

# Verbundwerkstoffe

17. Symposium Verbundwerkstoffe und  
Werkstoffverbunde

Herausgegeben von  
Walter Krenkel

**DGM**  
Deutsche Gesellschaft  
für Materialkunde e.V.



WILEY-  
VCH

WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA



# Verbundwerkstoffe

Herausgegeben von  
Walter Krenkel

**DGM**



WILEY-  
VCH

WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA

**Beachten Sie bitte auch  
weitere interessante Titel  
zu diesem Thema**

Krenkel, W. (Hrsg.)

**Ceramic Matrix Composites**

2008

ISBN: 978-3-527-31361-7

Kainer, K. U. (Hrsg.)

**Metal Matrix Composites**

**Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering**

2006

ISBN: 978-3-527-31360-0

Scheffler, M., Colombo, P. (Hrsg.)

**Cellular Ceramics**

**Structure, Manufacturing, Properties and Applications**

2005

ISBN: 978-3-527-31320-4

Krenkel, W., Naslain, R., Schneider, H. (Hrsg.)

**High Temperature Ceramic Matrix Composites**

2001

ISBN: 978-3-527-30320-5

Heinrich, J. G., Aldinger, F. (Hrsg.)

**Ceramic Materials and Components for Engines**

2001

ISBN: 978-3-527-30416-5

# Verbundwerkstoffe

17. Symposium Verbundwerkstoffe und  
Werkstoffverbunde

Herausgegeben von  
Walter Krenkel

**DGM**  
Deutsche Gesellschaft  
für Materialkunde e.V.



WILEY-  
VCH

WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA

## **Herausgeber**

Prof. Dr.-Ing. Walter Krenkel  
Lehrstuhl Keram. Werkstoffe  
Universität Bayreuth  
Ludwig-Thoma-Str. 36 b  
95440 Bayreuth

1. Auflage 2009

**Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Printed in the Federal Republic of Germany

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

**Satz** WGV, Weinheim

**Druck** betz-druck GmbH, Darmstadt

**Bindung** Litges & Dopf GmbH, Heppenheim

**Cover Design** Adam Design, Weinheim

**ISBN:** 978-3-527-32615-0

## Vorwort

Im Gegensatz zu früheren Phasen der Industrialisierung beherrscht heute kein einzelner Werkstoff oder keine einzelne Werkstoffklasse die technische Entwicklung. Gerade in den Kombinations- und Variationsmöglichkeiten der Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde besteht ein enormes Zukunftspotenzial mit einer großen Hebelwirkung auf zukünftige Innovationen. So gehen aktuelle Studien davon aus, dass rund 70 Prozent aller technischen Innovationen direkt oder indirekt von Werkstoffen abhängen. Die wichtigsten werkstoffbasierten Branchen in Deutschland erzielen derzeit einen jährlichen Umsatz von nahezu einer Billion Euro.

Vor dem Hintergrund hoher Rohstoffpreise und knapper werdender Ressourcen gewinnen Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbundsysteme daher immer mehr an Bedeutung. Es besteht generell ein zunehmender Bedarf an leichten, verschleißarmen, temperatur- und korrosionsbeständigen Polymeren, Metallen und Keramiken. Durch die Kombination von teilweise gegensätzlichen Eigenschaften der einzelnen Komponenten können Verbundsysteme völlig neue Eigenschaftsprofile aufweisen und zusätzliche Anforderungen erfüllen.

Dabei kommt der Gestaltung der Grenzfläche zwischen den einzelnen Komponenten eine entscheidende Bedeutung zu. Während zum Beispiel in polymeren Faserverbundwerkstoffen die Bindungskräfte zur Erzielung maximaler Verstärkungseffekte hoch sein sollten, wird in keramischen Verbundwerkstoffen das Interface möglichst schwach eingestellt, um hohe Duktilisierungseffekte zu erzielen. In metallischen Verbundwerkstoffen muss die Reaktivität zwischen Verstärkungskomponente und Matrix durch eine kompatible Faserbeschichtung reduziert werden, während in Biomaterialien wiederum die Wechselwirkung mit komplexen biologischen Systemen wie Zellen und Organismen im Vordergrund steht.

Die Entwicklung von Bauteilen und Strukturkomponenten aus Verbundwerkstoffen ist folglich eine ausgeprägt interdisziplinäre und stoffklassenübergreifende Aufgabe und umfasst alle Aspekte des modernen Werkstoff-Engineerings von der materialgerechten Auslegung und Berechnung über kostengünstige Fertigungsverfahren unter Einbeziehung von Verbindungs- und Beschichtungstechniken bis hin zu Lebensdaueranalysen unter Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren.

Trotz der Tatsache, dass alle Industriezweige in direkter oder indirekter Form auf Werkstoffe angewiesen sind, spielen diese in der öffentlichen Wahrnehmung meist eine untergeordnete Rolle. Zwar stehen Werkstoffe am Anfang nahezu aller Güter und Produkte des täglichen Gebrauchs, ihr Innovationspotenzial wird jedoch oft verkannt. Dies hängt auch mit der langen Zeitdauer zusammen, die zwischen der Entwicklung neuer Werkstoffe und ihrer Umsetzung in Produkte vergeht.

