko im elektronischen Zahlungsverkehr? Eine aktuelle Analyse unter rechtlichen und technischen Aspekten.

Seite 94

Inserentenverzeichnis

Seite 42



# Leichtes Bauen in der Natur

Paul G. Layer

Der „Leichtbau“ des Spinnennetzes wurde mit dem Olympiadach bionisch umgesetzt. Vergleicht man Bauprinzipien der Natur mit denen der Technik, so zeigt sich, dass Lebewesen nie „fertig sind“, so wie es technische Produkte sind, die aus Einzelteilen zusammengesetzt werden. Lebewesen entstehen aus eben solchen Evolutions- und Entwicklungszyklen, welche genetisch bestimmt und von der Umwelt kontrolliert sind. Ökonomie wie auch Genauigkeit erscheinen eher großzügig, und sensible Gleichgewichte sind innerhalb gewisser Grenzen stabil. Für die Technik ist es essentiell, diese biologischen Bildungsprinzipien zu verstehen, will man sich auf den Zukunftsfeldern des Bio-Engineerings etablieren.

**Light constructions in Nature.** *The light construction of a spider web was bionically verified with the Munich olympic roof. Comparing construction principles of nature and engineering reveals that living organisms never are "completed", as are technical products, which are composed from individual parts. Organisms develop from organisms by evolutionary and developmental cycles, which are genetically fixed and environmentally controlled. Economy and precision appear rather arbitrary, but – within given limits – are sensibly balanced. For engineering it will be essential to understand these forming principles, if one wishes to succeed in future fields of bioengineering.*



## Vorwort

Leichtes Bauen wurde mit dem Dach des Münchner Olympiastadions in Deutschland zum öffentlichen Thema. Als Frei Otto im Tübinger Kupferbau sprach, war ich als junger Biologe fasziniert und hatte das Glück, mit prominenten Stuttgarter Architekten eine Führung über die Münchner Baustelle miterleben zu können. Leicht bauen wie die Natur: Das Netz der Spinne als Leichtbauvorbild war über uns allen gespannt.

## Formen und Symmetrien

Am Meer hatte der Jenenser Biologe Ernst Haeckel täglich neue Kleinstlebewesen gefunden, sie mit Lupe und Mikroskop betrachtet und minutiös gezeichnet, bevor sein Lithograph Adolf Giltch sie in Kupfer ritzte: das Reich der Einzeller hatte sich aufgetan. Es war wohl die Formenvielfalt ebenso wie die offenbare Symmetrie, die Haeckel besonders ansprachen. Seine Kunstformen der Natur [Haeckel, 1904, Nachdr. 1998] haben im Gefolge Philosophen, Architekten und Künstler inspiriert. Man gehe in Darmstadt auf die Mathildenhöhe und spüre den Wurzeln des Jugendstils nach, oder betrachte die Eingangspforte zur Weltausstellung 1900 in Paris (Abb. 1). Wie alle Tiere und Pflanzen, so zeigen schon diese Formen auf dem Einzellerniveau, wie die Natur statisch verlässlich, leicht und funktional bauen kann, und dies in beliebiger Kopienzahl und in verblüffend kurzer Zeit. Leichtes Bauen zeigt sich in der Natur nicht nur im Verhältnis von Material, Masse, Form und erzielter Stabilität, sondern ließe sich auch auf die leichte Unbeschwertheit anwenden, mit der wie spielerisch Myriaden von Formen in unbegrenzter Zahl „in diese Welt geworfen“ werden. Und dabei sind sie – das sei gerade beim Thema Leichtes Bauen nicht vergessen – auch noch alle irgendwie schön (Ästhetik des Natürlichen).

Baut die Natur tatsächlich so exakt, wie es Haeckel gerne gesehen hätte? Sei die Symmetrie noch so offenbar und die Ähnlichkeiten zwischen den Individuen einer Art noch so frappierend, so machen heutige Biotheoretiker eher auf die natürlich gegebenen Varianzen und somit auf vorhandene Symmetriebrüche aufmerksam. Gerade sie sind es, die uns grundsätzliche Unterschiede zwischen Natur und Technik beleuchten: die Natur zeigt ihrem Wesen nach immer etwas Unexaktes, oder vielleicht treffender: sie baut unscharf und exakt zugleich.

## Wie baut der Mensch – wie die Natur?

Bei technischen Produkten geht man immer von Materialien aus, die zu Einzelteilen verarbeitet, und ihrerseits zu einem Produkt gefertigt werden. Hierbei sind Materialien, Werkzeuge, Energie und Arbeiter getrennte Entitäten. Das angemessene Bild für technische Produktion ist das Fließband mit seiner sequentiellen Montage von Einzelteilen. Der Computer als das höchst entwickelte technische Gerät arbeitet nach dem Prinzip binärer Entscheidungen, die sequentiell und fast so schnell wie das Licht verarbeitet werden. Anders bei der „Herstellung“ einer Pflanze oder eines Tiers: hier gibt es keine montierbaren Einzelteile, das einzige Einzelteil ist die Zelle, und sie

kann unendlich vielgestaltig sein und ist ebenso wie das Ganze in stetigem Übergang zu etwas Neuem. Die Arbeitsweise ist parallel, nicht-sequentiell, vergleichsweise gemächlich, alles kommuniziert mit allem, und nichts ist jemals „fertig“. Dies geschieht innerhalb einer einzelnen Zelle schon, dann von Zelle zu Zelle, entwickelt sich von der befruchteten Eizelle zur geschlechtsreifen Adultform, von Generation zu Generation. *Panta rhei* – schon Heraklit hat diese Eigenschaft des Natürlichen richtig erkannt [Vollmer, 1995]. Technische Produkte sind statisch, werden zusammengebaut, funktionieren eine Weile, werden entsorgt.

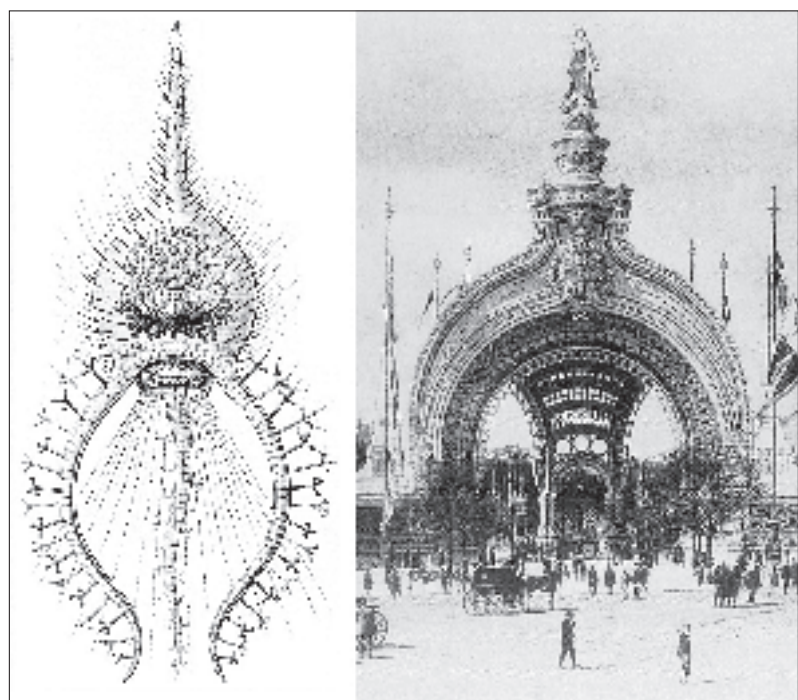
## Evolution und Entwicklung

Wollen wir das „Wie“ des Bauens in der Natur verstehen, so müssen wir uns mit den individuellen sowie evolutionären Entstehungsgeschichten von belebten Systemen beschäftigen (Ontogenese vs. Phylogenese). Mit seinem „*Omnis cellula e cellula*“ hat Rudolf Virchow darauf hingewiesen, daß jede Zelle nur aus einer anderen Zelle hervorgehen kann. Dabei wird das Leben jeder einzelnen Zelle in jedem Augenblick durch eine Summe unendlich vieler biochemischer Reaktionen bestimmt, die meist in wässriger Umgebung ablaufen. Dass dies funktioniert, hat viel mit einer Meisterleistung der Evolution zu tun, der Zellmembran. Sie ist an ihren Außenflächen wasserfreundlich (hydrophil), im Inneren aber wasserstoßend (hydrophob). Ohne diese Erfindung gäbe es keine Kompartimentierung in der Zelle (Organellen, Arbeitsteilung, etc.), damit keine höheren Zellen und sicherlich keine vielzelligen Lebewesen.

Bei der sexuellen Fortpflanzung im Tierreich entsteht aus einer befruchteten Eizelle der gesamte Organismus. Diese erste Zelle ist mit einer Blaupause – dem so genannten Genom – für den Bau des ganzen Organismus ausgestattet. Die (geometrisch zunehmende) Vermehrung der Zellen, und damit das Wachstum des Tieres sind auf das Genaueste reguliert; insbesondere

Abb. 1:  
Ein „Rohrstrahlring“ (Radiolaria, links) besteht aus nur einer Zelle und war Vorbild für die Eingangspforte zur Pariser Weltausstellung im Jahr 1900 (aus Haeckel 1904, 1998).

A „Rohrstrahlring“ (Radiolaria, left) consists of one cell only; it served as a model for the entrance gate to the Paris World Exhibition in 1900.



wird das gesamte Genom verlässlich in jede neue Zelle übertragen. Durch spezifische Differenzierungsprogramme werden alle Zellen im richtigen Augenblick auf ihren jeweiligen Weg gebracht (heißt genetisch gesprochen: durch jeweilige Aktivierung nur weniger Gene). Bedenkt man die doch geringe Gesamtzahl von etwa 30.000 Genen beim Menschen, so wird klar, dass bei der Entstehung eines vollständigen Lebewesens ein beträchtliches Maß an Selbstorganisation (Epigenese) hinzukommen muss. Ohne ständige Kommunikation zwischen den Zellen sowie der Einhaltung sensibler Gleichgewichte (Homöostase) wären Entwicklung und Überleben von lebenden Systemen völlig unmöglich. Auch das Prinzip der Redundanz ist sehr wichtig, denn es werden während der Entwicklung viel zu viele Zellen gebildet, die sich dann bei Nichtbedarf wieder selbst zerstören (Apoptose). Staunen kann man als Techniker auch über die raffinierten Möglichkeiten der Selbstheilung biologischer Teilsysteme. Organe oder Gewebe, die viel benutzt werden (bzw. leicht geschädigt werden), zeichnen sich oft durch die Fähigkeit zur Regeneration aus (z.B. das Blutsystem, Knochen, Haut, etc.). Und schließlich scheint die Natur mehr Wert auf das Überleben der Population als der des Individuums zu legen (Tabelle 1).

## Biowissenschaften an einer TU

In der Technik hat es sich längst herumgesprochen, dass sich sehr vieles vom leichten Bauen der Natur direkt in die Technik umsetzen lässt (Bionik). Aber nicht weniger spannend ist es zu verfolgen, wie sich auf der Basis entwicklungsbiologischer Erkenntnisse eine neue technische Fachdisziplin, nämlich das Bio-Engineering mit riesigen Zukunftsaussichten weltweit etabliert. Beim so genannten Tissue Engineering wird erfolgreich versucht, lebende menschliche Gewebe und Organteile unter Einsatz von Stammzellen zu züchten, um sie dann betroffenen Patienten einzusetzen (Implantate für die regenerative Medizin; z.B. Haut-, Knochen-, Nerven-, Retinaimplantate). Mithilfe ausgefeilter Zellkulturtechniken züchten wir an der TUD kleine Gewebekugeln, die der Netzhaut von Huhn oder Maus sehr ähnlich sind [Layer et al., 2002] (Abb. 2). Solche Technologien sind Voraussetzung zur Entwicklung von Verfahren zur Produktion von humanen Retinaimplantaten, wie von lebenden Biosensoren. Mit dem BioEngineering findet das leichte Bauen der Natur eine direkte Umsetzung in biomedizinische und andere gesellschaftsrelevante Techniken. Zweifellos ist dies eines der wichtigsten Innovationsfelder für eine Technische Universität.

Tabelle 1:

	Natur	Technik
Produktionsweise	selbstreproduktiv: <i>cellula e cellula</i>	vorgefertigte Einzelteile, Maschinen, Arbeiter
Arbeitsweise bei Herstellung	hochparallel & wachsend	sequentiell, kein Wachstum der Einzelteile
Genauigkeit bei Produktion	im Vergleich geringer: Symmetriebrüche	hoch
Redundanz	ausgeprägt: Überschussproduktion	genaue Stückzahlen, energie- & materialsparend
Homöostase	ausgeprägt innerhalb bestimmter Grenzen	sehr begrenzt: fehleranfällig
Adaptation	sehr hoch: ist entscheidender Lebensfaktor	bisher begrenzt, wird aber immer wichtiger
Regeneration	Selbstheilung weit verbreitet	bisher sehr begrenzt
Bedeutung des einzelnen Produkts	unwichtig: populationsorientiert	wichtig: individualorientiert

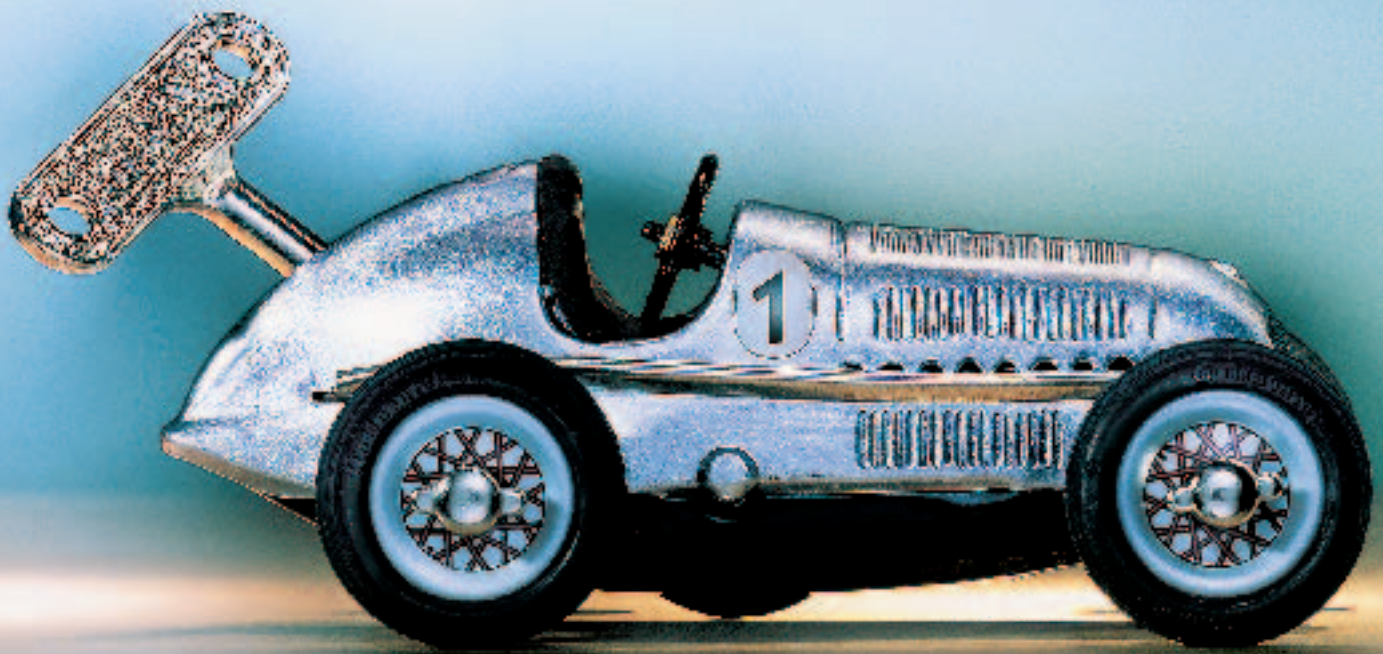
### Literatur

Haeckel, E. (1998). Kunstformen der Natur (Nachdruck der Farbtafeln von 1904), Prestel-Verlag, München - New York, ISBN 3-7913-1978-7.

Vollmer, G. (1995). Biophilosophie, Reclam, Universal-Bibliothek 9386, S. 62.

Layer, P.G., Robitzki, A.A., Rothermel, A., Willbold, E. (2002). Of layers and spheres: the reaggregate approach in tissue engineering. Trends Neurosci. 25(3), 131-134; siehe <http://www.bio.tu-darmstadt.de/zoology/layer/texte/TinsMar02.pdf>

# Are you auto-motivated? Welcome!



Continental

Continental  
TEVES

Continental  
TEMIC

Continental  
CONTITECH

Wir sind ein weltweit tätiger Technologiekonzern und innovativer Partner für die internationale Automobilindustrie. Mit heute mehr als 80.000 Mitarbeitern und einem Umsatz von 12,6 Mrd. Euro im Jahr 2004 ist es unser Ziel, die Spitzenposition im Markt zu sichern. Und das rund um den Globus an mehr als 100 Standorten. Genug Möglichkeiten also, um bei Continental Ihre Karriere in Schwung zu bringen. In einem Klima, das geprägt ist von Offenheit, flachen Hierarchien, internationaler Mobilität und eigenverantwortlichem Handeln. Startbereit? Dann geht es hier zu unserem Hochleistungsteam:

[www.conti-online.com](http://www.conti-online.com)

Offizieller Partner  
der FIFA WM 2006™



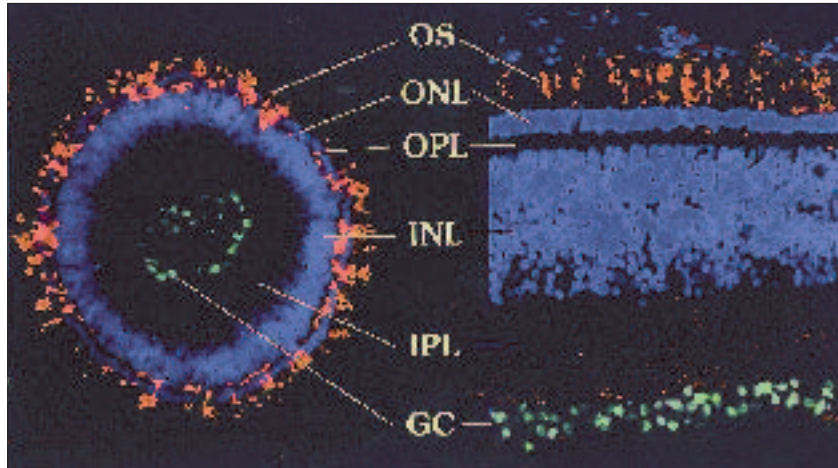
Continental





Abb. 2:  
Retina-artige Zellkugeln (links) haben denselben zellulären Schichtenaufbau wie eine normale Netzhaut des Hühnerembryos (rechts). Mit Stammzellen und Tissue Engineering lassen sich so Biosensoren und vielleicht auch Retina-Transplantate für den Menschen züchten.

Retina-typical spheres (left) present a corresponding structure of cell layers as a normal retina of the chick embryo (right). By the use of stem cells and tissue engineering, living biosensors and possibly also human retinal transplants can be produced.



### Der Autor:

**Prof. Dr. rer. nat. Paul G. Layer** leitet die Arbeitsgruppe „Entwicklungsbiologie und Neurogenetik“ am Institut für Zoologie des Fachbereichs Biologie der TU Darmstadt. Es werden Prozesse der Hirnbildung an Embryonen von Zebrafisch, Huhn und Maus entschlüsselt. Forschungsobjekt ist die Netzhaut (Retina), welche mithilfe von Stammzellen in vitro rekonstruiert wird (Tissue Engineering). Ähnlich werden Riechepithel der Maus und Haarzellen beim Zebrafisch untersucht; dem Neurotransmitter Azetylcholin kommt besondere Bedeutung zu.  
layer@bio.tu-darmstadt.de

**SCHENCK TIP**  
Technologie- und Industriepark

## Schenck Technologie- und Industriepark, der zentrale Standort für innovative Unternehmen



- 70.000 m<sup>2</sup> Bürofläche
- 70.000 m<sup>2</sup> Hallenfläche
- über 2.000 Pkw- und Lkw Stellplätze
- weitgefächerte Infrastruktur
- umfangreiches Serviceangebot wie Kasino, Konferenzzentrum
- allgemeine Dienstleistungen z.B. Facilitymanagement, Energiemanagement, Instandhaltung, Ausbildung, Logistik

**SCHENCK Immobilien & Service GmbH**  
Landwehrstraße 55  
64293 Darmstadt  
<http://www.schenck.net>  
Tel.: +49 (0) 6151 / 32-1200  
Fax: +49 (0) 6151 / 32-3800  
eMail: schenck-technologipark@schenck.net

The **DÜRR** Group



# Das Zusammenspiel von Gestaltung und Tragfähigkeit im Leichtbau

Dietger Weischede/Markus Dietz



Bild 2:  
Knoten aus Hanfseilen  
joint made of manila ropes

Identität von Scheinen und Sein, form follows function ist eines der Gestaltungsprinzipien in der Architektur. Die Optimierung von Tragstrukturen, Funktionen und Materialeffizienz ist notwendiges Planungsziel des Leichtbaus. Tragsysteme und Bauteile werden bis an ihre Leistungsgrenze genutzt. Um zuverlässige Tragfähigkeit zu erreichen, sind diese Grenzen zu erforschen und die Erkenntnisse umsichtig und gewissenhaft in die Praxis umzusetzen. Dieses Zusammenspiel macht Leichtbau so faszinierend in der Lehre, Forschung und Praxis.

**Leightweight construction – interaction between design and carrying capacity** The identity of appearing and being, „form follows function“ is one of the design principles architects are using. The optimisation of the load bearing structure, operation and material efficiency is a necessary goal for light-weight construction. Load bearing structures and components will be used to full capacity. In order to achieve adequate carrying capacity, it is important to research the limits of full capacity and to reduce the realization carefully and faithfully to practice. This interaction creates fascination for teachings research and in practice.



Leichtbau wird vor allem mit dem Flugzeugbau in Verbindung gebracht. Man versteht, dass so ein riesiges Flugzeug leicht gebaut sein muss, damit es überhaupt vom Boden abheben kann. Auffällig sind auch noch Flügel, Schwanzflosse und die aerodynamische Form, die man als funktionsbedingte Merkmale wahrnimmt. Die daraus abzuleitende typische Gestalt kann schon ein Kind wiedererkennbar aufzeichnen. Form follows function, Identität von Schein und Sein.

Form follows function ist auch ein Prinzip der Gestaltung in der Architektur. Allerdings muss nicht jedes Bauwerk, anders als ein Flugzeug, leicht sein, denn es ist bodenständig und seine Masse wird nicht bewegt. Trotzdem gibt es auch in der Baukunst gute Gründe leicht zu bauen: Ästhetik, Transparenz, Materialeinsparung und Gewichtsminimierung förderten die Entwicklung einer speziellen Disziplin im Bauwesen, die bestimmten konzeptionellen Regeln folgt: Wer leicht baut, optimiert das Tragsystem, stimmt zugleich die Struktur seines Bauwerks eng auf dessen Funktionen ab und erreicht eine höchstmögliche Ausnutzung der Tragfähigkeit aller Bauteile.

Das Ziel der Architektur nach harmonischer Einheit von Funktion, Gestalt und Tragfähigkeit wird somit insbesondere im Leichtbau erkennbar umgesetzt. Die Abhängigkeiten verlangen sichere Materialkenntnis und hohe Planungssorgfalt. Die Interaktion von Material und Geometrie bestimmt die Qualität des Bauwerks. Geometrische Größen sind Abstand und Weite. Sie prägen die gestalterischen Merkmale des Leichtbaus, denn sie stehen für Transparenz, Filigranität und leichtes Erscheinungsbild. Der Abstand zwischen korrespondierenden Kräften wie z. B. einem Kräftepaar bestimmt als Produkt aus Kraft  $K$  und Abstand  $a$  ganz wesentlich die Tragfähigkeit mit  $M=K \cdot a$ . Diese Momentenbeanspruchung ist eine von den drei Gleichgewichtsbedingungen in der Statik, die immer erfüllt werden müssen, und sie ist zugleich die Bedingung, die bei der Entwicklung eines Tragwerkes in der Regel den größten Materialbedarf einfordert. Es gilt deshalb konzeptionell für den Entwurf eines Leichtbautragwerkes diesen zu minimieren, also im Produkt  $K \cdot a$  den Abstand möglichst groß zu wählen. Die zu überspannende große Weite, z. B. als Entfernung zwischen zwei Raumgrenzen oder als Spannweite zwischen zwei Auflagern, erklärt – wie im Flugzeugbau – die Notwendigkeit, Gewicht zu sparen. Das gelingt, wenn die Konstruktionselemente besonders dünn oder das Material besonders leicht ist. Die Optimierung stellt dann die Kombination von beidem dar.

## Materialoptimierung

Seile sind hocheffiziente Leichtbaumaterialien. Als Netztragwerk können sie einzeln oder zu Geweben verarbeitet als Membrantragwerk verwendet werden. Da in der Architektur Haptik, Optik und Wesen bei Materialien eine große Rolle spielt, hat sich unser Fachgebiet mit Naturseilen beschäftigt und bei der Erforschung ihrer Gebrauchsfähigkeit die Studierenden einbezogen. So entstand auf dem „Übungsfeld“ neben dem Architekturgebäude ein Pavillon als Experimentierbau, der aus 25 Entwürfen als besonders gut, preisgünstig und in Eigenarbeit erstellbar ausge-



Bild 1:  
Experimentierbau aus  
Naturseilnetz  
Entwurf:  
U. Hubert, J. Bickel  
Experimental construction  
made of natural cable net  
draft: U. Hubert, J. Bickel

Bild 3:  
Schuppeneindeckung  
Shingle covering

wählt wurde. Die Entwerfer Ute Hubert und Jochen Bickel agierten im anschließenden Bauprojekt zusammen mit 30 Kommilitoninnen und Kommilitonen als „Architekten“ und so entstand in Selbstbauweise ein leichtes Membrantragwerk aus Rundhölzern und unterschiedlichen Seilarten (Bilder 1, 2, 3). Der Experimentierbau stand ca. 3 Jahre, wurde von den Studierenden für viele denkwürdige Parties benutzt und „nebenbei“ für Untersuchungen zum Dauerverhalten von Naturseilen unter Außenbedingungen verwendet. In einem zweiten Lehrprogramm wurden die Netze durch Textilmembrane aus Kunststofffasern ersetzt. Außer den unterschiedlichen Lehrzielen am Projekt ergab das Experiment mit Naturseilen, dass diese zwar viele architektonische Wünsche erfüllen, in Bezug auf Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit aber unüberbrückbare Mängel aufweisen.

Transparenz und Leichtigkeit vermittelt auch der Baustoff Glas, das als Material zwar schwer (wie Beton), in seiner Festigkeit auf Druckbeanspruchung aber auch sehr hochwertig ist. Wegen seiner Transparenz ist Glas ein beliebter Baustoff. In Verbindung mit einem effektiven Tragsystem, z. B. einem Bogen, gelingt es, äußerst leicht wirkende Bauten zu entwerfen. Leider ist Glas extrem spröde und deshalb zunächst mal als sicheres Baumaterial ungeeignet. In Verbindung aber mit einem sehr duktilen Material, einer zwischen zwei Scheiben eingeschweißten Kunststoffolie, lassen sich Tragwerke entwickeln, die äußerst filigran wirken und dank der aktiv mitwirkenden Kunststoffolie zudem eine definierte Resttragfähigkeit besitzen. Da für diese Bauweise noch keine ausgereifte, gültige Normung existiert, erfolgt die Realisierung solcher Bauten immer in Verbindung mit Forschungs- und Entwicklungsarbeiten: Das Dach auf dem Marktplatz in Wasseraalgingen bei Aalen



Bild 4:  
Dach aus selbsttragenden  
Glasbögen  
Architekt: Freie Planungs-  
gruppe 7  
roof made of self-supporting  
glass arches  
architect: Freie Planungs-  
gruppe 7



Bild 5:  
Auflagerdetail des Systems  
support detail of the  
system



Bild 6:  
Resttragfähigkeit des  
Systems  
residue carrying capacity of  
the system

wurde mit den Architekten Freie Planungsgruppe 7 aus Stuttgart entworfen und diente uns als Experimentiertragwerk, das mit 24 mm Dicke als Bogen eine Distanz von 5,40 m überspannen kann (Bilder 4, 5, 6).

Untersuchungen zum Verbundverhalten von Glas und Folie, Entwicklungen von sehr sensibel reagierenden Auflagerelementen und Versuche zur Resttragfähigkeit im gebrochenen Zustand ermöglichten die Realisierung des kleinen Daches aus Glasbögen, das nun schon seit 3 Jahren dort steht und hoffentlich noch viele Jahre seine Aufgabe erfüllen wird.

## Geometrische Optimierung

Ein Tragwerk definiert sich über die Form, das Material und die Art des Lastabtrages. Die Kombination verschiedener Tragwerke, deren Eigenschaften sich wirkungsvoll ergänzen, kann zu neuartigen Baustrukturen führen, die man Hybridtragwerke nennt. Der Begriff Hybrid bezieht sich im Sinne unseres Fachgebietes auf die Kombination verschiedener, für sich alleine tragfähiger Systeme unterschiedlicher Lastabtragscharakteristik. Hinsichtlich der Geometrie und des Materialeinsatzes bilden diese Systeme eine äußerst optimierte Tragstruktur. Material und Geometrie bestimmen die Systemsteifigkeiten, die sich als wichtiger Parameter beim Entwurf hybrider Tragwerke durch günstige gegenseitige Beeinflussung harmonisch ergänzen sollen.

Ein schönes Beispiel einer geometrischen Optimierung stellt der Brückenentwurf von Ruben Lang dar (Bilder 7 und 8). Wir hatten unseren Studierenden diese Aufgabe im Anschluss an einen Wettbewerb der Stadt Gelsenkirchen gestellt und große Leichtigkeit, starke Symbolkraft für eine High-Tech-Region und eine perfekte Anpassung an funktionale Randbedingungen eingefordert. Das Bauwerk setzt dieses alles hervorragend um durch äußerste Filigranität, ablesbare Tragwirkung bis ins Detail, Übernahme der geschwungenen Wegeführung und eine Repräsentationskraft, die ohne gekünstelte Selbstdarstellung auskommt.

## Funktionsoptimierung

Jedes Bauteil, jedes Tragsystem wurde geplant und gebaut, um eine ihm zugedachte Funktion zu erfüllen. Wenn es mehrere Funktionen zugleich übernehmen kann, steigert es seinen Funktionswert. Ein sehr gutes Beispiel einer Funktionsoptimierung zeigt der Entwurf einer Seilnetzkonstruktion von Danica Meier, die als Vogelvoliere im Nürnberger Zoo genutzt werden soll. Das Gelände der Voliere ist umgeben von einer Felswand, die an zwei gegenüberliegenden Bereichen unterbrochen ist.

Der Entwurf sieht vor, die Umgebung zur Lastabtragung einzubeziehen und das Netz am Fels zu verankern. In der Mitte definieren zwei Pylone die Hochpunkte der Seilnetzkonstruktion. Die Bereiche, in denen der Fels unterbrochen ist, sind Sonderbereiche, die auf den ersten Blick problematisch erscheinen.

Die Entwurfsverfasserin nutzt diese Gegebenheit aber für einen Tunnel, durch welchen die Besucher in das Gehege eintauchen und die majestätischen Vögel





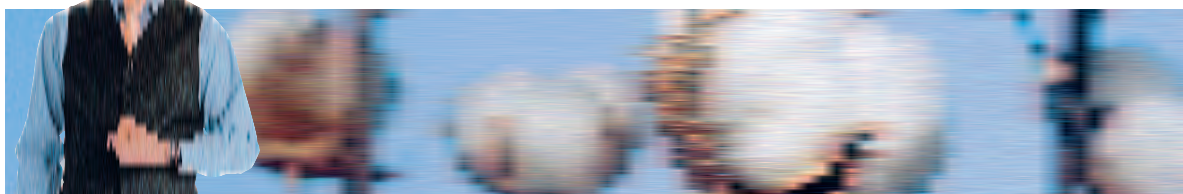
Bild 7:  
Fußgängerbrücke  
als Hybridtragwerk  
Entwurf: R. Lang  
footbridge as hybrid  
structure  
draft: R. Lang



Bild 8:  
Geometrische Anpassung  
des Brückenverlaufs an die  
Wegeführung  
geometric adaptation of  
the bridge to the confi-  
guration of ways



## G E S C H I C H T E   S C H R E I B E N



**Nur die Besten schreiben mit uns Geschichte! Unsere Führungskräfte sind von kreativem Zuschnitt und setzen Handelstrends. Wir haben als erster Discounter die Lebensmittelbranche revolutioniert und Textilien verkauft. Heute sind wir der siebtgrößte Bekleidungshändler in Deutschland. Wollen auch Sie Märkte bewegen und Zukunft mitbestimmen? Dann kommen Sie zu uns!**

Mit innovativen Ideen, Entschlusskraft und Spaß am Handeln werden Sie bei uns erfolgreich sein. Wir suchen Hochschulabsolventen mit wirtschaftswis-

senschaftlicher Ausrichtung und sehr gutem Abschluss. Nach einem einjährigen Traineeship steigen Sie in unser Management ein und übernehmen Personalverantwortung für bis zu 70 Mitarbeiter. Wir bieten Ihnen Gestaltungsspielräume mit besten Aufstiegschancen, ein überdurchschnittliches Gehalt und ein partnerschaftliches Arbeitsklima auf nationaler und internationaler Ebene.

Verbinden Sie Ihre persönliche Geschichte mit unserem Unternehmen – gemeinsam bewegen wir Märkte. ALDI GmbH & Co. KG, Hessenring 1, 64546 Mörfelden, [www.karriere-bei-aldi-sued.de](http://www.karriere-bei-aldi-sued.de)

**ALDI SÜD. Handeln aus Überzeugung.**



Bild 9:  
Vogelvoliere für den  
Tierpark in Nürnberg  
Entwurf: D. Meier:  
Funktionsoptimierung  
im Eingangsbereich

bird aviary for the zoo  
in Nürnberg  
draft: D. Meier: optimi-  
sation of functions of  
the entrance area



aus nächster Nähe in naturgemäßer Umgebung erleben können. Der Tunnel ist also Teil der Netzkonstruktion und entsteht durch ein Nach-innen-Stülpen des Netzes. Dadurch wird eine zu den Tragseilen gegensinnige starke Krümmung des Netzes erzeugt, die für die Tragwirkung einer Leichtbaukonstruktion unerlässlich ist (Bild 9).

Die Eingänge bzw. Ausgänge des Tunnels stellen für Netzkonstruktionen normalerweise problematische Bereiche dar. Hier beeinflussen sie das Tragverhalten günstig und stellen somit eine gelungene Funktionsoptimierung hoher architektonischer und tragwerksplanerischer Ansprüche dar.

Bild 10:  
Dachtragwerk des Fussball-  
stadions FC Arsenal London  
Entwurf: G. Bestgen,  
J. Feuerstein

Roof structure of the  
football stadium FC Arsenal  
London  
draft: G. Bestgen,  
J. Feuerstein

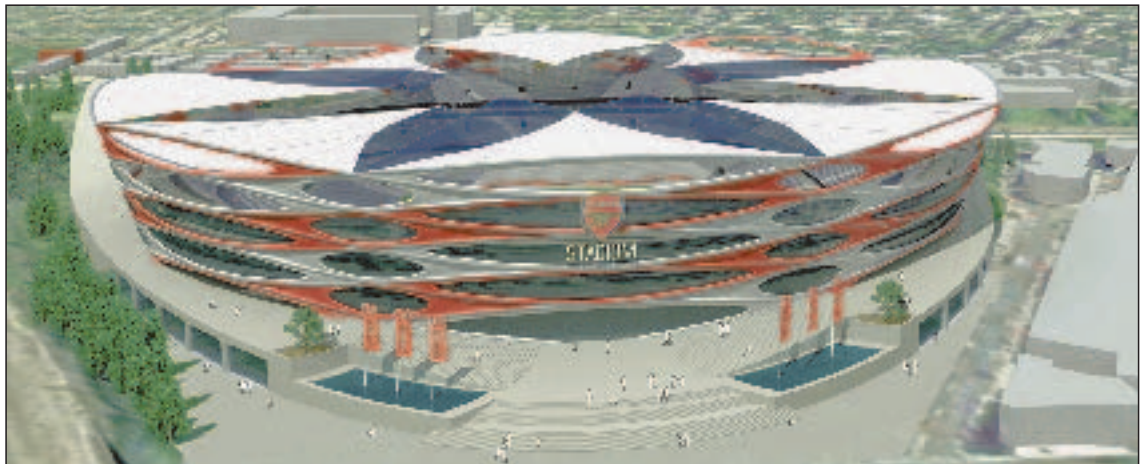
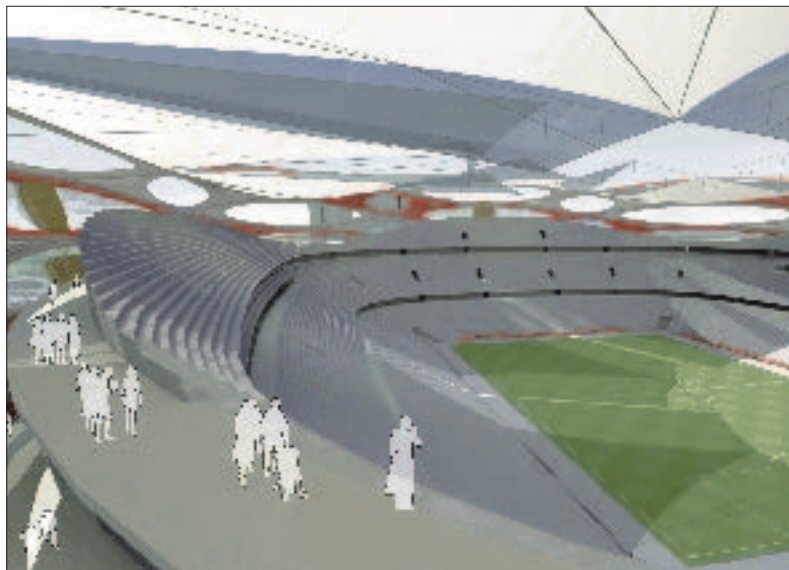


Bild 11:  
Dacheindeckung mit  
ETFE-Folie

Roof covering with  
ETFE-film



## Gestaltbildende Struktur

Eine Tragstruktur als bestimmendes Element eines Entwurfes ist gestaltbildend. Es tritt, den architektonischen Entwurf stärkend, in den Vordergrund. Dies kann nur gelingen, wenn die Tragstruktur ihren Ursprung im architektonischen Ansatz hat.

Die Basis des Entwurfes für das neue Fußballstadion des FC Arsenal London „insane in the membrane“ von Gerrit Bestgen und Jörg Feuerstein ist die Symbiose von traditioneller englischer Sitzplatzanordnung (parallel zum Spielfeldrand) und dynamischer Erscheinungsform der Sportarena. Der geschwungene Dachabschluss entsteht durch das Zusammenspiel der versetzt zueinander wellenförmig verlaufenden Dachränder, die durch den inneren Zugring und äußeren Druckring gebildet werden (Bild 10).

Über das Verständnis der Tragwirkung dieses Seiltragwerkes wurde eine neue Form kreiert, die den Entwurfsgedanken der Dynamik widerspiegelt. Die dadurch entstandene geschwungene Form des Dachrandes setzt sich in der Fassade fort, die Tragstruktur ist Gestaltungsmerkmal des homogenen Stadionkörpers (Bild 11).

Die aus transparenter und transluzenter ETFE-Folie bestehende Membraneindeckung sorgt für Transparenz und ist zugleich ein gelungenes Beispiel, wie der Leichtbau aus der richtigen Materialwahl, einer optimierten Tragstruktur und einem starken Gestaltungswillen zu guter Architektur wird.

## Fachgebiet Entwerfen und Tragwerksentwicklung an der TU

Prof. Dr.-Ing. Dietger Weischede (Leiter)

[weischede@twe.tu-darmstadt.de](mailto:weischede@twe.tu-darmstadt.de)

Dipl.-Ing. Markus Dietz

(Wissenschaftlicher Mitarbeiter)

In der Architektur bilden Funktion, Gestaltung und Tragfähigkeit eine Einheit. Das Fachgebiet Entwerfen und Tragwerksentwicklung vertritt in Forschung und Lehre des Fachbereiches Architektur primär die Inhalte der Tragfähigkeit und verbindet diese direkt mit Gestaltungs- und weitläufig auch mit Funktionskriterien.

Deutlich erkennbar sind diese Bezüge in der Disziplin Leichtbau, dem Forschungsschwerpunkt des Fachgebietes.

# Exzellenz in Lehre und Forschung ...

... zum Beispiel im Fachgebiet DiK der TU Darmstadt



Wir freuen uns, dass wir ein wenig dazu beitragen können:

Mit unseren Software-Lösungen für die interdisziplinäre, globale Produktentwicklung, die weltweit von renommierten Unternehmen für die Optimierung ihrer Produktentwicklungsprozesse eingesetzt werden, und die wir Institutionen der Lehre und Forschung zu überaus günstigen Konditionen anbieten.

**TEAMCENTER NX SOLID EDGE TECNOMATIX PLM COMPONENTS**



[www.ugs.com](http://www.ugs.com)  
[www.cad4academics.de](http://www.cad4academics.de)





# Die Ästhetik des Leichtbaus

Stefan Schäfer

Ein wesentliches Ziel des Leichtbaus sind Bauwerke, die bei geringster Masse die Lastabtragung optimal erfüllen. Ohne den Einfluss des konstruktiven Prinzips ist eine Bewertung des „Leichtbaugrads“ aber nicht möglich. Als sichere Vergleichsgrundlage zählt beim BIC-Modell die Tragleistung von Materialien zusätzlich zum Gewicht.

***The Aesthetic of Lightweight Construction***  
*An essential goal of lightweight construction are buildings, which can fulfil constructive tasks with a very low dead weight. Without the influence of the constructive principle a validation of the lightweight factor is impossible. As a reliable basis the so called BIC-model takes into account the total loading input of the material in addition to its weight.*

## Der Begriff „Leichtbau“

Spätestens seit Frei Ottos Wirken in Stuttgart wird mit „Leichtbau“ ein ästhetisches und konstruktives Prinzip im Bauwesen verknüpft. Zu den wesentlichen Zielen dieser Form des Leichtbaus zählen Bauwerke mit sehr geringer Masse, die die Anforderungen der Lastabtragung optimal erfüllen. Es gibt folgende Argumente für den Leichtbau:

- Geringere Bruttobaumasse
- Höhere konstruktive Leistungsfähigkeit
- Ästhetisches Erscheinungsbild
- Ressourcenschonung

Leichte Bauwerke sind mitnichten a priori die ästhetisch Wertvolleren. Allerdings setzt ein konsequenter Leichtbau eine hohe konstruktive Fertigkeit sowohl im Planungs- als auch im Ausführungsprozess voraus. Leichte Bauprojekte bedürfen daher insgesamt einer intensiveren fachlichen Vorbereitung und repräsentieren regelmäßig einen hohen technischen Standard, der kaum statische Redundanzen besitzt. Leichtbau benötigt extreme Stringenz!

Gegenüber anderen konstruierenden Disziplinen wie dem Fahrzeug- oder dem Flugzeugbau sind Bauwerke in der Regel deutlich schwerer gebaut. Anspruchsvolle Tragwerksaufgaben (z.B. große Höhe, große Spannweite) erfordern immer eine sehr leichte Bauweise (Abb. 1, 2).

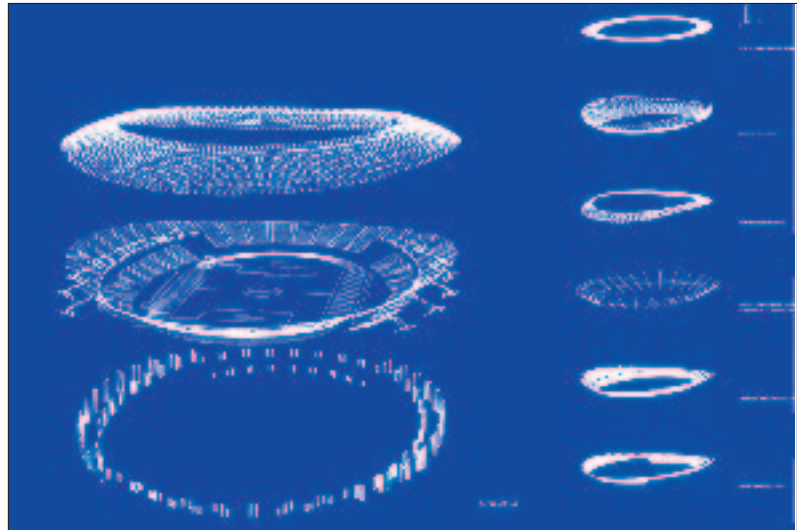
Mit Frei Ottos und Rolf Gutbrods Beitrag für den deutschen Pavillon zur Expo in Montreal 1967 (Abb. 3) bekamen Leichtbaukonstruktionen ein formales Aussehen als Flächentragwerk, das ein individuelles, tektonisches Erscheinungsbild geprägt hat und dabei auch außerhalb von Fachkreisen einen großen Bekanntheitsgrad genießt.

