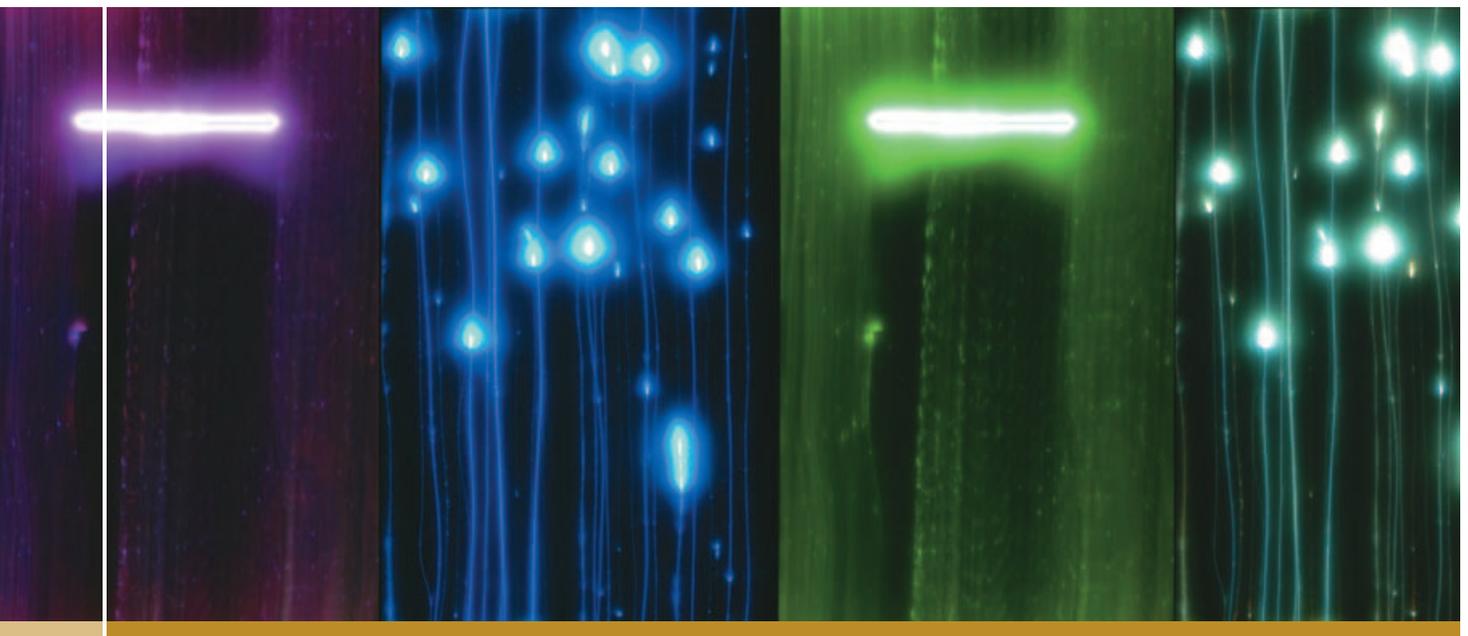


# Faserverbundwerkstoffe in Architektur und Bauwesen

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



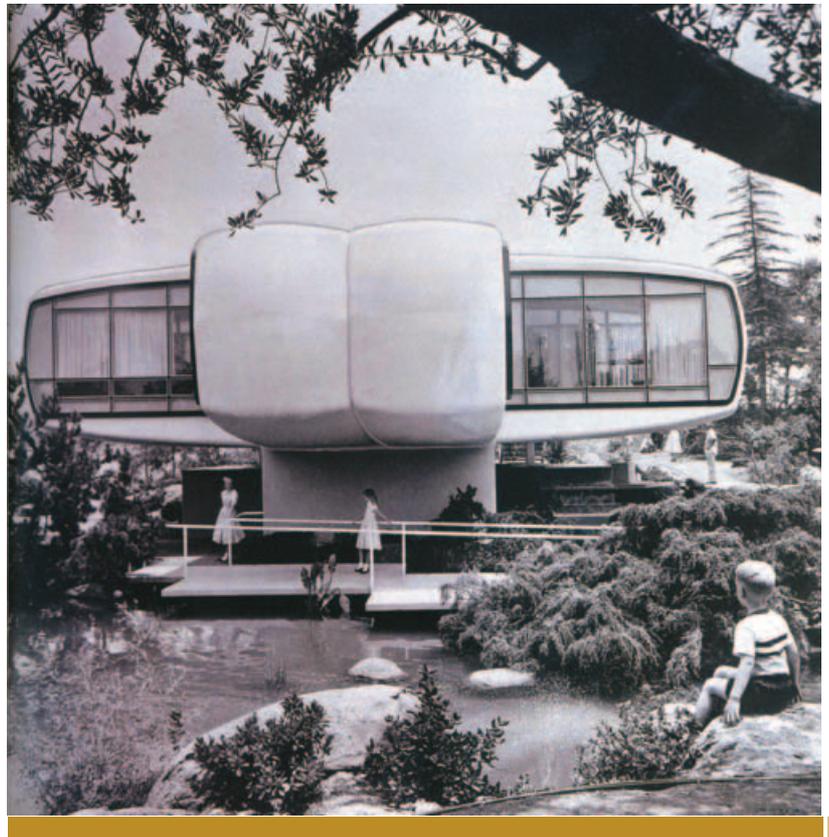
Trotz der enormen Resonanz in der Öffentlichkeit war diesen Bauten kein nachhaltiger Erfolg beschieden. Zum Teil mag das an den baukonstruktiven und bauphysikalischen Problemen gelegen haben, mit denen diese frühen Pionierbauten zu kämpfen hatten. Letztlich ausschlaggebend