Folglich ist es umso erfreulicher, dass Verbundwerkstoffe auf eine über dreißigjährige Tradition einer eigenständigen Tagung zurückblicken können, die die kontinuierliche Entwicklung dieser Werkstoffklasse aufzeigt. Verbundwerkstoffe weisen seit Jahren ein überdurchschnittliches Wachstum auf, wobei Deutschland weltweit zu den führenden Composite-Standorten zählt.

Das nunmehr 17. Symposium "Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde" wurde vom 1. bis 3. April 2009 an der Universität Bayreuth durchgeführt. Die mehr als 120 Beiträge belegen eindrucksvoll die Aktualität dieses Themas und das wissenschaftliche und industrielle Interesse an den laufenden Entwicklungen.

Schwerpunkte der Tagung bildeten Verbundwerkstoffe mit keramischer, metallischer und polymerer Matrix sowie Biomaterialien. Die neuesten Entwicklungen auf diesen Gebieten wurden in Fachvorträgen und Posterbeiträgen in insgesamt 19 Sessions vorgestellt. Dieser Tagungsband enthält die weit überwiegende Anzahl dieser Beiträge und stellt damit einen Querschnitt der aktuellen Forschungsergebnisse zu diesem Thema dar.

Ich danke den Autoren für die termingetreue Einreichung der Manuskripte. Den Koordinatoren des Review-Prozesses, Professor Aldo Boccaccini, Professor Hans-Peter Degischer, Dr. Thomas Hipke, Professor Lothar Kroll, Professor Gunter Leonhardt, Professor Thomas Scheibel und Professor Bernhard Wielage sowie den Gutachtern danke ich ganz herzlich für ihr großes Engagement und ihre Kooperationsbereitschaft.

Mein besonderer Dank gilt Frau Jelitschek vom Lehrstuhl Keramische Werkstoffe der Universität Bayreuth und Frau von der Bey von der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde sowie dem Verlag Wiley-VCH für die angenehme Zusammenarbeit und für ihren außergewöhnlichen Einsatz, der das Erscheinen dieses Tagungsbandes erst möglich machte.

Bayreuth, April 2009

Walter Krenkel



# Inhalt

## Plenarvorträge

Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen .....	1
<i>U. Meier, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf (CH)</i>	
Werkstoffe und Technologien für den Automobil Leichtbau .....	12
<i>R. Stauber, BMW Group, München</i>	
Werkstoffverbunde im Automobilbau - neue Systemlösungen für komplexe Anforderungsprofile .....	27
<i>B. Reinhold, Audi AG, Ingolstadt; K. Angermann, AL-KO Dämpfungstechnik GmbH, Hartha</i>	

## Metallmatrix-Verbundwerkstoffe

Sonderforschungsbereich TRIP-Matrix-Composite .....	39
<i>H. Biermann, C. G. Aneziris, M. Kuna, Technische Universität Bergakademie Freiberg</i>	
Modellierung der Eigenschaften und des Versagens von Metallmatrix- Verbundwerkstoffen mit lamellarer Struktur .....	46
<i>T. Ziegler, A. Neubrand, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg</i>	
Gefügecharakterisierung von hochenergie-gemahlene Verbundpulvern und Verbundwerkstoffen mit EN AW 2017-Matrix .....	52
<i>B. Wielage, H. Podlesak, S. Mücklich, Technische Universität Chemnitz</i>	
Grenzflächenreaktionen bei der Herstellung von SiC <sub>p</sub> -Magnesium- oder -Aluminium- Metallmatrix-Verbundwerkstoffen auf schmelzmetallurgischem Weg .....	59
<i>A. Schiffl, ARC Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH, Ranshofen (A)</i>	
Herstellung von partikelverstärkten Verbundwerkstoffen durch Magnesiumspritzgießen .....	66
<i>C. Rauber, A. Lohmüller, M. Hilbinger, Neue Materialien Fürth GmbH, Fürth; S. Opel, Universität Erlangen-Nürnberg; M. Hartmann, Neue Materialien Fürth GmbH, Fürth; R.F. Singer, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen</i>	
Optimiertes Verfahren zur Herstellung von langfaserverstärkten Aluminiumverbundwerkstoffen .....	73
<i>T. Burbach, A. Bührig-Polaczek, B. Kuckhoff, RWTH Aachen</i>	
Herstellung von Kohlenstofflangfaser-Aluminiumverbunden im Druckguss .....	80
<i>H. Ballmes, C.A. Rottmair, R.F. Singer, Universität Erlangen-Nürnberg, Fürth</i>	