Weiterhin gibt es auch ökologische Gründe, die gewichtssparende Konzepte erfordern. In Ermangelung der nötigen Stoffwechselprodukte entwickeln auch einzelne Organismen auf natürlichem Wege die Einsparung von knappem „Baumaterial“ (Abb. 4).

## Zur Relativität des Leichtbaus

Nicht jeder Konstruktion sieht man das ihr inne wohnende Gewicht tatsächlich an – nicht jedes „leichte“ Material trägt automatisch zu effektiv leichteren Bauwerken bei (Abb. 5). Ohne eine Bewertung des angewendeten konstruktiven Prinzips ist eine Bewertung des „Leichtbaugrads“ eines Bauwerks nicht möglich. Der reine Quotient aus Gewicht und umhülltem Volumen ließe den Schluss zu, dass z. B. Tragwerke aus Schaumstoff gute Werte erreichen. Dennoch ist eine nennenswerte Tragfunktion mit dem Material nicht möglich. Als sichere Vergleichsgrundlage dient daher auch die Berücksichtigung der materiellen Tragleistung zusätzlich zum Gewicht. Otto hat hierfür das „BIC-Modell“ entwickelt, das den Masseaufwand ins Verhältnis zur erzielbaren Spannweite setzt [Otto, 1990].

Konsequent leicht gebaute Strukturen besitzen eine eigene Ästhetik. Der Entwurfsprozess einer Leichtbaukonstruktion ist daher immer auch ein Gestaltungsprozess (s. Abb. 1). Mit dem Entwurf für ein Stadion mussten beispielsweise neben dem sichtoptimierten Unterbau vor allem das leichte, stützenfreie Dach gewichtsoptimiert entworfen werden. Angeregt



von der hängenden Stabwerksschale des Praterstadions in Wien wurden hierfür unter Anwendung der Kraftdichte-Methode in einem mehrstufigen Formfindungsprozess die zweifach gekrümmte, statisch optimierte Dachfläche entwickelt.

Abb. 1:  
Entwurf für ein Stadion  
Design for a stadium

Abb. 2:  
Die Überdachung der  
antiken Arena von Nîmes  
Canopy of the antique  
Nîmes arena

## Wege zum Leichtbau

Leichtes Bauen erfordert strategische, konstruktive Prinzipien, die sich in drei Lösungsansätze gliedern [Sobek, 1995]:

### • Materialeleichtbau:

Die Verwendung leichter Materialien bewirkt mitunter Einbußen in der Festigkeit, die u. U. durch einen Mehreinsatz desselben kompensiert werden müssen.

Abb. 3:  
Deutscher Pavillon, Expo in  
Montreal 1967  
German pavilion, Expo at  
Montreal 1967





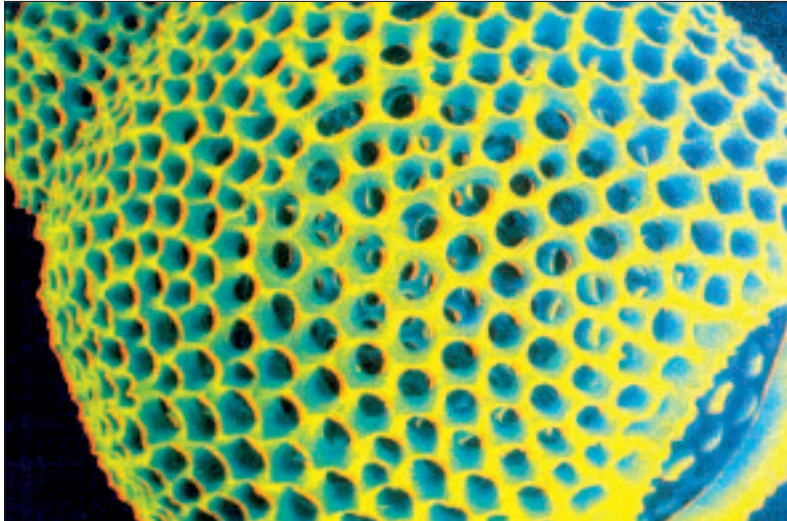


Abb. 4:  
Radiolaria  
Radiolaria

- **Strukturleichtbau:**  
Leichtere Strukturen sind ein essentieller Bestandteil des Leichtbaus. Dank mathematischer und kalkulatorischer Möglichkeiten sind heutzutage auch sehr komplexe Konfigurationen statisch berechenbar geworden.

- **Systemleichtbau:**  
Die Bündelung mehrerer baulicher Funktionen auf ein Bauteil – z.B. Dämmung, Dichtung, mechanischer Schutz – lässt den Wegfall sonst zusätzlicher, gewichtsträchtiger Bauteilschichten entbehrlich werden.

Diese Prinzipien sind für alle Materialien auch als gemischte Lösungen gleich applizierbar. Die idealen Grundelemente jeder leichten Konstruktion bilden die

Fasern (Seile und Textilien) und der Pneu (geschlossenes Volumen mit stabilisierendem Innendruck). Sie finden sich in vielen realisierten Bauwerken wieder.

## Der Bauweisenbegriff

Der Herstellungs- und Verarbeitungsprozess ist ein wichtiger Teil des Leichtbaus. Besonders die angewendeten Füge-technologien der eingesetzten Werkstoffkomponenten, die sich je nach Anwendung qualitativ zwischen lokalen punktförmigen und flächigen stoffschlüssigen Fügungen einordnen lassen, wirken sich auf die primären Bauweisen aus (Abb. 6-9).

Bekannt sind die

- **Differentialbauweise:**  
Punktförmige Fügestellen, Werkstoffmix möglich
- **Integralbauweise:**  
Monowerkstoffbauteil, ideale Geometrie-anpassung, hoher Fertigungsaufwand
- **Integrierende Bauweise:**  
Monowerkstoffgefüge, stoffschlüssige Fügungen zu komplexeren Geometrien
- **Verbundbauweise:**  
Werkstoffmix möglich, Addition von individuellen Materialeigenschaften  
[Sobek, Schäfer, 1996]

## Natürlicher Leichtbau

Aufgrund biologisch evolutionärer Vorgänge gibt es zahlreiche gewichtsoptimierte Beispiele in der Natur, die Ideen für den Leichtbau liefern können und die sich bestimmten Prinzipien zuordnen lassen [Nachtigall, 2003/Schäfer et. al. 2004].

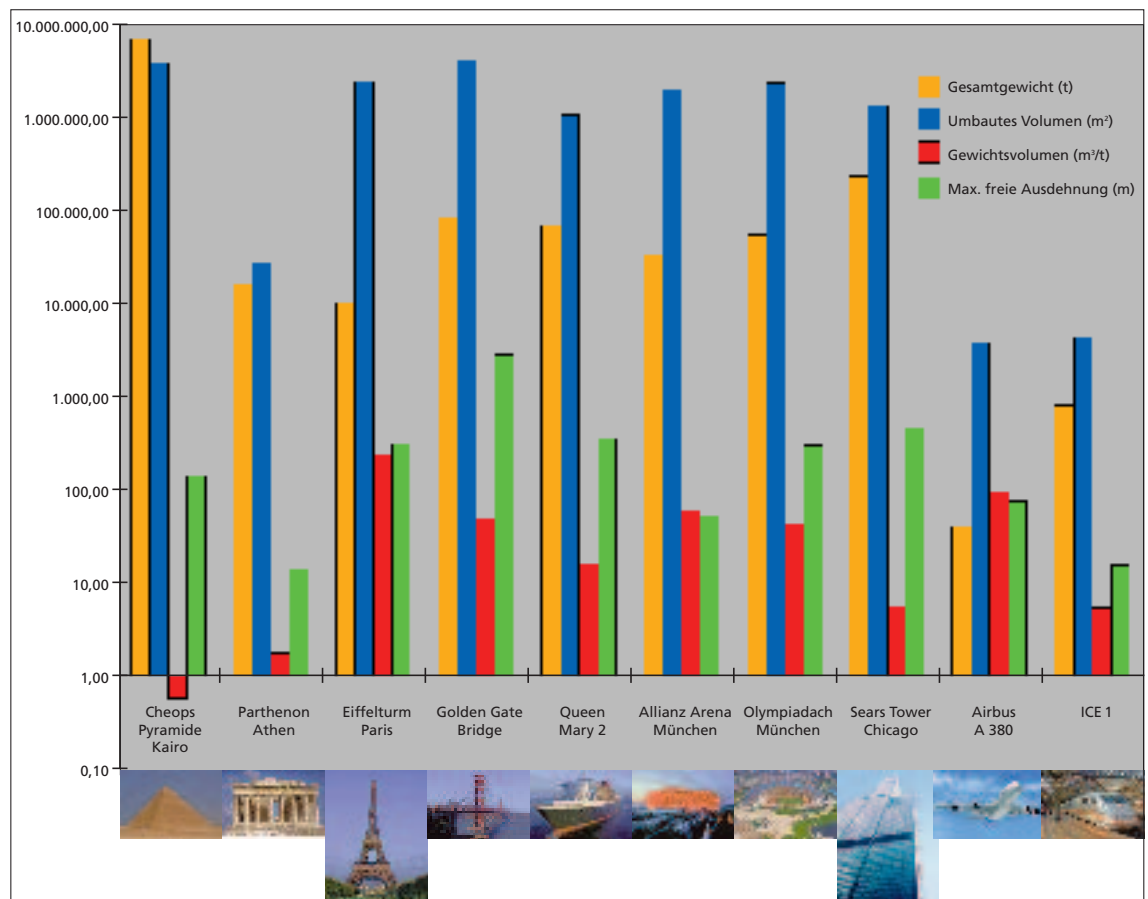
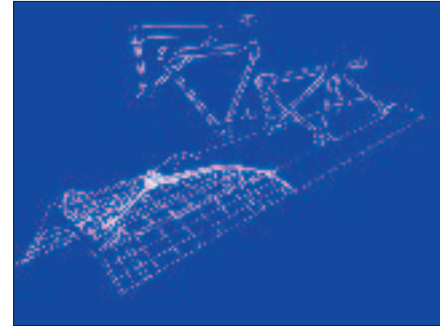


Abb. 5:  
Übersicht prominenter Konstruktionen  
Overview of prominent structures



### Versteifung/Faltung

Die gefaltete Oberfläche des 1851 errichteten Kristallpalastes (Abb. 11) verlieh ihm die für seine Größe notwendige Aussteifung. Das Rippengeflecht der Blattunterseite der Riesenseerose *Victoria Amazonica* (Abb. 10) kann durch ähnliche Effekte sogar das Gewicht von Personen tragen.

### Querkraftstrukturen

Die isostatischen Rippen innerhalb von Skelettknochen (Abb. 13) waren dem Ingenieur Pier Luigi Nervi (1891-1979) bekannt. Die von ihm gebaute Deckenunterseite des Fabrikgebäudes Gatti in Rom zeigt den Verlauf der lastabtragenden Strukturen (Abb. 12). Die zum Auflager hin verdichteten „Materialbalken“ aus Beton sind ein ideales Abbild der Querkraftverläufe und der damit einher gehenden Materialersparnis.

### Zugbeanspruchte Konstruktionen

Zeltkonstruktionen sind sehr effizient und typisch für den Leichtbau. Die oftmals damit verglichenen, natürlichen Spinnweben werden von hauchdünnen Naturfäden mit extrem hoher Zugfestigkeit getragen. Vergleichbare Fäden sind künstlich nicht herstellbar. Die Effizienz der von Stahlseilnetzen getragenen, natürlichen Konstruktionen hat sich Frei Otto bei seinen Zeltkonstruktionen zu Nutze gemacht (Abb. 3).

Die Stabilität solcher Zeltkonstruktionen entsteht durch einen Mix aus Vorspanneffekt und mehrdimensional verformten Oberflächen, die zu ihrem typischen Erscheinungsbild führen. Hierzu sind regelmäßig zahlreiche Studien notwendig, die u. a. an spannungsminimierten Seifenhautmodellen durchgeführt wurden. Heute existiert sowohl die Soft- als auch die Hardware, um die komplexen mathematischen Gleichungen zu lösen [Schäfer, 1999].

Abb. 6:

Differentialbauweise

Differented structure principle

Abb. 7:

Integralbauweise

Integrated structure principle

Abb. 8:

Integrierende Bauweise

Integrating structure principle

Abb. 9:

Verbundbauweise

Compounding principle



**Wir machen uns stark für maßgeschneiderte Energielösungen.**

Auch Sie können von den intelligenten, technisch ausgereiften Energiedienstleistungen der HEAG Südthessischen Energie AG profitieren. Von der Beratung, Planung und Realisierung bis zur Betriebsführung und Wartung bündeln wir unsere Energie, damit Sie sich um Ihr Kerngeschäft kümmern und Ihr Budget entlasten können. Mehr Infos unter Tel. 06151 701-6000.

**HSE**  
GEBÜNDELTE ENERGIE



Eine detaillierte Abhandlung über textile Materialien, ihre technische Herstellung und Weiterverarbeitung findet sich in [Sobek, Speth, 1993/Schock 1997].

Mit ca. 1000 g/m<sup>2</sup> für Tragwerk und Hülle zählen textile Bauwerke zu den echten Leichtgewichten. Rein auf Zugbeanspruchung konzipierte Tragwerke sind weniger durch Stabilisierungsversagen gefährdet. Die auftretenden Kräfte liegen fast ausnahmslos in Form von Zugspannungen vor, die jeden Faserquerschnitt gleichförmig und damit optimal belasten. Darin begründet sich das effektive Verhältnis von Materialgewicht zur Spannweite solcher Tragwerke wie auch ihr regelmäßig als äußerst „filigran“ empfundenes Erscheinungsbild.

Abb. 10:  
Untersicht der Victoria  
Amazonica  
Bottom side of the Victoria  
Amazonica

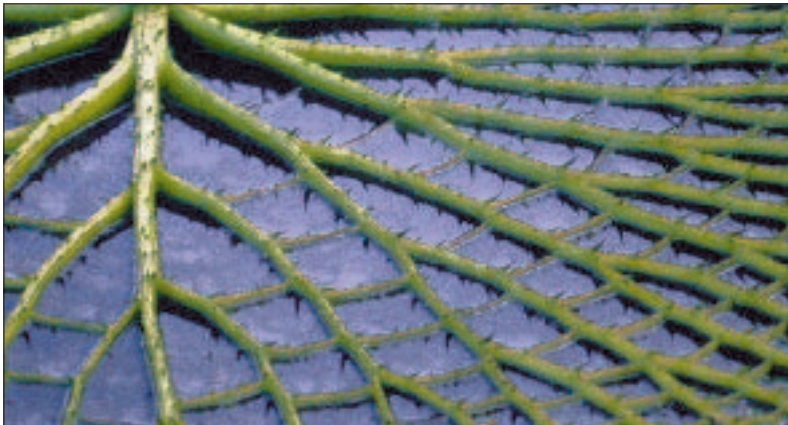


Abb. 11:  
Kristallpalast in London  
1851  
Cristall Palace at London  
1851



Abb. 12:  
Deckenuntersicht des  
Fabrikgebäudes Gatti, Rom  
Bottom view of the Gatti  
factory ceiling at Rome

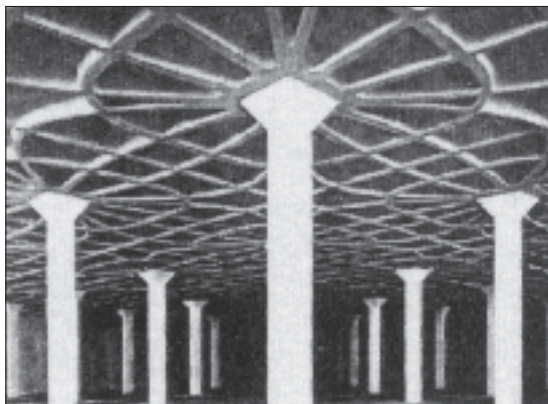
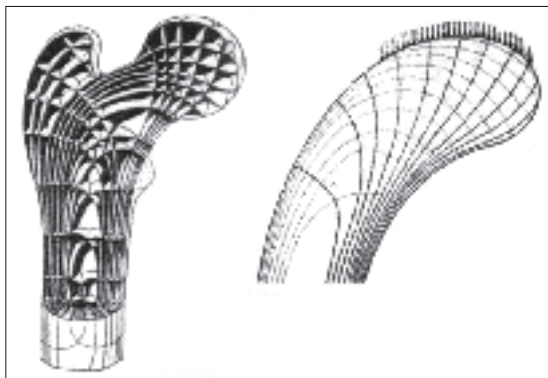


Abb. 13:  
Isostatische Rippen eines  
Hüftknochens  
Isostatic ribs of the femur



Eine Alternative zu den mechanisch vorgespannten Segeln bilden die pneumatischen Stützmethoden, die meistens Gase wie z.B. Luft als Stützmedien heranziehen. Bei leichten Konstruktionen stellen solche Kräfte, die der natürlichen Gravitation entgegengesetzt wirken (z.B. Windkräfte), häufig den formbestimmenden Lastfall dar und haben einen erheblichen Einfluss auf das formale Entwurfsergebnis.

## Leichtbau durch Optimierung

Gewichtseinsparende Optimierungen beinhalten die Materialverteilung unter Berücksichtigung von Selbstbildungsprozessen im Spiel der Kräfte. Hierzu gibt es mathematische Verfahren und physikalische Experimente, die mit modernen, computergestützten Methoden abgebildet werden können (Abb. 14, 15). Bekannte Methoden sind die:

- Kraftdichtemethode
- Methode der finiten Elemente
- Modellbasierende Methoden
- sonstige stochastische Verfahren

Sie gliedern sich im Wesentlichen in gestaltbeeinflussende und topologiebeeinflussende Verfahren und werden sich künftig im Bauwesen weiter etablieren [Ruppert, 2005].

## Zusammenfassung

Wenn eine mathematische Regelgeometrie wie z.B. eine Kugeloberfläche nicht die angestrebte Form eines leichten, flächigen Tragwerks darstellt, so wird die Entwicklung der geeigneten Form zur zentralen Entwurfsaufgabe [Ruth, Noack, 2001]. Es ist festzustellen, dass der Leichtbaubegriff unterschiedliche Interpretationen zulässt – die klassische Version bildet dabei die Gewichtsfunktion versus der Ästhetik. Um wirklich leicht zu bauen, müssen aber immer enorme Anstrengungen unternommen werden. Ottos Klassifizierung von Tragwerken in BIC-Kategorien hat einen wichtigen Ansatz für eine korrekte Betrachtungsweise geliefert, der auch tatsächlich das Erscheinungsbild widerspiegelt. Welche weiteren Qualitäten mit Umweltrelevanz der Leichtbau noch zu bieten hat, sollte auf breiter Basis diskutiert werden. Vermutlich werden es aber ökologische Notwendigkeiten sein, die uns in Zukunft leiten.

### Fachgebiet Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet gibt es seit 1998.

**Lehre:** Baukonstruktion, Konstruktives Gestalten, Sonderfragen Baukonstruktion, Freihandzeichnen, Grundzüge des Planens, Entwerfens und Konstruierens, Immobilienwirtschaft

**Forschung:** Gebäudehüllen, Leichtbau, Gebäudekonzepte, Gebäudesanierung, Bionik, Digitale Medien

#### Leiter des Fachgebiets:

Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer  
Neubau Petersenstr. 12, 3. Stock, Südflur  
Homepage: [www.info-schaefer.de](http://www.info-schaefer.de)  
Email: [sts@massivbau.tu-darmstadt.de](mailto:sts@massivbau.tu-darmstadt.de)

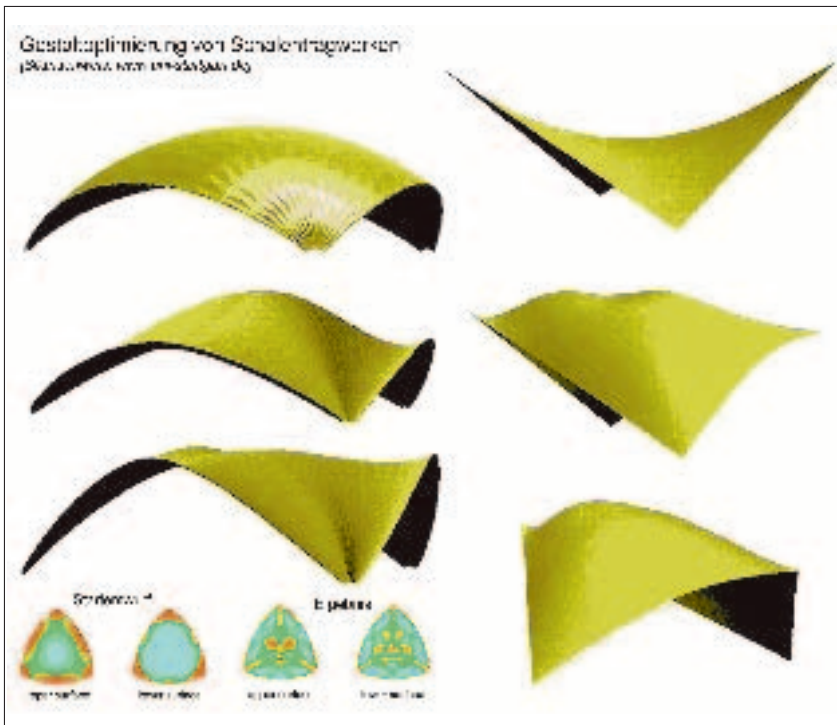


Abb. 14:  
Gestaltoptimierung von leichten Tragwerken  
Shape optimization of light structures

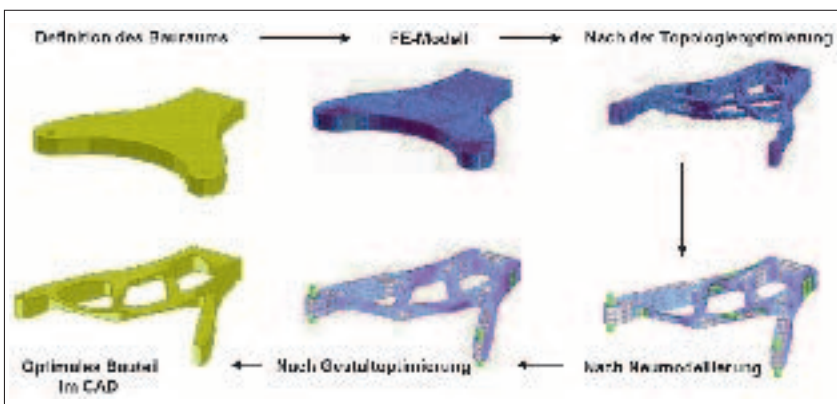


Abb. 15:  
Topologieoptimierung von leichten Autoteilen  
Topologic optimization of light structural components for cars

### Literatur

Kuhn, Markus, Glossar zum Leichtbau, Arch + 107/1991, S. 66 – 69.  
 Nachtigall, Werner, Bau-Bionik – Natur – Analogie – Technik, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin, New York 2003.  
 Otto, Frei (Hsg.) et. al., Form-Kraft-Masse 1-5, II. Reihen Nr. 21-25, Stuttgart 1990.  
 Otto, Frei, Zugbeanspruchte Konstruktionen, Band 1 + 2, Ullstein Verlag, Frankfurt, Berlin 1962.  
 Ruppert, Simon, Optimierung von Tragwerken, Vertiefungsarbeit am Institut für Massivbau, Fachgebiet Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion, TUD 2005.  
 Ruth, J.; Noack, T., Werkzeuge zum Entwerfen und Konstruieren leichter Flächentragwerke, Bericht zum 5. Informationstag des IKI, Bauhaus Universität Weimar, 2001.

Schäfer, Stefan, Textile Konstruktionen, Der Architekt 5/1999, Seite 49-53, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln 1999.  
 Schäfer, Stefan, Brieger, Björn; Menzel Stefan, Bionik im Bauwesen, Bionik, Springer Verlag Heidelberg 2004  
 Schock, Hans-Joachim, Segel, Folien und Membranen, Birkhäuser Verlag, Basel, Berlin, Boston 1997.  
 Sobek, Werner; Schäfer, Stefan, An der Nahtstelle – Fügen von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen, db 1/1996, Seite 106 - 114, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1996.  
 Sobek, Werner, Technologische Grundlagen des textilen Bauens, DETAIL 6/1994, S. 776 – 779, Institut für Internationale Architekturdokumentation, München 1994.  
 Sobek, Werner, Zum Entwerfen im Leichtbau, Bauingenieur 70/1995, S. 323 – 329, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf.

## Textile Architektur



Tribünenüberdachung Stadion Al Ain, VAE



„Tropical Islands“-  
ETFE-Folienkissenkonstruktion



Tribünenüberdachungen Formel 1, Istanbul

Textile Konstruktionen bieten nicht nur optimalen Schutz vor Wind, Wetter und Sonneneinstrahlung – sie setzen mit expressiver Formsprache vor allem eindrucksvolle optische Akzente. Zudem überzeugen sie durch kurze Planungs- und Montagezeiten, lange Haltbarkeit und kostengünstige Realisierung.

CENO TEC steht Ihnen bei der Verwirklichung textiler Projekte von der ersten Idee über die komplette Planungs- und Realisierungsphase mit Kompetenz und viel Erfahrung zur Seite.



CENO TEC GmbH  
 Postfach 18 61  
 48257 Greven  
 Telefon 02571/969-0  
 Fax 02571/3300  
 E-Mail info@ceno-tec.de

[www.ceno-tec.de](http://www.ceno-tec.de)



# Leicht bauen mit Public Private Partnership?

Andreas Pfnür



Unter der Bezeichnung Public Private Partnership werden in der jüngeren Vergangenheit vermehrt Konzepte diskutiert, den Instandhaltungstau insbesondere im öffentlichen Hochbau durch Einwerbung privaten Kapitals sowie privater Ressourcen und Know-hows aufzulösen. Wesenszug dieser neuartigen Modelle zur Organisation der Bauaufgaben ist die Erbringung aller Aufgaben im Lebenszyklus angefangen von der Planung, über die Bauausführung, den Betrieb bis hin zur Verwertung der Immobilie aus der Hand einer privatrechtlichen Gesellschaft. Die Anbieter dieser Konzepte versprechen eine Zunahme der Leistungsqualität bei niedrigeren Kosten. Zudem werden diese Aufgaben den Bau- und Liegenschaftsabteilungen abgenommen und tragen damit zu einer in Deutschland dringend gebotenen Verschlinkung der öffentlichen Verwaltung bei. PPP könnte das Bauen (und Betreiben) für den öffentlichen Nutzer der Flächen deutlich leichter machen. Der Beitrag beleuchtet kritisch die Chancen und Risiken von PPP-Konzepten in Deutschland.

*Lean Construction with PPP? In the later past Public Private Partnership concepts are used increasingly to solve Problems caused by insufficient Maintenance. Using private capital, privately owned resource and highly specific know how in a life-cycle integrated framework should lead to higher efficiency and effectiveness in Public Real Estate Management. PPP-Service Providers assure higher Building-Performance and Service Levels at lower costs. Moreover PPP potentially reduces the Public Administration to its needs and makes it become "lean". This paper is analyzing opportunities and risks of implementing PPP-concepts in Germany.*

Die öffentliche Hand tut sich derzeit mit der Instandhaltung der öffentlichen Hochbauten außerordentlich schwer. Bundesweit hat sich ein Instandhaltungsschub von über hundert Milliarden Euro angesammelt [Difu 2002]. Allein der Investitionsbedarf im Hochbau der TU Darmstadt beläuft sich auf mehrere hundert Millionen Euro. Angesichts knapper Kassen wirkt die Finanzierung der nötigen Maßnahmen ebenso wie die Bewältigung der Bauaufgaben gleichermaßen belastend. Betrachtet man die Organisationsstrukturen im öffentlichen Hochbau, so sind diese in der Regel gekennzeichnet durch aufgeblähte Bauabteilungen, die in ihrer Arbeit durch einen Wildwuchs an Bürokratie behindert werden. Glaubt man den Versprechungen der Produktanbieter, wird mit Public Private Partnership (PPP) die Erledigung dieser drängenden Aufgaben für die öffentliche Hand ganz leicht.

### Effizienzsteigerung durch PPPs

Unter dem Schlagwort „Public Private Partnership“ wird eine ganze Reihe an rechtlich-organisatorischen Konstruktionen subsumiert, denen mehr oder weniger große Potenziale zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch alternative Formen in der Beschaffung zugesprochen werden. Wesenszug dieser neuartigen Modelle zur Organisation der Bauaufgaben ist die Erbringung aller Aufgaben im Lebenszyklus angefangen von der Planung, über die Bauausführung, den Betrieb bis hin zur Verwertung der Immobilie aus der Hand einer privatrechtlichen Gesellschaft. Die Anbieter dieser Konzepte versprechen eine Zunahme der Leistungsqualität bei niedrigeren Kosten. Zudem werden diese Aufgaben den Bau- und Liegenschaftsabteilungen abgenommen und tragen damit zu einer in Deutschland dringend gebotenen Verschlinkung der öffentlichen Verwaltung bei. PPP könnte das Bauen (und Betreiben) für den öffentlichen Nutzer der Flächen somit tatsächlich deutlich leichter machen. Insbesondere in der Bereitstellung öffentlicher Immobilien, allen voran Schulen, Schwimmbädern und öffentlichen Verwaltungsbauten liegen bereits erste Erfahrungen mit dieser alternativen Beschaffungsform vor. Für Großbritannien beispielsweise wurde ein durchschnittlicher Wirtschaftlichkeitsvorteil von PPPs gegenüber der konventionellen Beschaffung von 17 % ermittelt. Experten gehen für Deutschland von Kostensenkungspotenzialen von 10 - 20 % aus [Beratergruppe PPP im öffentlichen Hochbau 2003]. Vorteile von PPPs verspricht man sich auch aus der Beschleunigung von Bauvorhaben und deren qualitativer Verbesserung, die durch die Einbeziehung privater Kapazitäten und privaten Know-hows im öffentlichen Sektor zu erwarten sind.

### Fünf kritische Erfolgsfaktoren

Public Private Partnership bezeichnet eine dauerhafte Kooperation zwischen öffentlichen Verwaltungsträgern und erwerbswirtschaftlichen Unternehmen zur Erfüllung kommunaler Aufgaben, in die beide Sektoren spezifische Ressourcen (z.B. Kapital, Rechte, Informationen, Know-how) einbringen, um komplementäre oder kongruente Ziele zu erreichen und gleichberechtigt Chancen und Risiken zu tragen

[Budäus 2004]. Echte PPPs sind durch folgende fünf Merkmale gekennzeichnet:

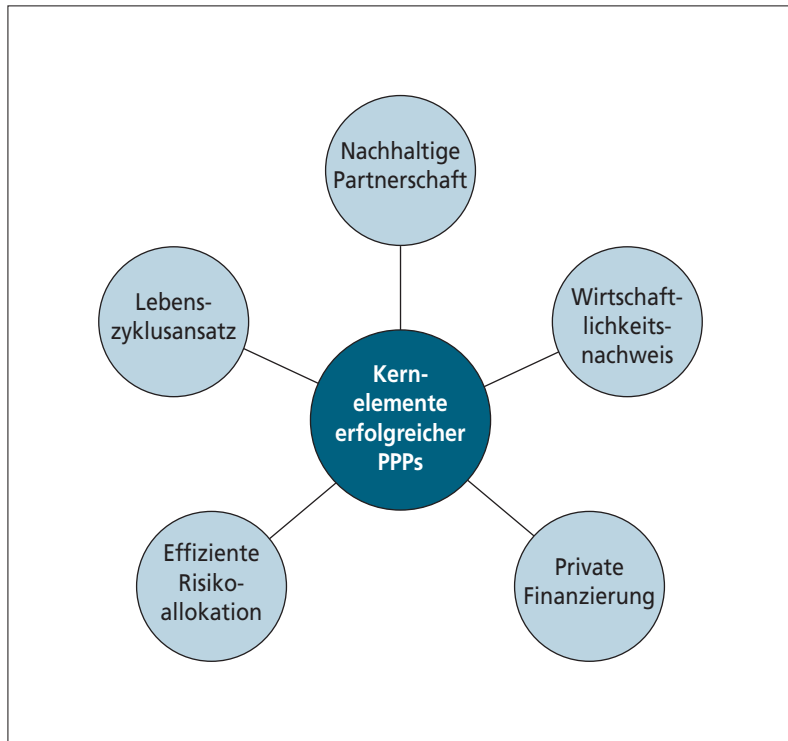
1. Das voraussichtlich wichtigste Potential von PPPs besteht in der Reallokation der Projektrisiken. In PPPs trägt derjenige Partner die Risiken, der sie am besten beherrscht. Dies klingt zunächst abstrakt, wird aber dann sehr schnell handfest, wenn man sich die Kostenentwicklung sowohl von Bauprojekten in der Errichtungsphase als auch im späteren Betrieb der Immobilien speziell im öffentlichen Sektor vergegenwärtigt. Im nachhaltigen Transfer vielfältiger Risiken, die sich letztendlich in den Bau-nutzungskosten der öffentlichen Hand niederschlagen, liegt der Schlüssel zu erfolgreichen immobilienwirtschaftlichen PPPs.
2. Im Rahmen von PPPs wird einer Projektgesellschaft die Aufgabe der Immobilienbereitstellung über den gesamten Lebenszyklus hinweg übertragen. Dazu gehört die Planung, der Bau beziehungsweise die Sanierung, die Finanzierung, der Betrieb und in vielen Fällen die Verwertung. Die lebenszyklusintegrierte Planung und Durchführung des Projekts ist regelmäßig eine wichtige Quelle für das Effizienzsteigerungspotenzial von PPPs. 90 Prozent der Lebenszykluskosten fallen in der Nutzungsphase an. Bereits in der Planungs- und Bauphase gilt es deshalb, die Betriebskosten im Blick zu behalten, um das Nutzungskostenoptimum sicherzustellen.
3. PPP-Projekte werden mit privatem Kapital finanziert. Aktuell existieren mit dem Forfaitierungsmodell und dem Projektfinanzierungsmodell zwei unterschiedliche Konzeptionen. Bei der Forfaitierung tritt die Projektgesellschaft unter Vereinbarung eines Einredeverzichts der öffentlichen Hand Forderungen gegenüber dem öffentlichen Nutzer in Höhe des Kapitaldienstes an die finanzierende Bank ab. Die finanzierende Bank stellt die Finanzierungsbedingungen auf die Bonität der öffentlichen Körperschaft ab. Entsprechend günstig ist diese Variante. Bei der Projektfinanzierung erfolgt keine Staatsgarantie. Die Bank trägt das Risiko des Leistungs- und damit auch des Zahlungsausfalls in der PPP-Finanzierung. Die Kreditkonditionen stellen auf die Bonität der privaten Partner in der Projektgesellschaft ab und sind in der Regel entsprechend teurer. Im Gegenzug hat die öffentliche Hand das Risiko des Leistungsausfalls an die Bank transferiert.
4. Ein PPP ist haushalts- und vergaberechtlich nur dann zulässig, wenn sich ein Wirtschaftlichkeitsvorteil nachweisen lässt. Zentrales Element des PPP-Prozesses ist deshalb eine mehrstufige und in der Regel sehr aufwendige Wirtschaftlichkeitsanalyse. [Beratergruppe PPP im öffentlichen Hochbau 2003]
5. Der Treibstoff, der PPPs am Leben erhält ist die PPP-Rendite, die zwischen dem öffentlichen Auftraggeber und den Privaten Partnern geteilt wird. Bleibt der Erfolg aus, werden beide Seiten angesichts der Unvollständigkeit der Verträge und der Dynamik der Rahmenbedingungen vielfältige Möglichkeiten finden, sich durch opportunistisches Verhalten Vorteile auf Kosten der jeweiligen Partner zu verschaffen. Grundvoraussetzung eines Erfolgsmodells im PPP-Bereich ist somit das partnerschaftliche Verhalten der Akteure, insbesondere die



Fünf Kernelemente der erfolgreichen Realisierung einer PPP

Five Critical Success Factors of Public Private Partnerships

gerechte Teilung von zukünftigen Chancen und Risiken. Ohne einen partnerschaftlichen Umgang mit ungeplanten oder rechtlich nicht geregelten Chancen und Risiken wird ein PPP dauerhaft nicht funktionieren. Opportunistisch auf den einseitigen Vorteil agierendes Handeln wird bei nächster Gelegenheit vom Partner vergolten. Im Ergebnis gerät die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprojekts in Gefahr.



### Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre des Fachbereichs Rechts- und Wirtschaftswissenschaften beschäftigt sich in seinem Forschungsschwerpunkt mit Problemstellungen der Immobilienentwicklung, des Projektmanagements, des Immobilieninvestments, des Immobilienbetriebs (Facility Management) sowie der Immobiliennutzung (Corporate Real Estate Management). Das Fachgebiet wird geleitet von Prof. Dr. Andreas Pfnür. Er ist Vorstandsmitglied des Bundesverbands PPP e. V. [www.bwl.tu-darmstadt.de](http://www.bwl.tu-darmstadt.de)

### Risiken und Forschungsbedarf

Durchaus ernst zu nehmen sind die von Rechnungshöfen sowie kritischen Teilen von Politik und Verwaltung vorgetragenen Bedenken, PPPs seien lediglich Instrumente zur Durchsetzung heute gewünschter Vorhaben auf Kosten der Zukunft und damit zur mehr oder weniger verdeckten Ausdehnung der Neuverschuldung. Angesichts einer sehr langfristig angelegten Vertragskonstruktion bleiben naturgemäß in jedem PPP berechnete Zweifel bestehen, ob sich der anvisierte Wirtschaftlichkeitsvorteil denn tatsächlich auch einstellt. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die gegenwärtig eingesetzte Wirtschaftlichkeitsanalyse sowohl konzeptionell, als auch von den eingesetzten Instrumenten her sehr bedenklich. Insbesondere die Bewertung des Risikotransfers ist bislang nur unbefriedigend gelöst. Schließlich fehlt es zurzeit noch an einer verlässlichen Datengrundlage, die eine valide Wirtschaftlichkeitsprognose erlauben würde [Pfeiffer 2004, Pfnür/Eberhardt 2005].

Die gegenwärtige Diskussion um PPP Modelle ist stark geprägt von vergaberechtlichen, haushaltsrechtlichen sowie steuerrechtlichen Hindernissen, die mit dem im Juli 2005 verabschiedeten ÖPP-Beschleunigungsgesetz nur in Teilen abgebaut werden konnten. Zukünftig, insbesondere wenn erste Modelle in die typischen Probleme der Betreiberphase gelangen, wird naturgemäß die Schaffung eines auf die Partnerschaft gerichteten betriebswirtschaftlichen Anreiz- und Steuerungssystems in den Vordergrund der Diskussion rücken. Nötig ist ein Performance-Controlling-System, welches den Erfolg der Partnerschaft auch institutionell verankert [Pfnür 2004, S. 278 ff.]. Aktuell bildet diese Lücke das größte Risiko immobilienwirtschaftlicher PPPs in Deutschland.

### Literatur

- Beratergruppe PPP im öffentlichen Hochbau (2003): PPP im öffentlichen Hochbau. Bd. 1 Leitfaden. Berlin 2003.
- Budäus, D. (2004): Public Private Partnership. Strukturierung eines nicht ganz neuen Problemfeldes. In: Zeitschrift für Organisation, 73. Jg. H. 6, S. 312 - 318.
- Difu (2002): Der Kommunale Investitionsbedarf in Deutschland. Eine Schätzung für die Jahre 2002 bis 2009, Deutsches Institut für Urbanistik. Köln 2002.
- Pfeiffer, M. (2004): Immobilienwirtschaftliche PPP Modelle im Schulsektor. Hamburg 2004.
- Pfnür, A. (2004): Modernes Immobilienmanagement. Berlin et al. 2004.
- Pfnür, A./Eberhardt, T. (2006): Allokation und Bewertung von Risiken in immobilienwirtschaftlichen Public Private Partnership. In: Budäus, D. (Hrsg.), Kooperationsformen zwischen Staat und Markt. Baden Baden, S. 159 - 188.

# Flexibles Profilieren für den Leichtbau

Peter Groche/Arnd Zettler



Stahlprofile, warm gewalzt wie auch kalt profiliert, haben eine lange Tradition im Bauwesen zurück. Profile können sowohl baustatische Aufgaben übernehmen als auch architektonisch, z.B. für Fassadenverkleidungen, eingesetzt werden. Bisher galt für diese Profile die Beschränkung hinsichtlich eines konstanten Querschnitts in Bauteillängsrichtung. Mit dem „Flexiblen Profilieren“ wird diese Restriktion aufgehoben und die kontinuierliche Herstellung von Kaltprofilen mit veränderlichem Querschnitt ermöglicht. Weiterhin lässt sich die Kontur tragender Bauteile im Sinne des Leichtbaus belastungsoptimiert auslegen. Darüber hinaus schafft die Möglichkeit der variablen Querschnittsgestaltung völlig neue Designfreiheiten.

**Flexible Roll Forming for Lightweight Construction Applications** In the building industry hot rolled and cold roll formed profiles are traditionally used in two fields of applications. On the one hand almost 100 percent of the steel components are used for structural beams. On the other hand, cladding and roof system applications are made of cold rolled steel and aluminium profiles. Both groups of profiles can be characterised by their constant cross section in the lengthwise direction. Therefore the Technische Universität Darmstadt developed the flexible roll forming, a technique to produce profiles with a variable cross section in a continuous process. This new forming technology enables the production of "tailor-made" profiles, e. g. for beams with an optimised weight distribution according to the predicted load allocation. In terms of aluminium profiles, an increased freedom in design for the architect shaping modern cladding and roof systems is possible.



## Einleitung

Steigende Rohstoffpreise und eine allgemeine Verknappung von Ressourcen verlangen nach einem bewussten Umgang mit den traditionell im Bauwesen verwendeten Werkstoffen Stahl und Aluminium. Dabei kann bei diesen beiden Materialien eine klare Trennung hinsichtlich des Einsatzbereichs vorgenommen werden. Stähle kommen klassischerweise als tragende Elemente im Massiv- und Stahlbau zum Einsatz, Aluminium dagegen hauptsächlich im Bereich von Fassadenverkleidungen oder Decken- und Wandsystemen. Die hergestellten Profile lassen sich dabei in zwei Klassen unterteilen.

Zum einen werden Halbzeuge mit konstantem Querschnitt mit unterschiedlichen Güten bzw. Anforderungen produziert. Dies sind warm gewalzte Bauteile mit zumeist großen Wandstärken bei minderen Oberflächenqualitäten, wie z.B. I-Profile, als auch kalt profilierte Produkte aus Stahl und Aluminium, die im Sichtbereich Anwendung finden, wo hohe Anforderungen an Oberflächen bestehen. Als zweite Gruppe sind zumeist sehr aufwändig, mehrteilig hergestellte Profile mit veränderlichem Querschnitt zu nennen, die im Stahlbau als belastungsangepasste Strukturelemente (Bild 1) eingesetzt werden. Die Auslegung belastungsangepasster Strukturen erfolgt im Massivbau dagegen durch die gezielte Vorspannung von Strukturelementen entgegen ihrer späteren Belastung.

Durch die Verwendung von Profilen mit veränderlichem Querschnitt ergeben sich Potentiale in zweierlei Hinsicht. Zum einen lassen sich im Bereich des Stahlbaus durch belastungsoptimierte Querschnittsverläufe der Materialeinsatz und somit das Gewicht und die Kosten reduzieren, ohne dass dafür aufwändige Fügeoperationen notwendig wären. Andererseits bieten diese Profile neue Gestaltungsmöglichkeiten für architektonisch anspruchsvolle Fassaden- und Dachverkleidungen.

## Produktionskonzept

Die Idee einer profiliertechnisch kontinuierlichen Erzeugung von Bauteilen mit einer Querschnittsveränderung ist schon seit den 80er Jahren bekannt. Das damals erarbeitete Prinzip bietet noch deutliches Optimierungspotential. Die Grundidee wurde im Rahmen eines öffentlich geförderten Forschungsprojekts (EFB/AiF 11837) aufgegriffen, grundlegend überarbeitet und einem erfolgreichen Machbarkeitsnachweis unterzogen.

Ziel bei der Entwicklung des flexiblen Profilierens ist die Erweiterung der Formgebungsmöglichkeiten in einem Walzprofilierprozess. Erfolg versprechend ist bei dem verfolgten Produktionskonzept die erreichbare Flexibilität unter Beibehalt des kontinuierlichen Prozesscharakters. Auf diese Weise sollen auch kleine Losgrößen wirtschaftlich herstellbar sein. Das entwickelte Werkzeugkonzept (Bild 2) dient zunächst zum Nachweis des erarbeiteten Funktionskonzepts und ist in eine Walzprofilieranlage integriert.