war aber das Fehlen einer angemessenen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

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

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

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

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



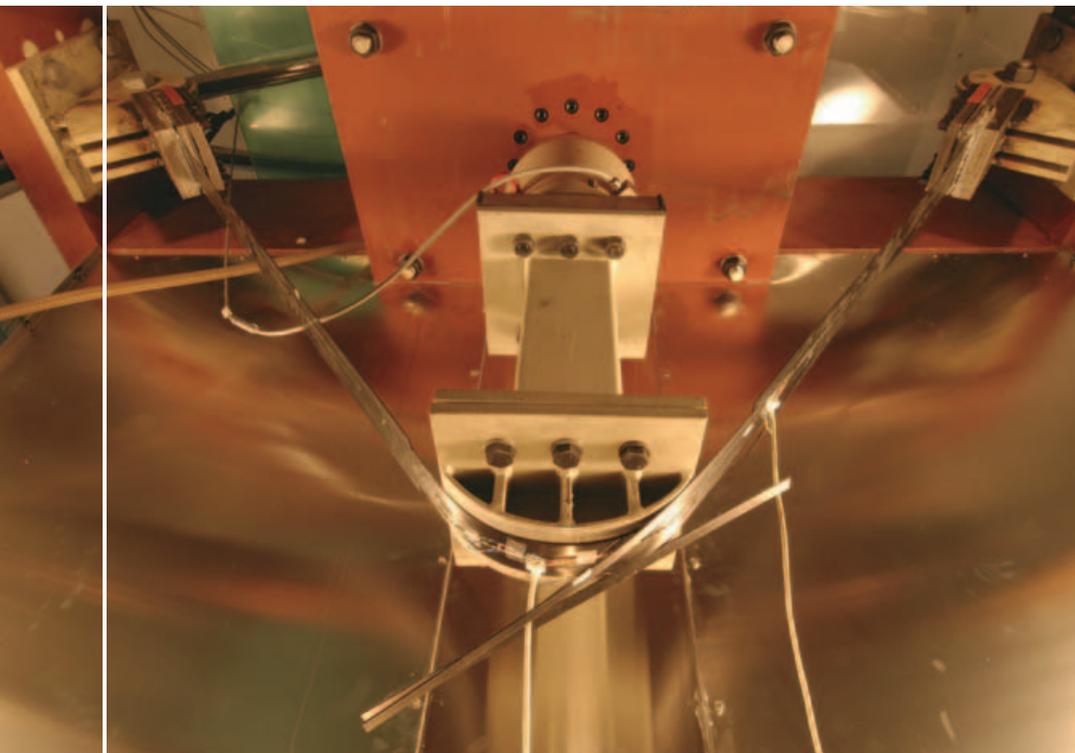
*Monsanto Haus 1957: Eines der ersten Häuser mit einer Hülle aus glasfaserverstärktem Kunststoff.*