## VIII

Tomographische Analyse der Schädigungsentwicklung bei der Ermüdung eines partikelverstärkten Al-Matrix-Verbundwerkstoffes .....	87
<i>D. Tolnai, Eötvös Loránd Universität, Budapest (H); A. Borbély, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf; H. Biermann, Technische Universität Bergakademie Freiberg</i>	
Thermische Ermüdung von Diamant verstärktem Aluminium untersucht mittels Neutronen- und Synchrotron-Experimenten .....	94
<i>M. Schöbel, Technische Universität Wien (A); S. Vaucher, EMPA, Thun (CH); M. Hofmann, FRM2, Garching; P. Cloetens, ESFR, Grenoble (F); H.P. Degischer, Technische Universität Wien (A)</i>	
Kupfer-PCM-Verbundwerkstoffe für Anwendungen im Bereich des thermischen Managements .....	102
<i>S. Kalinichenka, T. Schubert, T. Weißgärber, B. Kieback, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Dresden</i>	
Fabrication of Nano-Reinforced Titanium Matrix Composites via Powder Metallurgy .....	109
<i>I. Montealegre Meléndez, E. Neubauer, Austrian Research Centers - ARC GmbH, Seibersdorf (A); H. Danninger, Technische Universität Wien (A); G. Mozdzen, Austrian Research Centers - ARC GmbH, Seibersdorf (A)</i>	
Dispersionsverstärkte Kontaktwerkstoffe auf Silberbasis - Herstellung, Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften .....	116
<i>B. Wielage, T. Lampke, H. Podlesak, T. Halle, H. Steger, Technische Universität Chemnitz</i>	
Zugeigenschaften infiltrierter Hochtemperatur-MMCs mit unterschiedlichen Faservolumengehalten .....	122
<i>J.M. Hausmann, J. Gussone, H. Schurmann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Köln</i>	
Mechanische Charakterisierung von SiC-faserverstärkten Kupfermatrix-Verbundwerkstoffen .....	127
<i>A. Brendel, V. Paffenholz, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching; Th. Köck, SGL Carbon GmbH, Meitingen</i>	
Interface Structure and Chemical Stability of Continuous Mo Wire Reinforced NiAl Composites.....	134
<i>J. Song, W. Hu, D. Hajas, G. Gottstein, RWTH Aachen</i>	
Structure, Chemical Stability and Properties of NiAl-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Interface Modified by MAX-Phase Interlayer .....	140
<i>W. Hu, J. Song, Y. Zhong, G. Gottstein, RWTH Aachen</i>	
MMC aus TRIP-Stahl und MgO teilstabilisiertem ZrO <sub>2</sub> durch bildsame Formgebung .....	147
<i>C. Aneziris, H. Biermann, W. Schärfl, U. Ballaschk, U. Martin, Technische Universität Bergakademie Freiberg</i>	

Mechanisches Verhalten ausgewählter Werkstoffsysteme verbundstranggepresster Leichtbauprofile unter quasistatischer Belastung .....	155
<i>T. Hammers, M. Merzkirch, K.A. Weidenmann, E. Kerscher, Universität Karlsruhe (TH)</i>	
Kriechverhalten von AMC-Lötverbindungen unter Einsatz partikelverstärkter Weichlote .....	162
<i>B. Wielage, I. Hoyer, S. Weis, Technische Universität Chemnitz</i>	
Charakterisierung des mechanischen Verhaltens verbundstranggepresster Leichtbauprofile unter schlagartiger Beanspruchung .....	168
<i>K.A. Weidenmann, T. Hammers, M. Merzkirch, E. Kerscher, Universität Karlsruhe (TH)</i>	
Polystyrol-Acrylnitril Nanokomposite Schäume .....	174
<i>P. Gutmann, Universität Bayreuth; C. Greiner, Brose GmbH &amp; Co, Coburg; H. Ruckdäschel, BASF SE, Ludwigshafen; D.S. Bangarusampath, V. Altstädt, Universität Bayreuth</i>	
Infiltration von 3D Netzwerken aus Kohlenstoff Nanomaterial (CNF/CNT) mit Kupfer und Kupferlegierungen .....	181
<i>M. Kitzmantel, Austrian Research Centers - ARC GmbH, Seibersdorf (A), und Technische Universität Wien (A); E. Neubauer, M. Hulman, Austrian Research Centers - ARC GmbH, Seibersdorf (A); I. Smid, Pennsylvania State University, University Park, PA (USA); T. Schubert, S. Forero, Future Carbon GmbH, Bayreuth; F. Hepp, High Performance Space Structure Systems (HPS) GmbH, München; L. Pambaguian, ESA-ESTEC, Noordwijk (NL)</i>	
Gewebe- und gewirkeverstärkter Aluminiumschaum für Leichtbaukonstruktionen .....	189
<i>M. Seeger, R. Helbig, Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., Chemnitz; J. Hohlfeld, C. Lies, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz</i>	