Bild 2:  
CAD-Darstellung des flexiblen Gerüsts zwischen zwei konventionellen Gerüsten (Quelle: PtU)  
CAD-layout of the flexible roll forming stand (Source: PtU)

Das Werkzeug verfügt im Vergleich zu konventionellen, starren Profilierwerkzeugen über zwei bewegliche Gerüsthälften. Diese sind auf fahrbaren Schlitten montiert und besitzen je einen translatorischen und einen



Bild 1:  
Lastangepasste Konstruktion einer Brücke (Quelle: www.stmi.bayern.de)

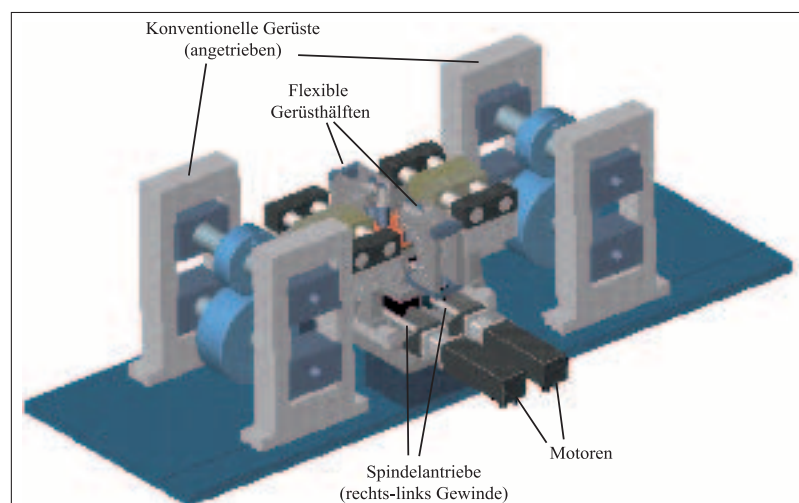
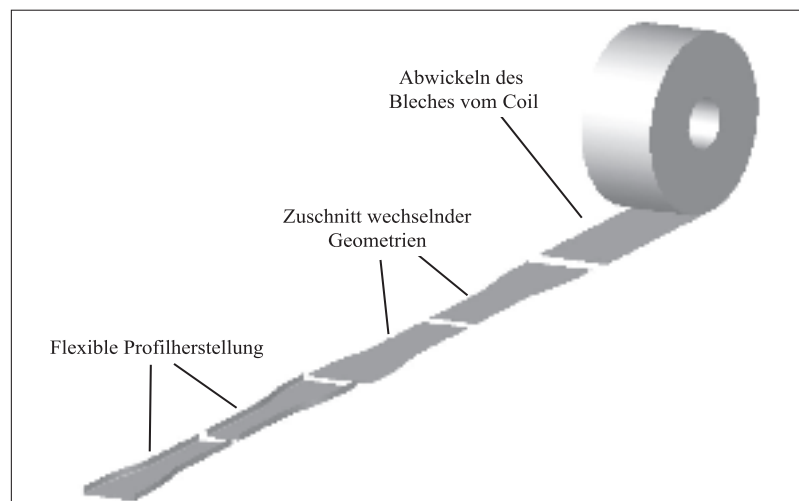
Load adapted bridge construction (Source: www.stmi.bayern.de)

rotatorischen Freiheitsgrad, die durch Gewindespindeln realisiert werden. Die Verfahrbewegungen der beiden Gerüsthälften sind dabei frei programmierbar. Angesteuert werden beide Motoren in Abhängigkeit des Blechvorschubs, der durch ein Reibrad aufgenommen wird und als Eingangsgröße einer PC-basierten Steuerung dient. Die Eingabe neuer Verfahrbewegungen, in Form eines Linienzuges der Kontur des Biegekantenverlaufs, dient als Rüstvorgang der Maschine. Derzeit verfügt das aufgebaute Prototypenwerkzeug über die Möglichkeit der Biegewinkelverstellung direkt an den Gerüsthälften. Den Antrieb der Blechplatine im Reversierbetrieb während der Versuche leisten konventionelle Profiliergerüste.

Ziel eines realen Produktionsprozesses ist die sequentielle Anordnung mehrerer solcher flexibler Gerüste hintereinander, die das zugeschnittene Blechband stufenweise einformen. Steuerungstechnisch liegt die Herausforderung in den zeitlich versetzten Verfahrbewegungen der Gerüsthälften entsprechend der an der Umformstelle herrschenden Blechgeschwindigkeit für aufeinander folgende Profilkonturen. Eine mögliche Prozesskette am Beispiel des Profilierens von U-Profilen zeigt Bild 3.

Bild 3:  
Prozesskette zur Herstellung wechselnder Profilgeometrien (Quelle: PtU)

Process chain for the production of varying profile geometries (Source: PtU)



Das Blechband wird dabei zunächst vom Coil abgewickelt und gerichtet. Danach erfolgt kontinuierlich ein Beschnitt in Abstimmung auf die später zu profilierende Zielgeometrie. Dabei wird das ebene, beschnittene Blechband stufenweise zum Zielbauteil hin eingeformt, wie in Bild 4 zu erkennen ist. Die hier beispielhaft gezeigte Biegewinkelschrittweite wird in der Praxis kleiner gewählt. Sequentiell angeordnete flexible Gerüste übernehmen nacheinander zeitversetzt die Einformung des durchlaufenden, zugeschnittenen Blechbandes.

## Prozessgrenzen

In Versuchen und Simulationen konnten erste Versagensformen während des flexiblen Profilierprozesses. Diese zeigten sich in Form von Abweichungen von der Sollgeometrie. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Erhaltene Kontur im Bereich der Querschnittsänderung ist zu prüfen. Während des Einformprozesses entstehen in den Übergangsbereichen der Querschnittsveränderung charakteristische Zug- und Druck-

Bild 4:  
Stadienfolge von flexiblen  
Einformstufen eines U-  
Profils (Quelle: PtU)

Forming Steps during the  
flexible roll forming pro-  
cess (Source: PtU)

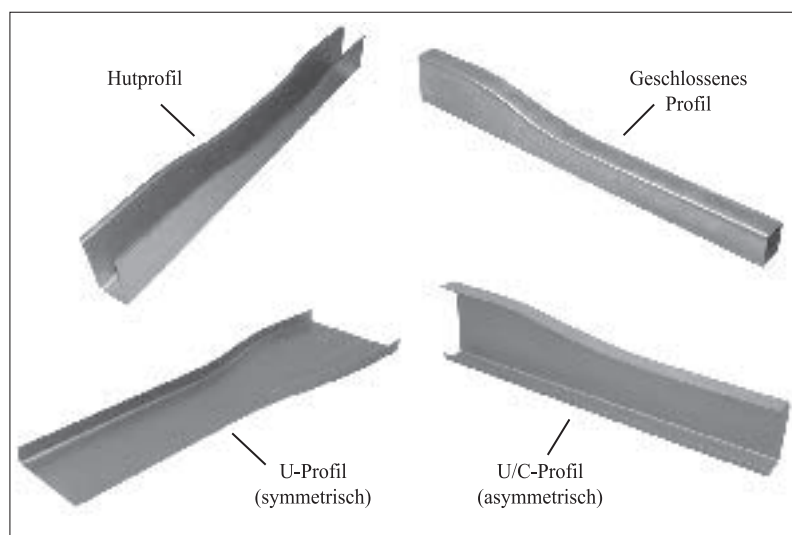
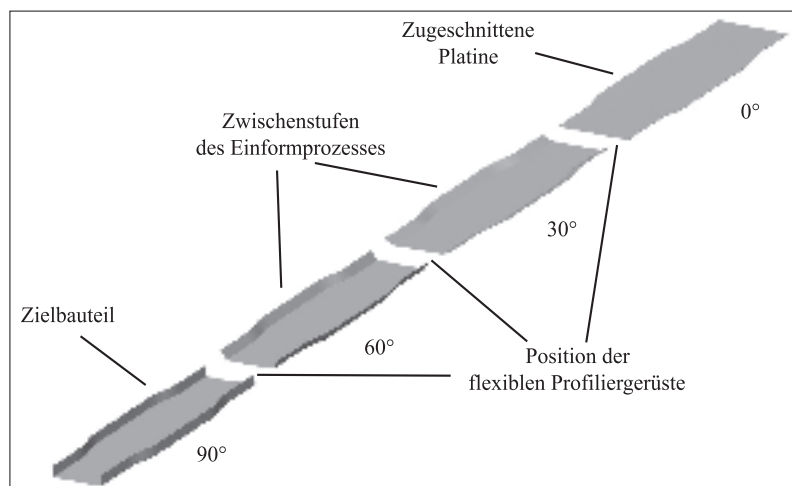


Bild 5:  
Am PtU Darmstadt herge-  
stellte Prototypen (Quelle:  
PtU)

Prototype profiles realised  
at the PtU Darmstadt  
(Source: PtU)

zonen in Längsrichtung. Problematisch ist das Verhalten des Profilschenkels im Druckbereich. Entstehen dort zu hohe Druckspannungen neigt das Blech an dieser Stelle zu Faltenbildung. Bekannt ist bisher, dass vor allem das Zusammenspiel von geometrischen Parametern über ein optimales „flexibles“ Profilierungsergebnis des Zielbauteils entscheidet.

## Prototypen und künftige Anwendungen

Anhand verschiedener Prototypen konnte die Machbarkeit des flexiblen Profilierens als auch die Weiterverarbeitung der Profile, z.B. durch anschließende Biegeoperationen gezeigt werden. Bild 5 zeigt eine Übersicht offener als auch geschlossener Bauteile mit veränderlichem Querschnitt. Das derzeit verwendete Prototypenwerkzeug ist für symmetrische Profilkonturen ausgelegt, da die Verfahrensbewegungen der beiden Gerüsthälften über Gewindespindeln gekoppelt sind. Asymmetrische Profile oder Bauteile mit einseitiger Querschnittsveränderung sind ebenso herstellbar.

Profile aus Stahl für zukünftige Anwendungen könnten z.B. auch in Form von Edelstahlssystemen zur Fassadenverkleidung architektonisch eingesetzt werden. Die Firma Corus Bausysteme widmet sich innovativen Dach- und Wandsystemen aus Aluminium. Schwerpunkt ist die Herstellung, der Vertrieb und die Vermarktung von Kalzip® X-Tail, einem industriell vorgefertigten Stehfalzsystem. Die zumeist direkt auf der Baustelle profilierten und maßgeschneiderten Platten werden dann direkt am Objekt montiert und zu Flächen verfalzt.

Im Stahlbau könnten in Zukunft auf diese Weise belastungsangepasste Träger kalt profiliert werden, die neben einem optimierten Materialeinsatz zudem noch bessere Oberflächeneigenschaften aufweisen als traditionell eingesetzte warmgewalzte Träger.

## Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Entwicklung des „flexiblen“ Profilierens ist es gelungen, die Produktion von profilartigen Bauteilen zu flexibilisieren. Die Weiterentwicklung der dazu notwendigen Anlagentechnologie für den kontinuierlichen Prozess (Bild 7) zählt zu den nächsten Schritten auf dem Weg zu einer industriellen Umsetzung des Verfahrens. Potentielle Anwender dieser Technologie sind gerne dazu aufgerufen, sich an dem Aufbau eines Anforderungsprofils für solche Produkte im Bereich des Bauwesens zu beteiligen.

## Danksagung an die DFG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens GR 1818/22-1 mit dem Thema „Auslegungsalgorithmen für „flexible“ Walzprofilierprozesse“.



## Das Fachgebiet für Produktionstechnik und Umformmaschinen

Das Fachgebiet für Produktionstechnik und Umformmaschinen an der TU Darmstadt befasst sich mit Fragestellungen hinsichtlich neuer Umformverfahren, der Weiterentwicklung von Maschinen- und Anlagentechnologien, aber auch der Optimierung tribologischer Systeme. Dabei soll im Rahmen der Grundlagenforschung ein Technologieverständnis vor allem neuer Prozesse und Prozessketten erarbeitet werden. In der vorindustriellen Forschung werden diese Ergebnisse dann in direkter Zusammenarbeit mit Industriepartnern weiterentwickelt.

### Fachgebietsleiter:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

### Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Arnd Zettler

zettler@ptu.tu-darmstadt.de

### Anschrift:

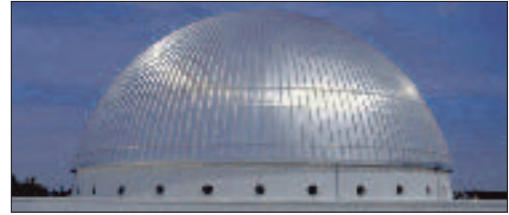
Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen

Petersenstraße 30 • 64287 Darmstadt

Telefon: 06151-16-3056 • Telefax: 06151-16-3021

www.ptu.tu-darmstadt.de

Bild 6:  
Kuppel eines mit Kalzip@-  
Profilen bedeckten Daches  
(Quelle: www.kalzip.de)



Roof system using the  
Kalzip@-profiles (Source:  
www.kalzip.de)

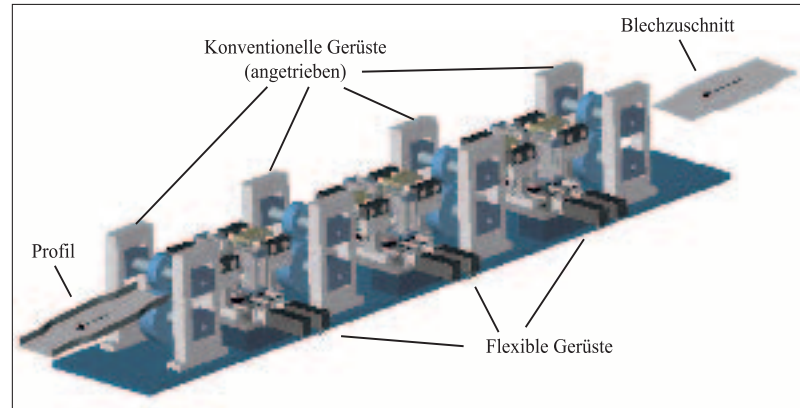


Bild 7:  
Mögliches Anlagenkonzept  
zum flexiblen Profilieren  
(Quelle: PtU)

Machine concept for flexible roll forming (Source: PtU)



## X-ray Image Intensifiers and Imaging Units

Whether for medical, industrial or scientific use, Siemens Vacuum Technology Division has OEM solutions available for a variety of applications. Benefit from the outstanding performance, higher life span, and better stability of products made by Siemens.

Share the experience of excellence with us.

For more information, please contact us:

Fax: +49 91 31 84-6022

E-mail: vacuumtechnology@siemens.com

www.siemens.com/vacuumtechnology

**SIEMENS**



# Sandwich am Bau

Jörg Lange/René Mertens

Sandwichplatten, bestehend aus zwei dünnen, metallischen Deckblechen, die durch einen leichten, schubweichen Kern miteinander verbunden sind, haben in den vergangenen Jahren im Bauwesen ein großes Einsatzfeld erobert. Durch den Verbund der Deckbleche mit der Kernschicht entsteht eine hohe Steifigkeit. Trotz des geringen Eigengewichts der Bauteile ist es möglich, mit ihnen erhebliche Lasten bei großen Stützweiten abzutragen. Ein weiterer Vorteil ist ihre sehr gute Wärmedämmung und die damit verbundene Energieeinsparmöglichkeit. Sandwichelemente erlauben eine schnelle Bauausführung, da sie die Funktionen „Tragen“, „Dichten“ und „Dämmen“ in einem Element vereinen und stellen somit ein ideales Bauteil für die Dach- und Wandbekleidung im Hochbau dar.

**Sandwichpanels in Construction** Sandwich panels made of very thin metal faces and a lightweight core gained a large share in the building market within recent years. A good adhesion between steel and core leads to a strong and stiff element. Despite the small weight these structural members can carry large loads over long spans. Another advantage is their very good thermal insulation leading to saving of energy. Sandwich panels allow a very fast erection because they unite load carrying, sealing, and insulating. Therefore they are very good elements for building construction.

Bild 1:  
Industriefassaden mit  
Sandwichelementen  
(© Hammersen Element-  
bau, Osnabrück)  
Industrial buildings using  
sandwich panels



## Das Bauteil

Die Deckbleche der Sandwichelemente bestehen meist aus Stahl und sind in der Regel zwischen ca. 0,4 und 1,0 mm dick. Als Kernwerkstoffe werden derzeit Polyurethanschaum, expandiertes bzw. extrudiertes Polystyrol oder Mineralwolle verwendet. Mit diesen Werkstoffen können Elemente mit bis zu 240 mm Dicke hergestellt werden (Bilder 2 und 4), was große Spannweiten ermöglicht und hervorragende Wärmedämmeigenschaften ergibt. Für Fassadenelemente mit besonders hohen Anforderungen an die Ebenheit werden Waben aus Aluminium (sogenannte Honeycombs) eingesetzt. Phenolharzschäume und Schaumglas sind weitere mögliche Kernmaterialien, die in Sandwichelemente eingebaut werden können.

## Tragverhalten

Die Tragfähigkeit eines Sandwichelements hängt stark vom guten Verbund der Deckschichten mit dem Kernmaterial ab. Stellt man sich vor, die Materialien seien nicht miteinander verbunden, so ist davon auszugehen, dass in diesem Zustand selbst das Eigengewicht nicht über größere Spannweiten abgetragen werden kann (Bild 3 links). Verbindet man die einzelnen Schichten jedoch untereinander, so ist es möglich, Lasten, z. B. aus Wind und Schnee auch über große Stützweiten in die Unterkonstruktion abzuleiten (Bild 3 rechts).

Sandwichelemente werden mit glatten, bzw. leicht profilierten oder mit stark profilierten Deckblechen hergestellt (Bild 4). Während die leichte Profilierung primär optische Gründe hat – kleine, herstellungs- oder transportbedingte Unebenheiten werden dadurch nicht so leicht sichtbar – folgt die starke Profilierung aus der Beanspruchung [Koschade 2000].

Das Tragverhalten der nur leicht profilierten Sandwichelemente kann vereinfacht betrachtet werden. Es wird angenommen, dass die Biegesteifigkeit des Elements allein von den Deckblechen bestimmt wird. Aufgrund der geringen Profilierung und der geringen Dicke ist die Eigenbiegesteifigkeit der Deckbleche gering gegenüber der Steifigkeit, die aus dem Abstand der Schwerachsen resultiert. Die Eigenbiegesteifigkeit wird daher bei den Elementen vernachlässigt. Die Schubsteifigkeit wird über den Kern erzeugt. Der Kern ist allerdings so weich, dass bei der Ermittlung von Schnittgrößen und Verformungen die Schubsteifigkeit, entgegen der im Bauwesen meist möglichen Näherung, nicht vernachlässigt werden kann. Darüber hinaus entzieht sich das Kernmaterial unter Belastung der Beanspruchung (Kriechen).

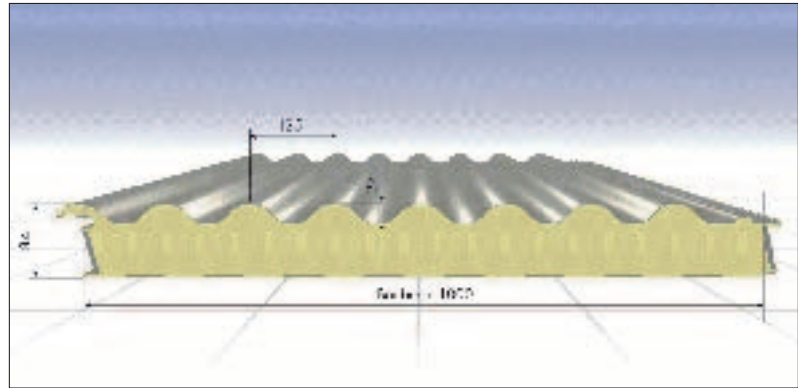


Bild 2:  
Sandwichelement  
Sandwich panel

Daher müssen Sandwichelemente, die einer ständig wirkenden Belastung (bei Dachelementen z.B. das Eigengewicht) unterliegen, mit mindestens einer biegesteifen Deckschicht versehen sein. Nur dann ist sichergestellt, dass ihre Verformungen nicht unendlich groß werden, da sich die ständig wirkenden Lastanteile in die profilierte Deckschicht umlagern. Nur die kurzzeitig wirkenden Beanspruchungen (z.B. Wind oder Schnee) werden dann noch über die Sandwichwirkung abgetragen. Werden ständig wirkende Lasten (z.B. Photovoltaikanlagen, Klimageräte oder Werbetafeln) auf Sandwichelemente aufgesetzt, ist das Kriechverhalten des Elements zu berücksichtigen [Jungbluth 1986].

Werden Bauteile auf Druck beansprucht, reagieren sie durch ein Ausweichen aus der Belastungsebene heraus. Dieses Ausweichen kann progressiv oder schlagartig erfolgen. Beide Versagensarten treten im Sandwichbauteil auf.

Die Biegung wird (bei ebenen Deckblechen) durch ein Kräftepaar in den Deckschichten abgetragen. Es entsteht eine druck- und eine zugbeanspruchte Schicht.

Während für die Zugbeanspruchung die Streckgrenze maßgebend wird, versagt die gedrückte Schicht meist unter einer geringeren Spannung. Dieses Versagen stellt sich als schlagartiges, kurzweiliges Beulen dar und wird Knittern genannt. Es kann näherungsweise als Verzweigungsproblem betrachtet werden. Das Deckblech besitzt nicht nur seine Eigenbiegesteifigkeit als Widerstand, sondern wird auch durch die Bettung auf dem Kern gestützt. Die Bettung wird maßgeblich von der Zug- und Drucksteifigkeit des Kerns beeinflusst. Weiterhin spielt die Qualität der Klebung zwischen Deckblech und Kern eine wichtige Rolle.

Bild 3:  
Sandwichelement a) ohne Verbund b) mit Verbund der Deckschichten und dem Kernmaterial  
Sandwich panel a) without adhesion b) activating adhesion between metal facing and core

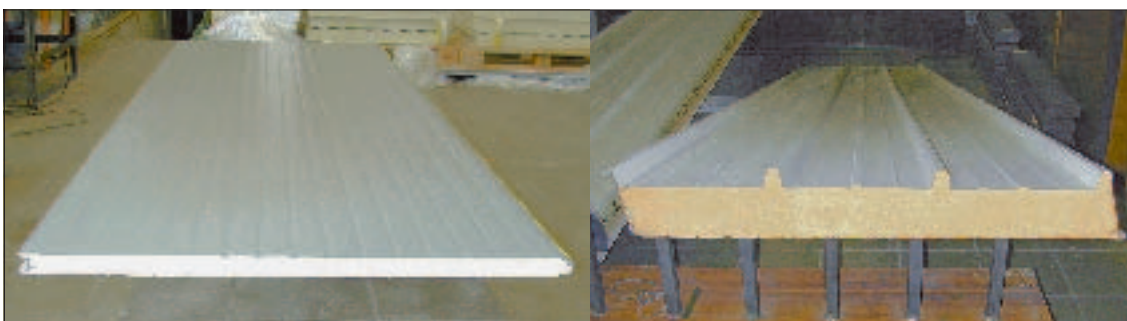
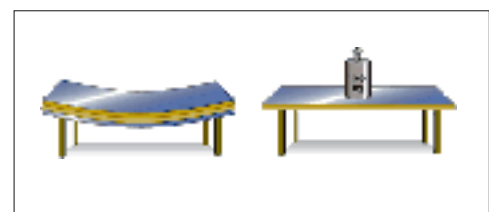


Bild 4:  
Sandwichelemente mit leicht profilierten (links) und mit stark profilierten Deckblechen (für Dachelemente, rechts)  
Lightly profiled sandwich panel (left) and profile for roof covering (right)

Die Druckspannung die zum Knittern führt, wird Knitterspannung genannt und experimentell bestimmt, da die Berechnungsmethoden wegen der komplexen Eigenschaften der üblichen Kernmaterialien noch nicht genau genug sind und die Eingangsparameter stark streuen [Lange/Böttcher 2005]. In „Einfeldträgerversuchen“ (Bild 5, siehe auch [ECCS 2000 und prEN 14509, 2004]) wird die Knitterspannung des Deckbleches ermittelt. Die Last wird bei diesem Experiment über vier Einzellasten so eingebracht, dass die Momenten- und Querkraftlinien ähnlich dem Verlauf bei einer Beanspruchung durch eine Gleichflächenlast sind. Die Beanspruchung kann auch durch ein Vakuum unter dem Element oder Luftkissen aufgebracht werden.

Bild 5:  
Einfeldträgerversuch:  
Versuchsaufbau (links),  
Versagen durch Knittern  
des oberen Deckblechs  
(rechts)  
Test on simply supported  
panel (left), failure due to  
wrinkling (right)



## Temperaturbelastung im Sandwichbau

Die Temperaturbelastung ist ein wesentlicher Lastfall im Sandwichbau. Das Sandwichbauteil besitzt eine sehr gute Wärmedämmeigenschaft, wofür der integrierte Kern verantwortlich ist. Während auf der äußeren Deckschicht bei Sonneneinstrahlung bis zu 80°C gemessen werden können, herrschen auf der inneren, raumzugewandten Deckschicht gleichzeitig nur 25°C. Dieser große Temperaturunterschied erzeugt in Elementen mit leicht profilierten Deckschichten in statisch bestimmten Systemen keine Schnittgrößen, aber Krümmungen. Die Verbindungsmittel an den Lagern müssen die daraus entstehenden Verschiebungen aufnehmen können. Äußere

### Feuerwiderstandsklasse mit Pentan getriebenen Sandwichelementen für Dach und Fassade erreicht!

Fischer Profil in Netphen-Deuz ist das erste Unternehmen der Branche, das mit einem Pentan getriebenem Sandwichwandelement eine Feuerwiderstandsklasse erzielt hat.

Um bei einem Gebäude die Einstufung in feuerhemmend mit F30 (bei nichttragenden Aussenwänden auch W30) zu erfüllen, musste man bisher einen aufwendigen Wandaufbau oder Sandwichelemente mit Mineralwolle wählen.

Die neuen FischerFIREPROOF- Sandwichelemente werden jedoch mit einem Pentan getriebenen Schaumsystem hergestellt und sind dadurch um einiges leichter. Leichter im Gewicht (bis zu 30% Gewichtsersparnis gegenüber Mineralfaserelementen) und leichter in der Montage. Dadurch auch schneller und kostengünstiger für die Weiterverarbeiter (Verleger) zu verbauen.

Bisher war es nur möglich, bei Pentan getriebenen Sandwichwandelementen das Brandverhalten als Baustoff zu prüfen. Maximal war dabei die Baustoffklasse B1 (schwerentflammbar) nach DIN 4102-1 zu erreichen.

Feuerwiderstandsklassen waren bisher nur mit metallischen Bausystemen mit Wärmedämmungen aus Mineralfasern möglich.

Die intensive Entwicklungsarbeit von Fischer Profil und Bayer MaterialScience hat es jetzt ermöglicht, mit dem Schaumsystem "Baymer / Desmodur", als tragendes Dach die Klassifizierungskriterien von REI30 und als Vorhangfassade die Kriterien von EI30 nach DIN EN 13501-2 zu erfüllen.

Die Herleitung des Kurzzeichens "R" ist Résistance = Tragfähigkeit.

Das Kurzzeichen "E" bedeutet Étanchéité = Raumabschluss. Es wird geprüft, ob Abschlüsse während einer geforderten Zeit (E30 = 30 min) den Raumabschluss gewährleisten (kein Durchgang von Feuer und Rauch). Auf der dem Feuer abgekehrten Seite dürfen keine Flammen auftreten.

Die Klassifizierung "I" bedeutet Isolation = Wärmedämmung (unter Brandeinwirkung). Die Abschlüsse der Klasse EI30 müssen zusätzlich zum Raumabschluss (analog E 30) den Durchgang der Wärmestrahlung während der geforderten Zeitdauer verhindern. Dabei darf sich die Temperatur auf der dem Feuer abgekehrten Oberfläche während der Versuchsdauer im Mittel um nicht mehr als 140°C erhöhen.

Die DIN EN 13501-2-2:2003 (Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten-Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen) wird die bisher noch gültige DIN 4102-2:1977-09 (Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Bauteile-Begriffe, Anforderungen und Prüfungen) ablösen.

Die neuen FischerFIREPROOF- Sandwichelemente erzielten bei dieser Prüfung im Dach und in der Fassade die Einstufung in "feuerhemmend".

Damit wurden die positiven Merkmale von FischerTHERM Sandwichelementen wie: hervorragende Wärmedämmung, hohe Fugendichtheit durch DUO -Dichtung, geringes Gewicht, einfache Montierbarkeit, keine Wasseraufnahme um die Erzielung der bauaufsichtlichen Anforderung "feuerhemmend" erweitert.

Weitere Informationen erhalten Sie bei  
Fischer Profil GmbH • Marketing • Waldstraße 67 • 57250 Netphen  
Tel.: 0 27 37 / 5 08 - 206 • Fax: 0 27 37 / 5 08 - 49 206 • E-Mail: marketing@fischerprofil.de





Weltneuheit

**FISCHER  
PROFIL\***   
ELEMENTE FÜR'S BAUEN



**FischerFIREPROOF**

# Brandschutz leicht gemacht

Neu entwickelt von Fischer Profil: **FischerFIREPROOF**, das erste Pentan getriebene Brandschutz-Sandwichelement der Welt für Dach und Wand, mit Feuerwiderstandsklasse **REI30** bzw. **EI30!**, dies entspricht nach DIN EN 13501-2 der bauaufsichtlichen Anforderung „feuerhemmend“. Durch das geringere Gewicht<sup>1</sup> im Vergleich zu Mineralfaserelementen auch leichter in der Montage und dadurch schneller und kostengünstiger zu verbauen. Mit allen FischerTHERM Merkmalen: hervorragende Wärmedämmung, hohe Fugendichtheit durch DUO-Dichtung, keine Wasseraufnahme.

**FischerFIREPROOF** - macht jetzt den Brandschutz leicht!

**<sup>1</sup>bis zu 30% Gewichtsersparnis gegenüber Mineralfaserelementen**

Fischer Profil GmbH · Waldstraße 67 · D-57250 Netphen-Deuz  
Telefon 02737 508-0 · Fax 02737 508-118

E-Mail: [info@fischerprofil.de](mailto:info@fischerprofil.de) · <http://www.fischerprofil.de>

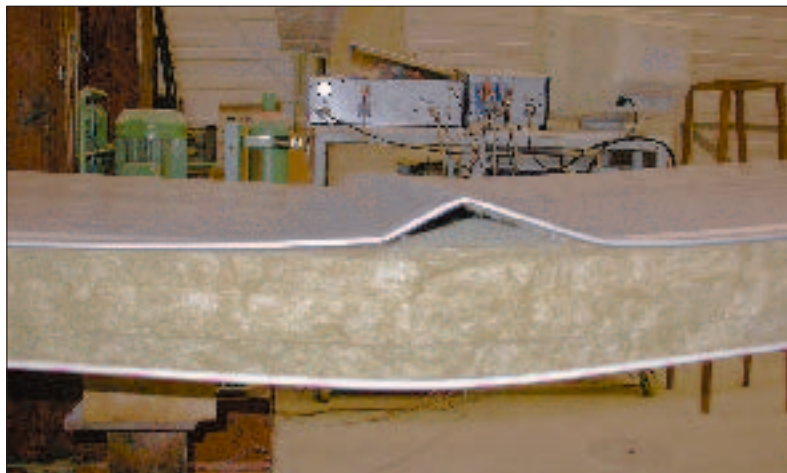
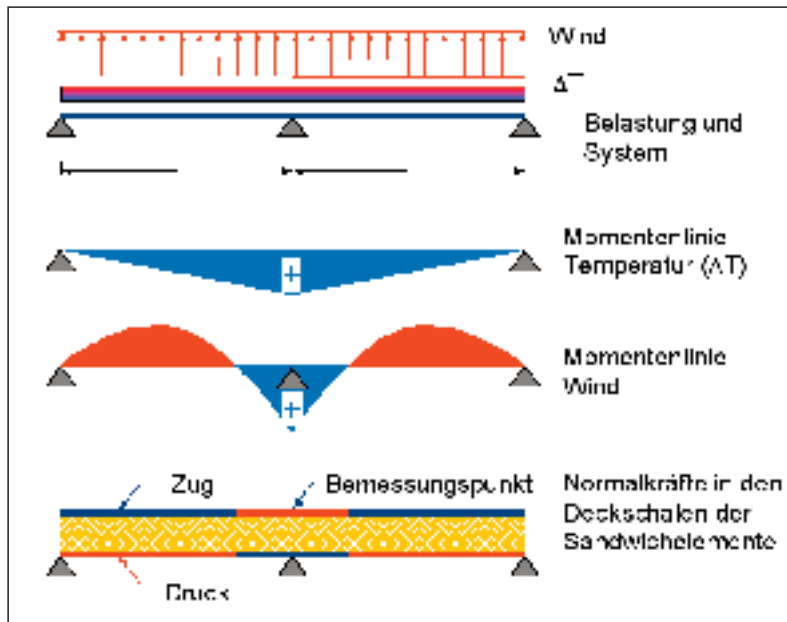
\*Ein Unternehmen von **Corus Distribution & Building Systems**

Schnittgrößen entstehen jedoch bei statisch unbestimmten Systemen. Die Spannungen aus dem Lastfall Temperatur erreichen im Zweifeld-System mehr als doppelt so große Werte wie der Lastfall Windsog! Die Spannungen aus Temperatur treten zusätzlich an ungünstiger Stelle im Sandwichelement auf. Aus dem Lastfall „Temperatur im Sommer“ am Zweifeld-System resultieren Zugkräfte in den Schrauben am Mittelaufleger und es werden Druckspannungen im äußeren Deckblech erzeugt.

Um das Verhalten des Bauteils im Temperaturlastfall besser beurteilen zu können, werden derzeit am Fachgebiet Stahlbau Sandwichelemente getestet, denen äußerlich eine Temperaturdifferenz aufgezogen wird. Der Versuchstand für diese Versuche befindet sich im Innern einer Klimakammer. Der

Bild 6:  
Superposition der Lastfälle  
Windsog und  $\Delta T$

Superposition of wind and  
temperature gradient



Bereich unter dem Prüfkörper, ein 4,00 m langes und 1,00 m breites Sandwichelement mit einer Nenndicke von 50 mm, ist wärmeisoliert. Wird die Klimakammer aufgeheizt, so erhöht sich die Temperatur der oberen Deckschicht. Die Temperatur der unteren Deckschicht bleibt nahezu konstant. Somit entsteht die gewünschte Temperaturdifferenz. Bei einer 2-Feld-Lagerung des Prüfelements entstehen an der Mittelauflagerstütze die maximalen Schnittgrößen (Bild 6). Bei einer Temperaturdifferenz von ca. 65-70 K versagen die bisher eingesetzten Sandwichelemente mit ebenen Deckschichten. Es entsteht eine Knitterfalte im oberen Deckblech im Bereich der Mittelauflagerstütze. Mit der Entwicklung, Auswertung und Interpretation dieser Versuche beschäftigt sich eine zur Zeit laufende Dissertation an unserem Institut.

## Delamination bei Sandwichelementen

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt betrifft die Delamination der Deckschichten von Sandwichelementen. Bereits bei ebenen Sandwichelementen kann es infolge Imperfektionen lokal zu leicht gekrümmten Deckschichten kommen, was bei schlechter Haftung zu Knitterversagen mit Delamination führt (Bild 7). Sind die Sandwichelemente planmäßig gekrümmt, was im Fassaden- und Dachbau (Tonnendach) zunehmend vorkommt, so entstehen großflächig Spannungen, die das Ablösen der gezogenen Deckschicht verursachen können, eine Versagensart, die dem Sandwichtbau bisher völlig fremd ist. Auch beim Versagen der gedrückten Deckschichten ist wegen der krümmungsbedingten Abtriebskräfte ein früheres Eintreten des Knitterns zu erwarten. Derzeit wird die Delamination der gezogenen Deckschichten untersucht, da weder verallgemeinerbare experimentelle Ergebnisse vorliegen, noch allgemeingültige Ansätze für eine Berechnung nach der FEM existieren.

Bild 7:  
Knitterfalte infolge Delamination der gedrückten  
oberen Deckschicht

Buckling of compressed top facing due to delamination

## Literatur

- ECCS- und CIB-Empfehlungen, European Recommendations for Sandwich Panels, Brüssel, Oktober 2000
- Jungbluth, Otto: Verbund- und Sandwichtragwerke. Springer, Berlin, Heidelberg 1986
- Koschade, Rolf: Die Sandwichbauweise. Ernst & Sohn, Berlin 2000
- Lange, Jörg; Böttcher, Marc: Analyse des Tragverhaltens von Sandwichelementen mit Öffnungen
- DCM Tagung „Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde“, Kassel 2005
- prEN 14509, Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten – werksmäßig hergestellte Produkte – Spezifikationen. DIN, Berlin, Oktober 2004

## VARIOTEC

Weißmarterstraße 3  
D-92318 Neumarkt i. d. Opf.  
Telefon: ++49 (0) 9181 / 69 46-0  
Telefax: ++49 (0) 9181 / 88 25  
E-mail: info@variotec.de  
Internet: www.variotec.de

**Vakuumgedämmte Bauelemente**  
**Passivhausbausysteme für Dach + Wand**  
**Passivhauszertifizierte Fenster**  
**Außen-, Spezial- und Funktionstüren**  
**All-inclusive Türen-Baukasten**  
**Sandwichelemente, Designsperrholz**



# TRIMO Brandschutzpaneele

**Trimo**  
Complete solutions

Innovationspreis BAU 2005  
in der Kategorie Produkte von  
hoher architektonischer Qualität

## WAND

Die erste frei wählbare Oberflächenprofilierung  
MultiVario THE FREEDOM TO DESIGN  
für die Brandschutzpaneele Standard und INVISIO  
in den Feuerwiderstandsklassen  
F30 bis F120 gemäss DIN 4102-2

## DACH

Das erste deutsche ABP  
(Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis)  
für ein Sandwich-Dachsystem  
in den Feuerwiderstandsklassen  
F30 bis F150 gemäss DIN 4102-2

**Trimex GmbH**, Leopold Str. 102, 80802 München, T: 089 / 34 00 50, F: 089 / 34 00 51  
www.trimex-online.de, info@trimex-online.de, www.trimo.de, info@trimo.de

### Fachgebiet Stahlbau im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie

Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange ist Leiter, Dipl.-Ing. René Mertens ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachgebiets Stahlbau im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie an der TU Darmstadt. Neben klassischen Fragen des konstruktiven Stahlbaus (Verbindungen, Stabilität) stehen die Themen Stahlleichtbau (inkl. Sandwichelemente) und Brandschutz im Zentrum der Forschung. Prof. Lange ist u.a. Vorsitzender des Arbeitsausschusses „Cold-formed thin-walled sheet steel in buildings“ der Europäischen Konvention für Stahlbau und Vorsitzender des DIN-Spiegelausschusses zur EN 14509 „Sandwichelemente“.

Das Fachgebiet verfügt über ein Labor, in dem statische und dynamische Versuche an Bauwerkskomponenten vorgenommen werden. Hierbei können Einzelbeanspruchungen bis zu 5000 kN aufgebracht werden. Weiterhin können in einer Klimakammer Bauteile Temperatur- und Feuchtewechseln ausgesetzt werden.

#### Anschrift:

Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik  
Petersenstraße 12 • 64287 Darmstadt  
Telefon: 06151/16-2145 • Telefax: 06151/16-3245  
www.stahlbau.tu-darmstadt.de



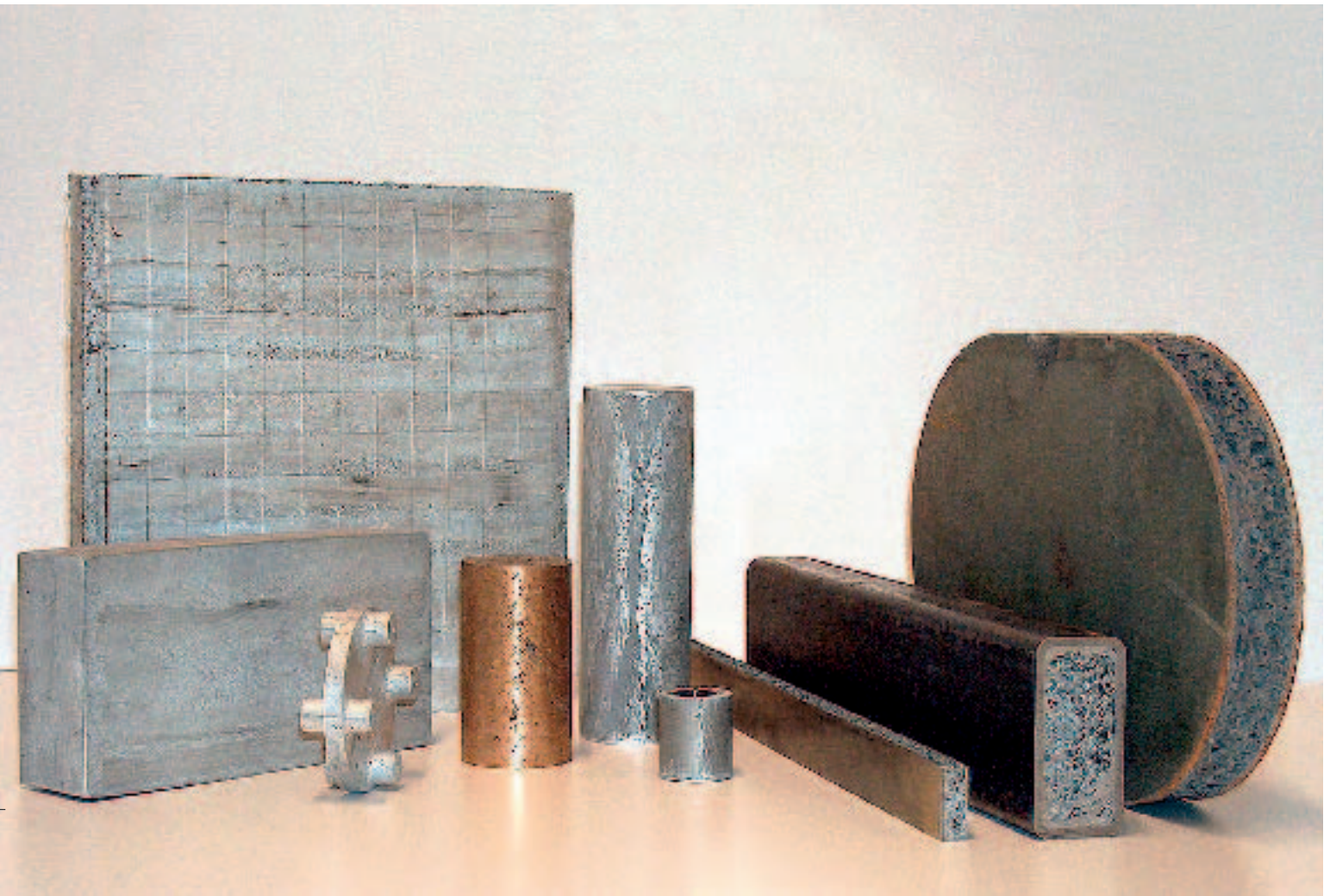
eintauchen in  
neue Dimensionen



Vakuumgedämmte Bauelemente  
Passivhauszertifizierte Fenster  
Außen-, Spezial- und Funktionstüren  
All-inclusive Türen-Baukasten  
Sandwichelemente  
Designsperrholz

**VARIOTEC**

VARIOTEC GmbH & Co. KG  
Weißmarterstraße 3  
D-92318 Neumarkt i. d. Opf.  
Telefon: ++49 (0) 9181 / 69 46-0  
Telefax: ++49 (0) 9181 / 88 25  
E-mail: info@variotec.de  
Internet: www.variotec.de



# Metallische Schäume

Dietmar Gross

Es wird gezeigt, wie sich das makroskopische mechanische Verhalten offenerporiger metallischer Schäume aus seinen mikroskopischen geometrischen und werkstoffmechanischen Eigenschaften durch geeignete Modellierung und numerische Simulation bestimmen lässt. Als Beispiel hierzu wird das Schädigungs-, Bruch- und Rissfortschrittsverhalten untersucht.

**Metallic foams** It is shown how the macroscopic mechanical behaviour of open cell metallic foams can be determined from its microscopic geometrical and material properties by appropriate modelling and numerical simulation. As an example the damage, fracture and crack growth behaviour is investigated.



## Einführung

Offenporige metallische Schäume sind hochporöse Materialien mit einem Porenvolumenanteil um die 90% und mehr, die eine schwammartige Mikrostruktur aufweisen (Bild 1). Typischerweise bestehen diese Materialien aus Aluminiumlegierungen, doch lassen sich heute auch viele andere Metalle „schäumen“. Metallische Schäume zeichnen sich durch ihre geringe Dichte aus, die mit einer Reihe anderer wünschenswerter Eigenschaften verbunden ist. Dazu gehören insbesondere die hohe Steifigkeit aber auch das große Deformations- und Energieabsorptionsvermögen, die guten akustischen Eigenschaften sowie die Temperaturbeständigkeit [Ashby et al. 2000]. Die Fortschritte in der Herstellungstechnologie erlauben heute eine kostengünstige Produktion offener metallischer Schäume. Dies hat sie zu idealen Kandidaten für weite Anwendungsbereiche gemacht, bei denen die einzigartigen Eigenschaften dieser Leichtbaumaterialien genutzt werden können. Beispiele hierfür sind Stoßabsorber in der Automobilindustrie, Kerne von Sandwichpanels in der Luft- und Raumfahrt oder Wärmetauscher.