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

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

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

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



02

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

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

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

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

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

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

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

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

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

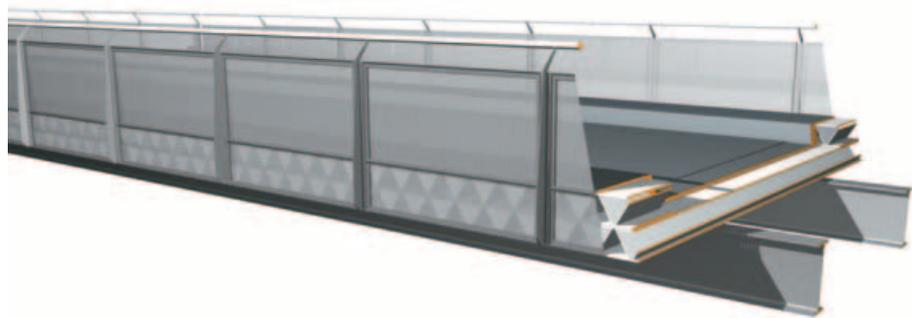
Eine Alternative stellt die Verwendung von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) für Brücken und Brückenfahrbahnen dar, denn dieser Werkstoff ist gegen Frost und Tausalze beständig, das Hauptproblem unserer Betonbrücken. Der zweite wesentliche Vorteil ist das geringe Gewicht: Eine Kunststoffbrücke wiegt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

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

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

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

Eine Brücke, die wie das englische Bauwerk vollständig aus GFK besteht, ist auf sehr kleine Spannweiten beschränkt, da der Werkstoff gegenüber Stahl oder Beton eine geringe Verformungssteifigkeit hat: der E Modul pultrudierter GFK Profile liegt bei etwa 14.000 MN/m<sup>2</sup>, beträgt also weniger als 1/10 des E-Moduls von Stahl. Der sehr



Brücke Friedberg: Stahlhauptideck mit aufgeklebter GFK-Fahrbahn.

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

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

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

sowie die Klebeverbindung und die Haftung des Fahrbahnbelages untersucht.

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

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

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

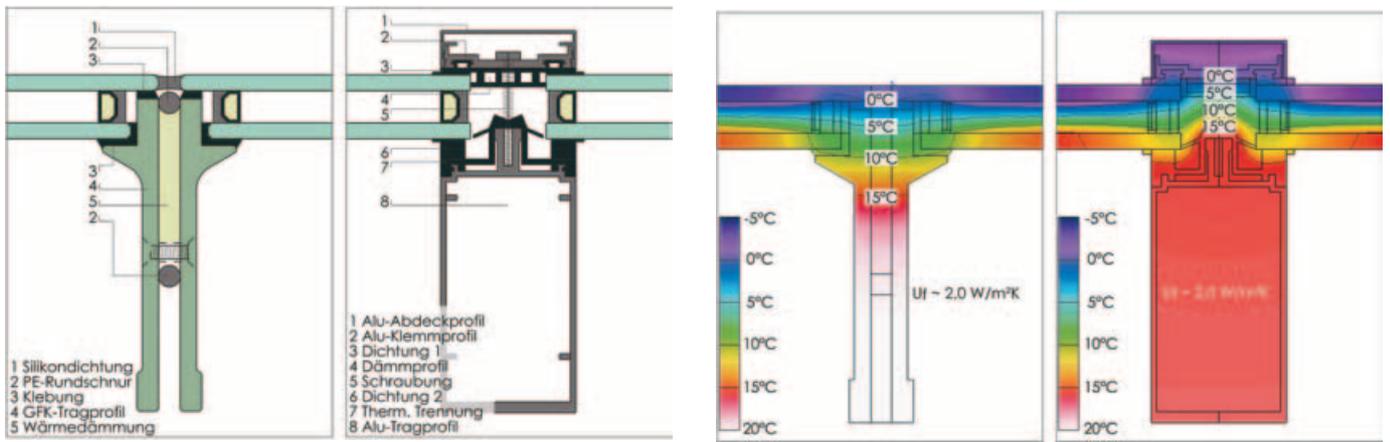
Der Aufbau konventioneller Metallfassaden wird nämlich wesentlich von der thermischen Trennung des Innenraums von der Umgebung bestimmt. Auch wenn die konstruktive Durchbildung schon lange sicher beherrscht wird, ist sie doch im Detail aufwendig. Neben den komplizierten Profilgeometrien sind Kunststoffelemente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