## **Keramische Verbundwerkstoffe**

Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Fertigungsparameter des PIP-Verfahrens auf die Materialeigenschaften von textilverstärkten Keramiken .....	195
<i>W. Hufenbach, H. Richter, T. Behnisch, A. Langkamp, Technische Universität Dresden</i>	
Characterization of Fiber-Matrix Interface Bonding at the CFRP Step of Fiber Fabrication Process by Single Fiber Push-out Technique .....	202
<i>J. Sha, J. M. Hausherr, W. Krenkel, Universität Bayreuth</i>	
Computertomografische Bestimmung von morphologischen Eigenschaften mittels angepasster Algorithmen .....	210
<i>J. M. Hausherr, T. Zeppenfeld, W. Krenkel, Universität Bayreuth</i>	
Versagenseffekte auf Grund von Makro-Fehlstellen in Oxidkeramischen Verbundwerkstoffen .....	219
<i>W. Pritzkow, Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik, Stuttgart; F. Deuerler, Universität Wuppertal; D. Koch, Universität Bremen; A. Rüdinger, Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung (SIC), Würzburg; K. Tushtev, Universität Bremen</i>	

Untersuchungen zur Entstehung von Porosität in Phenolharzmatrices bei der Härtung .....	226
<i>H. Mucha, Universität Bayreuth; Y.-E. Kim, Technische Universität Chemnitz; K. Kuroda, Nagoya University (J); W. Krenkel, Universität Bayreuth; B. Wielage, Technische Universität Chemnitz</i>	
Qualitative und Quantitative mikrostrukturelle Untersuchungen der Werkstoffe bei der Herstellung von C/SiC-Hochleistungskeramiken mittels Computertomografie.....	233
<i>J.M. Hausherr, Universität Bayreuth, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Bayreuth; C. Herrmann, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Bayreuth; C. Spatz, W. Krenkel, Universität Bayreuth und Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Bayreuth</i>	
Keramische Leichtbaumodule mit hoher geometrischer Variabilität .....	241
<i>S. Siegel, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden</i>	
Einsatz der Computertomografie zur zerstörungsfreien Prüfung und Charakterisierung von Faserverbundwerkstoffen .....	249
<i>C. Herrmann, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Bayreuth; J.M. Hausherr, W. Krenkel, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Bayreuth, und Universität Bayreuth</i>	
CMC-Bauteile für Heißgasanwendungen: Von der Entwicklung des Prototypen bis hin zum Serienbauteil .....	257
<i>M. Frieß, C. Zuber, S. Hofmann, M. Crippa, B. Heidenreich, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart</i>	
High Performance Pitch Based Carbon Fibers and Their Application .....	265
<i>H. Ohno, Nippon Graphite Fiber Corporation, Tokio (J)</i>	
In-Situ-Messung der Siliziuminfiltration von porösen C/C-Materialien .....	270
<i>J. Meinhardt, F. Raether, A. Klimera, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Würzburg; J. Daimer, SGL Brakes GmbH, Meitingen</i>	
Pyrolyse mittels Mikrowellen zur Herstellung von C-SiC Verbundkeramiken .....	277
<i>H.-S. Park, Universität Bayreuth und Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth; F. Yang, Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth; M. Rabenstein, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Bayreuth; M. Willert-Porada, Universität Bayreuth</i>	
Oxidkeramische Verbundwerkstoffe auf der Basis von Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) .....	285
<i>H. Neubert, T. Wamser, F. Barthmann, J. Lehmann, W. Krenkel, Universität Bayreuth</i>	
Entwicklung von Ultrahochtemperatur-beständigen Karbidkeramiken .....	292
<i>R. Voigt, W. Krenkel, G. Motz, Universität Bayreuth</i>	
Nuten- und Zirkularbearbeitung von faserverstärktem Siliziumkarbid mit Schleifstiften .....	298
<i>D. Biermann, T. Jansen, M. Feldhoff, Technische Universität Dortmund</i>	
Matrixharzkonzepte für die Herstellung von C/SiC-Verbundkeramiken .....	305
<i>F. Yang, D. Kunz, Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth; W. Krenkel, Universität Bayreuth</i>	

nanoCT: Dreidimensionelle Mikrostrukturanalyse von Verbundwerkstoffen mit Submikrometer-Auflösung .....	312
<i>S. Becker, O. Brunke, GE Sensing &amp; Inspection Technologies GmbH, Wunstorf; J. Starzmann, GE Sensing &amp; Inspection Technologies GmbH, Stuttgart</i>	