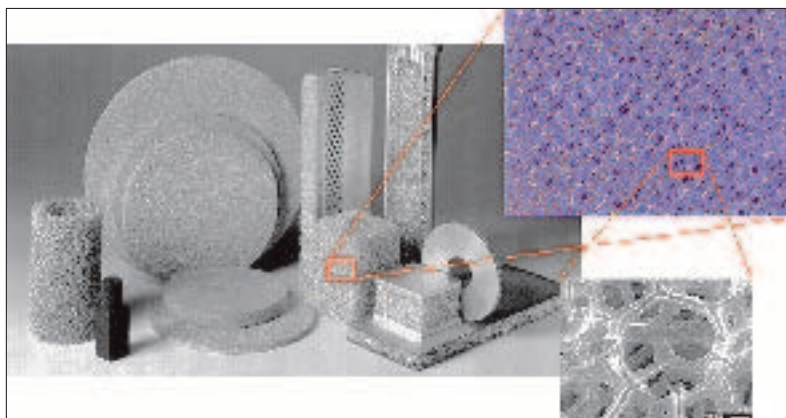
## Mikrostruktur und Modellierung

Die makroskopischen mechanischen Eigenschaften von Schäumen hängen nicht nur vom Porenvolumenanteil, sondern auch in starkem Maße von verschiedenen mikroskopischen Parametern wie Porengröße oder Stegdicke sowie den Eigenschaften des metallischen Grundwerkstoffes ab. Durch eine geeignete Wahl dieser Größen ist man dementsprechend in der Lage, das Material auf bestimmte Anwendungen hin zu optimieren. Für diesen Zweck eignet sich besonders die Modellierung und numerische Simulation, da ein experimentelles Vorgehen viel zu aufwändig, kostenintensiv und in bestimmten Fällen gar nicht möglich wäre.

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Mikrostruktur offener metallischer Schäume durch ein Netzwerk von in Knoten fest miteinander verbundenen Balken modellieren lässt. Letztere geben durch ihre geometrischen und werkstoffmechanischen Charakteristika die wesentlichen mikroskopischen Eigenschaften des Schaums sehr gut wieder. Auf der Basis dieses mikromechanischen Modells und seiner numerischen Umsetzung mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) können praktisch alle Fragen zum makroskopischen Verhalten des Schaums beantwortet werden. In diesem Sinn bildet die Kombination aus Modell und numerische Simulation ein virtuelles Labor. Seine Arbeitsweise sei an einem Beispiel aus der aktuellen Forschung gezeigt [Schmidt et al. 2003].

## Bruch und duktiles Risswachstum

Die Charakterisierung des Bruchs und des Risswachstums von metallischen Schäumen ist für sicherheitsrelevante Bauteile zwingend erforderlich. Wie Bild 2 zeigt, geht der makroskopische Bruchvorgang in diesen Werkstoffen mit einer Vielzahl von Mikrobrüchern einher. Zu solch einem Mikrobruch kommt es, wenn ein Steg bzw. Balken durch die lokale Beanspruchung infolge Zug, Druck oder Biegung soweit



plastisch deformiert wird, dass eine kritische Bruchspannung und Bruchenergie erreicht wird. Durch Mikrobruch wird der Schaum zunehmend geschädigt, was letztlich zu einem makroskopischen Risswachstum führt.

Zur realitätsnahen Untersuchung dieses Vorgangs können zwei- bzw. dreidimensionale FEM-Balkenetzwerke mit statistischem Aufbau verwendet werden (Bild 3 und 4), deren Geometrie- und Werkstoffparameter einschließlich der charakteristischen Bruch-

Bild 1: Komponenten aus offenporigen metallischen Schäumen und ihre Mikrostruktur (ERG Aerospace, Metal Foam Korea).

[Open cell metallic foam and its microstructure.](#)

Bild 2: Mikrobruch eines Steges (aus [van Merkerk et al. 2002]).

[Micro fracture of a bar.](#)

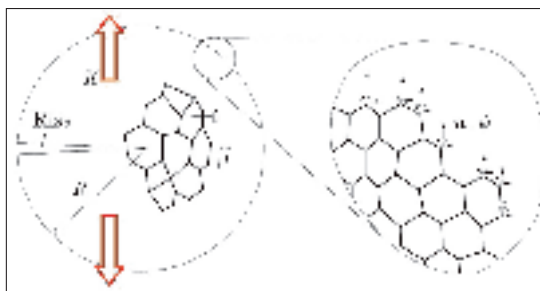
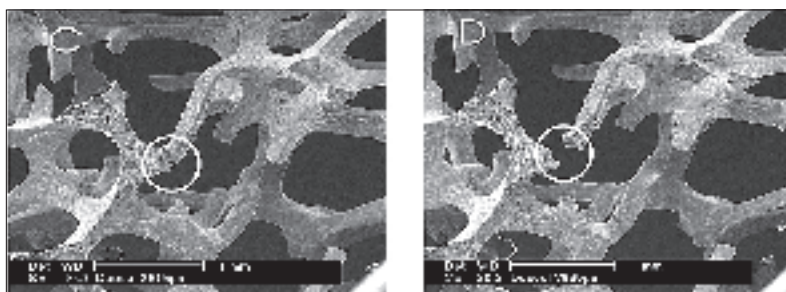


Bild 3: Schematisches 2D Modell der Mikrostruktur (Balkenlänge  $l$ , Balkendicke  $t$ ) mit einem makroskopischen Riss unter einer Belastung durch einen vorgegebenen  $\bar{K}$ -Faktor.

[Schematic 2D model of the microstructure \(bar length  \$l\$ , thickness  \$t\$ \) with a macroscopic crack loaded by a prescribed  \$\bar{K}\$ -factor.](#)

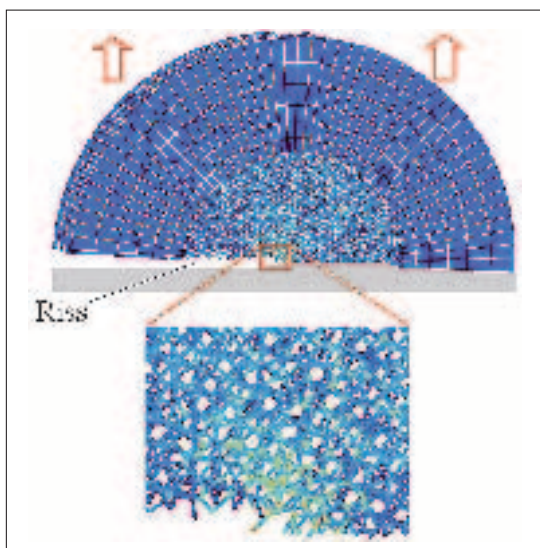


Bild 4: Dreidimensionales FEM Modell der Mikrostruktur mit vergrößertem Ausschnitt an der Risspitze (wegen der Symmetrie ist nur die obere Hälfte dargestellt).

[3D FEM model of the microstructure with enlarged cut-out at the crack tip \(on account of the symmetry only the upper half is displayed\).](#)

Bild 5:  
Schädigungsverteilung an der Risspitze: die Volumenbereiche mit einer Schädigung  $0 < D \leq 0,1$  und  $D > 0,1$  sind durch leere bzw. gefüllte Kreise markiert; die Risspitze befindet sich bei  $x, y = 0$ .

Damage distribution at the crack tip: volume regions with a damage  $0 < D \leq 0,1$  and  $D > 0,1$  are indicated by empty and filled circles, respectively; the crack tip is located at  $x, y = 0$ .

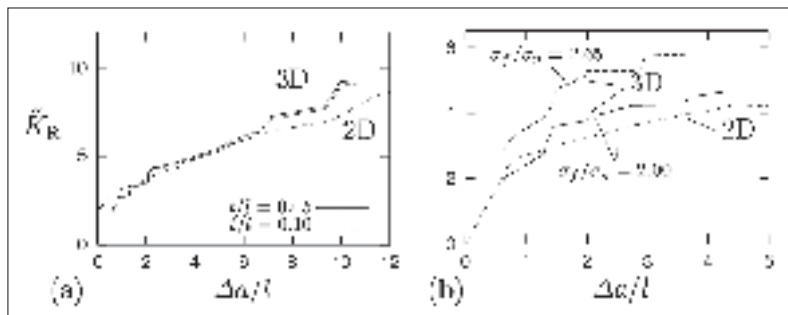
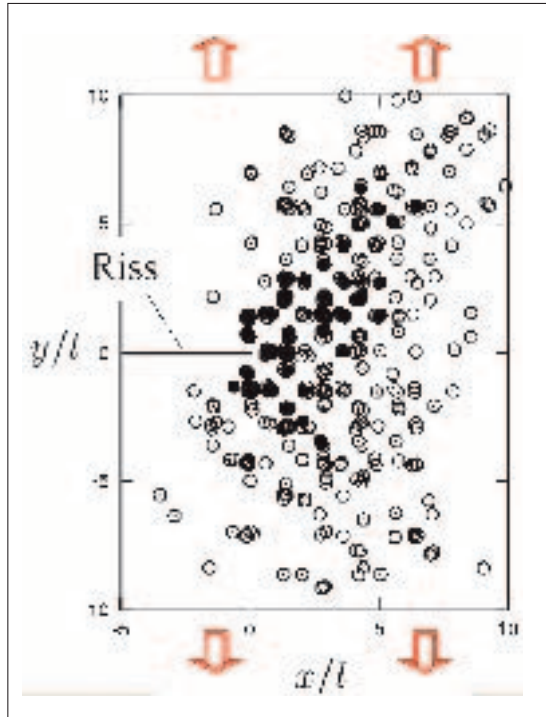


Bild 6:  
Vergleich von Risswiderstandskurven aus zwei- und dreidimensionalen Berechnungen: (a) Einfluss der relativen Dichte  $t/l$  ( $\bar{F}_0 = 50$ ), (b) Einfluss der Bruchspannung  $\sigma_f/\sigma_0$  ( $\bar{F}_0 = 10$ ).

Comparison of crack resistance curves from 2D and 3D calculations: (a) Influence of relative density  $t/l$  ( $\bar{F}_0 = 50$ ), (b) Dependence on fracture strength  $\sigma_f/\sigma_0$  ( $\bar{F}_0 = 10$ ).

parameter sich in breitem Bereich variieren lassen. Es ist dabei nicht erforderlich, die gesamte Struktur durch das Netzwerk abzubilden. Es reicht vielmehr aus, den hoch beanspruchten Bereich um die makroskopische Risspitze, in welchem sich der Schädigungs- und Bruchvorgang abspielt, durch das Netzwerk zu modellieren. Die weiter entfernten Bereiche können hingegen ohne Verlust an Genauigkeit durch ein Material mit den homogenisierten makroskopischen Eigenschaften des Schaums dargestellt werden. Die makroskopische Belastung des Risspitzenbereiches ist nicht völlig beliebig, sondern sie ist durch universelle Spannungs- bzw. Deformationsfelder gegeben. Diese sind bei einer symmetrischen Rissbeanspruchung eindeutig durch einen so genannten Spannungsintensitätsfaktor  $\bar{K}$  bestimmt, welcher kurz als  $\bar{K}$ -Faktor bezeichnet wird. Ein lokales Bruchereignis bei einer vorgegebenen Belastung, d.h. das Versagen eines Balkens, kann einfach durch die Herausnahme des betreffenden Balkenelementes aus dem FEM-Netz realisiert werden.

Da jeder einzelne Balken im FEM Modell aus einer Reihe von Elementen zusammengesetzt ist, ergeben sich im dreidimensionalen Fall aus numerischer Sicht sehr große diskrete Systeme. Wegen des elastisch-plastischen Verhaltens des Grundmaterials sowie der großen lokalen Deformationen vor dem Versagen sind diese stark nichtlinear, was einen hohen numerischen Aufwand mit sich bringt. Letzterer wird durch

spezielle Algorithmen, welche den lokalen Bruchvorgang eines Balkens beschreiben, noch zusätzlich erhöht.

Bild 5 zeigt als ein Detailergebnis einer dreidimensionalen Berechnung die Schädigungsverteilung an der Risspitze bei einer Belastung durch einen relativ niedrigen  $\bar{K}$ -Faktor, der noch zu keinem Rissfortschritt führt. Der Schädigungsparameter  $D$  kennzeichnet darin den Anteil der Balkenelemente, die im betreffenden Volumenbereich durch lokalen Bruch versagt haben.

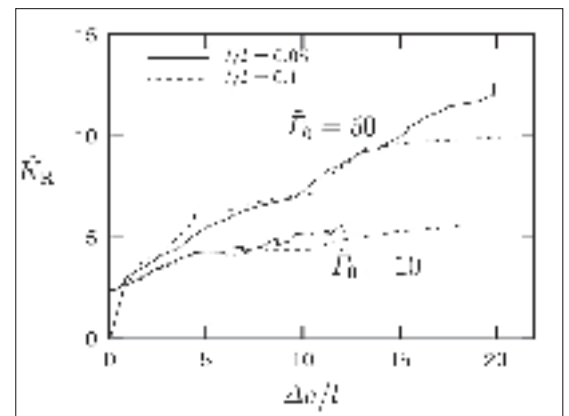
Eine der wichtigsten Kenngrößen für den makroskopischen Rissfortschritt ist der Risswiderstand  $\bar{K}_R$  des Materials. Die Stärke seines Anstiegs mit zunehmender Rissverlängerung  $\Delta a$  und sein Verlauf ist ein Qualitätsmerkmal für das Material. In Bild 6 sind dimensionslose Risswiderstandskurven aus zweidimensionalen und dreidimensionalen Berechnungen dargestellt, wobei  $t/l$  bzw.  $\sigma_f/\sigma_0$ , das Verhältnis von Balkendicke zu Balkenlänge bzw. von Bruchspannung zu Fließspannung des Grundmaterials sind. Man erkennt, dass eine zweidimensionale Analyse das makroskopische Verhalten des Werkstoffs in der Regel unterbewertet. Die Ergebnisse zeigen daneben, dass die Abhängigkeit von  $t/l$  gering, die von  $\sigma_f/\sigma_0$ , jedoch groß ist. Der starke Einfluss der charakteristischen Bruchenergie  $\bar{F}_0$  des Grundmaterials auf die Risswiderstandskurve ist schließlich in Bild 7 dargestellt. Bemerkenswert ist auch hier, dass der Einfluss des Parameters  $t/l$ , durch den die Dichte des Schaums charakterisiert ist, recht gering ist.

## Schlussbemerkungen

Neben der Untersuchung des Bruchverhaltens lassen sich noch eine Reihe anderer wichtiger makroskopischer Eigenschaften von metallischen Schäumen durch mikromechanische numerische Simulationen analysieren. Ein Beispiel hierfür ist die deformationsinduzierte plastische Anisotropie, welche sich insbesondere im Druckbereich bemerkbar macht. Ausführliche Untersuchungen hierzu, die auch von grundsätzlichem Interesse für die Formulierung der Plastizitätstheorie bei großen Deformationen sind, finden sich in [Schmidt, 2005].

Bild 7:  
Risswiderstandskurven für unterschiedliche Bruchenergien  $\bar{F}_0$  und relative Dichten  $t/l$ .

Crack resistance curves for different fracture energies  $\bar{F}_0$  and relative densities  $t/l$ .







## Fachgebiet Elastomechanik an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Elastomechanik befasst sich mit der mechanischen Analyse von Strukturen des Ingenieurwesens. Hierzu gehören klassische Bauteile wie Platten oder Schalen, wobei heute meist Strukturen aus modernen Verbundmaterialien interessieren. Weitere Schwerpunkte der Forschung bilden die Untersuchung von Mikrostrukturen aus der Mikrosystemtechnik und der Materialwissenschaft auf der Mikroskala bis hin zur Nanoskala. Im Vordergrund des Interesses stehen dabei die Mechanismen, die das makroskopische Deformations-, Schädigungs- und Versagensverhalten bis hin zum Bruch bestimmen. Untersucht werden sowohl statische als auch dynamische Prozesse wobei in vielen Fällen eine rein mechanische Betrachtung nicht ausreicht, sondern die Kopplung mit elektrischen oder chemischen Phänomenen berücksichtigt werden muss. Als Werkzeuge werden einerseits die Theorien und analytischen Verfahren der Festkörpermechanik angewendet und weiterentwickelt. In sehr breitem Maße kommen andererseits auch die verschiedensten numerischen Methoden wie die FEM, die BEM, Differenzenverfahren oder Monte-Carlo-Methoden zum Einsatz. Zahlreiche hochschulinterne, nationale sowie internationale Gemeinschaftsprojekte sowie Industrieprojekte belegen die Aktivitäten der Arbeitsgruppe.

### Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Gross  
Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich 13  
Fachgebiet Elastomechanik  
Hochschulstraße 1  
64289 Darmstadt  
Tel.: 06151/16-2973  
Fax: 06151/16-301

## Messeprogramm 2006\*

<b>Ideenbörse Stuttgart</b>	<b>23.03. – 24.03.</b>
Fachmesse für Marketing, Kommunikation und Vertrieb mit Direktmarketing-Kongress	
<b>azubi- und studientage**</b>	<b>24.03. – 25.03.</b>
Die Messe für Ausbildung und Studium	
<b>LogiMAT**</b>	<b>28.03. – 30.03.</b>
Int. Fachmesse für Distribution, Material- und Informationsfluss	
<b>Invest PROFESSIONAL</b>	<b>31.03. – 01.04.</b>
Die Finanzmesse für das Business-to-Business Geschäft	
<b>Invest</b>	<b>31.03. – 02.04.</b>
Die Messe für institutionelle und private Anleger	
<b>Personal**</b>	<b>26.04. – 27.04.</b>
Fachmesse für Personalwesen	
<b>automotive testing EXPO**</b>	<b>09.05. – 11.05.</b>
Internationale Fachmesse für Test-, Prüf- und Entwicklungsverfahren in der Automobilindustrie	
<b>engine EXPO**</b>	<b>09.05. – 11.05.</b>
Internationale Fachmesse für Motorenkonstruktion, -technik und -komponenten	
<b>Crash Test EXPO**</b>	<b>09.05. – 11.05.</b>
Die führende Fachmesse für Test- und Prüfverfahren in der Automobilindustrie mit offenem Technologieforum	
<b>Vehicle Dynamics EXPO**</b>	<b>09.05. – 11.05.</b>
Internationale Messe und Konferenz für Fahrzeugdynamik und Komponenten	
<b>European Automotive Components EXPO**</b>	<b>09.05. – 11.05.</b>
The new and much needed annual, trade-only exhibition for automotive component suppliers targeting Europe.	
<b>GALVANICA</b>	<b>16.05. – 18.05.</b>
Fachmesse für innovative Oberflächentechnologien, Veredelung und Galvanotechnik	
<b>Mobility &amp; Business</b>	<b>17.05. – 19.05.</b>
Internationale Fachmesse für Geschäftsreisen, Fuhrpark und Mobile Kommunikation	
<b>AMB</b>	<b>19.09. – 23.09.</b>
Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung	
<b>CAT.PRO</b>	<b>19.09. – 23.09.</b>
Internationale Fachmesse für innovative Produktentwicklung, Daten- und Prozessmanagement	
<b>INNOtex</b>	<b>18.10. – 19.10.</b>
Denkendorfer Kolloquium, Beschichtung und Oberflächenfunktionalisierung von Technischen Textilien mit begleitender Foyerausstellung für innovative textile Verfahrenstechniken	
<b>VISION</b>	<b>07.11. – 09.11.</b>
Internationale Fachmesse für industrielle Bildverarbeitung und Identifikationstechnologien	
<b>NewCome</b>	<b>01.12. – 02.12.</b>
Messe und Kongress für Gründung, Expansion und Nachfolge	

### Literatur

- Ashby, M., A. Evans, N. Fleck, L. Gibson, J. Hutchinson, and N. Wadley: 2000, Metal foams - a design guide. Boston, USA: Butterworth, Heinemann.
- Schmidt, I., C. Richter and D. Gross: 2003, Ductile crack growth in metallic foams, in 'Deformation and Failure in Metallic Materials', Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics (10), eds.: K. Hutter and H. Baaser, 363-380, Springer, Heidelberg
- Schmidt, I.: 2005, Deformation-induced Anisotropy and Ductile Crack Growth in Metallic Foams. Habilitationsschrift, TU Darmstadt.
- van Merkerk, R. and PR. Onck: 2002, Internal Report, University of Groningen, Dept. of Applied Physics



# Beton und leichtes Bauen – ein Widerspruch?

Peter Gröbl/Marcus Rühl

Zur Ästhetik eines Ingenieurbauwerkes gehört auch eine gewisse Leichtigkeit im Erscheinungsbild. Dem Drang nach „immer höher“ und „immer weiter“ kann nur mit „immer leichter“ und „immer fester“ begegnet werden. Die Grenzen in den einzelnen Bauepochen wurden abgesteckt durch die jeweils verfügbaren Kenntnisse über Eigenschaften und Besonderheiten des Werkstoffes Beton und ihrer zielgerichteten Erzeugung einerseits sowie deren Berechnungsmethoden andererseits. Hierzu finden sich vielfältige Beispiele in der Baugeschichte. Angefangen hat es mit den Römern, die den Baustoff Beton schon kannten.

**Concrete and lightweight construction – an antagonism?** *Creating aesthetic structures is synonymic to the ease in appearance. The trying to create the "biggest" or the "highest" structure can only be faced by creating the "strongest" or the "easiest" structure. Borders in the building of this age were reached while reaching the knowledge of the used technology and design methods and the behaviour of the used concrete. There are a lot of examples in the building history confirming this. It began with the Romans, who already knew the basic material concrete.*



## Einführung

Beton wird häufig mit den Adjektiven schwer und massig assoziiert. Dieses Image hat er vorwiegend einer seiner besonderen Eigenschaften zu verdanken: Er kann am Ort der Verarbeitung zu monolithischen Baukörpern fast beliebiger Gestalt und Größe geformt werden. Dieser Umstand, der auch die Architektur des Expressionismus mit geprägt hat, mag von vielen Architekten auch später häufig eine größere Aufmerksamkeit erfahren haben als die leichte Gestaltung des Bauwerkes. Die Verknüpfung des Baustoffes Beton mit diesen Adjektiven beschreibt daher leider nicht seine Leistungsfähigkeit, sondern nur den falsch interpretierten Charakter des Baustoffes Beton. Wer weiß schon, dass das Pantheon in Rom aus (römischem) Beton besteht. Die Spannweite der Kuppel (ca. 43 m) ist erst mit der Jahrhunderthalle in Breslau (1911 - 1913) aus (neuzeitlichem) Beton mit einer Spannweite von 65 m übertroffen worden.

Beim Pantheon wurde diese einzigartige Leistung durch eine besondere Maßnahme erreicht. Es wurde Betone unterschiedlicher Rohdichten verwendet. So wurde ein „leichter Beton“ entwickelt, den wir heute als Leichtbeton bezeichnen. Mit zunehmender Kuppelhöhe wurde das Gewicht des Betons dadurch verringert, dass man immer leichteren Zuschlag verwendete. Weiterhin wurde eine Verringerung des Querschnittes mit zunehmender Kuppelhöhe vorgenommen, welcher dem Kraftfluss angepasst war. Ein geniales Konzept, das heute Bemessungsstandard ist. Mit Beginn der Entwicklung des Stahlbeton- und Spannbetonbaues in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts ist es gelungen, einen wesentlichen Nachteil des Betons gegenüber anderen Werkstoffen – seine relativ geringe Zugfestigkeit – dadurch zu kompensieren, auftretende Zugkräfte in der Konstruktion durch Bewehrung aufzunehmen. In jüngerer Zeit setzt man hierfür neben Fasern aus Stahl und Kunststoff auch Textilien ein.

**Was ist Beton?** Beton ist ein künstliches Gestein aus Zement, Betonzuschlag (Sand und Kies bzw. Splitt) und Wasser.

Die obige Definition des Werkstoffes Beton führt uns zu der Frage: Was ist unter „leichtem Bauen“ zu verstehen? Zweifelsohne ist das Gewicht des Baustoffes bei der Beantwortung der Frage nicht der entscheidende Parameter. Das Potenzial zum leichten Bauen liegt genau genommen in der Eigenschaftskombination von Gewicht, Festigkeit und Verformungsvermögen. Werden diese Werte für einen Baustoff konsequent optimiert und in einer Konstruktion durchgängig umgesetzt, so entsteht der Eindruck von „Leichtigkeit“.

## Der maßgeschneiderte Beton

Konstruktionswerkstoffe sind in der Regel durch Festigkeit, Rohdichte und Verformungsverhalten charakterisiert. Während sich die Rohdichte in relativ engen Grenzen bewegt, kann die Festigkeit in weiten Grenzen variieren. Beton hat im Gegensatz dazu die Dichte als einen weiteren Variationsparameter. Damit kann das Gewicht der Konstruktion gesteuert werden.

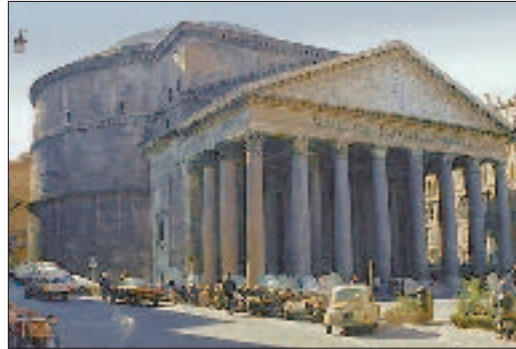


Bild 1:  
Pantheon  
– Eingang, Portalbereich  
Pantheon  
– Entrance, Portal-view

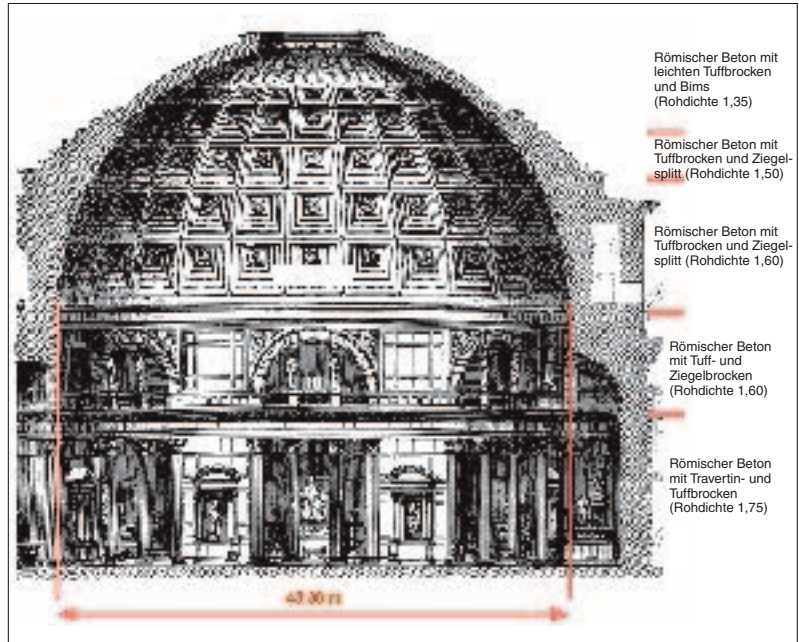


Bild 2:  
Schnitt  
Cross section



Bild 3:  
Jahrhunderthalle in Breslau, Innenansicht  
Jahrhunderthalle at Breslau, Interior view

Abbildung 1:  
Bandbreite von Festigkeit und Rohdichte bei Beton  
Spectrum of compressive strength and density of concrete

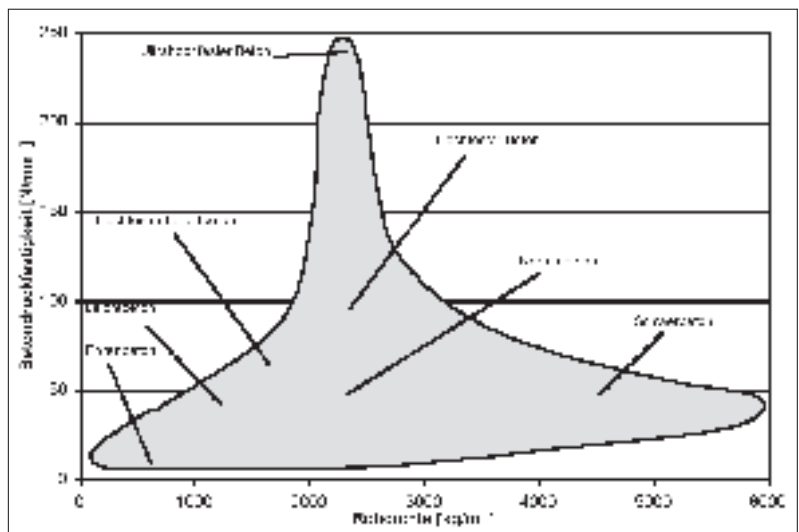




Bild 4:  
Schifflugschanze Oberst-  
dorf.  
Ski-jump Oberstdorf



Bild 5:  
Paketumschlaghalle  
München  
Storehouse Munich



Bild 6:  
Kern; Hubzustand mit teil-  
weiser Fassade; fertiger  
Zustand  
Core; under construction  
with partial fixed façade;  
Final state



Bild 7:  
Betonkanus  
Canoes made of concrete



Es fällt auf, dass die größten Festigkeiten im Bereich von Dichten zwischen 2,3 - 2,5 kg/m<sup>3</sup> auftreten. Die Dichte eines Betons wird überwiegend durch die Dichte des verwendeten Zuschlags gesteuert. Der Zuschlag ist in einer Matrix aus Zementstein eingebettet. Seine Dichte bewegt sich in relativ engen Grenzen. Dagegen kann seine Festigkeit in einem weiten Bereich gezielt verändert werden.

Mit dieser Beton-Technologie in Verbindung mit einer Bewehrung war es möglich, Konstruktionen zu verwirklichen, die den Anspruch auf leichtes Bauen im oben genannten Sinn erfüllen.

Bei der Konzernzentrale der BMW-Group, dem sogenannten „BMW-Vierzylinder“ in München, wurde das Motto „Leicht bauen“ in einer ganz besonderen innovativen Weise abgewandelt. Zur Verkürzung der Bauzeit, wurde zuerst der Kern des Hochhauses hergestellt. Anschließend wurden die Stockwerksdecken am Boden gefertigt und mit einer Hubvorrichtung in die richtige Höhenlage gebracht. Parallel zum Hubvorgang fand die Montage der Fassadenelemente statt. Um das Heben zu erleichtern und die auftretenden Zugkräfte (Hebekräfte) zu minimieren, wurde für die Decken Leichtbeton verwendet.

Ein besonders gelungenes Beispiel zum „Leichten Bauen“ ist das Betonkanu. Hier kommt man mit Wandstärken von 3 mm aus. Die Boote müssen ihre Tauglichkeit im Rahmen eines Wettkampfes unter Beweis stellen.

Ein wesentliches Ziel der technologischen Entwicklung in der Vergangenheit war der Frage gewidmet, wie Betone, welche sich durch möglichst geringe innere Spannungsspitzen im Bereich der Höchstlast auszeichnen, unter baupraktischen Bedingungen her-



gestellt werden können. Diese Entwicklung führte zu dem so genannten „Hochfesten Beton“, der auch als High Performance Concrete (HPC) bezeichnet wird. Er erreicht Druckfestigkeiten bis zu 120 N/mm<sup>2</sup>.

Der Vorteil eines solchen Betons liegt insbesondere darin, dass die Bauteilabmessungen gegenüber einem normalfesten Beton erheblich verringert werden können. So entstehen z.B. Stützen mit wesentlich größerer Schlankheit. Das Kunstmuseum in Bonn ist dafür ein sehr anschauliches Beispiel. Die von den Stützen getragene Platte scheint förmlich zu schweben.

Zur Beurteilung der konstruktiven Leistungsfähigkeit eines Baustoffes lässt sich die so genannte „Zerdrückhöhe“ heranziehen. Sie beschreibt die Höhe einer Säule aus dem betreffenden Konstruktionswerkstoff, bei der an der Aufstandsfläche aus der Belastung durch das Eigengewicht gerade die Spannung erreicht wird, welche der Festigkeit entspricht (Tabelle 1).



Bild 8:  
Kunstmuseum Bonn  
Museum of arts, Bonn

## Forschung

Aktuelle Forschungen am Fachgebiet Baustoffe, Bauphysik, Bauchemie befassen sich mit der Frage, wie die Festigkeit eines Betons noch weiter gesteigert werden kann. Es handelt sich dabei um den Ultrahochfesten Beton, auch Ultra-High-Performance-Concrete (UHPC) genannt. Angestrebt sind Festigkeiten dieses Konstruktionsbetons im Bauteil bis 200 N/mm<sup>2</sup>.

Dabei rückt ein besonderes Problem in den Vordergrund der Betrachtungen. Betonkonstruktionen sollen den Versagenszustand durch große Verformungen ankündigen. Da Beton im Vergleich zu Stahl ein sprödes Bruchverhalten zeigt, muss das Verformungsverhalten des Bauteils durch die Bemessung gesteuert werden. Trotzdem möchte man, dass ein

Versagen des Betons möglichst verformungsdominiert erfolgt. Ein verformungsdominiertes Bruchverhalten ist durch eine große Völligkeit der Spannungs-Dehnungs-Linie gekennzeichnet. Je größer die Festigkeit eines Betons ist, umso geringer ist aber die Völligkeit der Arbeitslinie. Ein Ziel der Forschung besteht darin, auch bei den angestrebten sehr hohen Festigkeiten die Völligkeit der Spannungs-Dehnungs-Linie nicht einzubüßen.

Diese Forschungsarbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultra – hochfestem Beton“ finanziert und vom Fachgebiet in Kooperation mit dem Fachgebiet Mesoskopische Systeme am Eduard-Zintl-Institut für Anorganische und Physikalische Chemie durchgeführt.

Werkstoff		Dichte $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Zerdrückhöhe h [m]
Stahl		7,60	250 - 500	3.290 - 6.580
Holz		0,4 bis 1,0	45 - 70	10.000 - 7.000
Glas		2,5	400 - 1.200	16.000 - 48.000
Beton	Normalbeton	2,4	25 - 60	1.040 - 2.500
	Hochfester Beton	2,4	75 - 120	3.130 - 5.000
	Leichtbeton	1,2 - 2,0	10 - 100	830 - 5.000
	UHPC	2,4	bis 200	bis 8.330

Tabelle 1:  
Zerdrückhöhen verschiedener Konstruktionswerkstoffe

## Fachgebiet Baustoffe, Bauphysik, Bauchemie an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Baustoffe, Bauphysik, Bauchemie ist am Institut für Massivbau im Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie angesiedelt. Im Zentrum der Forschung stehen die Dauerhaftigkeit von Werkstoffen und Konstruktionen, die Wiederverwertung mineralischer Abbruchmassen, die zerstörungsfreie Evaluierung von Bauwerken, die Bauwerkserhaltung und Instandsetzung und die Energieeffizienz von Gebäuden.

### Leiter des Fachgebietes:

Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl

### Anschrift:

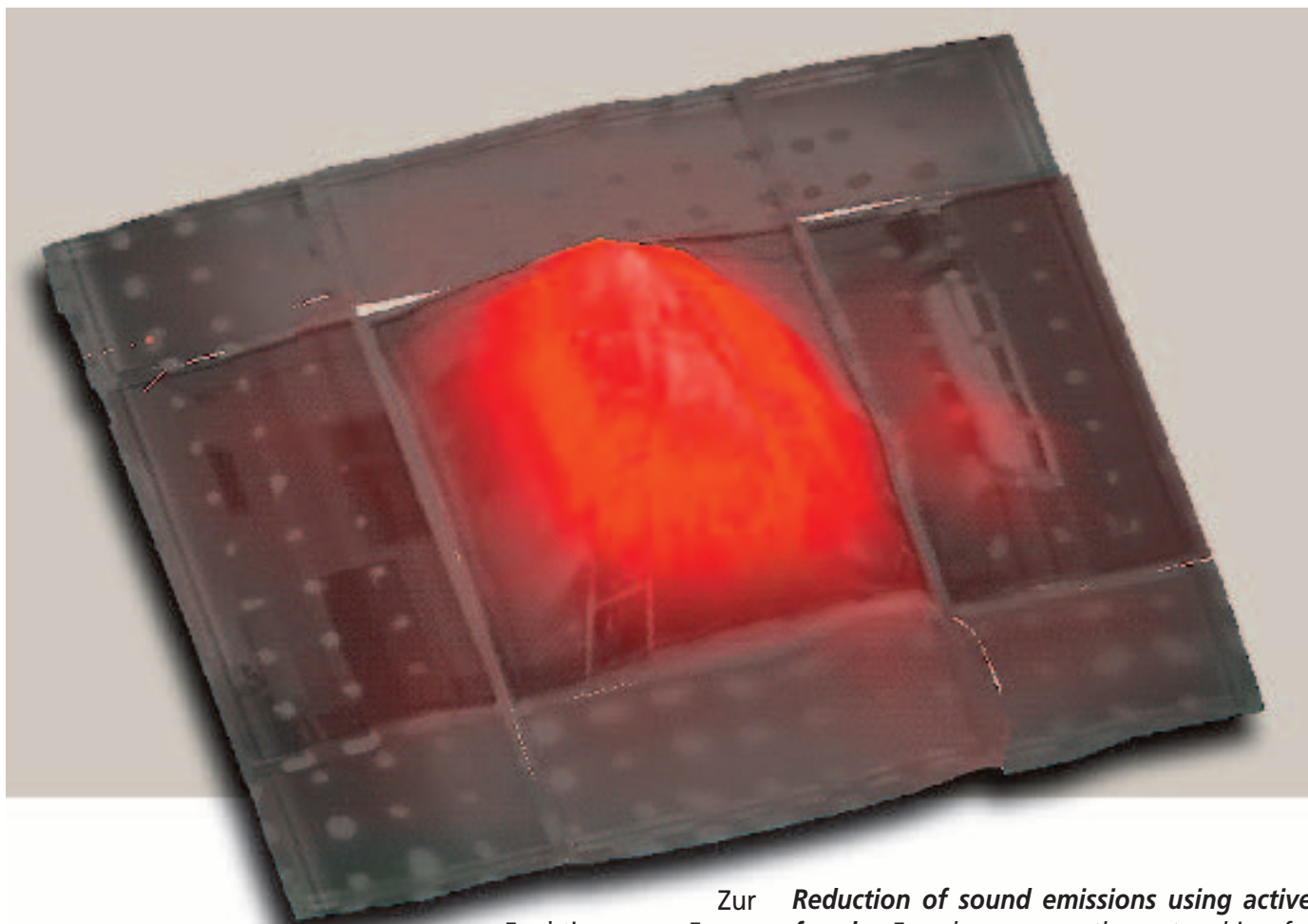
Institut für Massivbau  
Fachgebiet Baustoffe Bauphysik Bauchemie  
Petersenstraße 12 • 64287 Darmstadt  
Tel.: 06151/16-2244

E-Mail: gruebl@massivbau.tu-darmstadt.de

**Ansprechpartner:** Dr.-Ing. Marcus Rühl

# Lärminderung durch aktive Fassaden

Torsten Doll/Lothar Kurtze/Holger Hanselka/Rainer Storm



Zur Funktion von Fassaden als äußere Schutzhaut eines Gebäudes zählt auch die Reduktion von Umgebungsgeräuschen wie z.B. Straßenlärm. Klassische, passive Schallschutzmaßnahmen bedeuten eine Zunahme von Masse und Volumen. Eine Alternative im modernen Leichtbau sind aktive Maßnahmen.

In einem Akustikprüfstand an der TU Darmstadt wird eine Demonstratorfassade aus Doppelglasfenstern und Aluminiumpaneelen getestet. Durch „Active Structural Acoustic Control“ lässt sich mit piezokeramischen Aktuatoren an der Fassade eine Verringerung der Strukturschwingungen erzielen, die durch den eindringenden Luftschall verursacht wird. Im Versuch wurde bereits eine deutliche Schallreduktion im Innenraum erreicht. Dabei kommt eine adaptive Regelung zum Einsatz.

**Reduction of sound emissions using active façades** Façades serve as the outer skin of a building. This includes several functions including the reduction of the ambient noise such as road noise. Classical, passive methods of sound insulation result in an increase of the mass and volume of the façade. An alternative for the modern, light weight construction are active techniques.

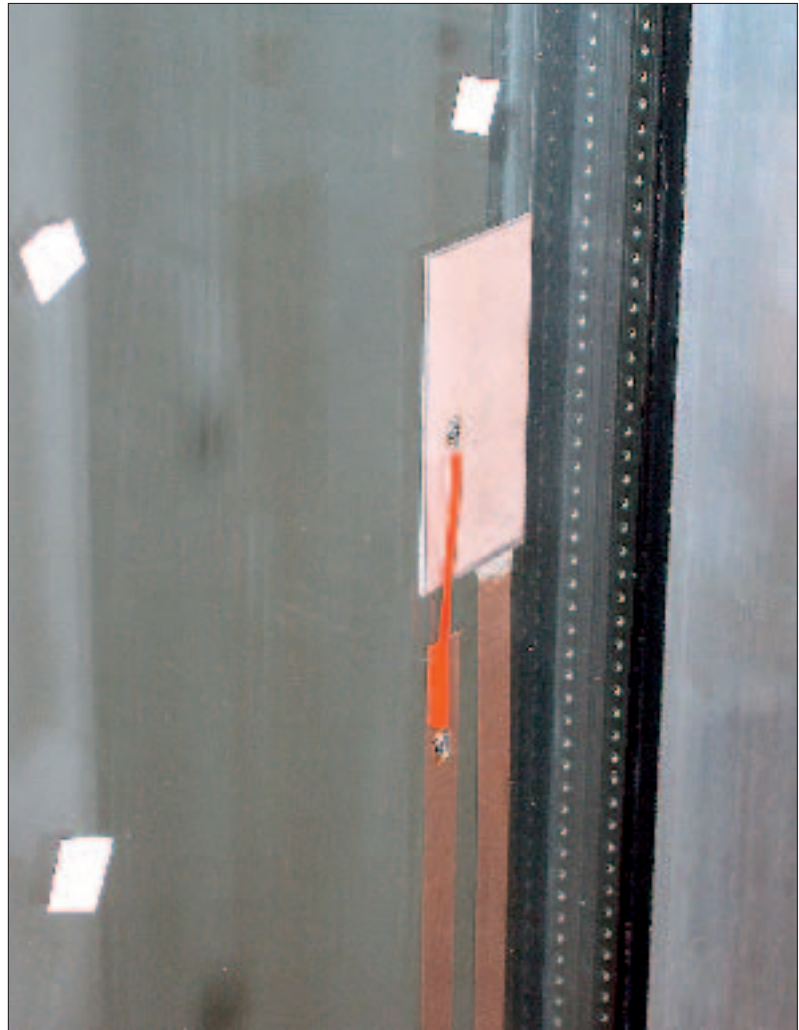
In the anechoic room at Technische Universität Darmstadt, a demonstrator façade element built out of double glassed windows and aluminium panels is undergoing several tests. Using techniques like "Active Structural Acoustic Control" and piezoelectric actuators on the façade, it is possible to reduce its structure borne noise caused by the airborne noise from the exterior. In an experiment with an adaptive control technique, a significant reduction of the airborne noise in the interior has been shown.



## Die aktive Fassade

In der heutigen Architektur plant man Fassaden als die Außenhaut eines Gebäudes, die eine Vielzahl von Eigenschaften erfüllen muss. Neben der Statik, Wind- und Niederschlagsbeständigkeit und dem an die Architektur angepassten Design ist die Reduktion der Umgebungsgeräusche eine bedeutende Eigenschaft. Da mittlerweile die Störungen durch Lärm als eine gravierende Umweltbelastung eingestuft sind, haben niedrige Schallimmissionen in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Dies ist insbesondere bei großen öffentlichen Gebäuden wie Krankenhäusern, Flughäfen, Konferenz-Zentren oder bei Hotels der Fall. Sie befinden sich häufig in einer lauten Umgebung an Hauptstraßen oder Bahnstrecken, bzw. sind durch Fluglärm beeinträchtigt. Eine akustische Abschirmung der Umgebungsgeräusche kann jedoch mit den klassischen, passiven Methoden oft nur schwer erreicht werden. Doppelt- oder dreifachverglaste Fenster und Dämmmaterialien sind in der Lage, Schallimmissionen oberhalb von etwa 1000 Hz effektiv zu reduzieren. Für den Einsatz bei niedrigeren Frequenzen muss man in der Regel die Masse dieser Komponenten deutlich erhöhen. Einerseits möchte man Fassadenelemente so leicht wie möglich bauen, da die Gewichtsreduktion auch die Baukosten reduziert und die Statik vereinfacht; andererseits bieten schwere und steife Elemente eine deutlich bessere akustische Abschirmung. Eine Lösungsmöglichkeit ist die Anwendung einer aktiven Technik wie beispielsweise „Active Structural Acoustic Control“ (ASAC). So kann man Aktuatoren aus multifunktionalen, piezoelektrischen Materialien an definierten Positionen auf die Struktur der Fassade aufbringen und sie nach der Methode der ASAC ansteuern (Bild1).