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



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

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



05

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

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

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

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

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

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



06

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

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

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

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

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

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

#### 4. Vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich Transparenz, Form und Farbe

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



07

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

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

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

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

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

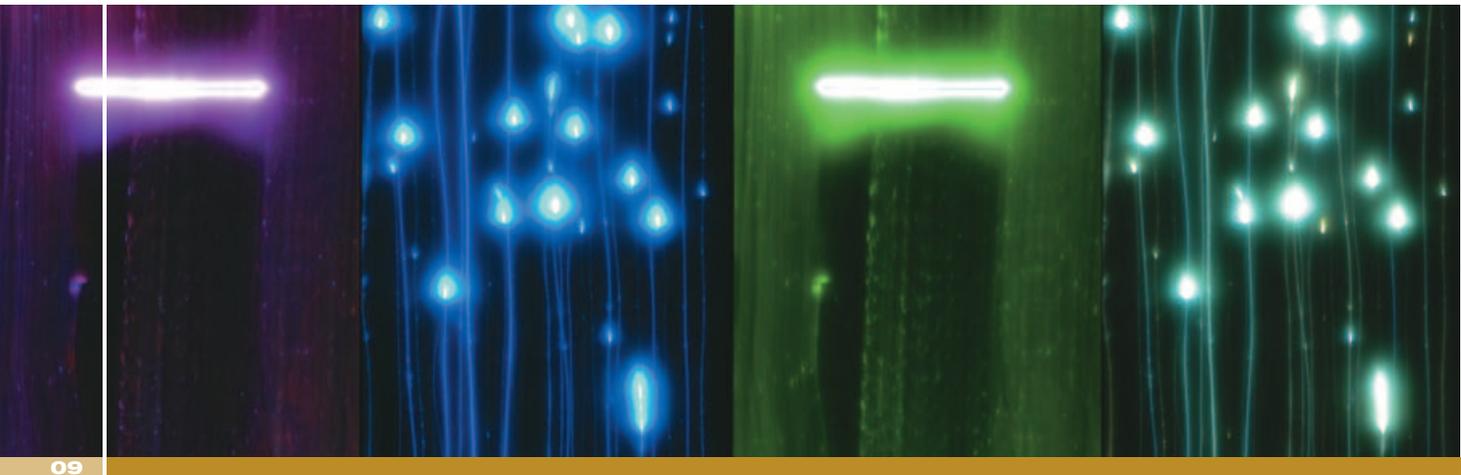


08

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

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

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



GFK-Platten mit einlamierten lichtleitenden Fasern.

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

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

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

## 5. Offene Fragen und Themen für künftige Projekte

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

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

chanischer Beanspruchung ermittelt. Dabei werden verschiedene Harzsysteme betrachtet.

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

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

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

## SUMMARY

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



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

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

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

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

Jan Knippers et al.

## DIE AUTOREN



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

## DIE AUTOREN UND MITARBEITER

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

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

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

### Kontakt

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

# ALUCORE® ALUCOBOND® KAPA®



## Constructive Sandwich Material



### KAPA®

Polyurethan Leichtstoffplatte

#### KAPA®inlay

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

#### KAPA®core

- offenzellig
- elastisch und verformbar

#### KAPA-Term®

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

#### KAPA-Term®DVD

- sehr hohe Steifigkeit
- hohe Formstabilität
- geringes Gewicht



### ALUCORE®

Aluminium-Wabenkern-  
Verbundplatte

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



### ALUCOBOND®

Aluminium-Verbundplatte

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

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