## **Polymere Verbundwerkstoffe**

Anfangsfixierung von Klebungen im Faserverbundbereich .....	319
<i>M. Frauenhofer, S. Böhm, K. Dilger, Technische Universität Braunschweig</i>	
Faserverstärkte Klebstoffe - Betrachtung der Verbundtragwirkung.....	326
<i>M. Göbel, F. Werner, Bauhaus-Universität Weimar</i>	
Fügen von CFK-Organoblechen durch Metall-Ultraschallschweißen.....	333
<i>F. Balle, G. Wagner, D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern</i>	
Vergleich eines Resin Transfer Moulding Epoxidharzsystems mit einem Prepregharzsystem .....	339
<i>M. Schubert, Toho Tenax Europe GmbH, Wuppertal</i>	
Charakterisierung triaxialer C-Faser-verstärkter Silikone und Epoxide.....	345
<i>J. Schimitschek, L. Datashvili, H. Baier, Technische Universität München, Garching</i>	
Nicht-thermisch härtende Kohlestofffaser-Kompositmaterialien auf Basis von Epoxidharzen .....	354
<i>F. Wolff-Fabris, V. Altstädt, Universität Bayreuth</i>	
Untersuchungen zum Verhalten von langfaserverstärkten Thermoplasten unter mechanischer Beanspruchung.....	361
<i>M. Grigo, K.A. Weidenmann, P. Elsner, Universität Karlsruhe (TH)</i>	
Vorhersage des Langzeitverhaltens kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) aus dem Kurzzeitverhalten unter Zugbelastung anhand des Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzips .....	368
<i>J. Wolfrum, Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-, Explosiv- und Betriebsstoffe, Erding</i>	
Kosteneffiziente Leichtbaustrukturen aus nachwachsenden Rohstoffen.....	376
<i>R. Rinberg, W. Nendel, L. Kroll, Technische Universität Chemnitz; K. Philipp, Polytec Automotive GmbH&amp;Co. KG, Geretsried</i>	
Neuartige kosteneffiziente thermoplastische Prepregs .....	382
<i>L. Kroll, M. Kausch, Technische Universität Chemnitz; H.J. Heinrich, J. Grünert, Cetex Institut für Textil- und Verarbeitungsmaschinen GmbH, Chemnitz</i>	
Einsatz der Preformtechniken zur Produktivitätssteigerung bei der Verarbeitung von Faserverbundkunststoffen .....	388
<i>J. Schulz, E. Kühne, B. Wielage, Technische Universität Chemnitz</i>	

Flexible Preformprozesskette für komplexe Hochleistungs-Faserverbund- Strukturbauteile.....	395
<i>U. Beier, J. Krämer, V. Altstädt, Universität Bayreuth; H. Spanner, C. Weimer, T. Roser, W. Buchs, Eurocopter Deutschland GmbH, München</i>	
Naturfaserverstärkte Kunststoffe als akustisch wirksame Bauelemente .....	401
<i>N. Aisenbrey, L. Frormann, Westsächsische Hochschule Zwickau; W. Maysenhölder, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart</i>	
Spritzgießprozess für textilverstärkte Kunststoffbauteile.....	407
<i>L. Kroll, J. Tröltzsch, F. Helbig, Technische Universität Chemnitz</i>	
Einfluss von Temperaturwechseln auf die Struktureigenschaften von CFK-Schaum-Sandwichstrukturen .....	413
<i>M. Gutwinski, R. Schäuble, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Halle</i>	
Sandwich-Spritzgießen (Coinjection) - Renaissance eines Klassikers für thermoplastische Werkstoffverbunde .....	420
<i>V. Reichert, A&amp;E Produktionstechnik GmbH, Dresden; H. Becker, StructoForm GmbH, Aachen</i>	
Schwingfestigkeits- und Schädigungsverhalten von mehrlagengestrick-verstärkten Kunststoffverbunden unter überlagerter Zug/Druck-Schubbeanspruchung .....	427
<i>M. Gude, W. Hufenbach, I. Koch, Technische Universität Dresden</i>	
Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) zur Charakterisierung des Härtungsvorgangs von Harzsystemen.....	433
<i>M. Schennen, W. Kunze, TA Instruments, Eschborn</i>	
Beanspruchungsgerechte Abstandsstrukturen für komplexe Leichtbauanwendungen durch funktionsgerechte Nähtechnik .....	440
<i>C. Herzberg, N. Zhao, H. Rödel, Technische Universität Dresden</i>	
Einfluss des CNT-Anteils auf die thermophysikalischen Eigenschaften von PEEK-Werkstoffen .....	447
<i>A. Lindemann, J. Blumm, H. Niedrig, NETZSCH Gerätebau GmbH, Selb</i>	
Rechnerische Abschätzung der modalen Dämpfung für die Auslegung komplexer Faserverbundstrukturen.....	453
<i>W. Hufenbach, M. Dannemann, J. Friedrich, F. Kolbe, Technische Universität Dresden</i>	
Micromechanical Processes and Fatigue Behaviour of Reactively Compatibilized PA 6/ABS Blends .....	461
<i>U. Handge, Universität Bayreuth; C. Sailer, ETH Zürich (CH); H. Steininger, M. Weber, BASF SE, Ludwigshafen; S. Scholtyssek, V. Seydewitz, G.H. Michler, Martin-Luther-Universität, Halle; C. Götz, F. Fischer, G.T. Lim, V. Altstädt, Universität Bayreuth</i>	
Das Verfahren der Hochdruckhomogenisierung – Eine neuartige Technologie zur Dispergierung von Nanopartikeln in flüssigen Harzsystemen.....	467
<i>J. Leib, U. Handge, V. Altstädt, Universität Bayreuth</i>	

Schallemissionsanalyse beschichteter kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe ..... 474  
*M. Sause, S. Horn, Universität Augsburg*