Der Einsatz dieser Technik erlaubt die Verwendung leichter Fassadenelemente bei einer zugleich stärkeren Abschwächung der eindringenden Schallwellen. Führt man gegenphasig Energie zu, so lassen sich die Moden der radialen Strukturschwingungen dämpfen. Mit einem angepassten, adaptiven Kontrollalgorithmus ist das System in der Lage, fast augenblicklich auf einfallende Schallfelder zu reagieren. Der dafür notwendige Regelkreis wird zunächst als theoretisches Modell entworfen, in dem verschiedene Algorithmen getestet werden. Der Erfolg der Simulation hängt in erster Linie von der Reproduzierbarkeit der Regelstrecke ab. Er wird aus dem bereits



im Voraus entwickelten Finite-Element-Modell (FE-Modell), das auf wenige Freiheitsgrade reduziert ist, abgeleitet. Das FE-Modell wiederum basiert auf ausführlichen Luft- und Körperschallmessungen an der realen Struktur.

Bild 1:  
Versuchsaufbau mit Piezoaktor auf einer Scheibe  
Experimental setup attached to a window with a piezoelectric actuator

## Akustische Messungen

Die genaue Kenntnis der Struktureigenschaften der einzelnen Fassadenelemente ist die Basis für die Entwicklung des aktiven Systems. Insbesondere die Identifikation der niedrigeren Eigenfrequenzen und der zugehörigen Eigenmoden der Komponenten ist für das Verfahren der ASAC von entscheidender Bedeu-

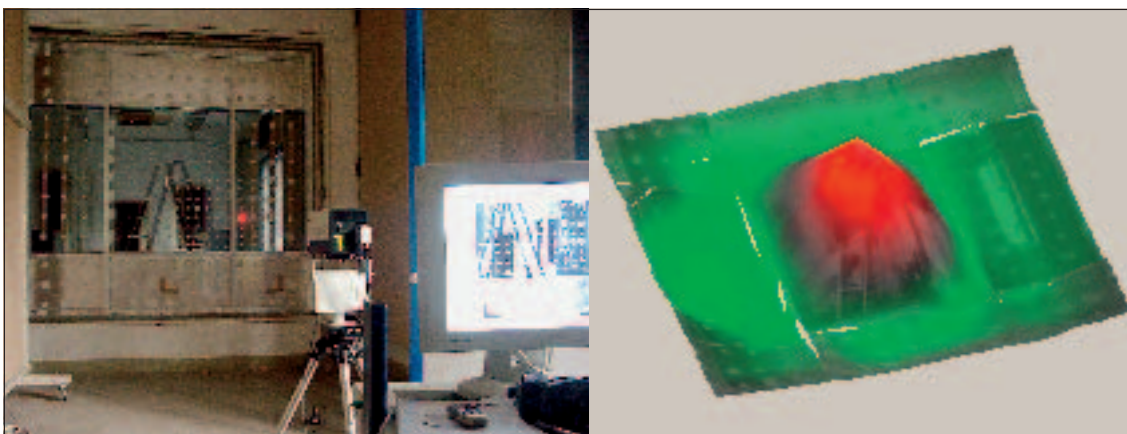


Bild 2:  
links: Fassadenelement im Prüfstand der Firma Schüco; rechts: Eigenform bei 19 Hz.

left: Façade element in the test rig of Schüco Int. KG  
right: Eigenmode at 19 Hz.

tung. Die notwendigen Parameter wurden im Rahmen von akustischen Messungen und Strukturuntersuchungen ermittelt. Zunächst wurde eine Referenzfassade im Prüfstand unseres Projektpartners, der Firma Schueco International KG in Bielefeld, detailliert vermessen. Dabei kamen Verfahren wie die Laservibrometrie und Messungen mit einem Mikrofonarray zum Einsatz [Bös/Kurtze 2004]. Für die 2,8 x 3,0 Meter große Fassade wurden Bauelemente aus Glas und Aluminium verwendet, wie sie üblicherweise im kommerziellen Fassadenbau eingesetzt werden. Im Einzelnen handelt es sich um 3 Doppelglasfenster und 6 Aluminium-Sandwichpaneele verschiedener Dimensionen (Bild 2).

Die Ergebnisse der Messungen an der Referenzfassade wurden zur Konstruktion eines Modells herangezogen, das zunächst zu Tests und später für Demonstrationszwecke verwendet wird. Dieser Demonstrator ist 1710 x 1260mm groß und wurde in den halbschalltoten Raum der AG Maschinenakustik an der TUD integriert (Bild 3). Dabei dient der Raum als „Empfangsraum“, der Raum auf der anderen Seite des Demonstrators fungiert bei Luftschallanregung als „Senderraum“. Für Körperschallmessungen kann dort alternativ ein Shaker an die Fassade angekoppelt werden, der sie direkt zu Schwingungen anregt. Auch der Demonstrator wurde zur Ermittlung der Eigenformen und -frequenzen ausführlich vermessen. Zusätzlich wurden auch die Randbedingungen der einzel-

Bild 3:  
Demonstrator an der TUD  
Demonstrator at TUD



nen Paneele ermittelt, die je nach Einspannung deutlich variieren. Auch die zwischen Demonstrator und der Prüfraumwand auftretenden Schwingungen sind nicht zu vernachlässigen. Diese Randbedingungen haben einen direkten Einfluss auf die Auslegung des aktiven Systems [Str. 1997].

Neben den Körperschallmessungen, mit denen u.a. das Verhalten der Struktur ermittelt wurde, ist auch deren Abstrahlverhalten in den Raum genau analysiert worden. Im Rahmen der Messungen wurden zusätzlich die Stellen im Empfangsraum ermittelt, an denen der Schalldruck je nach Frequenz die maximalen Werte erreicht. Es zeigt sich, dass nur ein Teil der Eigenfrequenzen der Struktur von akustischer Relevanz sind. Das hängt vor allem von den Systemeigenschaften ab (z.B. Geometrie oder Materialeigenschaften). Der Schall einiger Eigenfrequenzen wird gar nicht erst in das Fernfeld abgestrahlt. Insbesondere die niedrigen Eigenfrequenzen werden durch das menschliche Gehör kaum wahrgenommen. Es zeigte sich, dass die zwischen 200 und 300 Hz entstehenden Eigenformen die „lautesten“ Geräusche emittieren. Dieser Frequenzbereich ist entsprechend der Wichtigste für die aktive Schwingungsbeeinflussung.

## Platzierung der Aktoren

Wenn man das Abstrahlverhalten einer Struktur, wie eine Gebäudefassade, durch aktive Maßnahmen verbessern möchte, müssen die aktiven Elemente an Stellen auf oder in der Struktur angebracht werden, an denen ihr Einfluss auf das Systemverhalten möglichst groß ist. Dabei gilt, dass ein Aktor dann besonders gut platziert ist, wenn er eine zu minimierende Schwingform selbst sehr gut anregen kann. Allerdings ist zu beachten, dass die beste Aktorposition für die Beeinflussung einer Mode am Knotenpunkt einer anderen liegen kann. Da man aber mit möglichst wenigen Aktoren möglichst viele Eigenmoden erzeugen, bzw. später mit einer entsprechenden Regelung abschwächen möchte, muss man bei der Platzierung der Aktoren Kompromisse eingehen.

Optimale Aktorpositionen können mit Hilfe eines Finite-Elemente-Modells bestimmt werden. Im Modell wird die Lagerung der flächigen Elemente im Rahmen durch Federelemente an den Randknoten verwirklicht. Wie aus den Messungen bekannt ist, sind die flächigen Elemente des Demonstrators hauptsächlich für die Schallabstrahlung in den Raum verantwortlich. Entsprechend müssen die Aktoren auf diesen flächigen Strukturen angebracht werden, da dort der größte Einfluss auf die Eigenschwingformen ausgeübt werden kann. Bild 4 zeigt die Ergebnisse einer Modellrechnung für ein Fensterelement der Demonstratorfassade. Die rot dargestellten Spitzen sind die Stellen mit der besten Steuerbarkeit, d.h. die optimalen Aktorpositionen. Die blauen Zonen sind hingegen ungeeignet, da dort jeweils eine oder mehrere Knotenlinien von Schwingformen liegen.

Aufgrund der Projektanforderungen dürfen Aktoren und Sensoren des aktiven Systems nur im unmittelbaren Randbereich der flächigen Elemente angebracht werden, damit beispielsweise die Sicht durch ein Fenster möglichst wenig beeinträchtigt wird. Aber auch dort lassen sich gute Aktorpositionen finden, was auch experimentell nachgewiesen wurde.



## Übertragung auf die reale Struktur

Das Konzept wird nun aus dem Modell in eine Echtzeitumgebung übertragen und am Demonstrator weiter getestet. Mit der entsprechenden Hardware (Piezo-Elemente und Verstärker, verschiedenen Filter, Echtzeit DSP etc.) kann man die Aktuatoren und Sensoren direkt ansteuern und die Regelstrategien in der Praxis an der Demonstratorfassade testen. In diesem Artikel wurde nur die Schallabstrahlung der einzelnen Paneele durch die Luft betrachtet. Ein zweites Problem ist die Übertragung von Körperschall und seine aktive Dämpfung. Neben der Entwicklung des Reglers ist auch die Strukturintensität Gegenstand der aktuellen Forschung.

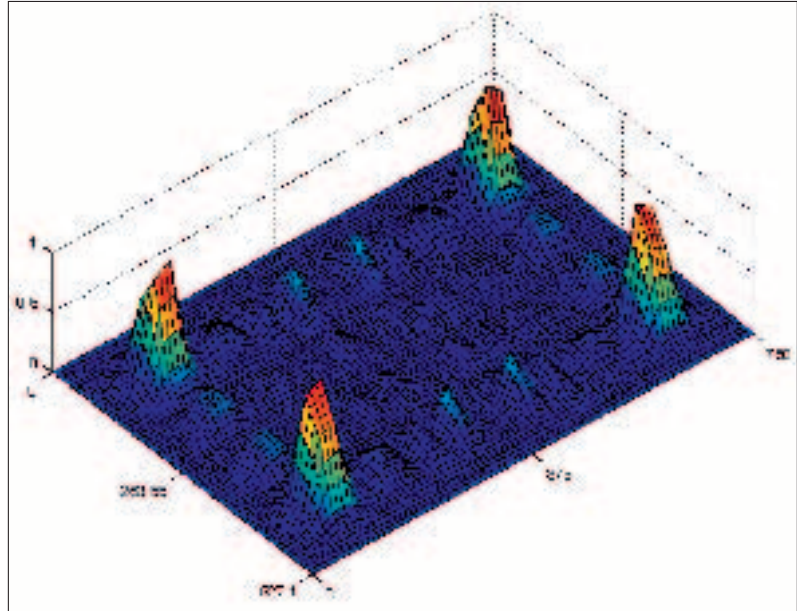


Bild 4:  
Steuerbarkeitsindex der  
modalen Dehnungen  
Modal strain indices

### Die Autoren

#### Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit im Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt,  
Magdalenenstraße 4, 64289 Darmstadt  
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF,  
Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt

#### Dipl.-Ing. Torsten Doll

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit im Maschinenbau, Technische Universität Darmstadt  
Magdalenenstraße 4, 64289 Darmstadt

#### Dr.-Ing. Rainer Storm

#### Dipl.-Ing. Lothar Kurtze

Arbeitsgruppe Maschinenakustik, Technische Universität Darmstadt  
Magdalenenstraße 4, 64289 Darmstadt

Dr.-Ing. Rainer Storm und Dipl.-Ing. Lothar Kurtze sind Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Maschinenakustik, die zum 1.11.2005 in das Fachgebiet „Systemzuverlässigkeit im Maschinenbau“ von Prof. Dr.-Ing. H. Hanselka integriert wurde. Die Entwicklung der Aktorik und der Regelung wird von Dipl.-Ing. Torsten Doll aus der Arbeitsgruppe Systemzuverlässigkeit betreut, mit der das Projekt bereits seit 2003 gemeinsam bearbeitet wird.

### Literatur

- [Bös/Kurtze 2004] J. Bös/L. Kurtze, 'Design and Application of a Low-Cost Microphone Array for Nearfield Acoustical Holography', CFA/DAGA '04, Strasbourg, 2004
- [Str. 1997] M. Strassberger, 'Aktive Schallreduktion durch digitale Zustandsregelungen mit Hilfe piezo-keramischer Aktoren', Mitteilungen aus dem Institut für Mechanik, Bochum, No. 111 (1997)

„Alle Dinge sind leicht,  
schwer ist nur die Kunst, dahin zu gelangen,  
wo sie es werden...“ [Adolf Muschg, 2002]



## Kunststoff in der Architektur

Stephan Nicolay/Johann Eisele

Kunststoff, was ist das eigentlich? Die Definitionen aus einschlägigen Fachlexika, meist an die Adressaten aus den Naturwissenschaften gerichtet, befriedigen uns nicht so recht. Die reine Beschreibung einer Molekülstruktur zeigt keinesfalls die wahren Möglichkeiten dieser Werkstoffe in Bezug auf das Bauen. Und wenn wir ehrlich sind, sind wir oft nicht in der Lage, diesen Definitionen inhaltlich wirklich zu folgen. Wir sind eben keine Materialwissenschaftler – sondern Architekten. Die vielfältigen Möglichkeiten der Kunststoffe werden meist nur in der industriellen Produktentwicklung als Herausforderung gesehen. Aber diese fortschrittlichen Materialtechnologien werden das Bauen und damit die Architektur in der nahen Zukunft – und zum Teil schon jetzt – sehr stark beeinflussen. Und das ist die Herausforderung der Architekten.

Arbeitsmodell einer transparenten Überdachungskonstruktion aus Kunststoffplatten

Work model of a transparent roof construction with plastics sheets

*Architecture and Plastics* Plastics, what is that actually? The definition given in encyclopaedias which relate to natural sciences, do not really satisfy us. The pure description of the molecular structure does not show the real potential of these materials in building area. And if we are honest we are not really able to pursue the contents of these definitions. We are not material scientists – but architects.

*The potential of plastics materials widely used in Industrial product development is seen as a challenge. But this advanced material technology will be applied more and more to buildings and their constructions and thus in architecture – partially now – but most certainly in the near future. And this is the architects challenge.*



Kunststoff, der polymere Werkstoff, eigentlich schon immer als halb- bzw. vollsynthetisch herstellbares Ersatzmaterial für «Traditionelle» verwendet, etablierte sich in relativ kurzer Zeit zu einem nicht mehr wegzudenkenden Material, welches uns in vielen Produkten des Alltäglichen schon längst umgibt. Industrielle Prozesse ermöglichen Ungeahntes, doch der Slogan »Jute statt Plastik« der vergangenen 70er Jahre und „... die Plastiktüte als Inbegriff der Wegwerfgesellschaft“ [Jensen, 1999] schwingt bei der Beurteilung der Kunststoffe, vor allem in stark traditionsgebundenen Sektoren – wie z.B. im Bauen – immer noch ein bisschen mit. So ist das nun mal mit dem Bauen.

Kunststoff ist hier z. Zt. meist nur auf »untergeordnete Helfer« in Fassadenelementen, haustechnischen Anlagen, Dämmungen, Abdichtungen usw. reduziert. Dabei sind die polymeren Werkstoffe mittlerweile leistungsfähiger als vergleichbare Materialien aus der «traditionellen» Bauindustrie. „...temperaturbeständig bis 1300°C, dreimal so hart wie Stahl, außerdem transparent wie Glas“ [Stattmann, 2003] und natürlich frei formbar. Dieses zeigt, dass in der Welt der Kunststoffe die Möglichkeit besteht, auf spezielle Anforderungen abgestimmt, konfektionierte Werkstoffe herzustellen, bei denen scheinbar krasse Gegensätze sich in einem Material vereinigen lassen.

Schon seit längerer Zeit besteht am Fachgebiet von Prof. Eisele des Fachbereichs Architektur der TU Darmstadt das Bestreben, die Anwendungsmöglichkeiten der polymeren Werkstoffe in der Architektur zu erweitern.

1999 entstanden im Rahmen eines studentischen Wettbewerbs, PLEXIDEE, in Kooperation mit der unter damaligem Namen firmierenden Röhm/Degussa-Hüls, mehrere Entwurfsbeiträge zur Umgestaltung des Hauptbahnhofsvorplatzes in Darmstadt. Der Hintergrund dieser „Ideen-Förderung mit PLEXIGLAS®“ [Johann Eisele, 1999] war, die vielen Vorteile dieses Materials zum Ausdruck zu bringen.

Es entstanden Beiträge, die sehr spielerisch und leicht mit Farbigkeit, Transparenz und vor allem mit der freien Formbarkeit des Kunststoffmaterials umgingen. Wenn man sich der Möglichkeiten dieses Materials bewusst ist, fängt man an, Architektur anders zu sehen.

Im Rahmen eines Gutachtens aus dem Jahre 2000 entstand eine gestalterische Modifizierung des Blockheizkraftwerks an der TU Darmstadt. Neben der Entwicklung einer Herstellungsmethode von Fassadenreliefs aus Beton wurden die Entrauchungsanlagen des Heizkraftwerkes mittels PLEXIGLAS® illuminiert in Szene gesetzt. Man kann hierbei den Standort des BHKWs an der Lichtwiese in Darmstadt fast wörtlich nehmen.

Die Entrauchungsanlage besteht aus insgesamt neun Schornsteinen, die bis zu einer Höhe von 20,00 m, standardmäßig aus doppelwandigen Stahlrohren bestehen. Drei davon bilden durch eine Erhöhung um weitere 12,00 m u.a. mit PLEXIGLAS®-Rohren, vor allem nachts, einen beeindruckenden Akzent in der Hauptzufahrtsstraße zum Uni-Campus. Die PLEXIGLAS®-Erhöhung der Schornsteinanlage wird vor allem des Nachts in der Außenummantelung in Zeitintervallen farblich wechselnd von innen her beleuchtet. Hierbei steht transparentes PLEXIGLAS® als Material zur Imagination einer Leichtigkeit profaner Schornsteine.

## Halbzeug ist auch nur halbfertig

In den meisten Fällen werden Kunststoffe über industriell gefertigte Halbzeuge (für eine Montage bereits vorbereitetes Bauteilelement) für das Bauen angeboten. Die Bauindustrie entwickelt diese für einen von ihnen favorisierten Kontext mit möglichst großen Marktchancen. So vorkonfektioniert für bestimmte bauliche Anwendungen (nach Aussage der Produzenten alles sehr einfach zu montieren) werden die Halbzeuge auf Messen den Entscheidungsträgern im Bauen angepriesen. Wir Architekten sollen nun ja auch damit bauen. Allerdings ist die Auswahl hierbei innerhalb der einzelnen Halbzeugprodukte meist nur auf Farbe und gewisse Abmessungen reduziert. Das ist definitiv zu wenig! Die Produkte könnten eigentlich viel mehr.

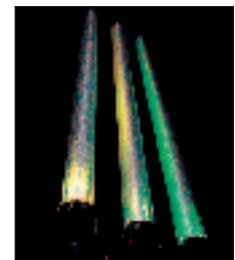
Genau an diesem Punkt setzten wir mit unserer Tätigkeit am Fachgebiet an. Zum einen möchten wir zeigen, dass bestehende Halbzeuge auch in weitere Anwendungen überführt werden können, und zum anderen bieten wir Mithilfe bei der Festlegung bestimmter Materialparameter – vor der Markteinführung – an. Welche Materialien bzw. daraus entwickelte Halbzeuge die Architektur benötigt, wissen eigentlich die Architekten selbst am besten.

## Überdachung aus Stegdoppelplatten

Momentan beschäftigen wir uns sehr intensiv mit transparenten Stegdoppelplatten (SDP) oder auch Hohlkammerplatten (siehe Abb. nächste Seite) aus Kunststoff, bestens bekannt als Halbzeug aus vielen Baumärkten. Diese werden fast immer ausschließlich als kostengünstiger Glaserersatz von den jeweiligen Herstellern angepriesen. Kunststoffprodukte wollen eben immer noch Ersatz sein.

Die marktführenden Werkstoffe Polycarbonat (PC), besser bekannt unter dem Produktamen Makrolon® oder aus Polymethylmethacrylat (PMMA), hier der Produktname PLEXIGLAS®, sollen in Form der SDP in einem neuen konstruktiven Kontext angewendet werden. Ziel dabei ist der Nachweis, dass die SDP

Blockheizkraftwerk an der Lichtwiese, Nachtaufnahme und Aufnahme tagsüber  
Heating-power station at the campus "Lichtwiese", night and daylight photograph



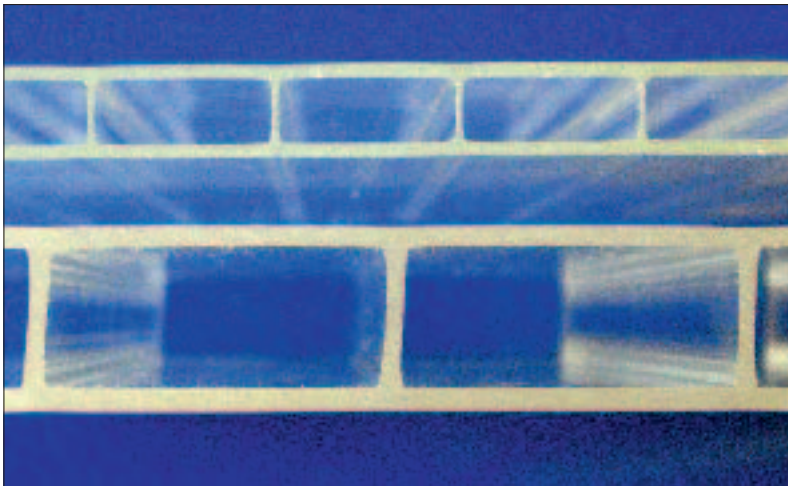
ohne größere Modifizierung, deutlich mehr leisten kann als bei bisherigen Anwendungen, wodurch sich auch das Marktpotenzial dieser Produktpalette mit minimalen Mitteln erweitern würde.

Wir sind mitten in der Entwicklung der Parameter einzelner Konstruktionskomponenten einer temporären transparenten Überdachungskonstruktion aus SDP. Für diese Konstruktion sind folgende Hauptanforderungen formuliert:

- Variable Ausdehnung in Grundfläche und Raumhöhe, um auf möglichst viele räumliche Forderungen zu reagieren.
- Hohe Transparenz und thermische Trennung zwischen Innen und Außen.
- Geringes Eigengewicht der gesamten Konstruktion sowie geringe Abmessung der Konstruktionskomponenten, zur verbesserten Lager- und Transportmöglichkeit.
- Aufbau ohne aufwendige Hilfsmittel; es soll möglichst kein Werkzeug zum Auf- bzw. Abbau benötigt werden.
- Verwendung bereits existierender industriell produzierter Halbzeuge zur kostengünstigen Realisierung einer relativ großen Überdachungsfläche.

Von unserer Seite ist die Materialität der Hauptkomponente SDP in PLEXIGLAS® geplant, da hier einige der beschriebenen Forderungen bereits im Material vorhanden sind. Der Grad der Transparenz wie auch eine mögliche Farbzigkeit der Platten ist praktisch frei wählbar. Außerdem ist dieser Kunststoff UV-bestän-

Querschnitt zweier transparenter Stegdoppelpplatten  
profile of two transparent  
double-skin sheets



dig und somit für einen dauerhaften Einsatz im Freien bestens geeignet. Darüber hinaus auch noch im Materialvergleich gegenüber Glas ca. zweimal leichter (und als SDP sogar noch deutlich mehr), schlagzäh gegen mechanische Belastungen und die SDP ist sehr gut räumlich kalt verformbar.

Geplant ist im Rahmen dieser Weiterentwicklung der SDP die Präsentation eines Prototyps als Ausstellungspavillon im Maßstab 1:1 am Design-Zentrum Hessen auf der Mathildenhöhe. Die geplante überdeckte Fläche des Pavillons beträgt ca. 18,00 m x 14,00 m, mit fast 880 m<sup>3</sup> umbautem Raum. Hierbei liegt das Eigengewicht der gesamten Überdachungskonstruktion bei ca. 3,0 t, die der einzelnen Überdeckungseinheiten bei 1,0 m Breite und einer Spannweite von 14,00 m zwischen den Auflagern, inkl. der ganzen Unterkonstruktion gerade mal 170 kg „... und das Ganze würde direkt vom Transporter mit max. 4 Personen ohne Werkzeug aufgebaut ...und ich sag' euch, das ist dann richtig leicht!“ [Nicolay, 2004]

## Fachgebiet Entwerfen und Baugestaltung an der TU Darmstadt

Die Beziehung von Material und Konstruktion ist die Grundlage, die die Gestalt im Bauen beeinflusst. Seit 2004 beschäftigt sich Dipl.-Ing. Stephan Nicolay intensiv mit neuen Anwendungsmöglichkeiten von polymeren Werkstoffen in der Architektur. Als Leiter eines FuE-Kooperationsprojektes werden am Werkstoffbeispiel PMMA (Polymethylmethacrylat), die daraus bestehenden Halbzeuge in einen neuen konstruktiven Kontext überführt.

Die Erkenntnisse hieraus werden im Rahmen eines Lehrauftrages am Fachbereich Architektur von Stephan Nicolay an die Studierenden des Fachgebiets von Prof. Eisele weitergegeben.

joeisele@eub.tu-darmstadt.de

## Literatur

- Dierk Jensen: Phantasie statt Plastik, Freitag, OST-WEST Wochenzeitung Nr. 32/99, Berlin, 6. Aug 1999
- Adolf Muschg: Die Herzensbildung an der Natur Goethe als dilettantischer Naturwissenschaftler oder die Zuversicht der Sinnlichkeit, Neue Zürcher Zeitung Nr. 195, Zürich CH, 24. Aug.2002
- Stephan Nicolay: Auszug aus der Präsentation der Überdachungskonstruktion mit SDP am TUD Fachgebiet Prof. Eisele, 2004
- Röhm, J. Eisele (Herausgeber): Transparenz + Mobilität, Dokumentation PLEXIDEE, TU Darmstadt, 1999
- Nicola Stattmann: Ultra light-Super Strong, Birkhäuser CH, 2003





# Besondere konstruktive Möglichkeiten der Faser-Kunststoff-Verbunde

Helmut Schürmann

Obschon noch ein sehr junger Werkstoff, so konnten sich die Faser-Kunststoff-Verbunde seit ihrer Einführung vor etwa 40 Jahren in einer Reihe von Branchen durchsetzen. In Bereichen der Spitzentechnologie wie Satelliten-, Flugzeug- und Hubschrauberbau, aber auch bei Sportgeräten für den Spitzensport – z.B. im Yacht- und Rennwagenbau – haben sie Anteile von 70% und mehr erreicht. Dies gelang, obwohl noch bei weitem nicht alle ihre Möglichkeiten ausgeschöpft wurden. Aufgrund ihres strukturellen Aufbaus bieten Faser-Kunststoff-Verbunde besondere, elegante konstruktive Möglichkeiten, die den Leichtbau-Vorsprung gegenüber konventionellen Werkstoffen vergrößern können. Einige dieser Möglichkeiten sollen beispielhaft vorgestellt werden.

***Some special design potentialities with advanced composites*** The advanced composites are a very young material. In spite of this they succeeded to establish widely in high tech areas such as satellite, airplane and helicopter constructions. The same is true for high tech sport articles such as racing yachts and formula racing cars. This success was possible in spite of implementing all the advantages this material offers. Due to their structural concept AC's are offering a lot of special design possibilities which can be used to increase the advantage over conventional materials. Some of these design potentialities will be demonstrated.

## Einleitung

Die wichtigsten Vorteile der Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) haben sich auch außerhalb der Technik, insbesondere durch Medienberichte zum Formel-Rennsport herumgesprochen. FKV gelten als herausragende Leichtbauwerkstoffe, die neben der im Vergleich zu Metallen ausgezeichneten Korrosionsbeständigkeit auch eine besonders hohe Energieaufnahme bei Crashbelastung bieten. Ihr Image als teure „High-Tech“-Werkstoffe hat sogar dazu geführt, dass die FKV-typische Gewebestruktur auf Folie gedruckt erhältlich ist, so dass man Bauteilen, die kein FKV enthalten, mittels dieser Dekorfolie zumindest den Anschein geben kann.

In der Technik werden Faser-Kunststoff-Verbunde derzeit als Substitutionswerkstoffe begriffen, d.h. bei einem gegebenen Strukturbauteil wird der bisherige Werkstoff einfach durch FKV ersetzt. Ein günstiger Umstand bei dieser direkten Substitution ist es, dass FKV bzgl. der Fügeverfahren unproblematisch ist. So lassen sich hochfeste Verbindungen zuverlässig durch Kleben, aber auch mittels Nieten und Schrauben herstellen. Da der strukturelle Aufbau bei einer Werkstoffsubstitution meist beibehalten wird, besteht der Gewinn allein in einer Gewichtsreduktion, die dem Dichteunterschied entspricht (Bild 1). Dieser Vorteil reicht häufig jedoch nicht aus, die höheren Werkstoffkosten zu kompensieren. Um die Chancen für einen FKV-Einsatz zu verbessern, sollten weitere Vorteile genutzt werden.

An erster Stelle empfiehlt es sich, zusätzlich die überlegenen Festigkeiten auszunutzen. Dies ist umso lohnenswerter, je ungleichförmiger der Spannungszustand ist. Im Extremfall einachsiger Zugbeanspruchung stehen Festigkeiten bis zu 4000 N/mm<sup>2</sup> zur Verfügung [Schürmann 2005].

Andere Vorteile erwachsen aus folgenden Möglichkeiten:

- aus der Nutzung gezielt einstellbarer elastischer Eigenschaften
- aus der Nutzung des schichtenweisen Aufbaus
- aus der Nutzung von gezielt eingebrachten Eigen-  
spannungen.

## Elastische Eigenschaften

Prinzipiell lassen sich die elastischen Eigenschaften auf dreierlei Weise einstellen:

- durch Wahl des Faseranteils im Verbund
- durch die Auswahl des Fasertyps
- durch die geschickte Kombination verschiedener Faserorientierungen.

Während die Wahl des Fasertyps sich recht einfach gestaltet, ist es bedeutend aufwändiger, die richtigen Faserorientierungen zu finden. Eine Beurteilung ist nur unter Einbeziehung geeigneter Bruchkriterien möglich. Sehr nützlich können jedoch einige Effekte sein, die sich so bei den klassischen, isotropen Konstruktionswerkstoffen nicht einstellen lassen.

Bekannt und schon vielfach in hochgenauen Messinstrumenten und im Satellitenbau genutzt ist die Möglichkeit, bei Kohlenstofffaser-Kunststoff über die Faserorientierungen zumindest in einer Richtung den thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu null einzustellen.

Dies gelingt auch bei der Querkontraktion. Setzt man durch geschickt gewählte Faserrichtungen bei einer durch Innendruck belasteten Rohrleitung die Längsdehnung zu null, so lassen sich die Kompensatoren einsparen.

Es gibt Überlegungen, die einstellbaren elastischen Kopplungen innerhalb eines Laminats zu nutzen. Beispielsweise ließe sich mittels Dehnungs-Schiebungskopplung bei Durchbiegung eines Flugzeugtragflügels gleichzeitig eine Verdrillung generieren, die die Anstellwinkel- und damit die Auftriebsverteilung überziehsicherer macht.

Wenig bekannt ist die Möglichkeit, die Werkstoffausnutzung bei torsionsbelasteten Rohren zu verbessern [Jakobi 1987]. Da bei einem isotropen Kreiszyylinder unter Torsion die Schubspannungen linear mit dem Durchmesser anwachsen, wird der Rohrrinnenbereich schlecht ausgenutzt. Stellt man über der Wanddicke mittels der Faserorientierung unterschiedliche Schubmodule ein, so lässt sich eine konstante Schubspannungsverteilung über dem Radius erreichen (Bild 2). Analog besteht die Möglichkeit, Spannungsspitzen abzubauen und die Spannungsverteilung zu gleichmäßigen, indem man in hochbelasteten Bereichen die Steifigkeiten senkt. Dies kann bei dickwandigen Hochdruckrohren geschehen, bei denen eine Spannungsüberhöhung auf dem Innenradius vorliegt. Reicht es nicht aus, die Steifigkeiten im Bereich des Innenradius durch die Faserorientierungen abzu-

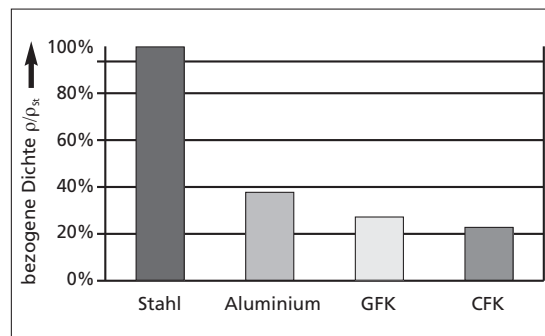


Bild 1: Abschätzung des Gewichtsvorteils von Faser-Kunststoff-Verbunden anhand eines Dichtevergleichs

Estimation of the weight advantage of advanced composites based on the comparison of the densities

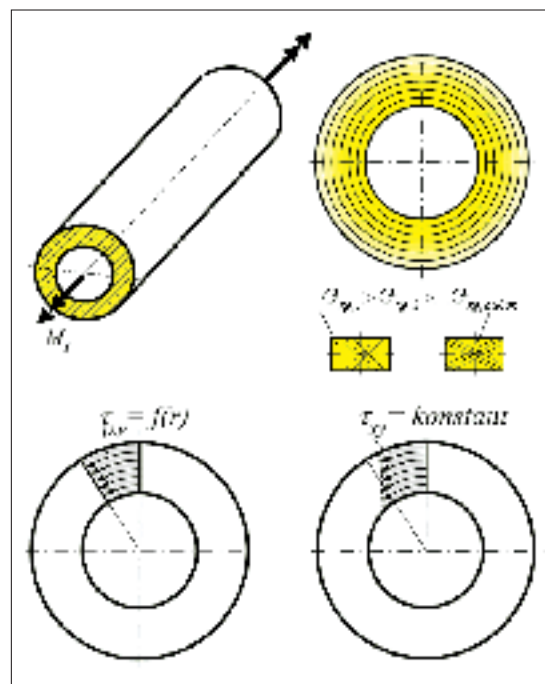


Bild 2: Einstellung einer konstanten Schubspannungsverteilung durch die gezielt eingestellte Reihenfolge der Schub-Steifigkeiten über dem Radius

Generating a homogeneous shear stress state by placing layers of definite shear stiffness in a row



mindern, so besteht zusätzlich die Möglichkeit, den benötigten Steifigkeitsgradienten durch einen hybriden Aufbau, also durch Kombination unterschiedlicher Fasern zu verwirklichen.

## Nutzung des schichtenweisen Aufbaus

Der Bezeichnung Laminat entsprechend besteht eine Faserverbundstruktur aus übereinander gestapelten Einzelschichten. Es bietet sich die Möglichkeit, die Schichtanzahl und die Schichtreihenfolge gezielt zu gestalten.

Der nahe liegende Ansatz besteht darin, die Anzahl der Schichten, und damit die Wanddicke leichtbaugerecht dem lokal herrschenden Spannungsverlauf anzupassen.

Ein Laminataufbau muss nicht zwingend mittensymmetrisch sein. So lassen sich z.B. bei Drehfedern für eine Drehrichtung mehr Einzelschichten vorsehen und damit in der bevorzugten Drehrichtung höhere Festigkeiten einstellen, als in der entgegen gesetzten, minder genutzten Drehrichtung.

Im Verein mit gezielten Faserorientierungen lässt sich eine Versagensreihenfolge, d.h. ein ausgesprochen gutmütiges Fail-Safe-Verhalten konstruieren. Besonders günstig ist es, wenn die schwächste Schicht an der Oberfläche platziert wird, so dass der Nutzer erkennen kann, wann Schädigungen eingetreten sind. Eine Variante ist es, hochzähe Faserschichten z.B. aus Aramidfasern einzubetten, die als Rissstopper wirksam werden und das Risswachstum in Nachbarschichten vollständig verhindern.

Es müssen nicht ausschließlich Faser-Kunststoff-Schichten gestapelt werden. Der Konstrukteur hat die Freiheit, auch Schichten aus Holz, Aluminium usw. mit einzufügen. Dünne Metallschichten eignen sich beispielsweise gut dazu, die Lochleibungsfestigkeit des Laminats bei Bolzenfügungen zu verbessern.

Insbesondere bei Biegebeanspruchung bietet der schichtenweise Aufbau verschiedene Optionen:

- Bei beulgefährdeten Strukturen lässt sich die Wanddicke leichtbauoptimal durch Hohlfasern niedriger Dichte steigern, die man in der Laminatmitte platziert.

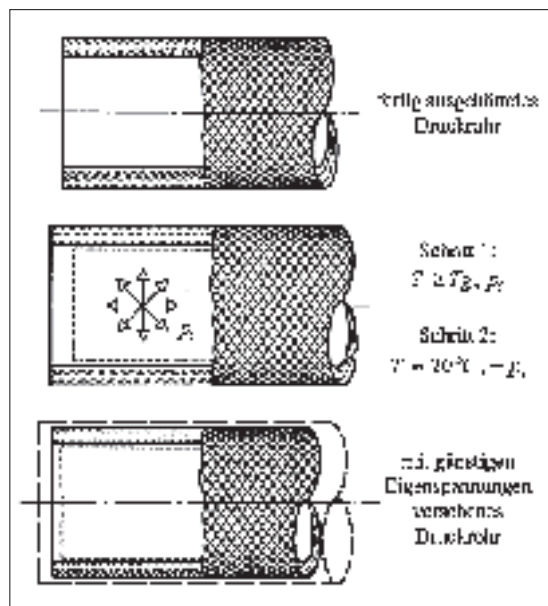


Bild 3:  
Einbringen eines günstigen  
Eigenspannungszustands in  
ein Druckrohr

Introducing positive  
internal stresses into  
a pressure pipe

- Ebenso kann man auf die unterschiedlichen Versagensausprägungen bei Zug und Druck reagieren. So ist es sinnvoll, auf der Zugseite hochzähe Matrixsysteme einzusetzen, während auf der Druckseite druckfeste, hartelastische Systeme zu bevorzugen sind.

- Es bietet sich auch die Chance zur Kostensenkung. Im Inneren – in den niedriger beanspruchten Bereichen – können preisgünstigere, damit meist aber auch minderfeste Fasern und Matrixharze verwendet werden.

Gängige Praxis ist es, metallische Blitzschutzgewebe und Antennen direkt im Laminat einzubetten. Integrierte Sensoren in gefährdeten Bereichen – z.B. Lichtleiter – zeigen Rissbildung an. Mittels einlaminiert Bragg-Sensoren lassen sich Dehnungen kontinuierlich mitschreiben.

## Gezielt Eigenspannungen nutzen

Wenig verbreitet ist die Möglichkeit – in Analogie zum Spannbeton – hohe Druckeigenspannungen in Laminaten einzubringen. Genutzt wird dabei eine besondere Eigenschaft der Kunststoffmatrices. Im hohen Temperaturbereich – oberhalb der so genannten Glasübergangstemperatur  $T_g$  – sinkt deren Steifigkeit auf ein Bruchteil ab. Ist die Faserstruktur so ausgelegt, dass sie als Netzwerk allein tragfähig ist, so kann man die FKV-Struktur auch bei  $T > T_g$  belasten. Die Last wird ausschließlich von den Fasern aufgenommen, da die Matrix so dehnweich ist, dass sie keine nennenswerten Spannungen auf sich zieht. Kühlt man bei Aufrechterhaltung der Last ab, so nimmt die Matrix wieder ihre hohe Steifigkeit an, trägt also die Entlastungskräfte mit. Auf diese Weise gerät sie unter Druckeigenspannungen. Die Fasern halten das Gleichgewicht durch Zug-Eigenspannungen (Bild 3). Die Rissbildungsgrenze lässt sich um bis zu 300% steigern.

## Fazit

Es gibt eine Vielzahl von speziellen Möglichkeiten, den Leichtbau-Nutzwert von Faser-Kunststoff-Verbunden zu vergrößern. Allerdings wachsen damit auch die Anforderungen an den Konstrukteur. Er sollte die gegebenen Möglichkeiten kennen und möglichst zur Optimierung nutzen, dabei gleichzeitig immer auch abwägen, ob der eventuelle Mehraufwand wirtschaftlich vertretbar ist. Lösbar ist dies mit Unterstützung durch weitere Forschungsanstrengungen und Weiterbildungsmaßnahmen.

## Literatur

- Jakobi, R., Schreiber, W. (1987): Steigerung der Belastbarkeit von dickwandigen Torsionsrohren aus Faser-Kunststoff-Verbund. 21. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe, Baden-Baden
- Schürmann, H. (2005): Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer Verlag, Berlin

## Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen

Das Fachgebiet „Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen“ – zum Fachbereich Maschinenbau gehörig – besteht seit 1994. Forschungsgegenstand sind die Faser-Kunststoff-Verbunde. Der Fokus liegt dabei auf dem Konstruieren mit dieser anisotropen Werkstoffklasse. Ziel ist es, Konstruktionsmethoden und Lösungsprinzipien zu entwickeln, die die besonderen Möglichkeiten der Faserverbundwerkstoffe nutzen. Hoch beanspruchbare Krafterleitungen sind ein weiteres Ziel intensiver Forschungsanstrengungen. Bei der Entwicklung von Strukturbauteilen werden alle Stationen einer Produktentwicklung, vom Entwurf, über Konstruktion und Dimensionierung bis zum experimentellen Nachweis durchlaufen. Zur Prototy-

penfertigung steht ein gut ausgerüstetes Faserverbund-Technikum, für vertiefte experimentelle Untersuchungen verschiedene, rechnergesteuerte Prüfstände zur Verfügung.

### Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann  
 TU Darmstadt  
 Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen  
 Petersenstr. 30  
 64287 Darmstadt  
 Tel. 06151/16-2160 • Fax: 06151/16-3260  
 E-Mail: [helmut.schuermann@klub.tu-darmstadt.de](mailto:helmut.schuermann@klub.tu-darmstadt.de)  
[www.klub.tu-darmstadt.de](http://www.klub.tu-darmstadt.de)

### Unser Unternehmen

Im Verlauf der letzten sechs Jahrzehnte ist der Name WIKA weltweit zum Begriff für ausgereifte Lösungen rund um Druck- und Temperaturmesstechnik geworden.

Die Spitzenposition im Weltmarkt verdanken wir dem konsequenten Engagement für erstklassige Qualität, hinter dem heute über 4.500 Mitarbeiter der WIKA-Firmengruppe stehen.



WIKA Alexander Wiegand GmbH & Co. KG  
 Personalwesen · Manuel Peterwerth  
 Alexander-Wiegand-Straße  
 63911 Klingenberg/Germany  
 Tel. 09372/132-8938  
 E-Mail: [m.peterwerth@wika.de](mailto:m.peterwerth@wika.de) · [www.wika.de](http://www.wika.de)

## Trainee/Direkteinstieg/Stipendium

### Trainee-Programm

- Individuelle Konzeption des Programms mit technischer oder kaufmännischer Schwerpunktsetzung, Einstieg jederzeit
- Gründliches Kennenlernen der **WIKA-Welt** im In- und Ausland
- unbefristeter Arbeitsvertrag von Anfang an

### Direkteinstieg

- Schnelle Übernahme einer verantwortungsvollen Position im jew. Fachbereich
- umfassende Weiterbildungsmaßnahmen und Entwicklungsperspektiven im In- und Ausland
- unbefristeter Arbeitsvertrag von Anfang an

### Praktikum, Diplomarbeit und Stipendium

- Angebote von Praktika, Diplomarbeiten, Werksstudententätigkeiten sowie Stipendien, jeweils mit finanzieller Unterstützung

### Was Sie auszeichnet

- Zügiges Studium mit überdurchschnittlichen Leistungen (Elektrotechnik, Maschinenbau bzw. Wirtschaftsingenieurwesen, z.B. mit Studienrichtung Automatisierungstechnik, Mechatronik, Mikro- und Feinwerktechnik)
- studienbegleitende, qualifizierte Praktika
- erfolgsorientierte, zielstrebige und kommunikationsstarke Persönlichkeit
- gute Englischkenntnisse in Wort und Schrift

**Wir freuen uns auf Ihre vollständige  
 Bewerbung!**

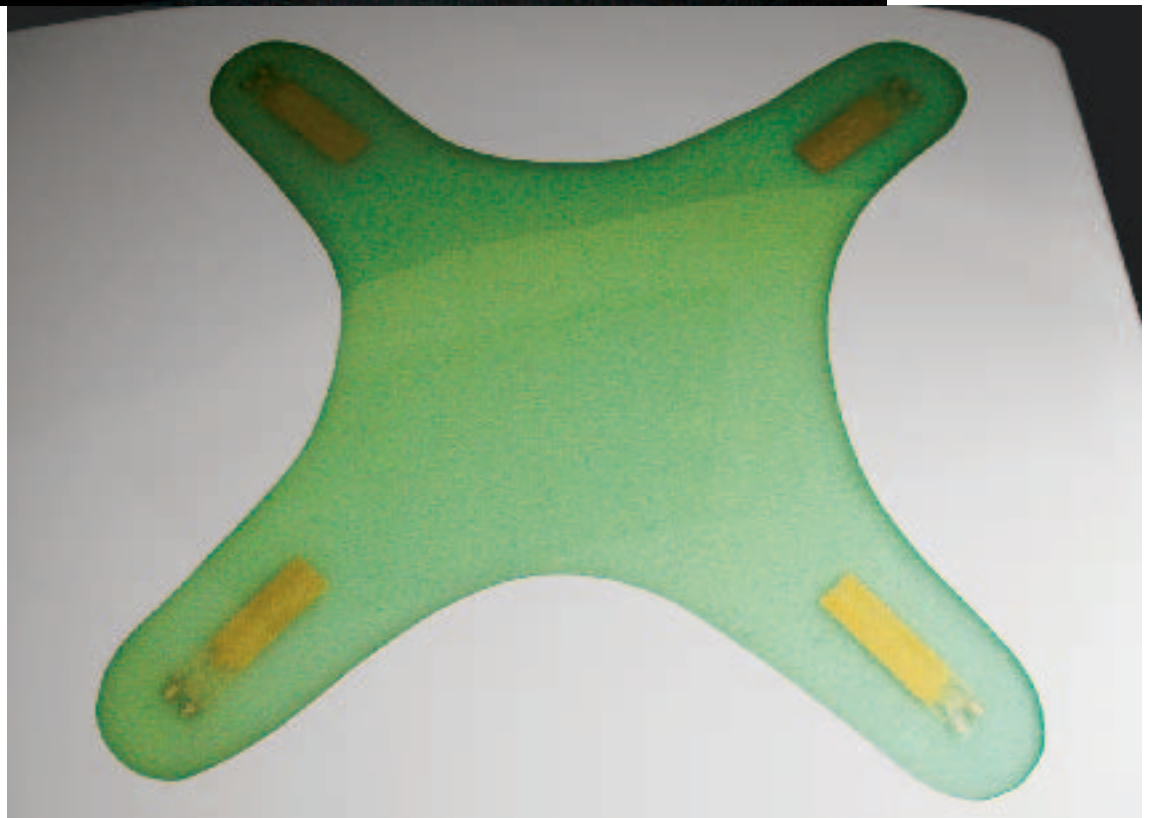
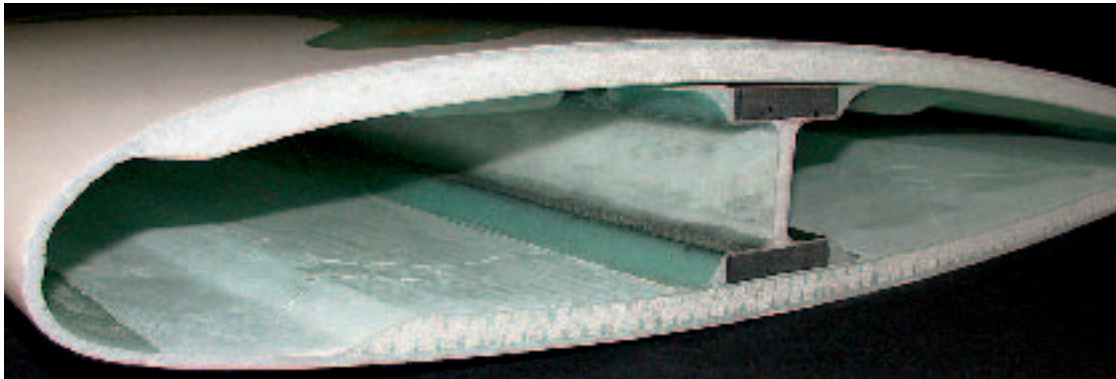


Druck- und Temperaturmesstechnik



# Betriebsfestigkeit und Leichtbau

Andreas Büter/Holger Hanselka



Werkstoff, Fertigung, Geometrie und Beanspruchung stehen als Einflussparameter der Betriebsfestigkeit in einem engen Zusammenhang. Optimierte Konstruktionsprinzipien zur Realisierung leichter Strukturen, der Einsatz neuer Werkstoffe und/oder Fertigungsmethoden erfordern für eine sichere Bemessung, neben umfangreichen Materialkennwerten auch angepasste Bemessungsverfahren. Die Betriebsfestigkeit liefert alle diese Grundlagen.

**Structural Durability and Lightweight Design** *The fatigue strength of components is predominantly affected by the material, the manufacturing process, the geometry and the loading. With optimized concepts for the design of light-weight structures and the introduction of new materials and/or manufacturing processes, for a save dimensioning in addition to substantial knowledge of the materials characteristics adapted dimensioning methods are required. Therefore, the structural durability provides the fundamentals.*

## Einleitung

Bei Leichtbaustrukturen geht die Auslegung über den Nachweis einer hinreichenden Schwingfestigkeit hinaus. Zyklische Belastungen stellen aus strukturdynamischer Sicht eine Anregung zu Strukturschwingungen dar und überlagerte Mittellast oder hohe Einzelasten können zum örtlichen Ausknicken oder Beulen führen. Die Steifigkeit und Stabilität einer Konstruktion werden, wie in Bild 1 dargestellt, durch Parameter wie Material, Geometrie (Formgebung) und Bauweise bestimmt. Hierbei gilt es somit insbesondere hinsichtlich Gewichtsminderung, ausreichender Steifigkeit, hinreichender Stabilität und Betriebsfestigkeit einen ökonomischen Kompromiss zu finden.

Leichtbau bedeutet die Realisierung einer Gewichtsminderung bei hinreichender Steifigkeit, dynamischer Stabilität und Betriebsfestigkeit. Für Bauteile und Konstruktionen heißt das, dass sie ihre Funktion über die Einsatzdauer ohne Ausfall bestehen müssen. Da Leichtbaukomponenten in der Regel während ihrer Einsatzzeit nicht nur statischen, sondern auch schlag- und stoßartigen und vor allem dynamischen Beanspruchungen mit zeitlich veränderlichen Amplituden ausgesetzt sind, erfordert dieses eine Bauteilauslegung gegen die zyklischen Betriebsbelastungen unter Berücksichtigung nicht nur des Werkstoffs, sondern auch der konstruktiven Formgebung und der Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchte.

Eine gewichtsoptimale, betriebsfeste Auslegung von Komponenten und Strukturen setzt im Allgemeinen die genaue Kenntnis der im Betrieb auftretenden schädigungsrelevanten Beanspruchungen (Art, Größe, Richtung, zeitliche Abfolge und Verteilung) voraus. Die für alle wichtigen Betriebspunkte experimentell oder auch rechnerisch ermittelten Betriebsbeanspruchungen werden gemäß den Einsatzbedingungen auf die Lebensdauer extrapoliert und zu Belastungskollektiven zusammengefasst. Hierbei können drei Lasttypen unterschieden werden: die Missbrauchs-, die Sonder- und die Betriebslasten. Das Belastungskollektiv und die Sonder- und Missbrauchslasten beschreiben somit alle über die gesamte Einsatzdauer auftretenden Beanspruchungen und stehen somit in direkter Beziehung zur Verfügbarkeitsdauer der Struktur.

Ein zuverlässiger Betriebsfestigkeitsnachweis erfordert die Berücksichtigung aller Lasttypen mit ihren schädigungsrelevanten Auswirkungen, wie z.B.

- Hohe Spitzenbeanspruchungen oder Sonderereignisse führen je nach betrachteter Struktur zu Instabilitäten, Plastifizierungen, Delaminationen, Umlagerungen von Eigenspannungen und stehen in Beziehung mit Formdehngrenze, Bruchverhalten, Funktionsverhalten.
- Zyklische Belastungen können je nach Frequenzinhalt strukturelle Resonanzen anregen und damit, je nach Dämpfung der Struktur, sehr hohe Beanspruchungen zur Folge haben.
- Wechselnde Amplituden und hohe Lastspielzahlen stehen in Beziehung mit Ermüdungsverhalten, Reibkorrosion.
- Hohe Fliehkräfte oder wechselnde Temperaturen bewirken einen Einfluss auf die Mittellastspannung, veränderte Passungsverhältnisse, Zusatzbeanspruchungen.

- Mehraxiale Belastung führen zu mehrachsigen Spannungszuständen mit verändertem Festigkeitsverhalten.
- Die Art der Beanspruchung beeinflusst das Ermüdungsverhalten und die Lebensdauer.

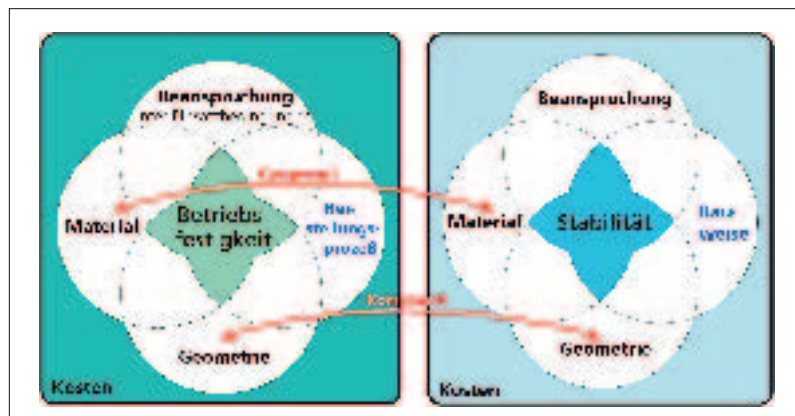
Leichtbaustrukturen sind darüber hinaus auf ausreichende statische und dynamische Stabilität auszuliegen. Was das bedeutet wird im Folgenden kurz dargestellt.

## Strukturdynamik – dynamische Stabilität

Das Übertragungsverhalten dynamischer Strukturen wird durch die Übertragungsfunktion beschrieben, aus der sich die Amplitudenvergrößerungsfunktion oder der Amplitudengang ermitteln lässt. Diese durch die Dämpfung und die Eigenfrequenzen stark beeinflusste Funktion beschreibt in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz das Verhältnis der Amplituden des Ausgangs- zum Eingangssignal. Die Anzahl und Lage der Eigenfrequenzen sind in erster Näherung durch die Massen- und Steifigkeitsverteilung in der Struktur bestimmt. Es können in diesem Diagramm drei Bereiche unterschieden werden, in denen die Systemantwort durch verschiedene Kraftgruppen bestimmt wird. Bei Erregerfrequenzen weit unterhalb der Resonanzstelle wird das System aufgrund der langsam mit der Zeit veränderlichen Erregung hauptsächlich durch die Steifigkeitskräfte beherrscht. Das System verhält sich quasistatisch. Oberhalb der Resonanzfrequenz dagegen dominieren die Massenkräfte, während in der Resonanz sämtliche Kräftearten, d.h. die Steifigkeits-, Dämpfungs- und Massenkräfte, vorherrschen. Die durch eine Anregung verursachte Amplitude wird in diesem Frequenzbereich nur durch die Dämpfung begrenzt. Bei Resonanzanregung halten sich somit Steifigkeits- und Massenträgheitskräfte die Waage. Lediglich die von den Strukturbewegungen abhängige Dämpfungskraft, die im Gleichgewicht mit der Anregungskraft steht, bestimmt die schwingungsinduzierte Beanspruchungsverteilung.

Die Massen-, Steifigkeitsverteilung und Struktur-dämpfung werden im wesentlichen durch das Material, die Geometrie (Formgebung) und die Bauform (z.B. Fachwerk, Integral-, Differentialbauweise) bestimmt. Anregungskräfte ergeben sich aus den Betriebsbedingungen. Hierbei muss im Allgemeinen zwischen bewegungsabhängigen und bewegungsunabhängigen Anregungskräften unterschieden werden. Während diese die eigentlichen Anregungskräfte darstellen, bewirken jene „virtuelle“ Steifigkeits-, Dämpfungs-

Einflussgrößen auf die Betriebsfestigkeit und die Stabilität  
 Influencing factors on structural durability and stability





oder Massenträgheitskräfte die das Eigenverhalten der Struktur wesentlich verändern, aber auch zu einer Entdämpfung führen können. Die Wechselwirkung zwischen Betriebsfestigkeit und Strukturmechanik erfordert eine ausreichende Bemessung, d.h. eine hinreichende Schwingfestigkeit, bei dynamischer Stabilität über den gesamten Betriebsbereich.

## Stabilität gegen Knicken und Beulen

Neben den Knicken eines auf Druck belasteten Trägers, kann es auch beim Einsatz dünnwandiger Strukturkomponenten, wie z.B. Schalen, Platten oder Schubfeldern, zum Ausbeulen kommen. Bei Untersuchung möglicher Gewichtsreduktionen auf Basis der Schwingfestigkeit an geschweißten Aluminium-Komponenten konnte gezeigt werden, dass oberhalb einer bauteil- und belastungsabhängigen Grenze eine weitere Gewichtsminderung nur über eine Steifigkeitsoptimierung möglich ist. Bei Leichtbaustrukturen ist somit neben einer hinreichenden Betriebsfestigkeit auch eine ausreichende Stabilität gegen Knicken und Beulen gefordert.

## Betriebsfestigkeitsnachweis

Eine aussagekräftige Betriebsfestigkeitsuntersuchung im Labor erfordert für das Bauteil oder die bauteilähnliche Probe eine möglichst realitätsnahe Nachbildung aller Betriebsbeanspruchungen. Während des Versuchs werden in den kritischen Bereichen der Struktur die realen Beanspruchungsverteilungen qualitativ und quantitativ erzeugt, um sie mit der lokalen Beanspruchbarkeit vergleichen zu können. Ist die lokale Beanspruchung größer als die lokale Beanspruchbarkeit (material- und herstellungsbedingte Schwingfestigkeit), kommt es zum Versagen. Beanspruchung und Beanspruchbarkeit unterliegen im Allgemeinen einer natürlichen Streuung, die sich in der Regel über die Lebensdauer ändert. Während sich die Höhe und Streuung der lokalen Beanspruchung durch Systemveränderungen infolge von Anrissen, Delaminationen und/oder Verschleiß vergrößern kann, wird die Beanspruchbarkeit der Gesamtstruktur während des Betriebes vornehmlich durch festigkeitsverändernde Einflüsse wie z.B. Alterung, Umweltbelastungen, Delaminationen usw. vermindert. Das statische und dynamische Tragverhalten einer Leichtbaustruktur ist letztlich

gegeben durch den Sicherheitsabstand zwischen der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit. Da beide einer natürlichen Streuung unterliegen, kann durch strenge Materialkontrolle, präzise Fertigung und genaue Lastvorgaben die Versagenswahrscheinlichkeit durch Erhöhung des Sicherheitsabstandes zwar gemindert werden, in keinem Fall ist jedoch eine 100%ige Zuverlässigkeit erreichbar [Wiedemann, 1996].

## Konstruktionsphilosophien

Von einer sicheren Konstruktion muss gefordert werden, dass bei Sicherheitsbauteilen während der Bemessungslebensdauer kein Schaden auftritt oder sich bei einer regelmäßig inspizierten Struktur ein Teilschaden nicht zum Totalversagen auswächst. Um dieses zu gewährleisten lassen sich zwei Konstruktionsphilosophien unterscheiden:

- Die schwingbruchsichere Konstruktion (safe-life design) – hierbei wird die Struktur so ausgelegt, das im geplanten Lebenszeitraum keine Primärschäden (Anrisse) auftreten. Anwendung: Auslegung von Sicherheitskomponenten im Kraft- und Eisenbahnfahrzeugbau.
- Der ausfallsichere Entwurf (fail-safe design) vermeidet nicht unbedingt den Anriss, jedenfalls aber seine katastrophale Auswirkung. Redundanz, die Frage nach Resttragfähigkeit und die klare Definition von Inspektionen sind wesentliche Bestandteile des Entwurfs. Anwendung: in ausgewählten Bereichen des Flugzeugbaus.

Während bei der schwingbruchsicheren Konstruktion mehr die Frage nach der primären Schädigung im Vordergrund steht und somit den Werkstoff, das Herstellungsverfahren und die lokale Bauteilgestaltung angeht, zielt der ausfallsichere Entwurf auf Schadentoleranz ab. Die Gewichtsminderung eines als schwingbruchsichere Konstruktion ausgelegten Bauteils setzt somit die genaue Kenntnis des Sicherheitsabstandes zwischen der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit voraus. Dagegen wird die Gewichtsminderung der ausfallsicheren Konstruktion über Redundanz und regelmäßige Inspektionen erkaufte.

Die Betriebsfestigkeit liefert für beide Konstruktionsphilosophien die wesentlichen Grundlagen und ermöglicht so den Weg zu einer schadenstoleranten und ausfallsicheren Konstruktion.

## Kompetenzcenter Betriebsfester Leichtbau des Fraunhofer-Instituts

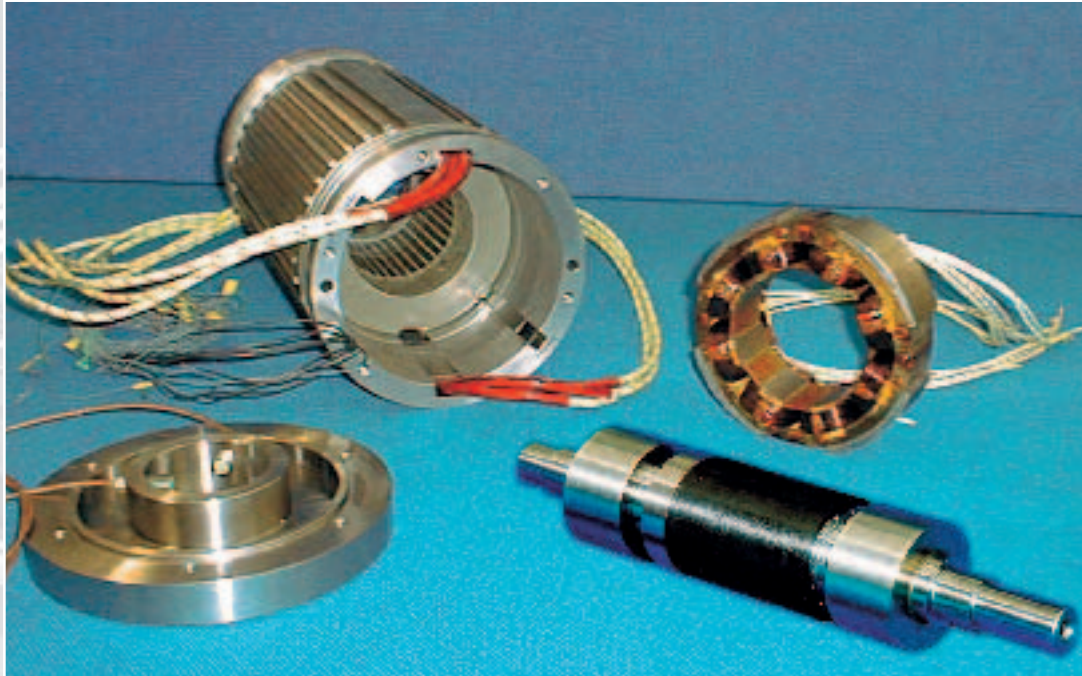
Im Kompetenzcenter Betriebsfester Leichtbau des Fraunhofer-Instituts LBF werden Leichtbaukomponenten in der Ganzheitlichkeit von Werkstoff, Konstruktion, Fertigung und Einsatz bewertet. Dieses umfasst die Untersuchung und Optimierung der Eigenschaften und Lebensdauer von Leichtbaustrukturen unter besonderer Berücksichtigung der realen, einsatzspezifischen Betriebsbeanspruchungen und Umgebungsbedingungen.

Prof. Dr.-Ing. Holger Hanselka, Leiter Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF), Leiter des Fachgebiets Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik im Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt  
[www.lbf.fhg.de](http://www.lbf.fhg.de)

Dr.-Ing. Andreas Büter; Leiter Kompetenzcenter „Betriebsfester Leichtbau“

## Literatur

Wiedemann, J.: „Leichtbau, Band 2: Konstruktion“, Springer Verlag, Berlin, 1996



# Leichtere Elektromotoren durch Hochausnutzung von Werkstoffen

Andreas Binder/Tobias Schneider

In der elektrischen Antriebstechnik ist ein starker Trend zu immer leichteren Motoren pro abgegebener Leistung zu erkennen. Das Ziel ist eine gute Integration des Motors in das Gesamtsystem und die Gewichtsreduktion zum Beispiel für Anwendungen im Flugzeug. Bei Antrieben für Pumpen und Werkzeugmaschinen ermöglicht eine Steigerung der Drehzahl auf etwa 100.000 min<sup>-1</sup> eine deutliche Gewichtsreduktion. Im Low-Speed-Bereich ermöglichen die moderne Magnettechnologie, spezielle Wicklungssysteme und Kühlverfahren ringförmige „Torque-Motoren“ mit einer deutlichen Steigerung des Drehmomentes pro Motormasse.

**Lighter motors due to high utilisation of materials** There is a strong trend in electric drive systems to reduce mass and volume per output power demand. The aim is to get a good integration of motors into the machinery system and to get light weight drives e.g. for aircraft applications. For drives in pumping and tooling applications (e.g. high speed cutting) a significant reduction in mass is possible by raising the speed to e.g. 100.000 rpm. In low speed applications with high torque demand modern permanent magnet technology, high pole count and special tooth coil windings are used to design ring shaped so called torque motors.

Abbildung 2:  
Komponenten eines  
magnetgelagerten  
High-Speed Antriebs,  
40.000 min<sup>-1</sup>, 40 kW  
(Quelle: TU Darmstadt)

Components of a magneti-  
cally suspended high-speed  
motor, 40.000 rpm, 40 kW,  
TU Darmstadt



Der Trend bei der Weiterentwicklung elektrischer Antriebe geht auf Grund von Anwendungen im Maschinenbau und der Automatisierungstechnik in Richtung von Massen- und Volumeneinsparungen sowohl bei den Motoren als auch den speisenden Umrichtern. Dadurch lassen sie sich in die Arbeitsmaschine (z. B. eine Druckmaschine) integrieren oder es entstehen „leichte“ Antriebe, was z. B. im Flugzeugbau immer wichtiger wird („fly-by-wire“).

## Drehzahlerhöhung

Die Größe eines Motors wird – neben konstruktiven Maßnahmen – wesentlich durch das Drehmoment  $M$  bestimmt, das der Motor dauernd liefern kann. Um eine geforderte Antriebsleistung  $P$  zu erhalten, die dem Produkt aus Drehmoment  $M$  und Drehzahl  $n$  proportional ist, kann durch Bemessung des Motors für eine hohe Drehzahl  $n$  ein kleines Drehmoment und damit ein kleines Motorvolumen  $V$  erhalten werden. Gleichzeitig kann in vielen Anwendungen wie bei Pumpen, Verdichtern, Ventilatoren, Turbinen, aber auch Fräs- und Drehantrieben durch die hohe Drehzahl auch die Arbeitsmaschine, also z. B. das Pumpenrad, ebenso verkleinert werden, wenn es direkt mit dem Motorläufer verbunden wird. Zusätzlich entfällt das mechanische Getriebe, so dass insgesamt der Antrieb und die Arbeitsmaschine sehr klein und leicht werden.

## Werkstoffwahl

Da als elektrisches Leitermaterial zumeist Kupfer oder Aluminium und zur magnetischen Flussführung Eisenblech erforderlich ist, ist durch deren Dichte der Gestaltungsspielraum für die Massenreduktion eingeschränkt. Durch den Einsatz von Hochenergie-Permanentmagneten wie Neodym-Eisen-Bor mit Remanenzflussdichten bis  $B_r = 1.4 \text{ T}$  (bei  $20^\circ\text{C}$ ) lassen sich aber aus kleinen Volumina hohe Magnetflussdichten erzeugen, so dass das Permanentmagnet-Läufervolumen klein gehalten werden kann. Für die Beherrschung hoher Fliehkräfte sind durch den Einsatz von Glasfaser- und für höchste Ansprüche Kohlefaserverbundwerkstoffen mit ausgenützten Zugfestigkeiten bis  $1200 \text{ N/mm}^2$  als aufgespresste Hülsen und darunter liegenden „Oberflächenmagneten“ neue Läufer topologien entstanden, die den Einsatz von Permanentmagnet-Synchronmaschinen für hohe Drehzahlen gegenüber den sonst sehr weit verbreiteten Asynchronmaschinen mit Käfigläufern favorisieren. Die magnetisch inaktiven Komponenten wie die Motorwelle, die Motorlagerschilde zur Aufnahme der Lager oder das Motorgehäuse zur Kühlmittelführung werden aus Stahl bzw. Aluminium gefertigt. Der Einsatz von Kohlefaserverbundwerkstoffen zwecks Massenreduktion ist wegen der dreidimensionalen Kraftbeanspruchung noch im Versuchsstadium. Die Drehmomentbildung erfolgt durch die Wechselwirkung des Läufermagnetfelds  $B$  mit dem elektrischen Strom  $I$  in der Ständerwicklung. Die Erhöhung der Ständerstromdichte  $J$  als Quotient aus Strom und Leiterquerschnitt gestattet eine Einsparung beim Volumen der Wicklung und des die Wicklung tragenden Ständerblechpakets. Die sich einstellende höhere Wicklungstemperatur von z. B.  $180^\circ\text{C}$  statt  $155^\circ\text{C}$  muss

durch hochwertigere Isolierstoffe auf Silikonharzbasis (Wärmeklasse  $H$ ) anstatt Epoxidharzbasis (Wärmeklasse  $F$ ) abgefangen werden. Bei Wahl einer hohen Drehzahl ergibt sich eine hohe Ummagnetisierungsfrequenz im Ständerisenblechpaket. Um die dadurch entstehenden elektrischen Wirbelstromverluste klein zu halten, empfiehlt sich der Einsatz von speziellen, für den Betrieb bei 2000 bis 3000 Hz entwickelten verlustarmen und sehr dünnen Magnetblechen mit Dicken unter  $0.3 \text{ mm}$ . Die Beigabe von Silizium zwecks Erhöhung des spezifischen Widerstands der Bleche zur Unterdrückung der Wirbelströme verschlechtert aber die Magnetisierbarkeit, so dass Weiterentwicklungen dieser Magnetblechwerkstoffe im Gange sind.

## Kühlungsoptimierung

Durch eine intensiviertere Kühlung des Motors kann die Temperatur der Wicklung trotz erhöhter Ausnützung der Wicklung durch hohe Stromdichten in den zulässigen Grenzen gehalten werden. Anstelle der Luftkühlung sind Flüssigkeitsmantelkühlungen im Einsatz, die im Gehäuse in einem Doppelmantel einen Fluidstrom mit einer hohen Wärmeübergangszahl vom Aktivteil auf das Fluid gestatten. Eine gute Anbindung der Wicklung im Bereich der Wickelköpfe außerhalb des Blechpakets mittels einer thermisch gut leitfähigen, aber trotzdem elektrisch gut isolierenden Vergussmasse an den Kühlmantel ist möglich, um eine gleichmäßige Wicklungserwärmung ohne Wärmenester („hot-spots“) zu erreichen. Auch hierin ist die Permanentmagnetsynchron-Maschine der Asynchronmaschine überlegen, da der Läufer auf Grund der Permanentmagneterregung deutlich geringere Verluste hat.

## Wahl der Lagerung

Bei Einsatz hoher Drehzahlen können konventionelle Wälzlagerlösungen nicht mehr verwendet werden. Die der mittleren Wälzkörperumfangsgeschwindigkeit entsprechende Kennzahl aus Produkt von Drehzahl und mittlerem Lagerdurchmesser übersteigt typisch den Wert von 2 Millionen  $\text{mm/min}$ . Spezielle Spindellager mit Keramikkugeln statt Stahlkugeln mit verringerter Größe, dafür erhöhter Anzahl am Umfang, die mittels Ölminimalschmierung speziell geschmiert werden, sind eine gängige Lösung, die zu noch höheren Drehzahlen hin durch Magnetlager abgelöst wird. In diesem Fall wird der Läufer berührungslos bei Magnetlagerluftspalten von wenigen Zehntel Millimetern in Magnetfeldern radial und axial gehalten. Allerdings ziehen die Magnetkräfte den Läufer in die Richtung des minimalen Luftspalts, so dass eine Abstandsregelung des Magnetlagerluftspalts zwingend erforderlich ist, die neben den



Abbildung 1: Einstufiger hoctouriger PM-Synchrongenerator für Mikrogasturbinen,  $70.000 \text{ min}^{-1}$ ,  $100 \text{ kW}$ ; links: Läuferwelle, Kompressor und Turbinenrad, rechts: PM-Läufer mit C-Faser-Bandage (Quelle: ABB Schweden)

Single-stage high-speed PM-synchronous generator for micro gas turbines,  $70.000 \text{ rpm}$ ,  $100 \text{ kW}$ ; left: rotor, compressor and turbine wheel, right: PM-rotor with carbon fibre bandage

Abbildung 3:  
Numerische Feldberechnung als modernes Entwicklungstool zur Berechnung hoch ausgenutzter PM-Synchronmotoren mit Zahnspulenwicklung (Quelle: TU Darmstadt)

Numerical field calculations as modern tool for the design of highly utilised PM-synchronous machines with tooth coils



Abstandssensoren auch eine elektronische Regelung der Stromversorgung der Magnetlagerspulen benötigt. Mit der Permanentmagnettechnologie lassen sich die Volumina dieser Lager deutlich verringern. Die speisende Elektronik wird kleiner und kostengünstiger. Vor allem bei Hochdrehzahlenwendungen für Vakuumpumpen und andere spezielle Anwendungen, wo das Schmieröl eine Verunreinigung des Fördermediums bewirken könnte, sind Magnetlager nicht nur aus Drehzahlgründen die erste Wahl.

Abbildung 4:  
Getriebeloser Direktantrieb für den ICE 3, 500 kW, 0...2110 min<sup>-1</sup> (Quelle: TU Darmstadt, Siemens)

Gearless direct drive for ICE 3, 500 kW, 0...2110 rpm

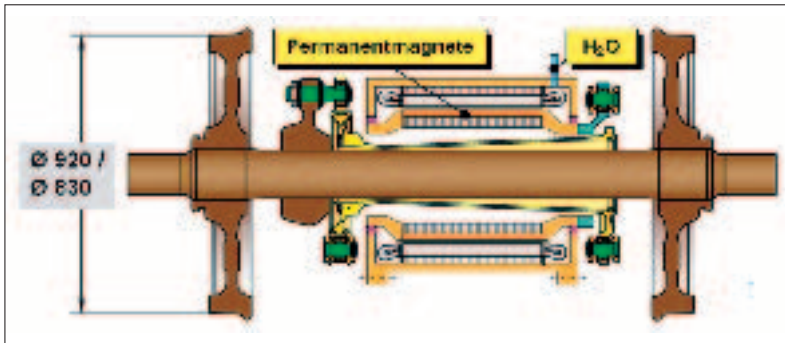


Abbildung 5:  
Torque-Motoren für niedrige Drehzahlen bis ca. 300 min<sup>-1</sup> (Quelle: Siemens)

Torque-Motors for low-speed up to 300 rpm

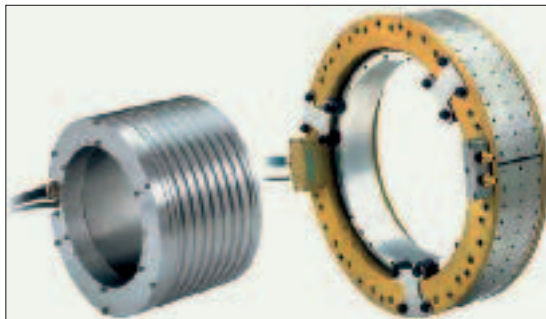


Tabelle 1:  
Vergleich von Normasynchronmotor mit High-Speed und High-Torque Motoren  
Comparison of a standard induction motor with high-speed and high-torque motors

	Nennleistung P <sub>N</sub> (kW)	Nenndrehzahl n <sub>N</sub> (min <sup>-1</sup> )	P <sub>N</sub> /m (W/kg)	M <sub>N</sub> /m (Nm/kg)
Norm-Asynchronmotor	45	2995	145	0,47
<i>High-Speed</i>				
PM-Motor	30	24.000	500	0,2
PM-Motor, Magnetlagerung	40	40.000	408	0,1
<i>High-Torque</i>				
PM-Hohlwellenmotor	12,5	300	99	3,17
PM-Motor	45	1000	230	2,2
Bahndirektantrieb	500	617	781	12

## Applikationen und Weiterentwicklungen

Hochdrehzahlantriebe sind z. B. bei  $P = 100$  kW Antriebsleistung mit Drehzahlen bis ca.  $n = 70\,000$ /min von Spezialfirmen entwickelt worden (Abb. 1) und am Markt erhältlich [Binder/Schneider 2004]. Eigenentwicklungen am Institut für Elektrische Energieumwandlung (Abb. 2), gemeinsam mit der Industrie dienen der Bereitstellung von Entwicklungswerkzeugen für diese Antriebe, die z. B. in Linienflugzeugen als Hochdrehzahl-Unterdruckpumpenantrieb für die Toilettenabsaugung oder als Klimageräte eingesetzt werden [Lu 2004, Binder/Klohr 2004]. Die enge Wechselwirkung der elektromagnetischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften im Motor einerseits, aber auch die Interaktion von speisendem Umrichter und Motorwicklung mit der Beherrschung der zusätzlichen Parasitäreffekte durch die gepulste Umrichterausgangsspannung andererseits erfordern dazu fundierte Kenntnisse. Numerische Feldberechnungen (Abb. 3), spezielle mathematische Umrichter-Motor-Modelle und eine ausgefeilte Messtechnik an eigens dafür aufgebauten Hochdrehzahl-Versuchsständen werden für Entwurf und Entwicklung eingesetzt und gestatten an Hand der im Eigenbau gefertigten Prototypen eine kritische Bewertung der erarbeiteten Entwurfsmethoden.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch auf die Volumenverringering bei langsamer laufenden Antrieben übertragen, z.B. als getriebeloser Antrieb für den ICE3 (Abb. 4) [Koch/Binder 2002]. Speziell die als „Langsamläufer“ bezeichneten Torque-Antriebe (Abb. 5) mit hoher Polzahl, einer speziellen Zahnwicklung, Permanentmagnetläufern und einer Flüssigkeitsmantelkühlung als ringförmige Hohlwellenstrukturen lassen sich leicht in die Arbeitsmaschine, wie z.B. Druck- oder Papiermaschinen integrieren. Durch diesen Integrationseffekt wird das Getriebe eingespart und das Gesamtvolumen der Arbeitsmaschine verringert, während gleichzeitig die Regelgüte dieser Antriebe durch den Entfall der Getriebelose und durch die erreichte höhere Gesamtsteifigkeit des Antriebs steigt. Tabelle 1 stellt die zur Zeit erreichten Leistungs- und Drehmomentdichten bei Wassermantelkühlung denen eines luftgekühlten Normasynchronmotors gegenüber.

## Literatur

- Binder, A.; Klohr, M.; Schneider, T.: Losses in high-speed permanent magnet motor with magnetic levitation for 40.000/min, 40kW, Proc. of the 16th Int. Conf. on Electrical machines (ICEM), 5.-8.9.2004, Krakau, Polen, Vol. 1, S. 93-94 (CD-ROM)
- Binder, A., Schneider, T.: Permanent magnet synchronous generators for regenerative energy conversion – a survey, Proc. of 11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 11.-14.09.2004, Dresden, Deutschland, 10 Seiten, CD-ROM
- Koch, Th.; Binder, A.: Permanent magnet machines with fractional slot winding for electric traction, Proc. of 15th Int. Conf. on Electrical Machines (ICEM), 25.-28.08.2002, Brügge, Belgien, CD-ROM
- Lu, T.: Weiterentwicklung von hochtourigen permanentmagnetregten Drehstromantrieben mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen und experimentellen Untersuchungen, Dissertation, TU Darmstadt, 2004, Shaker-Verlag





## Perspektiven bei SEW

Mein Studium geht voran. Irgendwie freue ich mich darauf, auch mal über den Bücherrand schauen zu können. Experiment Berufswelt. Wie sieht die Praxis aus? Und wie werden die Spielregeln sein?

Informationen und Online-Bewerbung

[www.jobs-sew.de](http://www.jobs-sew.de)



SEW-EURODRIVE – eines der führenden Unternehmen in der Antriebstechnik. Mit rund 10.000 Mitarbeitern in 44 Ländern bringen wir die Welt in Bewegung. Und Sie? Studieren Sie Wirtschaftsingenieurwesen, Maschinenbau, Elektrotechnik, Mechatronik, Informatik oder Wirtschaftswissenschaften? In unserem

Unternehmen finden Sie die praktischen Antworten auf Ihre Fragen. Und ganz nebenbei: ideale Rahmenbedingungen für Praktikum, Diplomarbeit oder Berufseinstieg – in einem internationalen Umfeld und mit Freiräumen für eigenständiges Handeln. Schon mal darüber nachgedacht?



SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG  
DriveAcademy/Personalentwicklung  
Postfach 30 23 · D-76642 Bruchsal

→ [www.jobs-sew.de](http://www.jobs-sew.de)

## Institut für Elektrische Energiewandlung

Das Institut für Elektrische Energiewandlung (Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik an der TU Darmstadt) beschäftigt derzeit 12 wissenschaftliche Mitarbeiter mit den Forschungsschwerpunkten:

- High-Speed Antriebe
- Magnetlagerung
- Antriebe für elektr. Bahnen und Hybrid-Autos
- Linear- und Direktantriebe
- Generatoren für regenerative Energien
- Parasitäreffekte bei Umrichterspeisung (DFG-Forschergruppe FOR575)

### Institutsleiter

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Binder  
Tel.: 06151/16-2167  
E-Mail: abinder@ew.tu-darmstadt.de

### Ansprechpartner

Dipl.-Ing. Tobias Schneider  
Tel.: 06151/16-5263  
E-Mail: tschneider@ew.tu-darmstadt.de

### Adresse:

Institut für Elektrische Energiewandlung  
Landgraf-Georg-Straße 4, 64283 Darmstadt  
www.ew.e-technik.tu-darmstadt.de

## Zukunft Hydroforming

# SCHULER

### Anwendungen "Innenhochdruck-Umformung"



Plattenbauweise

Druckkissen



### Hydraulisches Tiefziehen



### Hydroforming von Blechen



Schuler Hydroforming GmbH & Co. KG  
Louis Schuler Str. 2  
57234 Wilnsdorf  
Tel. +49(0) 2739-808-0  
Fax. +49(0) 2739-808-110  
E-mail : info.hydroforming@schulergroup.com  
Internet: <http://www.schulergroup.com>





# Mit Simulation zum schnelleren Sportski

Wilfried Becker/Jochen Hebel

Moderne Sportski sind komplexe Leichtbauprodukte, die in einer Kompositbauweise mit einem hohen Maß an technischem Know-how realisiert werden. Praxisanforderungen wie hohe Geschwindigkeit bei gleichzeitig sicherem Fahrverhalten erfordern die vollständige Ausschöpfung konstruktiver Möglichkeiten. Zum Erreichen dieser Ziele erweist sich die strukturmechanische Simulation als ein geeignetes Werkzeug im zusätzlich zeit- und kostenoptimierten Entwicklungsprozess. In Kooperation mit einem deutschen Skihersteller werden moderne Sportski simuliert und optimiert.

**Simulation for faster racing skis** Modern racing skis are complex composite products featuring a lightweight design, emerging from decades of engineering experience. Operational requirements such as high speed and precise handling necessitate a thorough exploitation of the design space. Mechanical simulation offers a suitable tool within the design process in order to achieve these goals as well as time- and cost-optimised product development. In cooperation with a German ski manufacturer, modern racing skis are modelled and optimised.

Zur Realisierung teilweise gegensätzlicher Kundenanforderungen wie hohe Kurvengeschwindigkeiten, Agilität bei gleichzeitiger Beherrschbarkeit und der Vermeidung unerwünschter dynamischer Effekte, bedienen sich heutige Skikonstruktionen im Rahmen einer komplexen Integralbauweise einer großen Bandbreite an Werkstoffen. Neben dem traditionellen Werkstoff Holz werden Stahl, Aluminium, Polymere, glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK), sowie kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK) eingesetzt, aus denen mittels aufwändiger Verfahren der Ski in der gewünschten Form hergestellt wird. Ob ein Ski den Anforderungen an seine Funktion gerecht wird, hängt maßgeblich von seinen mechanischen Eigenschaften ab, denen deshalb eine besondere Bedeutung im Entwicklungsprozess zukommt. Die derzeitige Entwicklung moderner Carvingski geschieht in einem zeitaufwändigen Iterationsprozess unter stark begrenztem Einsatz von Simulationen. Für strukturelle Simulationen bieten sowohl die Quantifizierung des Einflusses der essentiellen konstruktiven Parameter, als auch die Vorhersage der Auswirkungen konstruktiver Änderungen auf das Systemverhalten schon in einem frühen Entwicklungsstadium interessante Anwendungsfelder. In Zusammenarbeit mit einem namhaften deutschen Skierhersteller wurden am Fachgebiet Strukturmechanik im Fachbereich Maschinenbau an der TU Darmstadt das mechanische Verhalten eines Carvingski für charakteristische Lastfälle grundlegend analysiert und die Leistungsfähigkeit der mechanischen Simulation zur effizienten Weiterentwicklung und zur Optimierung demonstriert.

### Modellbildung

Das aus aktuellen Rennskidesigns abgeleitete untersuchte Skimodell ist in Bild 1 dargestellt. Ein Schichtholzkern ist in mehrere GFK-Lagen eingebettet. Stahlkanten schützen die Lauffläche aus Polyethylen (PE) und stellen die Seitenführung beim Carven, der Kurvenfahrt mit aufgekantetem Ski, her. Die Seitenwangen bestehen aus ABS-Kunststoff und die bedruckte Deckfläche besteht aus thermoplastischem Polyurethan (TPU). Grundlage eines jeden Skidesigns ist der gekrümmte, mit in Skilängsrichtung veränderlichen Dicken- und Breitenabmessungen gefertigte Schichtholzkern. Ein charakteristischer Parameter jedes Carvingski ist der Seitenzugradius R. Aus mechanischer Sicht kann die Struktur als gekrümmter Schichtverbund [Becker, Gross, 2002] idealisiert werden. Aufgrund der Komplexität der entstehenden elastomechanischen Randwertprobleme werden diese numerisch mit der Methode der fi-

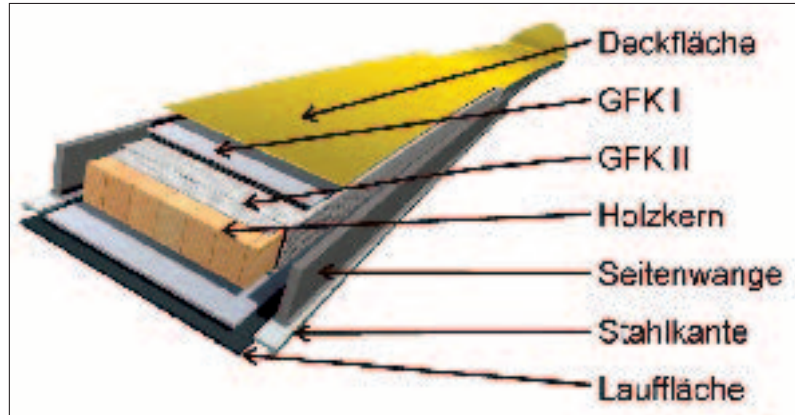


Bild 1: Aufbau des untersuchten Skimodells [Bild Völkl GmbH & Co. KG]. Investigated ski design [courtesy of Völkl GmbH & Co. KG].

nitenelemente [Zienkiewicz, Taylor, 2000] gelöst. Die Struktur wird, wie in Bild 2 dargestellt, mit vierknotigen Schalenelementen mit jeweils sechs Freiheitsgraden (drei Verschiebungen und drei Verdrehungen) diskretisiert. Im Rahmen der verwendeten Laminattheorie höherer Ordnung wird der Anisotropie durch Struktur und Werkstoff Rechnung getragen. Im Vorgriff auf spätere Parameterstudien und Optimierungsrechnungen wird das Netz automatisiert erstellt. Knoten und Elemente werden durch eine am Fachgebiet entwickelte spezielle Vernetzungsroutine erzeugt und der Lagenaufbau den Schalenelementen gemäß ihrer Position zugewiesen. Diese Herangehensweise ermöglicht eine effiziente Anpassung von Materialparametern, Geometrie und Diskretisierungseinheit.

Die maßgeblichen elastischen Konstanten der beteiligten Werkstoffe wurden anhand von Biege- und Torsionsversuchen experimentell ermittelt. Dieser bauteilunabhängige Materialdatensatz bildet die Grundlage für weitergehende Analysen.

### Biegeverhalten

Bei Geradeausfahrt ist der Ski überwiegend durch Biegung beansprucht. Dieser wichtige Lastfall wird im Labor durch einen Dreipunkt-Biegeversuch nachgebildet, der auch numerisch analysiert werden kann. Dabei wird der Ski an den Auflagern in Dickenrichtung fixiert, wobei in die anderen Raumrichtungen eine freie Verformung zugelassen wird. Die Kraft wird in der Mitte der Auflagerlänge in Skidickenrichtung aufgebracht und die Absenkung für verschiedene Punkte im belasteten Bereich gemessen.

Bild 2: Finite-Elemente-Modell. Finite element model.