IMC-Spritzgießcompounder - Potentiale der Langfaserverstärkung ..... 482  
*M. Rohde, F. Fischer, V. Altstädt, Universität Bayreuth; C. Herrmann, Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC), Bayreuth; W. Krenkel, J.M. Hausherr, Universität Bayreuth*

Kosteneffiziente Herstellung von Sandwichkernen aus expandiertem Polypropylen (EPP) ..... 489  
*C. Trassl, D. Kunz, Neue Materialien Bayreuth GmbH, Bayreuth; V. Altstädt, Universität Bayreuth*

Dynamische Thermische Analyse unter hohen Lasten - Eine Betrachtung zur Arbeitsweise und zum Nutzen! ..... 495  
*H. Halm, H. Deckmann, Gabo Qualimeter Testanlagen GmbH, Ahlden/Aller*

## **Werkstoffverbunde und Schichten**

Stahl-Keramik-Verbunde durch Pulverspritzgießen ..... 502  
*A. Baumann, D. Mayer, T. Moritz, R. Lenk, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden*

Diamantverschleiß bei der Schleifbearbeitung von Stahl-Keramik-Werkstoffverbunden ..... 513  
*B. Denkena, N. Kramer, Leibniz Universität Hannover, Garbsen*

Hot Extrusion of Fe-Base MMC: A Novel Method for Producing Wear Resistant Thick Coatings ..... 520  
*S. Weber, Helmholtz-Zentrum Berlin und Ruhr-Universität Bochum; A. Röttger, Ruhr-Universität Bochum; P. Silva, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf; M. Karlsruhn, Köppern Entwicklungsgesellschaft mbH, Hattingen; W. Theisen, Ruhr-Universität Bochum; W. Reimers, Technische Universität Berlin; A. Pyzalla, Helmholtz-Zentrum Berlin*

Interface of Steel Inserts in Al-Si Alloy Castings ..... 527  
*K. Zimmik, M. Schöbel, Technische Universität Wien (A); B. Reitingner, Upper Austrian Research GmbH, Linz (A); H.P. Degischer, Technische Universität Wien (A); U. Noster, ARC Leichtmetallkompetenzzentrum Ranshofen GmbH*

Lebensdauerberechnung von walzplattierten Al-St Werkstoffverbunden unter Berücksichtigung des Herstellprozesses ..... 535  
*H. Leitner, A. Lamik, Montanuniversität Leoben (A)*

Neue Entwicklungen zu Verbindungen von Kunststoff und Metall unter Zuhilfenahme thermischer Fügeprozesse ..... 542  
*U. Reisinger, S. Olschok, N. Wagner, RWTH Aachen*

Ultraschallschweißen - Ein innovatives Fügeverfahren für hybride Leichtbaustrukturen aus Metall/CFK-Verbunden ..... 549  
*F. Balle, G. Wagner, D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern*

Optimierung von Dünnschichtsystemen für hoch beanspruchte Werkzeuge der Umformtechnik.....	555
<i>B. Wielage, A. Wank, C. Rupprecht, Technische Universität Chemnitz; G. Schmidt, S. Stark, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz</i>	
Oberflächenschichten als Verschleißschutz auf CFK-Komponenten und CFK-Produktionsformen.....	563
<i>M. Meyer, EADS Deutschland GmbH, Ottobrunn; S. Bürkner, Premium Aerotec, Augsburg; D. Jonke, M. Enghart, EADS Deutschland GmbH, Ottobrunn</i>	
Kostenreduzierung von Aluminiumschaumbauteilen.....	571
<i>R. Thümmler, F. Schneider, R. Vogel, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz</i>	
Glas-Kunststoff-Hybridelemente - Einsatz und Werkstoffeigenschaften.....	578
<i>M. Göbel, J. Hildebrand, F. Werner, Bauhaus-Universität Weimar</i>	
Auslegung und Fertigung von thermoplastverbundkompatiblen Piezokeramik-Modulen für adaptive Leichtbaustrukturen.....	585
<i>W. Hufenbach, M. Gude, T. Heber, Technische Universität Dresden; M. Geiger, M. Schmidt, S. Neugebauer, Bayerisches Laserzentrum GmbH, Erlangen</i>	
Piezokeramische Fasern, Faserkomposite und LTCC-Module zur Integration in Leichtbaustrukturen .....	592
<i>U. Scheithauer, M. Flössel, Technische Universität Dresden; S. Uhlig, A. Schönecker, S. Gebhardt, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden; A. Michaelis, Technische Universität Dresden</i>	
Untersuchungen zur Entwicklung robuster Fertigungsprozesse für die Herstellung aktiver Thermoplastverbundbauteile mit integrierten neuartigen thermoplastkompatiblen Piezokeramik-Modulen (TPM).....	601
<i>W. Hufenbach, M. Gude, N. Modler, T. Heber, A. Winkler, J. Friedrich, Technische Universität Dresden</i>	
Strukturelle Integration von Sensorsystemen in Leichtbauverbundstrukturen im Massenfertigungsverfahren.....	608
<i>H. Elsner, L. Kroll, Technische Universität Chemnitz</i>	
TiO <sub>2</sub> Thick Film Coated on Alumina Foams for UV Light Stimulated Photocatalytic Phenol Mineralization.....	615
<i>U. Vogt, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf (CH), und Universität Freiburg (D); M. Gorbár, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf (CH), und Comenius University, Bratislava (SK); M. Vargová, G. Plesch, Comenius University, Bratislava (SK)</i>	
Mittels Verbundguss hergestellte Schneidaktivelemente .....	620
<i>A. Mackensen, S. Hippmann, Technische Universität München, Garching</i>	