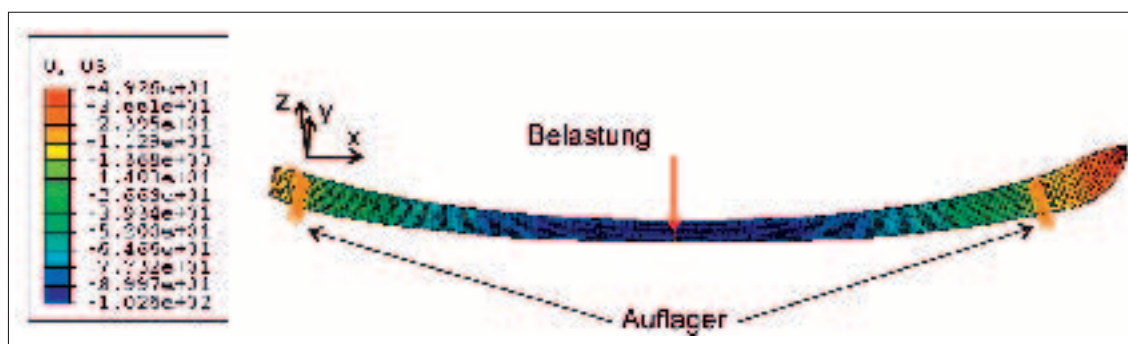


Bild 3: Dreipunkt-Biegeversuch: Verschiebungen w. Three-point bending test: Displacements w.



Bild 4:  
Dreipunkt-Biegeversuch:  
Absenkung des Lastangriffspunktes.  
Three-point bending test:  
Displacement of point of load application.

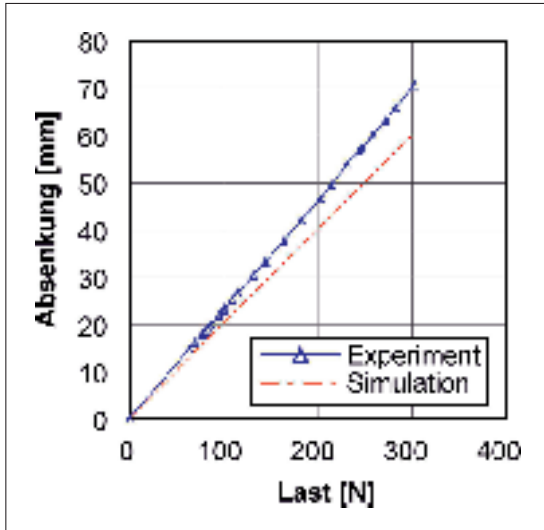


Bild 5:  
Dreipunkt-Biegeversuch:  
Biegelinien für verschiedene GFK-Lagenwinkel.  
Three-point bending test:  
Deformed geometry for different GFRP reinforcement angles.

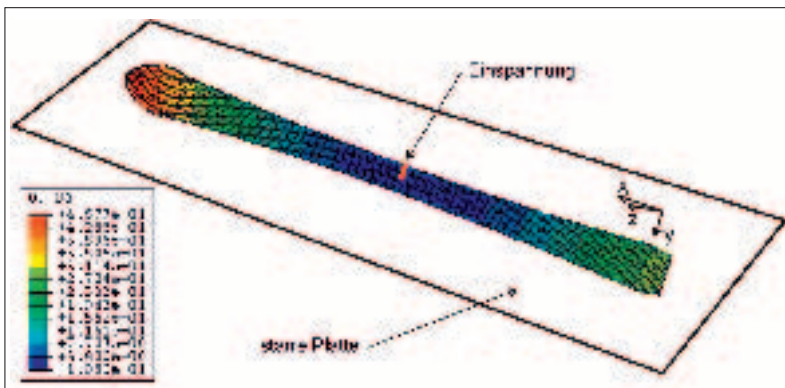
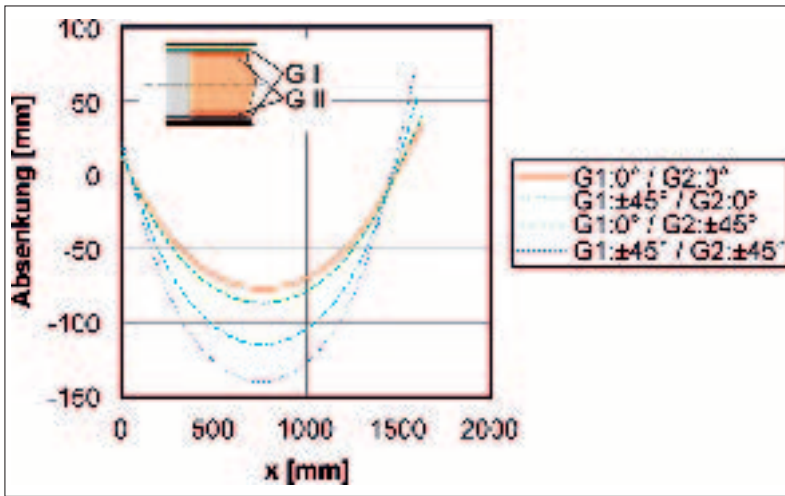


Bild 6:  
Aufkantversuch:  
Verschiebungen w.  
Contact pressure loading:  
Displacements w.

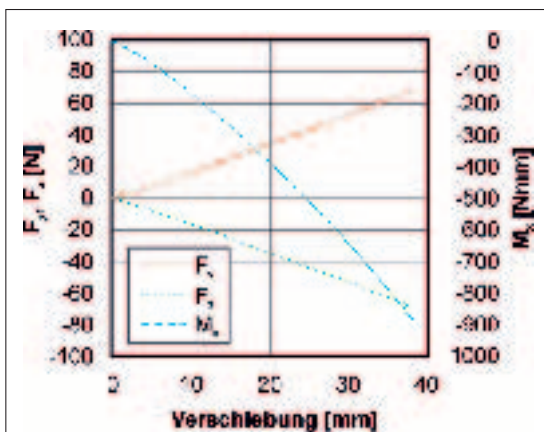


Bild 7:  
Aufkantversuch: Reaktionskräfte und -momente.  
Contact pressure loading:  
Reaction forces and -moments.

Für die FE-Simulationen werden die erwähnten Randbedingungen, wie in Bild 3 angedeutet, aufgebracht. Im Konturplot sind die sich einstellenden Verschiebungen  $w$  in z-Richtung dargestellt. Bild 4 zeigt die Absenkung des Lastangriffspunktes über der aufgetragenen Last für Simulation und Experiment. Die Struktur weist im untersuchten Lastbereich linear-elastisches Verhalten auf und Experiment und Simulation stimmen gut überein. Mögliche Ursachen für Abweichungen können Streuungen in den Materialdaten, sowie modellinhärente Annahmen sein. Trotzdem erscheint die Modellierung für weitergehende Studien durchaus geeignet.

In einem nächsten Schritt wird der Einfluss verschiedener Entwurfsparameter simuliert. Bild 5 zeigt die Absenkung der Skimittellinie im Dreipunkt-Biegeversuch für gleiche Lasten mit verschiedenen GFRP-Lagenwinkeln. Eine Orientierung aller Fasern in Skilängsrichtung ( $0^\circ$ ) führt zu einer sehr hohen Biegesteifigkeit, wohingegen ein Verdrehen der Fasern um  $45^\circ$  mit einer Erniedrigung der Biegesteifigkeit und einer gleichzeitigen Erhöhung der Torsionssteifigkeit einhergeht.

## Aufkantverhalten

Bei Kurvenfahrt unterliegt der Ski, abhängig vom Aufkantwinkel, einer kombinierten Beanspruchung aus Torsion und Biegung. Der Kontakt zwischen Ski und Untergrund wird für den flach aufliegenden Ski durch die Lauffläche hergestellt, bei vergrößertem Aufkantwinkel jedoch zunehmend durch die Stahlkante dominiert. Für die Skientwicklung sind deshalb die sich unter dem Ski einstellende Kontaktdruckverteilung als Maß für die Seitenführung und die vom Fahrer aufzubringenden Kräfte und Momente von besonderem Interesse. Im dazugehörigen Laborversuch wird der Ski unter vorgegebenem Aufkantwinkel fixiert, wobei eine Rotation um die Querachse zugelassen wird. Anschließend wird er mit einer konstanten Kraft auf eine starre Unterlage gedrückt, wodurch die Stahlkante komplett aufliegt. Die sich einstellende Druckverteilung unter dem aufgekanteten Ski wird gemessen.

In der FE-Analyse werden die diskutierten Randbedingungen für die Einspannung, wie in Bild 6 dargestellt, auf das Modell aufgebracht. Der Konturplot zeigt die sich unter einem Aufkantwinkel von  $45^\circ$  einstellenden Verschiebungen  $w$  in z-Richtung. Eine starre Platte wird unter dem gewünschten Aufkantwinkel relativ zum Ski verschoben. Das, bedingt durch den Kontakt zwischen Ski und Unterlage, hochgradig nichtlineare Randwertproblem wird numerisch approximiert und inkrementell gelöst. In Bild 7 sind die vom Fahrer aufzubringenden Kräfte und Momente für einen Aufkantwinkel von  $45^\circ$  in Abhängigkeit der Absenkung dargestellt. Sie sind ein Maß für die Steifigkeit des Skis, die an das Gewicht des Fahrers angepasst werden muss. Bild 8 zeigt die sich einstellende Kontaktdruckverteilung unter dem flach aufliegenden Ski, über die auf das Handling geschlossen werden kann.

Auch für diesen Versuch soll der Einfluss von Entwurfsparametern auf das mechanische Verhalten gezeigt werden. In Bild 9 sind Simulationsergebnisse für einen Aufkantwinkel von  $45^\circ$  bei geänderten Sei-

tenzugradien gezeigt. Die Unterschiede in den maximalen Absenkungen für verschiedene Seitenzugradien kommen durch die geänderte Deformationskinematik zustande. Außerdem wird die zunehmende Steifigkeit für größere Radien und somit breitere Ski deutlich.

### Zusammenfassung

An einem modernen Carvingski wurden Strukturanalysen mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt, wobei die Materialdaten experimentell anhand verschiedener Probenversuche ermittelt wurden. Simulationen von Dreipunkt-Biegeversuchen zeigten eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen. Für die simulierten Aufkantversuche kam der Kontaktmodellierung zwischen Ski und Untergrund eine besondere Bedeutung zu. In verschiedenen Parameterstudien konnte der Einfluss der konstruktiven Parameter Seitenzugradius und GFK-Lagenwinkel aufgezeigt werden.

Es wurde demonstriert, dass die strukturmechanische Simulation als ein leistungsfähiges Werkzeug in der Skientwicklung eingesetzt werden kann. Zeit- und kostenintensive iterative empirische Entwicklungsschritte können so deutlich reduziert werden. Neben einer Verfeinerung des Modells bietet auch der Einsatz der Methoden der Strukturoptimierung [Eschenauer et al. 1990] ein vielversprechendes Feld für zukünftige Arbeiten.

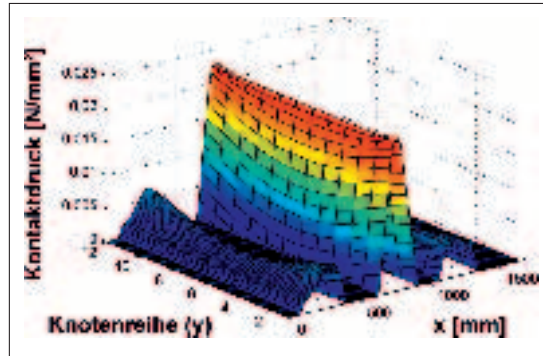


Bild 8: Druckverteilung unter flach aufliegendem Ski.  
Contact pressure distribution under flat ski.

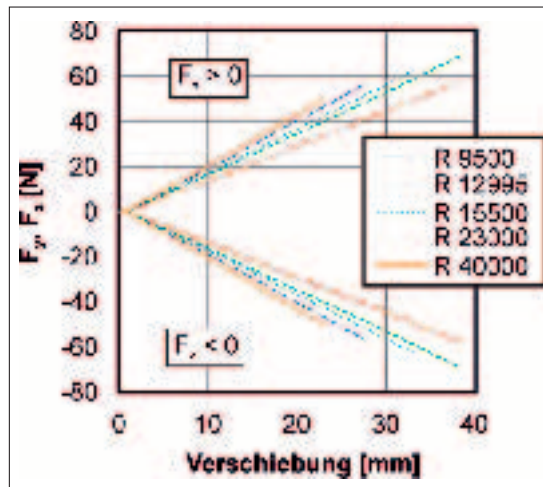


Bild 9: Aufkantversuch: Variation der Seitenzugradien.  
Contact pressure loading: Variation of edge radii.

### Fachgebiet Strukturmechanik

Die Forschungsaktivitäten des Fachgebiets Strukturmechanik im Fachbereich Maschinenbau an der TU Darmstadt erstrecken sich über die Mechanik elastischer Körper und Strukturen, die Modellierung von Bruch- und Versagensvorgängen, sowie die Strukturoptimierung mittels geeigneter Optimierungsalgorithmen. Im Mittelpunkt der Arbeiten stehen dabei die mechanische Modellbildung und die numerische Umsetzung mit angepassten mathematischen Methoden und Werkzeugen. Ein Kompetenzschwerpunkt liegt in der Analyse hochbeanspruchter Strukturen aus Composite-Werkstoffen.

#### Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Becker  
Fachgebiet Strukturmechanik  
TU Darmstadt, Hochschulstr. 1, 64289 Darmstadt  
Tel.: 06151/16-3174  
E-Mail: becker@mechanik.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Jochen Hebel  
Fachgebiet Strukturmechanik  
TU Darmstadt, Hochschulstr. 1, 64289 Darmstadt  
Tel.: 06151/16-2975  
E-Mail: hebel@mechanik.tu-darmstadt.de

### Literatur

- [Becker, Gross, 2002]  
Becker, W.; Gross, D.:  
Mechanik elastischer Körper und Strukturen.  
Springer, Berlin, 2002.
- [Eschenauer et al. 1990]  
Eschenauer, H., Koski, J., Osyczka, A.: Multi-criteria Design Optimization. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1990.
- [Zienkiewicz, Taylor, 2000]  
Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L.: The Finite Element Method, Vol. 2: Solid Mechanics, 5th edition., McGraw-Hill, Oxford, 2000.





# Leicht bauen durch Transparenz

Johann-Dietrich Wörner/  
Christian Eckhardt

Leicht bauen bedeutet für den Einen die Reduktion des Gewichts auf ein Minimum, für den Anderen birgt schon eine Fassade aus transparenten Materialien eine Leichtigkeit. Die verfügbaren Materialien für das transparente Bauen beschränken sich im Wesentlichen auf Glas und PMMA (Plexiglas®). Beide Materialien müssen dem Anspruch auf eine lebenslange Gewährleistung des Tragverhaltens genügen. Die zunehmende Verwendung von Glas brachte in den vergangenen Jahren immer wieder imposante, „leichte“ Systeme zum Vorschein. Die Entwicklung bei Plexiglas® führt immer mehr von sekundären zu optimierten, tragenden Konstruktionen.

***Lightweight building with transparency***  
*On one hand lightweight building is the reduction of the total weight; on the other hand a transparent facade can cause lightness. The materials used for transparent building are basically limited to glass and PMMA (Plexiglas®). Both materials have to fulfil a lifelong guarantee of bearing capacity. With the rising use of glass in the last years some impressive lightweight systems were born. The evolution of Plexiglas® went from secondary to optimised primary constructions.*

Bild 1: Golden Gate Bridge

## Einleitung

Leicht Bauen, eine Formulierung, die noch viel offen lässt: Ist die materielle Betrachtung, d.h. das absolute Gewicht einer Konstruktion gemeint oder geht es um die subjektive Beurteilung? Beide Aspekte sind in der modernen Architektur vertreten, beide haben ihre speziellen Herausforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Ästhetik usw. Selbst wenn man die materielle Gewichtskomponente (Stahl ist schwerer als Beton, Beton ist genauso schwer wie Glas, Aluminium ist – bezogen auf die ausnutzbare Spannung – ggf. schwerer als Stahl) außen vor lässt, sind weitere Festlegungen zu treffen, um sich dem Thema spezifisch zu nähern: In der Regel wirkt eine aufgelöste Konstruktion leichter als eine massive, wie an den Beispielen der Golden Gate Bridge und der ersten GFK-Brücke in Deutschland nachvollzogen werden kann. Aber schon für diese einfache Aussage gibt es Gegenbeispiele, z.B. das Lloyds-Gebäude in London. (Bilder 1 bis 3)

Gerade beim Vergleich dieser Beispiele wird klar, dass Transparenz ein wesentliches Element leicht wirkender Konstruktionen ist. Die dafür zur Verfügung stehenden Möglichkeiten sind vielfältig und reichen von der Wahl besonders schlanker Elemente über Fachwerk- und Seilkonstruktionen bis zum Einsatz transparenter Werkstoffe, denen dieser Artikel gewidmet ist.

## Verfügbare transparente (Bau-)Materialien

Die Anforderungen im Bauwesen sind geleitet von einer Reihe unterschiedlicher Aspekte. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Gewährleistung der Tragfähigkeit während der gesamten Lebensdauer. Unter Berücksichtigung dieser zentralen Bedingung wird die Palette der Materialien rasch eingeschränkt: Es verbleiben im wesentlichen (anorganisches) Glas und (organisches) Plexiglas® (PMMA). Trotz der Ähnlichkeit der Bezeichnung und der beiden Materialien gemeinsamen Eigenschaft der Durchsichtigkeit sind die Unterschiede gravierend. Für den Einsatz als Baustoffe sei hier auf eine kurze Liste verwiesen:

Glas ist ein anorganisches Produkt, dessen Verhalten als „gefrorene“ Flüssigkeit im „normalen“ Temperaturbereich als linear elastisch mit Sprödbbruch ohne signifikantes Kriechverhalten beschrieben werden kann. Lokale Überlastung führt durch die Sprödigkeit i.d.R. zum Versagen des gesamten Elementes. Durch verschiedene Maßnahmen, wie thermisches oder chemisches Vorspannen, Aufbau als Verbundsicherheitsglas, Brandschutzbehandlung u.ä. kann das Ausgangsprodukt für verschiedene Einsatzbereiche gezielt angepasst werden. Glasverarbeitung ist sehr aufwändig und bei vorgespanntem Glas nur sehr bedingt möglich. Die Wahl der richtigen Verbindungstechnik muss auf das Glasverhalten abgestimmt werden. Schraubverbindungen, obgleich durch die einfache Ausführung sehr beliebt, sind durch ihre Spannungskonzentrationswirkung nicht die optimale Technik. Plexiglas® ist ein aus organischen Ausgangsmaterialien hergestelltes Produkt, das als Thermoplast mit relativ niedriger Schmelztemperatur schon bei Raumtemperatur und den im Bauwesen üblichen



Bild 2:  
GFK-Brücke Schwerin  
GRP-Bridge Schwerin,  
Germany



Bild 3:  
Lloyds, London

Bild 4:  
Tower Place London







Bild 5:  
Stegdoppelplatte  
multi-wall sheet

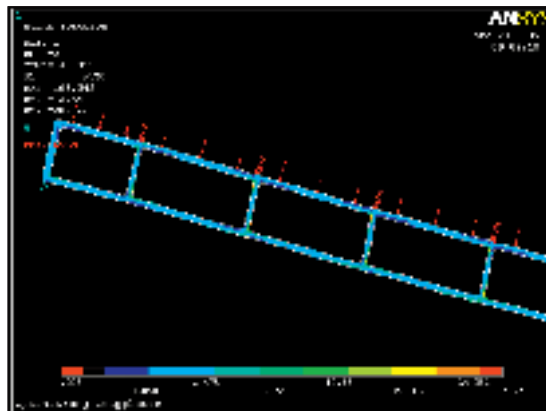


Bild 6:  
Ergebnisse  
FEM-Berechnungen  
Results of FEM calculation

Temperaturen, neben dem für Kurzzeitlasten wirksamen linear-elastischen Verhalten, bei länger wirkenden Lasten ein ausgeprägtes Kriechen zeigt. Plexiglas lässt sich sehr einfach bearbeiten: Alle üblichen Verfahren wie Schneiden, Sägen, Bohren und Fräsen sind möglich. Als Verbindungen kommen neben Kleben und Schweißen auch Schraub- und Klemmkonstruktionen in Betracht.

Aus Sicht der Bauaufsicht hat anorganisches Glas den Vorteil der klaren Regelung in verschiedenen Regelwerken und Zulassungen. Mittlerweile existieren aber auch für transparente Kunststoffe erste Entwürfe für die regelgemäße Behandlung als tragender Baustoff (BÜV-Richtlinie).

## Innovative Konstruktionen

Die Wirkung von Glas als Baumaterial wurde in den vergangenen Jahren vehement eingesetzt und führte zur Entwicklung sehr interessanter, ästhetisch befriedigender Konstruktionen. Neben dem Einsatz als Fassadenverkleidung wurden weitere Konstruktionselemente (Brüstungen, Balken, Stützen) entwickelt und eingesetzt. In Verbindung mit Fachwerk- und Seilkonstruktionen entstanden transparente Systeme, deren Transparenz dem Grundsatz „Leicht bauen“ hervorragend genügt. (Bild 4)

Tabelle 1:  
Materialeigenschaften  
PMMA  
Material properties PMMA

PMMA	Schlagzähmodifikation			
	-	45	65	75
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	3300	2700	2200	2000
Poissonzahl [-]	0,37	0,41	0,42	0,41
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,19	1,18	1,17	1,17
Ausdehnungskoeffizient [1/k]	7*10 <sup>-5</sup>	7*10 <sup>-5</sup>	8*10 <sup>-5</sup>	9*10 <sup>-5</sup>

Die verfügbaren Bemessungsgrundlagen und Berechnungsverfahren ermöglichen es dem Tragwerksplaner, innovative Konstruktionen zu entwickeln und nachzuweisen.

Plexiglas® wurde zunächst in untergeordneten Bauteilen eingesetzt. Schrittweise wurden die Methoden zur rechnerischen Beschreibung entwickelt und die Nachweise zur Gewährleistung der Anforderungen formuliert. Die so entwickelten Grundlagen bieten nun auch die Möglichkeit, Plexiglas-Elemente zu optimieren, wie am Beispiel der Stegdoppelplatte (Bild 5) gezeigt werden kann.

Stegdoppelplatten zeichnen sich durch ein geringes Gewicht bei einem großen Tragverhalten aus. Die Möglichkeiten der Formgebung sind bei der Produktion von Plexiglas, im Gegensatz zum Glas, fast grenzenlos. Aus der Anforderung einer leichten transparenten Bedachung hat sich die Stegdoppelplatte entwickelt. Wie Bild 5 zeigt besteht sie aus zwei Platten, die durch Stege miteinander verbunden sind. Die typische Plattenbreite (quer zur Stegrichtung) beträgt 1200 bzw. 980 mm, die Standard-Lieferlängen liegen zwischen zwei und sieben Metern. Typische Anwendungen der Platten sind Terrassendächer, Carports, Wintergärten und Gewächshäuser.

Das Tragverhalten dieser Stegplatten hängt vom Material und natürlich auch sehr stark von der Geometrie ab. Da die Rohstoffe immer teurer werden und der Preiskampf auf dem Markt groß ist, wird eine optimale Ausnutzung des PMMA, also eine optimale Geometrie, angestrebt. Bei bisherigen Untersuchungen zur Optimierung waren die Hersteller auf aufwendige Produktionsversuche angewiesen. Eine Entwicklung einer vollkommen neuen Geometrie war fast unmöglich bzw. mit einem sehr großen wirtschaftlichen Risiko verbunden. Mit der Hilfe von Finiten-Elemente-Berechnungen können nun die bestehenden Geometrien im Tragverhalten optimiert und neue Geometrien entwickelt werden.

Das Material Polymethylmethacrylat (PMMA) ist ein hoch transparenter, wetterfester Kunststoff. Das spröde Materialverhalten kann durch eine Schlagzähmodifikation beeinflusst werden. Die Materialeigenschaften sind abhängig von dieser Modifikation und in Tabelle 1 (nach Röhm) zusammengestellt.

Das Eingabemodul und die Ergebnisse der Berechnungen (Bild 6) mit dem FEM-Programm ANSYS™ wurden anhand von realen Versuchen verifiziert und eine erstaunlich gute Übereinstimmung festgestellt. Bei den Berechnungen zur Optimierung wurden zuerst einzelne Werte wie die Verteilung und Anzahl der Stege oder verschiedene Dickenverteilungen genauer betrachtet und optimiert. Die jeweils besten Ergebnisse wurden so kombiniert, daß sich eine maximale Tragfähigkeit ergab.

Schon mit den bestehenden Produktionsanlagen können Verbesserungen des Tragverhaltens bzw. eine Gewichtsreduzierung von etwa 6 % erzielt werden.

## Zusammenfassung

„Ein Material macht noch keine anforderungsgerechte Konstruktion“. Es hängt vielmehr von dem jeweiligen Anforderungsprofil ab, welches Material in welcher Weise eingesetzt werden kann und soll. Neben den traditionellen Baustoffen hat sich Glas als transparenter Werkstoff einen festen Platz erobert. Dazu sind Methoden der spezifischen Modifikation entwickelt worden. Plexiglas kann hier durch seine Eigenschaften eine ergänzende Rolle spielen und so neue Möglichkeiten eröffnen. Besonders spannend dürften Kombinationen von Glas und Plexiglas sein, um die jeweiligen Vorteile optimal zu verbinden.

### Fachgebiet Statik und Dynamik der Tragstrukturen an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Statik und Dynamik der Tragstrukturen am Institut für Werkstoffe und Mechanik im Bauwesen wird von Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner geleitet. Die angebotenen Vorlesungen reichen von „Baudynamik“ und „Glas und Kunststoffe im Bauwesen“ bis hin zu Vorlesungen Statik I bis IV für Architekten.

Dipl.-Ing. Christian Eckhardt ist im Bereich der Forschung mit transparenten Kunststoffen tätig.

[www.iwmb.tu-darmstadt.de](http://www.iwmb.tu-darmstadt.de)

**DELTA**<sup>®</sup> System

DELTA<sup>®</sup> schützt Werte. Spart Energie. Schafft Komfort.

## DELTA<sup>®</sup>-COOL 24 – Ihre Sicherheit für ein angenehmes Raumklima!

Phase Change Material als thermische Speichermasse in Decken.  
Stabile Raumtemperatur. Schont Geldbeutel und Umwelt.

Dörken GmbH & Co. KG · 58311 Herdecke · Tel.: 0 23 30/63-0 · [www.doerken.de](http://www.doerken.de)  
Ein Unternehmen der Dörken-Gruppe.







# Optimal verknüpft – Schulanfangszeiten und öffentlicher Personennahverkehr

Armin Fügenschuh

Eine Doktorarbeit im Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt zeigt auf, wie mit Hilfe der diskreten Optimierung im öffentlichen Personennahverkehr Steuergelder für die Schülerbeförderung gespart werden können. Die Abstimmung der Schulanfangszeiten mit der Fahrt- und Umlaufplanung ist eine praxiserprobte Idee zur Kostenreduktion. Mathematisch betrachtet führt sie auf Tourenplanungsprobleme mit neuartigen Nebenbedingungen. Das Einsparpotenzial wird anhand von Rechenergebnissen aus fünf Landkreisen nachgewiesen.

***Ideally Matched – School Starting Times and Public Transport*** The integration of the schools' starting times into the optimization of the trips and the bus schedules is an approved idea to reduce costs. From a mathematical point of view the corresponding models are vehicle routing problems with an additional new type of constraints, which we studied with methods from the field of discrete optimization. Numerical results for five German counties are presented.

Bild: Zentrum für Integrierte Verkehrssysteme

## Einführung

In vielen dünn besiedelten Flächen-Landkreisen ist die Schülerbeförderung eine tragende Säule des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Das Angebot an Buslinien ist zeitlich und räumlich stark an die Bedürfnisse der Schüler angepasst. So gibt es für die Beförderung von Fahrschülern gesetzlich festgelegte Vorgaben bezüglich der maximalen Fahrzeit und der Höchstwartedauer vor und nach Unterrichtsbeginn. Überwiegend sind die Fahrschüler aus Kostengründen in den Linienverkehr integriert; spezielle Schulbusse ausschließlich für Fahrschüler sind selten geworden. Angesichts leerer öffentlicher Haushalte und der immer größeren Einschnitte bei den Zuschüssen sind neue Ideen gefragt, die politisch umsetzbare Einsparungen ermöglichen. Eine praxiserprobte Idee ist die Optimierung durch eine integrierte Koordinierung von Schulanfangszeiten und des Nahverkehrsangebots (kurz: IKOSANA). Diese basiert auf dem Ansatz, bei mindestens gleichwertigem Angebot einen wirtschaftlicheren Fahrzeug- und Personaleinsatz zu ermöglichen. [4] Dabei ist die Staffelung der Schulanfangszeiten ein wesentlicher Aspekt. Wenn alle Schulen eines Landkreises (fast) zum selben Zeitpunkt beginnen, kann ein Bus (wie in Abb. 1 links) nur einen Schulstandort anfahren. Bei gestaffelten Anfangszeiten kann derselbe Bus einen weiteren Schulstandort bedienen. Dies ermöglicht die Einsparung eines zweiten Fahrzeugs (siehe Abb. 1 rechts).

Dabei bleiben Fahrtenangebot, Fahrtdauer und Linienverlauf konstant. Deshalb geht die Optimierung mittels IKOSANA nicht durch sonst übliche Angebotsverschlechterung wie Linienausdünnung, Umwegfahrten oder überfüllte Busse zu Lasten der Fahrgäste. Im Gegenteil: Die neuen Busabfahrts- und Unterrichtszeiten ermöglichen Einsparungen, von denen ein Teil in Angebotsverbesserungen oder in die Ausstattung von Schulen investiert werden kann. Rechtlich ist eine Verschiebung der Schulanfangszeiten durch die Landesschulgesetze gedeckt, in denen es heißt, dass der Unterrichtsbeginn zur ersten Stunde zwischen 7:30 und 8:30 Uhr liegen darf.

Das Auffinden von optimalen Schulanfangszeiten und die Abstimmung der Fahrten ist für einen menschlichen Planer ein hochkomplexes Unterfangen. Vor diesem Hintergrund entstand die Idee, mit Hilfe eines EDV-gestützten, automatischen Planungstools die Suche nach geeigneten Lösungen zu vereinfachen.

## Modellierung

Das Problem, eine gegebene Anzahl von Fahrten mit vorgegebener Abfahrtszeit durch möglichst wenige Fahrzeuge zu bedienen, kann mathematisch als Netzwerkflussproblem modelliert werden. Zur Lösung derartiger Probleme stehen effiziente Lösungsverfahren zur Verfügung, die auch für praxisrelevante Größenordnungen hinreichend schnell optimale Lösungen liefern. Ist jedoch, wie im Falle von IKOSANA, die Abfahrtszeit nicht fest vorgegeben, sondern kann sie innerhalb von gegebenen Schranken frei gewählt werden, so lassen sich Netzwerkfluss-Modelle und -Verfahren nicht mehr anwenden. Hierfür kommen dann Ansätze aus dem Bereich der Tourenplanung mit Zeitfenstern (engl.: Vehicle Routing with Time Windows, VRPTW) in Betracht. In diesen Modellen wird jedoch davon ausgegangen, dass alle Zeitfenster voneinander unabhängig sind, was für IKOSANA nicht zutrifft: Wenn Schüler von einem Bus in einen anderen an einer bestimmten Haltestelle umsteigen müssen, dann darf diese Umsteigebeziehung nicht durch die Optimierung verloren gehen. Ferner müssen bei der Wahl der Schulanfangszeiten die Ankunftszeiten der Busse berücksichtigt werden. Die einzelnen Zeitfenster sind also untereinander gekoppelt. Diese Kopplungsbedingungen stellen die entscheidende Erweiterung des Modells dar, welches wir aus diesem Grund als Tourenplanung mit gekoppelten Zeitfenstern (engl.: Vehicle Routing with Coupled Time Windows, VRPCTW) bezeichnen.

## Optimierung

Mathematisch gesehen fällt das VRPCTW Modell in die allgemeine Klasse der gemischt-ganzzahligen Probleme (engl.: mixed-integer program, MIP). Zur Lösung von MIPS entspricht die Verwendung von Branch-and-Cut-Verfahren dem Stand der Technik. Branch-and-Cut ist ein exaktes Verfahren, da nicht nur eine Lösung des Problems errechnet wird, sondern zudem der Beweis der Optimalität erbracht wird. [2] Nahezu jedes erdenkliche Entscheidungsproblem lässt sich als MIP formulieren. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Entwicklung effizienter Software zur Lösung großer MIPS, welche bei der Modellierung von Problemen in der Wirtschaft vorkommen, in den letzten Jahren stark forciert wurde. Doch auch die ausgefeilteste Software stößt an Leistungsgrenzen. So sind die VRPCTW-Modelle für praktisch relevante Größenordnungen selbst mit mo-

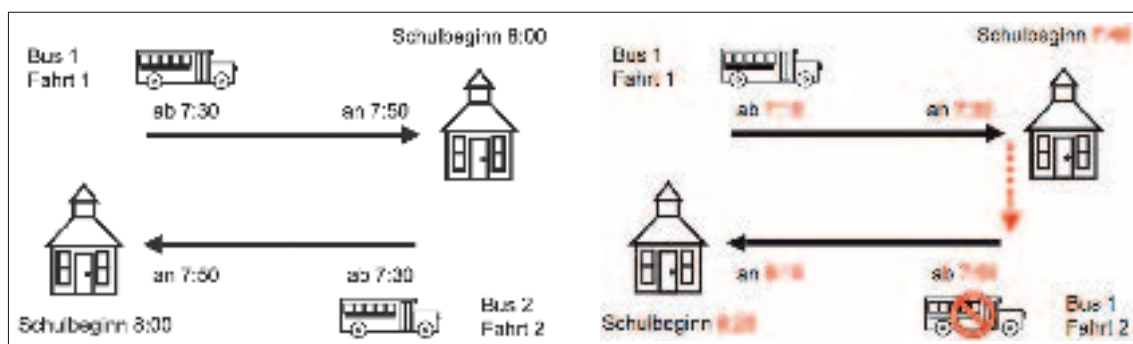


Abb. 1:  
Das Optimierungsprinzip  
Model for Optimization



der Software auf schnellen Rechnern in annehmbarer Zeit nicht lösbar. An dieser Stelle schlägt die Stunde der Heuristiken.

Heuristiken sind Lösungsverfahren, die im Gegensatz zum Branch-and-Cut-Verfahren nicht die globale Optimalität der gefundenen Lösung garantieren. Sie garantieren im Allgemeinen nicht einmal, dass überhaupt eine zulässige Lösung gefunden wird. Dafür liegt die Laufzeit deutlich unter der von exakten Verfahren. Die bekanntesten Verfahren sind zum Beispiel Greedy, Lokale Suche, Simulated Annealing, Tabu-Suche oder Genetische Algorithmen.

Zur Lösung von VRPCTW verwenden wir einen hybriden Ansatz, welcher heuristische und exakte Techniken mischt und so das Beste aus den zwei Welten vereint. Durch das Lösen von Teilproblemen mittels eines exakten Verfahrens kann garantiert werden, dass eine zulässige Lösung gefunden wird. Die Auswahl der Teilprobleme übernimmt eine Greedy-Heuristik, so dass die Lösungen nach sehr kurzer Zeit dem Anwender zur Verfügung stehen. Dieses Optimierungsverfahren wurde in der Doktorarbeit des Autors vorgestellt [1] ist durch die TU Darmstadt mittlerweile patentrechtlich geschützt. [3]

### Ergebnisse

Das beschriebene Verfahren zur Lösung des VRPCTW bildet den Kern der Software IKOSANA. Während der Entwicklungsphase wurde es auf Datensätze aus fünf Landkreisen angewandt. Drei der Landkreise liegen in Nordrhein-Westfalen (Lk2, Lk3, Lk5), jeweils einer in Mecklenburg-Vorpommern (Lk1) und in Sachsen-Anhalt (Lk4). Die folgende Tabelle gibt Aufschluss

über die Größe des Landkreises (Fläche, Einwohner, Schulen). Etwa 10% der Einwohner sind Schüler an allgemein bildenden Schulen, wiederum die Hälfte davon nutzt den ÖPNV für den Schulweg. Die letzten beiden Spalten enthalten die Anzahl der gegenwärtig eingesetzten Fahrzeuge (Busse-Ist) sowie die Anzahl Fahrzeuge in der von IKOSANA berechneten Lösung (Busse-Plan). Das Einsparpotenzial liegt jeweils zwischen 12% und 27% der eingesetzten Busse.

### Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Einbeziehung der Schulanfangszeit in die Fahrt- und Umlaufplanung kann der ÖPNV insbesondere im ländlichen Raum deutlich wirtschaftlicher betrieben werden. Um dieses Potenzial in den jeweiligen Kreisen auch auszuschöpfen, bieten die Arbeitsgruppe Diskrete Optimierung und das Zentrum für Integrierte Verkehrssysteme ZIV gemeinsam den Einsatz der Software IKOSANA in Form einer Beratungsdienstleistung für Verkehrsunternehmen und -träger an. Gegenwärtig wird es im Rahmen dieser Kooperation in zwei hessischen Landkreisen eingesetzt.

Die Reduzierung der Fahrzeugflotte um einen einzigen Bus bedeutet bereits Einsparungen von etwa 30.000 € an staatlichen Zuschüssen. Nimmt man an, dass pro Landkreis im Durchschnitt 10 Busse durch die Schulzeitstafelung gespart werden können, und rechnet man dieses auf alle 323 Landkreise Deutschlands hoch, so ergibt sich ein Einsparungspotenzial von etwa 100 Mio. € für die kommunalen Haushalte – Jahr für Jahr. Angesichts der knappen kommunalen Haushalte ist dies eine nicht zu vernachlässigende Größe. Worauf warten wir noch?

Landkreis	Fläche in km <sup>2</sup>	Einwohner	Schulen	Busse-Ist	Busse-Plan	Potenzial
Lk1	1.921	93.935	43	82	65	21%
Lk2	1.792	438.765	102	226	175	23%
Lk3	1.327	307.809	82	90	66	27%
Lk4	798	94.556	37	43	38	12%
Lk5	967	345.370	84	176	134	24%

### Literatur

[1] Armin Fügenschuh: The Integrated Optimization of School Starting Times and Public Transport, Doktorarbeit, Logos Verlag Berlin, 165 Seiten, Oktober 2005.  
 [2] Armin Fügenschuh, Alexander Martin: Computational Integer Programming and Cutting Planes, In: K. Aardal, G. Nemhauser, R. Weismantel (Hrsg.), Handbooks in Operations Research and Management Science Vol. 12: Handbook on Discrete Optimization, Elsevier, 69 - 122, 2005.

[3] Armin Fügenschuh, Alexander Martin: Verfahren und Vorrichtung zur automatischen Optimierung von Schulanfangszeiten und entsprechendes Computerprogramm, Deutsches Patent DE 102004020786A1, 18 Seiten, November 2005.  
 [4] Peter Stöveken: Wirtschaftlicherer Schulverkehr: ÖPNV-Optimierung mit erfolgsabhängiger Honorierung. Der Nahverkehr 3, 65 – 68, 2000.

## Autor

Armin Fügenschuh, Jahrgang 1974, studierte von 1995-2000 Mathematik in Oldenburg und ist seit 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Mathematik an der TU Darmstadt. 2005 Promotion, seit Oktober 2005 tätig im SFB 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung“.

## Arbeitsgruppe Diskrete Optimierung an der TU Darmstadt

Die Arbeitsgruppe „Diskrete Optimierung“, zur Zeit 15 wissenschaftliche Mitarbeiter, ist im Fachbereich Mathematik an der TU Darmstadt angesiedelt. In der Forschung beschäftigt sich die Gruppe mit der Entwicklung von Methoden zur Lösung schwieriger diskreter Optimierungsprobleme aus Industrie und Wirtschaft. Schwerpunkte der Arbeiten sind:

- die mathematische Modellierung praktischer Fragestellungen,
- die theoretische Analyse (vorwiegend mit Methoden aus den Bereichen der Graphentheorie, der polyedrischen Kombinatorik und der Theorie zur ganzzahligen Programmierung)
- die Entwicklung und die Implementierung effizienter Algorithmen und deren Umsetzung in die Praxis.

Dieser interdisziplinäre Charakter spiegelt sich auch in den Anwendungsgebieten wider, in denen die Arbeitsgruppe ihre Schwerpunkte hat, beispielsweise bei der Standortplanung in Telekommunikation, bei der Frequenzzuweisung im Mobilfunk, im Supply Chain Management, im Energiemanagement oder in der Biomathematik (Proteinfaltung).

### Fachgebietsleiter:

Prof. Dr. rer. nat. Alexander Martin, Tel.: 06151-16-3394, martin@mathematik.tu-darmstadt.de

### Ansprechpartner:

Dr. Armin Fügenschuh, Tel.: 06151-16-3689, fuegenschuh@mathematik.tu-darmstadt.de

### Anschrift:

TU Darmstadt, Arbeitsgruppe Diskrete Optimierung  
Schlossgartenstraße 7 • 64289 Darmstadt,  
www.opt.tu-darmstadt.de

# Connecting Parts.

## MOTOMAN-EA1400N und EA1900N – wieviel Verbindung möchten Sie?

Wir entwickeln die Zukunft für Sie: mehr als 360° Bewegungsfreiheit in jeder Roboterposition. Speziell für die hohen Anforderungen im Schutzgasschweißen wurde die EA-Serie entwickelt. Als Varianten stehen Ihnen der MOTOMAN-EA1400N und der EA1900N mit einem noch größeren Arbeitsradius zur Verfügung. Die durchdachte Lösung erlaubt es unter schwierigsten Bedingungen optimale Ergebnisse zu erzielen.

MOTOMAN-EA1400N und EA1900N – die intelligente Lösung für Ihre Anforderungen von Heute und Morgen.

### Ihre Vorteile:

- Vergrößerter Arbeitsbereich
- Sehr gute Zugänglichkeit in den Vorrichtungen und Bauteilen durch integrierte Schlauchpaketführung
- Offline = Online
- Keine undefinierten Störkonturen machen das synchrone Arbeiten mehrerer Roboter auf engstem Raum möglich
- Bisher unerreichte Verfügbarkeit durch geringe mechanische Beanspruchung



Rotationsfreiheitsgrad auch über 360° der 6. Roboterachse



MOTOMAN robotec GmbH

Zentrale: Kammerfeldstr.1 · D-85391 Allershausen

Tel. 0 81 66/90-0 · [www.motoman.de](http://www.motoman.de)

Vertriebsbüro Frankfurt: Im Katzenforst 2

D-61476 Kronberg · Tel. 0 61 73/60 77 30



# Rekeying Prozessor: Eine skalierbare Lösung für die Schlüsselverwaltung in Gruppenkommunikation

Abdulahadi Shoufan/Sorin A. Huss

Schlüsselverwaltung im sicheren Multicast wirft ein Skalierbarkeitsproblem auf, wenn die Gruppe eine hohe Dynamik aufweist. Der präsentierte Rekeying Prozessor erzielt eine skalierbare Schlüsselaktualisierung und Verteilung und erhöht somit die Dienstgüte des Systems und die Sicherheit der Gruppe.

*A scalable Solution for the Key Management in Group Communication* Key management in secure multicast raises a scalability problem in large dynamic groups. The presented Rekeying Processor enables a scalable key updating and distribution which results in both a higher Quality of Service in the system and in a higher group security.



## Einleitung: Multicast-Rekeying

Zahlreiche Anwendungen im Internet basieren auf einer sicheren Gruppenkommunikation. Hierzu gehören Fernkonferenzen, automatische Softwareaktualisierung, Videostreaming und die Verteilung von Aktien- und Finanzdaten. Eine effiziente Methode zur Datenübertragung von einem Sender zu mehreren Empfängern stellt die Multicast-Technik dar, durch die das Datenpaket, im Gegensatz zur Unicast-Technik, nur einmal gesendet werden muss. Die Paketduplikation übernehmen spezielle Multicast-Router an den erforderlichen Stellen des Netzes (Bild 1).

Multicasting hat allerdings das inhärente Problem, dass sich jeder Internet-Benutzer jeder Multicast-Gruppe anschließen und somit an derer Kommunikation teilnehmen kann. Dies macht eine Verschlüsselung der Daten unabdingbar, wenn lediglich einer autorisierten Teilnehmergruppe der Zugriff gewährt werden soll. Für diesen Zweck wird ein gemeinsamer so genannter *Gruppenschlüssel*  $k_g$  verwendet. Für die Verteilung dieses Schlüssels dienen benutzerspezifische Schlüssel  $k_d$  ( $k_1$  bis  $k_5$  im Bild 1), die die Benutzer bei ihrer Registrierung erhalten. In dynamischen Gruppen muss der Kommunikationsschlüssel  $k_g$  jedes Mal aktualisiert und verbreitet werden, wenn sich die Gruppenzusammensetzung ändert, denn lediglich hierdurch wird eine zukünftige Zugriffskontrolle gegenüber verlassenden Mitgliedern und eine rückwärtige Zugriffskontrolle gegenüber neuen Mitgliedern sichergestellt. Der Prozess der Aktualisierung und Verteilung von  $k_g$  wird als *Gruppen-Rekeying* bezeichnet.

Angenommen, das Mitglied  $m_2$  im Bild 1 soll abgetrennt werden, weil es beispielsweise als Bankkunde seine Smartcard mit dem benutzerdefinierten Schlüssel verloren hat. In diesem Fall wird ein neuer Gruppenschlüssel generiert, mit jedem  $k_d$  der bleibenden Benutzer verschlüsselt und verschickt; dies entspricht einem Rekeying-Aufwand von  $n-1$  Verschlüsselungen. Es handelt sich somit um eine lineare Abhängigkeit der Rekeying-Kosten vom Gruppenumfang, für große Gruppen somit um ein *Skalierbarkeitsproblem*.

## Logische Schlüsselhierarchie LKH

In LKH [1] werden die Gruppenmitglieder in hierarchischen Teilgruppen mit jeweils einem so genannten Hilfsschlüssel  $k_{x,y}$  eingeteilt (Bild 2).

Mit dieser Strategie muss der Server nun für das Rekeying nicht jeden einzelnen Benutzer ansprechen, stattdessen adressiert er Teilgruppen. So müssen für die Trennung des Mitglieds  $m_2$  in Bild 2 nicht 7 Rekeying Nachrichten ( $n-1$ ) berechnet werden, sondern nur 5. Dies lässt sich dadurch erklären, dass – ausschließlich  $k_2$  – alle Schlüssel im Besitz von  $m_2$ , also  $k_{2,3}$ ,  $k_{0,3}$  und  $k_{g,3}$  aktualisiert und verschlüsselt werden müssen.  $k_{2,3}^{neu}$  wird an  $m_3$  verschlüsselt mit  $k_3$  gesendet.  $k_{0,3}^{neu}$  wird an zwei Teilgruppen mit den Schlüsseln  $k_{0,1}$  und  $k_{2,3}^{neu}$  verschlüsselt und verschickt. Ähnliches gilt für  $k_{g,3}^{neu}$ , der mit  $k_{0,3}^{neu}$  und  $k_{4,7}$  verschlüsselt wird. Der Performanzgewinn durch LKH geht auf die logarithmische Abhängigkeit der Rekeying-Kosten von der Gruppengröße zurück, wie Tabelle 1 zu entnehmen ist.



## Batch Rekeying

Eine Methode zur Beschleunigung des Rekeying besteht in der Batch-Verarbeitung von Rekeying-Anfragen [2]. Hierbei werden zunächst mehrere solcher Anfragen innerhalb eines festgelegten Intervalls erfasst und die zu verarbeitenden Schlüssel markiert. In einem zweiten Schritt werden die markierten Schlüssel aktualisiert und verschlüsselt. Durch diese Strategie wird eine wiederholte Verarbeitung von einigen Schlüsseln vermieden, die in Echtzeit-Rekeying unumgänglich ist. Batch Rekeying verschlechtert allerdings die Dienstgüte und die Zugriffskontrolle im System, da neue Mitglieder länger warten müssen und zu trennende Benutzer die Zugriffsberechtigung länger behalten.

Bild 1:  
Potentielle Umgebung für sichere Multicast-Kommunikation  
Potential Environment for secure multicast communication

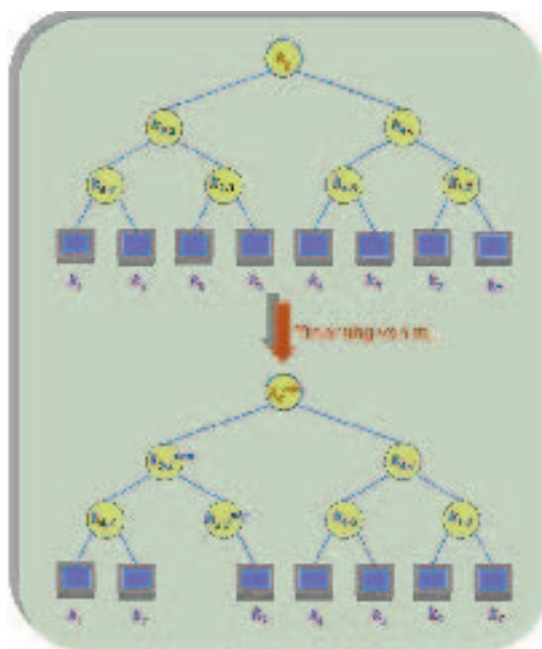


Bild 2:  
LKH: Logische Schlüsselhierarchie  
LKH: Logical Key Hierarchy

Tabelle 1:  
Rekeying-Kosten in LKH vs. einfachem Ansatz  
Rekeying costs in LKH vs. simple scheme

	n Verbindungen	
	Einfacher Ansatz	LKH
Verbindung eines Mitglieds	2	$2 \log_2 n$
Trennung eines Mitglieds	$n-1$	$(2 \log_2 n) - 1$
Beibehaltung	$O(n)$	$O(\log_2 n)$



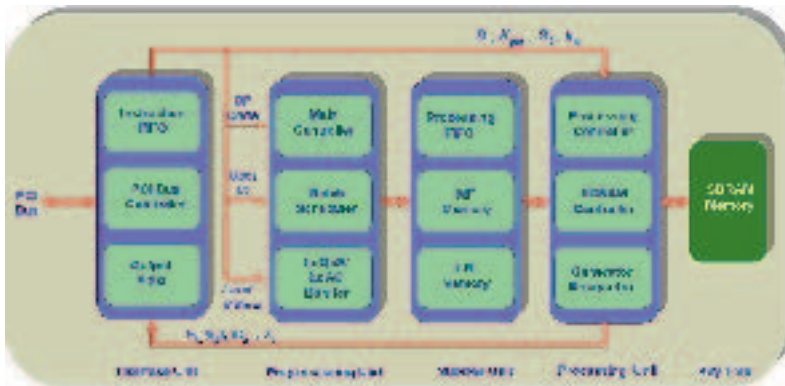
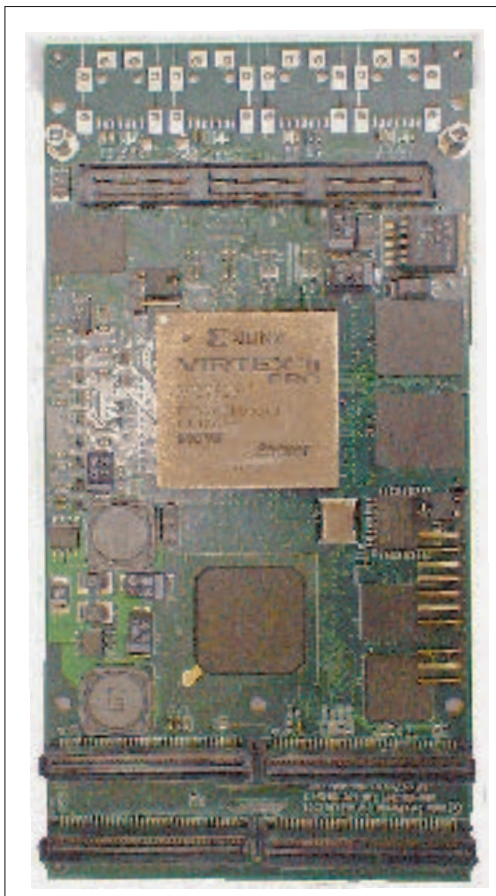


Bild 3:  
BRP: Batch Rekeying Processor  
BRP: Batch Rekeying Processor

### Batch Rekeying Processor

Rekeying basiert auf zeitaufwendigen Operationen wie der Verschlüsselung und Schlüsselgenerierung, die durch eine Hardware-Unterstützung effizienter ausgeführt werden. Das Fachgebiet Integrierte Schaltungen und Systeme hat erstmalig Hardware-Architekturen zur Beschleunigung des Multicast-Rekeying entwickelt und implementiert. Hierzu gehören der *Rekeying Prozessor RP* [3], der das Rekeying in Echtzeit ausführt, und der *Batch Rekeying Prozessor BRP* [4], der das oben beschriebene Batch Rekeying unterstützt. Im Folgenden wird der BRP als Beispiel näher erläutert. Bild 3 zeigt den Grundaufbau des Batch Rekeying Prozessors, der den Rekeying Server aus Bild 1 ersetzt und als Coprozessor in der Serverumgebung fungiert. Der BRP empfängt Rekeying-Anfragen in Form von Instruktionen aus dem Registrierungsserver über den PCI Bus. Die in die Instruction-FIFO eingelesenen Instruktionen werden vom Main-Controller dekodiert,

Bild 4:  
ADM-XPL Karte mit VirtexII-Pro FPGA  
ADM-XPL card with VirtexII-Pro FPGA



der dann den Batch-Scheduler zur Durchführung der Schlüsselmarkierung veranlasst. Der Markierungsprozess generiert Informationen über die markierten Schlüssel, sowie deren Verarbeitungsart und -richtung. Diese Informationen werden in der Subtree-Einheit abgespeichert. Der Batch-Scheduler schätzt während der Markierung außerdem die Verarbeitungszeit des aktuellen Stapels ab und liefert diese an den LoQoS-Monitor. Dieses Modul

bewertet den Verlust an Dienstgüte und Zugriffskontrolle und unterbricht den Hauptkontroller, sobald vordefinierte Grenzen überschritten werden. In diesem Fall beendet der Controller die Markierung und veranlasst die Processing-Einheit, die markierten Schlüssel zu verarbeiten. Die Processing-Einheit generiert neue Schlüssel und verschlüsselt sie entsprechend den Markierungsdaten in der Subtree-Einheit. Die hierdurch entstehenden Rekeying-Nachrichten werden in die Output-FIFO geschrieben und von dort aus an den Registrierungsserver übertragen. Im Herzen der Processing-Einheit steht der Encryptor/Generator, der die Verschlüsselung basierend auf dem neuen Verschlüsselungsstandard AES berechnet und neue Schlüssel mittels eines Pseudo-Zufallgenerators nach ANSI X9.17 generiert.

### Implementierung und Ergebnisse

Als Zielplattform dient die PCI-Karte ADM XPL von der Firma Alpha Data Inc (Bild 4). Die Karte ist dem Baustein 2VP20 der Serie VirtexII-Pro der Firma Xilinx bestückt.

Der Rekeying Prozessor unterstützt Gruppen mit 131.072 Mitgliedern. Durch eine Taktung mit der Frequenz 133MHz ergeben die in Tabelle 2 angegebenen Messwerte, die mögliche Softwarelösungen gegenüber gestellt sind. Trotz seiner prototypischen, nicht optimierten Auslegung liefert der BRP einen mindestens sechsfachen Performancegewinn. Dieser Performancegewinn reflektiert sich unmittelbar auf die Dienstgüte und Sicherheit zur schnelleren An- und Abmeldung von Gruppenmitgliedern.

### Zusammenfassung und laufende Arbeiten

Dieser Beitrag hat eine effiziente Hardware-Lösung für die Skalierbarkeitsproblem in Multicast Rekeying präsentiert. Die laufenden Arbeiten befassen sich mit den folgenden Themen:

1. Optimierung des Verschlüsselungsalgorithmus, um eine „Rekeying-gerechte“ AES-Architektur bereit zu stellen.
2. Signierung der Rekeying-Nachrichten zur Unterbindung möglicher Manipulation.
3. HW/SW Codesign für den Rekeying Prozessor. Hierbei sollen die steuerintensiven Operationen auf den im VirtexII-Pro eingebetteten Power PC Prozessor verlagert werden, um die Hardware Ressourcen für zeitintensive Aufgaben freizugeben.
4. Vernetzung des BRP zur Reduzierung der Kommunikation auf dem PCI-Bus.

Tabelle 2:  
Rekeying Performanz im BRP vs. SW-Lösungen  
Rekeying performance in BRP vs. SW solutions

	SW: AMD Duron 100 MHz, 64 KB cache, 256 MB RAM	SW: Intel Xeon 1.0 GHz, 512 KB cache, 1 GB RAM	HW: Batch Rekeying Processor
Word-case Einzelkodierung	1,068 ms	0,399 ms	0,065 ms
Word-case Einzelverschlüsselung	1,059 ms	0,387 ms	0,065 ms

## Das Fachgebiet Integrierte Schaltungen und Systeme an der TU Darmstadt

Die Forschung am Fachgebiet Integrierte Schaltungen und Systeme (ISS) ist im Bereich der Technischen Informatik angesiedelt. Das Fachgebiet gehört dem Fachbereich Informatik der TU Darmstadt an und wird von Prof. Sorin Huss geleitet, der vor 15 Jahren aus der Industrie an die TU Darmstadt berufen wurde. Über die Zweitmitgliedschaft seines Leiters im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik bildet ISS eine Brücke zwischen der Informatik und der Elektrotechnik an dieser Universität, die sich in der von Prof. Huss initiierten Einrichtung des gemeinsamen Bachelor/Master-Studiengangs „Informationssystemtechnik“ konkretisiert hat.

Die Forschungsarbeiten am ISS lassen sich in drei Kompetenzbereiche einteilen. Der Bereich „Hardware/Software Koentwurf“ befasst sich mit Fragestellungen einer ganzheitlichen Entwurfsmethodik für eingebettete Systeme. Der Kompetenzbereich „Sicherheitstechnik“ hat die Entwicklung und Systemintegration anwendungsspezifischer Koprozessoren zum Ziel, die das in praxisrelevanten Verschlüsselungs- und Authentifizierungssystemen

häufig geforderte Echtzeitverhalten erst ermöglichen. Der dritte Kompetenzbereich „Heterogene Systemkomponente“ erforscht Problemstellungen der Modellierung, der ausführbaren Modellrepräsentation und der Hardware-Synthese unter Verwendung von standardisierten Beschreibungssprachen wie VHDL, VHDL-AMS und SystemC.

Vielfältige Kooperationen mit Forschungseinrichtungen in Europa, USA und China und gemeinsame Projekte mit Unternehmen aus dem In- und Ausland werden für eine praxisnahe Ausrichtung der laufenden Forschungsarbeiten genutzt.

### Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Sorin Alexander Huss  
Hochschulstraße 10  
D-64283 Darmstadt  
Tel.: 0 6151/16-3980 • Fax: 0 6151/16-4810  
E-Mail: [huss@iss.tu-darmstadt.de](mailto:huss@iss.tu-darmstadt.de)  
[www.vlsi.informatik.tu-darmstadt.de](http://www.vlsi.informatik.tu-darmstadt.de)

### Literatur

- [1] Wallner, D., E. Harder, and R. Agee, "Key Management for Multicast: Issues and Architectures", RFC 2627, IETF, June 1999.
- [2] X. Li, Y. R. Yang, M. Gouda, S. S. Lam, "Batch Updates of Key Trees", TR-2000-22 Sep. 19, 2000.
- [3] A. Shoufan and S. A. Huss, "A Scalable Rekeying Processor for Multicast Pay-TV on Reconfigurable Platforms" Workshop on Application Specific Processors, IEEE/ACM Int. Conf. on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, Stockholm, Schweden, Sep. 2004.
- [4] A. Shoufan, S. A. Huss and M. Cutleriwala, "A Novel Batch Rekeying Processor Architecture for Secure Multicast Key Management", Int. conf. on High Performance Embedded Architectures and Compilers, Barcelona, Spanien Nov. 2005, LNCS 3793, Seiten 169-183.



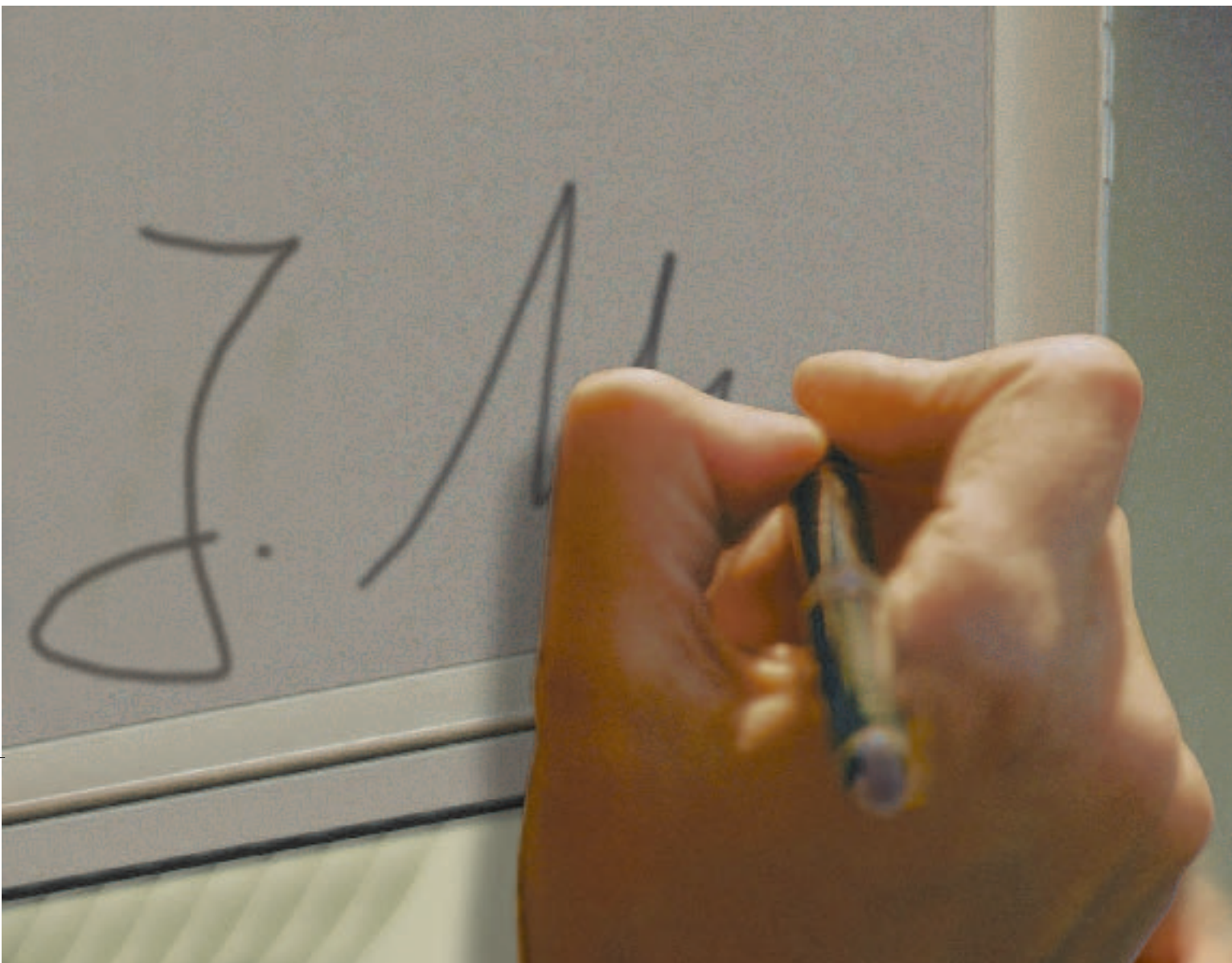
...more than IT Solutions

Innovativ, erfahren,  
qualitätsbewusst –  
diese Eigenschaften nutzen  
wir, um unseren Kunden  
integrierte und profunde  
Lösungen mit einer hohen  
Lebensdauer zu bieten.

[www.danet.com](http://www.danet.com)

**danet**<sup>Group</sup>





## Die eigenhändige Unterschrift im Multichannel Banking

Nicolas Repp/Rainer Berbner/Alejandro Pérez/Oliver Heckmann/Ralf Steinmetz

Der Beitrag beschäftigt sich mit dem Einsatz der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift, einem biometrisches Verfahren, zur Vereinheitlichung der Authentifizierung und Autorisierung im Multichannel Banking. Die Potentiale der Technologie werden an einem Prototyp für das Online-Banking aufgezeigt.

***Multichannel Banking using digital handwritten signatures*** The article describes the application of digital handwritten signatures in multichannel banking scenarios. Digital handwritten signatures can be used for the integration of different channels in multichannel banking. The article discusses the use of this biometrical approach in an online banking scenario.

## Einleitung

Unsichere Formen der Authentifizierung und Autorisierung im Online-Banking sorgen regelmäßig für negative Schlagzeilen. Dritte erschleichen sich von Bankkunden persönliche Identifikations- (PIN) und Transaktionsnummern (TAN), um unter deren Verwendung unautorisierte Banktransaktionen vorzunehmen (z.B. durch Phishing-Attacken [1], [2]). Ursache hierfür ist u.a. der Einsatz von Verfahren für Authentifizierung und Autorisierung, die auf Grund ihrer Abstraktheit zu niedriger Akzeptanz und einem daraus resultierenden niedrigen Risikobewusstsein der Kunden führen können. Vermindertes Risikobewusstsein ist es jedoch, welches, z.B. im Falle von Phishing, den Bankkunden zur fahrlässigen Herausgabe seiner Daten bewegen kann.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Einsatz der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift zur Vereinheitlichung der Authentifizierung und Autorisierung im Multichannel Banking. Die digitalisierte eigenhändige Unterschrift basiert auf einem biometrischen Verfahren zur Erkennung von individuellen Merkmalen der menschlichen Unterschrift. Es wird aufgezeigt, welche Potentiale diese Technologie zur Erhöhung der Sicherheit, zur Reduzierung der Medienbrüche sowie zur Steigerung der Anwenderfreundlichkeit und -akzeptanz aufweist.

Weiterhin wird ein Prototyp vorgestellt, welcher die Konzepte am Beispiel Online-Banking umsetzt. Der Prototyp entstand im Rahmen der Forschungen des Fachgebiets Multimedia Kommunikation (KOM) der Technischen Universität Darmstadt, des E-Finance Lab, Frankfurt am Main, sowie von SOFTPRO, einem Anbieter von Software für die Verarbeitung von digitalisierten eigenhändigen Unterschriften.

## Digitalisierte eigenhändige Unterschrift als Integrationsmittel

Die eigenhändige Unterschrift als nahe liegende Form der Authentifizierung und Autorisierung wurde in bisherigen Banklösungen kaum betrachtet. Dabei kann die eigenhändige Unterschrift, wenn sie direkt beim

Schreiben digitalisiert wird, in einer Vielzahl bestehender Produkte und Szenarien eingesetzt werden.

Die Unterschrift hat unter den biometrischen Merkmalen eine Sonderstellung. Sie kann als aktive Willenserklärung nicht ohne das Einverständnis ihres rechtmäßigen Inhabers abgegeben werden. Im Gegensatz zur passiven Aufnahme von Körpermerkmalen wie Retina oder Fingerabdrücken, erfordert das Unterschreiben einen aktiven Vorgang. Die Unterschrift wird nicht vergessen und kann auch nicht ohne den Einsatz aufwendiger Verfahren kompromittiert werden. Als allgemein übliche Form der Willenserklärung bei Transaktionen und Verträgen ist sie wenig erklärungsbedürftig und ihre Bedeutung den Kunden hinreichend bekannt.

Eine digital aufgezeichnete Unterschrift besitzt statische und dynamische Merkmale (z.B. [3], [4] und [6]). Zu den Merkmalen zählen neben dem Abbild der Unterschrift z.B. auch Beschleunigungs- und Drucksignale, die beim Schreiben ermittelt werden können.

Der Einsatz der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift kann zusätzlich zu den beschriebenen Vorteilen hinsichtlich Sicherheit und Anwenderfreundlichkeit auch zur Beseitigung von Medienbrüchen in Prozessen und zur Integration verschiedener Zugangs- bzw. Vertriebskanäle eingesetzt werden (Abbildung 1).

Ein Bankkunde kann innerhalb unterschiedlicher Kanäle seine Produkte mit derselben Authentifizierungs- und Autorisierungsmethode verwenden. Beispielsweise müssen Freistellungsaufträge aus dem Download-Bereich der Online-Bank oder Anträge zur Kontoeröffnung in der Filiale nicht mehr ausgedruckt und in Papierform verarbeitet werden, sondern können direkt digital vom Kunden unterschrieben werden.

## Umsetzung im Rahmen des Online-Bankings

Um die Anwendbarkeit der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift zur Authentifizierung und Autorisierung innerhalb von Bankkanälen zu demonstrieren, wurde eine prototypische Umsetzung am Bei-

Abbildung 1: Multichannel Integration auf Basis der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift  
Multichannel integration by digital handwritten signatures

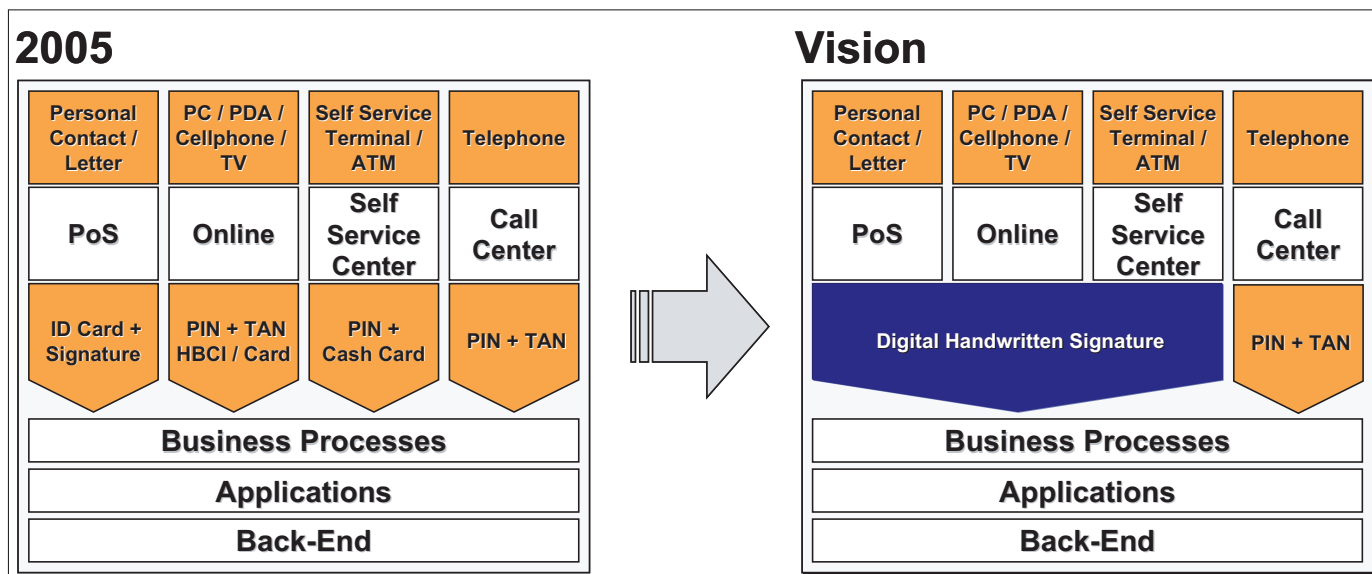




Abbildung 2:  
Anmeldung durch digitalisierte  
eigenhändige Unterschrift

Login by digital hand-  
written signatures



spiel Online-Banking realisiert. Der Prototyp beinhaltet eine Vielzahl von Funktionen einer traditionellen Online-Bank, in welcher für Authentifizierung und Autorisierung zusätzlich auf die Verwendung der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift zurückgegriffen werden kann [5].

Ein Benutzer kann auf der Startseite der Online-Bank zwischen der Eingabe seiner PIN und der Verwendung der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift wählen. Die digitalisierte eigenhändige Unterschrift wird hierbei über ein Schrifteingabegerät (z.B. Tablet-PC oder Pen-Pad) aufgenommen (Abbildung 2). Nach erfolgreicher Authentifizierung kann der Benutzer zwischen verschiedenen banktypischen Transaktionen wählen (z.B. Kontoabfrage oder Überweisung). Analog zur Authentifizierung kann zum Abschluss der Transaktion die Autorisierung alternativ mit der digitalisierten eigenhändigen Unterschrift vorgenommen werden.

## Fazit

Die im Vergleich zu traditionellen Lösungen gesteigerte Akzeptanz unseres Ansatzes konnte bereits im Rahmen von Demonstrationen und Road-Shows evaluiert werden. Zukünftig soll der Ansatz in anderen Kanälen umgesetzt und evaluiert werden. Innerhalb einer weiteren Phase wird die Sicherheit des Prototyps abschließend untersucht werden.

## Das Fachgebiet Multimedia Kommunikation (KOM) an der Technischen Universität Darmstadt

An der Vision einer nahtlosen Kommunikation arbeiten seit 1996 regelmäßig bis zu 25 Wissenschaftler des Fachgebiets Multimedia Kommunikation (KOM) unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz. Ein Schwerpunkt der Forschung sind neuartige IT-Architekturen. In diesem Bereich ist auch der Forschungscluster 2 des E-Finance Lab, Frankfurt am Main, angesiedelt. Daneben forscht KOM auf den folgenden Feldern:

- Peer-to-Peer Networking
- Mobile Networking
- Network Mechanisms
- Communication Services
- Ubiquitous Computing
- Media Creation, Management & Usage in E-Learning
- Security

### Zu den Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz ist Leiter des Fachgebiets Multimedia Kommunikation (KOM) an der Technischen Universität Darmstadt sowie Leiter des Forschungscluster 2 des E-Finance Lab, Frankfurt am Main. Dr.-Ing. Oliver Heckmann leitet die Forschungsgruppe „Peer-to-Peer Networking“ am Fachgebiet. Dipl.-Wirtsch.-Inform. Nicolas Repp, Dipl.-Wirtsch.-Inform. Rainer Berbner sowie Dipl.-Ing. Alejandro Pérez sind wissenschaftliche Mitarbeiter der Forschungsgruppe „IT Architectures“ sowie Mitglieder des E-Finance Lab, Frankfurt am Main.

## Informationen zum E-Finance Lab

Das E-Finance Lab ist eine Kooperation zwischen der Johann Wolfgang Goethe Universität Frankfurt am Main, der Technischen Universität Darmstadt sowie einem Netzwerk von Industriepartnern. Das Ziel des E-Finance Lab ist die Entwicklung von Methoden zur Industrialisierung der Finanzindustrie.

Der Schwerpunkt des von Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz geleiteten Cluster 2 des E-Finance Lab liegt in folgenden Bereichen:

- Management Service-orientierter Architekturen
- Web Services zur Umsetzung Service-orientierter Architekturen
- Erforschung von Dienstgüte (Quality of Service) für Web Service basierte Workflows

### Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Steinmetz  
Merckstraße 25 • D-64283 Darmstadt  
Tel: +49 6151/16-61 50 • Fax: +49 615 /16-61 52  
E-Mail: Ralf.Steinmetz@KOM.tu-darmstadt.de  
Internet: www.kom.tu-darmstadt.de

## Literatur

- [1] D. Bachfeld: Nepper, Schlepper, Bauernfänger - Risiken beim Online-Banking. c't, 22/2005, S. 148.
- [2] eBanker: Online-Bank muss wegen "Phishing"-Angriffs schließen. Mitteilung im Onlinedienst www.ebanker.de am 13. Oktober 2005.
- [3] A. van Gemmert, G. van Galen, H. Hardy: Dynamical features of disguised handwriting. In Proceedings 5th European Conference for Police and Handwriting Experts, The Hague, Netherlands 1996.
- [4] K. Han, I. Sethi: Signature identification via local association of features. In International Conference on Document Analysis and Recognition, Montreal, 1995, S. 187-190.
- [5] N. Repp, R. Berbner, J. Lenz, C. Kaplan, A. Perez, O. Heckmann, R. Steinmetz: Digitalisierte eigenhändige Unterschrift im Online-Banking. In Proceedings of D-A-CH Security 2006, März 2006
- [6] C. Schmidt: Online Unterschriftenanalyse zur Benutzerverifikation. Dissertation, RWTH Aachen, 1999.



## Phishing, Pharming & Co. im Zahlungsverkehr

Uwe H. Schneider/Heribert M. Anzinger

Aktuelle Legitimationsverfahren im elektronischen Zahlungsverkehr basieren auf Magnetkarten und Geheimnummern. Der Beitrag befasst sich mit der Verteilung des Missbrauchsrisikos. Er zeichnet aktuelle Entwicklungen nach, beleuchtet rechtliche Fragen und zeigt die enge Verknüpfung technischer und rechtlicher Probleme auf.

*Phishing and Pharming et al. in payment transactions* Current authorisation methods in cashless payment transactions are based on magnetic cards and secret numbers. The article concerns the risk distribution of abuses. It traces recent developments, illuminates legal aspects and points out the close connections between technical and legal problems.



Muss der Gesetzgeber, müssen Gerichte und Verwaltung, Anwälte und Steuerberater etwas von Technik verstehen? Sollten Gerichte, die das Verdrängen bestimmter Produkte wegen ihrer Gefährlichkeit verbieten, erkennen, weshalb die Produkte besondere Risiken mit sich bringen? Oder dürfen sie „ins Blaue hinein“ entscheiden? Und spiegelbildlich: Was sollten Ingenieure und Informatiker, Chemiker und Physiker von den rechtlichen Rahmenbedingungen ihrer Tätigkeit verstehen, von Technikrecht, vom Datenschutzrecht, vom Vertrags- und Steuerrecht? Böse Überraschungen erleben manche bei Vertragsstrafen, die in Allgemeinen Geschäftsbedingungen versteckt sind, bei Mangelfolgeschäden, die vertraglich nicht begrenzt werden und beim Verlust des Eigentumsvorbehalts bei Lieferungen über die Grenze. Etwas zynisch könnte man als Anwalt sagen, der „ahnungslose“ Ingenieur sei in der Folge ein „wunderbarer“ Klient, erschreckt über die Folgen seiner Ahnungslosigkeit – und zahlungsfähig. Wer gesellschaftliche Verantwortung trägt, wer verantwortlich für Lehre und Forschung ist, wird sich für wechselseitiges Verständnis einsetzen.

## Legitimation von Kunden

Was dies bedeutet, soll im Folgenden exemplarisch am Beispiel der Legitimation von Kunden gegenüber Banken gezeigt werden. Worum geht es? Es ist eine Binsenweisheit, dass nur der berechtigte Kunde über sein Konto verfügen kann. Für die Bank oder Sparkasse bedeutet dies, dass eine Auszahlung an den Nichtberechtigten oder die Ausführung eines Überweisungsauftrags durch einen Nichtberechtigten keinen Aufwendungsersatzanspruch gegen den Konteninhaber begründet. Die Bank muss den Schaden tragen. Und das macht gewiss keine Freude.

Der Grundsatz, dass nur der Berechtigte gegenüber der Sparkasse oder Bank wirksam verfügen kann, gilt auch für die modernen Techniken des Zahlungsverkehrs. Zu Lasten des Konteninhabers kann am Geldausgabeautomaten, oder beim electronic banking nur der Berechtigte verfügen. Dabei muss grundsätzlich die Sparkasse oder die Bank beweisen, dass der Berechtigte gehandelt hat.

Also wird eine Bank oder Sparkasse überlegen, wie sie die Identität des Kunden feststellt. Wenn der Mitarbeiter der Bank oder Sparkasse, etwa in einer Kleinstadt, seine Kunden persönlich kennt, ist das kein Problem. Mitarbeiter wechseln aber gelegentlich den Arbeitsplatz und Kunden gehen nicht immer zur selben Zweigstelle. Dann kennt man den Kunden am Schalter nicht persönlich. Traditionell dient dann die Unterschrift als Erkennungszeichen, gegebenenfalls in Verbindung mit dem Personalausweis. Bei Geldausgabeautomaten, Kontoauszugsdruckern, am Bankterminal und beim electronic banking ist die Unterschrift durch andere Legitimationsverfahren verdrängt worden. Am Geldausgabeautomaten identifiziert sich der Kunde durch den Besitz seiner ec-Karte und die Kenntnis der Geheimnummer (PIN). Beim electronic banking ist das PIN/TAN-Verfahren weit verbreitet. Beide Verfahren nehmen für sich in Anspruch, vor Missbrauch hinreichend geschützt zu sein. Gleichzeitig häufen sich Meldungen über ec-Karten-Missbrauch, Phishing, Pharming, Trojanische

Pferde. Phishing ist ein Kunstwort (Password-Fishing) für eine Form des Trickbetruges im Internet. Phishing-Mails sind gefälschte offiziell wirkende Schreiben von Dritten, die den Kunden verleiten sollen, vertrauliche Informationen, etwa PIN und TAN von Online-Banking-Zugängen, im guten Glauben dem Täter preiszugeben. Beim Pharming wird der Bankkunde auf gefälschte Internetseiten umgeleitet, die in zur Preisgabe seiner geheimen Zugriffsdaten verleiten sollen.

Mit der wachsenden Verbreitung moderner Methoden des Zahlungsverkehrs stellen sich Fragen, in denen technische und juristische Probleme untrennbar miteinander verbunden sind: Sind die derzeit angewandten Legitimationsverfahren ec-Karte/PIN und PIN/TAN geeignet, den Berechtigten mit hinreichender Sicherheit zu identifizieren? Wer trägt das Risiko für einen Missbrauch der ec-Karte und des electronic banking-Systems? Welche technischen Vorkehrungen kann der Kunde von seiner Bank zur Missbrauchsabwehr erwarten? Welche Sorgfalt kann die Bank von ihren Kunden im Umgang mit den zur Verfügung gestellten technischen Einrichtungen (ec-Karte, Internet-Banking-Zugang) verlangen?

Bestes Beispiel für diese Verknüpfung rechtlicher und technischer Fragen ist der ec-Karten-Missbrauch: Wie soll die Bank reagieren, wenn der Karteninhaber den Verlust seiner Karte meldet, die Karte sogleich sperren lässt und später reklamiert, dass eine kurz vor Vollzug der Sperrung vorgenommene Abhebung nicht von ihm durchgeführt worden ist? Geht man von der materiellen Rechtslage aus, trifft das technische Missbrauchsrisiko in vollem Umfang die Bank. Sie muss beweisen, dass der Berechtigte am Geldausgabeautomaten verfügt hat. Wie aber soll sie diesen Beweis führen, wenn nicht gerade eine Videoaufnahme des Kunden beim Geldabheben vorliegt?

Die Konsequenz dieses Beweisproblems kann nicht sein, dass die bloße Behauptung des Konteninhabers genügt, das Geld nicht selbst und auch nicht durch einen Beauftragten abgehoben zu haben, um die Belastung des Girokontos zu vermeiden. Der Anreiz zum „Missbrauch“ durch den Kontoinhaber ist offensichtlich.

## Erleichterte Beweisführung

Die Rechtsprechung hat den Banken daher die Beweisführung erleichtert und auf die Sicherheit des ec-Karte/PIN-Verfahrens abgestellt: Wenn es technisch ausgeschlossen sei, die richtige PIN zu erraten oder zu errechnen, dann spreche ein Anscheinsbeweis dafür, dass der Karteninhaber entweder das Geld selbst abgehoben oder die PIN weitergegeben oder die PIN auf der ec-Karte notiert bzw. gemeinsam mit dieser verwahrt hat. Im letzten Fall steht der Bank zwar kein Aufwendungsersatzanspruch zu. Die gemeinsame Verwahrung von PIN und Karte stellt aber die Verletzung einer vertraglichen Nebenpflicht dar, aus der sich ein Schadenersatzanspruch der Bank in Höhe des abgehobenen Betrages ergibt.

Vor diesem Hintergrund haben sich Richter mit der technischen Frage beschäftigt, ob die eingesetzte 128 BIT Triple-DES-Verschlüsselung ausreicht, um die PIN vor den Entschlüsselungsversuchen unberechtigter Dritter zu schützen. Zuletzt hat der Bundesge-

richtshof am 5.10.2004 entschieden, dass es bei dem derzeit eingesetzten Verfahren mathematisch ausgeschlossen sei, die PIN einzelner Karten zu errechnen. Die richtige PIN könne nur durch sorgfaltspflichtwidrige Aufbewahrung oder durch Ausspähen in die Hände eines unberechtigten Dritten gelangen.

Mit der (technischen) Feststellung des Bundesgerichtshofs, dass das Verschlüsselungsverfahren sicher sei, trägt das Risiko des ec-Kartenmissbrauchs im Ergebnis nun der Kunde, es sei denn, er kann nachweisen, dass die PIN von einem Dritten erspäht wurde. An diesen Nachweis stellt der BGH hohe Anforderungen. Weil der Kunde danach im Regelfall nicht beweisen kann, dass seine PIN ausgespäht worden ist, trägt effektiv der Kunde den Schaden aus dem Missbrauch des ec-Kartensystems.

Der BGH hat sich nicht mit der Frage beschäftigt, ob es technische Verfahren gibt, mit denen das Risiko des Ausspähens der PIN nicht verbunden ist und die auch dem Kunden geringere Sorgfaltspflichten im Umgang mit ec-Karte und PIN auferlegen, etwa biometrische Verfahren zur Legitimationsprüfung.

Das Missbrauchsrisiko beim electronic banking hat die Gerichte noch wenig beschäftigt. Die Grundprobleme sind ähnlich. Auch bei Online-Überweisungen muss die Bank beweisen, dass der Überweisungsauftrag vom Berechtigten stammt. Kann sie das nicht, darf sie dem Girokonto des Kunden den Überweisungsbetrag nicht belasten. Sie kann aber wie beim ec-Kartenmissbrauch einen Schadensersatzanspruch gegen den Kunden geltend machen, wenn dieser sei-

ne vertraglichen Nebenpflichten verletzt hat. Auch hier sind noch viele Fragen ungeklärt: Wie wahrscheinlich ist es, dass die PIN errechnet oder erraten werden kann? Welche Vorkehrungen muss die Bank treffen, um die Internetverbindung hinreichend gegen Ausspähen der PIN zu schützen? Ist es eine schuldhaftige Pflichtverletzung des Kunden, wenn er auf eine täuschend echte Aufforderung der Sparkasse oder der Bank (Phishing-Mail) seine PIN und TAN offenbart? Verletzt der Kunde seine Sorgfaltspflichten, wenn er keinen Virenschoner und keine Firewall installiert und so Trojanischen Pferden den Stall bereitet? Muss er die Sicherheitszertifikate für SSL-verschlüsselte Webseiten überprüfen, um Pharming-Attacken abzuwehren? Wie viel technischer Sachverstand darf den Bankkunden im Rahmen der Allgemeinen Geschäftsbedingungen von den Banken abverlangt werden?

Die Rechtsprechung zum ec-Kartenmissbrauch wirft technische und juristische Fragen auf. Die Verteilung des Missbrauchsrisikos bei der Verwendung von electronic cash und electronic banking ist ein rechtliches Problem, das ohne technischen Sachverstand nicht gelöst werden kann. Spiegelbildlich ist die Entwicklung von Softwaresystemen zur Abwicklung von electronic banking ein technisches Problem, das ohne Kenntnis und Absicherung der Haftungsrisiken nicht angegangen werden sollte. Diese Erkenntnis lehrt, dass es für Juristen und Ingenieure gleichermaßen wichtig ist, die Entwicklungen in der jeweils anderen „Welt“ zu verfolgen.

### Fachgebiet für Deutsches, Europäisches und Internationales Wirtschaftsrecht an der TU Darmstadt

Professor Dr. jur. Uwe H. Schneider, Fachgebiet für Zivilrecht, deutsches und internationales Wirtschaftsrecht, Geschäftsführender Direktor des Instituts für Rechtswissenschaft, Technische Universität Darmstadt; Direktor des Instituts für deutsches und internationales Recht des Spar-, Giro- und Kreditwesens, Johannes Gutenberg-Universität Mainz; Mitglied des deutschen Übernahmerats bei der Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht; ständiger Vertreter der Bundesrepublik Deutschland bei der United Nations Commission on International Trade Law, New York/Wien sowie in der Steering Group on Corporate Governance der OECD, Paris.  
E-Mail: [uwe.h.schneider@jus.tu-darmstadt.de](mailto:uwe.h.schneider@jus.tu-darmstadt.de)

Assessor jur. Heribert M. Anzinger, Wirtschaftsjurist (Univ. Bayreuth), wissenschaftlicher Mitarbeiter am

Institut für Rechtswissenschaft, Technische Universität Darmstadt.

E-Mail: [heribert.anzinger@jus.tu-darmstadt.de](mailto:heribert.anzinger@jus.tu-darmstadt.de)

Forschungsschwerpunkte des Instituts für Rechtswissenschaften im Unternehmensrecht am Fachgebiet Zivilrecht II: Deutsches, europäisches und internationales Handelsrecht, Gesellschafts- und Konzernrecht sowie deutsches, europäisches und internationales Kapitalmarktrecht.

Fachgebiet für Deutsches, Europäisches und Internationales Wirtschaftsrecht

Technische Universität Darmstadt  
Hochschulstraße 1 • 64289 Darmstadt

Tel.: 06151/16-2818

[www.bwl.tu-darmstadt.de/jus2](http://www.bwl.tu-darmstadt.de/jus2)

#### Literatur

- Borges, Georg, Rechtsfragen des Phishing – Ein Überblick, NJW 2005, S. 3313 - 3317  
Hofmann, Christian, Schadensverteilung bei Missbrauch der ec-Karte, WM 2005, S. 441 - 455  
Singhof, Daniela, Legitimation gegenüber Kreditinstituten, Berlin 2005  
Strube, Hartmut, Richter und Technik, BKR 2004, S. 497 - 502

#### Rechtsprechung

- BGH v. 5.10.2004, XI ZR 210/03, WM 2004, 2309  
- OLG Hamm, Urteil v. 17.3.1997, 31 U 72/96, WM 1997, 1203