Suspensionsplasmaspritzen thermisch aktivierbarer triboaktiver Schichtverbunde ..... 627  
*F.-W. Bach, K. Möhnwald, M. Erne, D. Kolar, Leibniz Universität Hannover, Witten*

Erzeugung von Nanokomposit-Schichten auf dünnen Blechen mittels  
 Laserstrahlaufragschweißen..... 635  
*S. Claußen, N. Weidlich, D. Herzog, H. Haferkamp, Laser Zentrum Hannover e.V., Hannover*

Die Verbundplatte gegen Verschleiß - eine maßgeschneiderte metallkundliche  
 Lösung durch Auftragschweißen ..... 642  
*H. Riegger, VAUTID GmbH, Ostfildern*

## **Biomaterialien**

Rapid Prototyping als innovative Herstellungsmethode für individuell angepassten  
 Knochenersatz auf Basis von Calciumphosphat-Keramiken..... 649  
*U. Deisinger, Universität Bayreuth; G. Ziegler, Universität Bayreuth und BioCer Entwicklungs-  
 GmbH, Bayreuth*

Innovatives Materialverbundkonzept für Knie-Endoprothesen..... 656  
*B. Wielage, L. Meyer, T. Müller, Technische Universität Chemnitz; G. Leonhardt, F. Trommer,  
 InnoMat GmbH, Chemnitz; K. Liefeth, IBA e.V., Heiligenstadt*

Dispensgeplottete Scaffolds aus Hydrogel/Keramik-Composites für die Anwendung als  
 Knochenersatzmaterial..... 663  
*A. Schlechte, BioCer Entwicklungs-GmbH, Bayreuth; U. Deisinger, Universität Bayreuth;  
 F. Uhl, BioCer Entwicklungs-GmbH, Bayreuth; G. Ziegler, BioCer Entwicklungs-GmbH,  
 Bayreuth, und Universität Bayreuth*

Indirektes Rapid Prototyping biphasischer Calciumphosphat-Keramiken:  
 biomechanische und zellbiologische Eigenschaften..... 669  
*M. Schumacher, Universität Bayreuth; U. Deisinger, R. Detsch, BioCer-Entwicklungs-GmbH,  
 Bayreuth; G. Ziegler, Universität Bayreuth und BioCer-Entwicklungs-GmbH, Bayreuth*

Calciumphosphat-basierte Knochenersatzmaterialien: Studie zur  
 in vitro-Osteoklastogenese..... 676  
*R. Detsch, BioCer EntwicklungsGmbH, Bayreuth; S. Schlüfter, G. Ziegler, Universität Bayreuth*

Spinnenseidenproteine - Biopolymerische Materialien für Medizintechnische  
 Anwendungen ..... 683  
*A. Lammel, Technische Universität München; K. Spieß, C. Blüm, Universität Bayreuth;  
 M. Schwab, G. Winter, Ludwig-Maximilians-Universität München; T. Scheibel, Universität  
 Bayreuth*

Verspinnen von Proteinfasern für technische Anwendungen..... 689  
*D. Keerl, F. Bauer, J. Hardy, U. Slotta, T. Scheibel, Universität Bayreuth*

Bone Tissue Engineering: Einfluss unterschiedlich hergestellter Calciumphosphat-Scaffolds auf die osteogene Stimulierung von Knochenmarkzellen .....	693
<i>F. Uhl, R. Detsch, BioCer Entwicklungs-GmbH, Bayreuth; U. Deisinger, G. Ziegler, Universität Bayreuth</i>	
In vitro-Abbauuntersuchungen an makroporösen 3D-Scaffolds auf Calciumphosphatbasis.....	700
<i>S. Schlüfter, Universität Bayreuth; R. Detsch, BioCer Entwicklungs-GmbH, Bayreuth; U. Deisinger, Universität Bayreuth; G. Ziegler, Universität Bayreuth und BioCer Entwicklungs-GmbH, Bayreuth</i>	
Charakterisierung von Knochenwachstum auf einer Calciumphosphat-Mischkeramik: Beurteilung einer zerstörungsfreien und 3-dimensionalen Charakterisierungsmethode .....	707
<i>R. Detsch, BioCer Entwicklungs-GmbH, Bayreuth; J.M. Hausherr, S. Schlüfter, U. Deisinger, Universität Bayreuth; J. C. Roldan, Universitätsklinik Regensburg; J. Fischer, Universität Bayreuth; E. Chang, Stanford University (USA); G. Ziegler, BioCer Entwicklungs-GmbH, Bayreuth, und Universität Bayreuth; W. Krenkel, Universität Bayreuth</i>	
<b>Autorenregister</b> .....	713
<b>Sachregister</b> .....	718

# Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen

U. Meier

EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, Schweiz

## 1 Einführung

Faserverbundwerkstoffe stehen im Bauwesen bei kreiszylindrischen Lagersilos, Hochkaminen, Druckrohren für Wasserversorgungen sowie Rohren mit großen Durchmessern für Dücker- und Abwasserleitungen seit rund vierzig Jahren erfolgreich im Einsatz. Es handelt sich dabei hauptsächlich um im Wickel- oder Schleuderverfahren verarbeitete glasfaserverstärkte Kunststoffe GFK. Stahlbetontragwerke können mit nachträglich aufgeklebten dünnen Bändern aus kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffen (CFK) effizient verstärkt werden, wie erstmals 1987 demonstriert wurde [1]. Seit 1991 werden solche CFK-Bänder dank ihrer ausgezeichneten Eigenschaften weltweit zur nachträglichen Verstärkung von Tragwerken genutzt. Ihr Einsatz ist sowohl in technischer als auch in wirtschaftlicher Hinsicht sehr gewinnbringend [2]. Der Grund, dass die pro Volumeneinheit etwa zehnmal teureren CFK im Vergleich zu Stahl konkurrenzfähig sind, liegt in der sehr einfachen Applikation. Die gesparten Lohnkosten kompensieren die hohen Werkstoffkosten. Die für diesen Zweck global im Bauwesen eingesetzte Masse an Kohlenstofffasern erreicht heute jene der gesamten Luftfahrtsindustrie, d. h., rund 7'000 Tonnen pro Jahr. Dies erscheint im Vergleich zu den Tonnagen, mit denen man im klassischen Brückenbau rechnet, außerordentlich wenig. Es ist allerdings zu bedenken, dass die Festigkeit solcher Bänder über 3000 MPa liegt und die Rohdichte nur  $1,5 \text{ t/m}^3$  beträgt. Der vom Autor auf einer Vortragsreise durch die USA 1997 geprägte Ausspruch "Never before has a post-strengthening method done so much with so little" versinnbildlicht die Situation.

Die Ende der 1970er Jahre empirisch wahrgenommene und später durch Studien bestätigte [3] Zunahme von Schäden an Stahl-Zuggliedern motivierten Forscher in Europa, Japan und Nordamerika solche aus nicht-metallischen Werkstoffen zu entwickeln.

Forschungsinstitute und Firmen schufen für den Neubau in den vergangenen 25 Jahren Bewehrungsstäbe, Spannglieder und Seile aus CFK in Form von Paralleldraht- und Litzenbündeln. Seit zwölf Jahren kommen solche CFK-Zugglieder in etwa drei Dutzend Pilot-Brückenprojekten zur Anwendung.

Im Brücken- und im Hochbau gewinnen «aufgehängte» Konstruktionen weiterhin an Bedeutung. Während im Hoch- und Hängebrückenbau die Hauptseile aus Stahl vor allem statischer und Korrosionsbeanspruchung unterworfen sind, kommt bei den Schrägseilbrücken noch die Ermüdung hinzu. So mussten in den vergangenen 20 Jahren bei vielen Schrägseilbrücken beschädigte Seile aus Stahl mit viel Aufwand erneuert werden. Neuerdings werden sogar bei jüngeren, aus den 1960er-Jahren datierenden großen Hängebrücken an den Hauptseilen dramatische Korrosionsschäden festgestellt, die einen baldigen Ersatz der Seile notwendig machen [4]. Sind Zugglieder aus CFK eine Alternative zu solchen aus Stahl? Wie weit sind Forschung und Entwicklung fortgeschritten? Wie ist der Stand der Technik?

## 3 Stand der Forschung und Technik

### 3.1 Verstärkung und Instandsetzung

Im Forschungsbereich „Verstärkung mit CFK-Bändern“ sind derzeit weltweit etwa fünfhundert Forschungsgruppen aktiv. Der erreichte Forschungsstand dürfte, übertragen auf den Stahlbeton, etwa jenem der 1950er-Jahre entsprechen. Die wichtigsten Grundlagen sind bekannt. Es gibt Richtlinien, Zulassungen und teilweise auch bereits Normen [5]. So wie für den klassischen Stahlbetonbau auch heute noch weitergeforscht wird, so werden im Bereich der Verstärkung mit CFK in den kommenden Jahren noch hunderte von Doktorarbeiten und Forschungsberichte erscheinen. Die Verstärkung mit aufgeklebten oder in gefräste Schlitzte eingeklebten CFK Bänder, die heute Stand der Technik ist, hat die Methode der Verstärkung mit aufgeklebten Stahllaschen weitgehend abgelöst.

Von der Forschungsseite werden seit den frühen 1990er-Jahren große Anstrengungen unternommen, beim Verstärken mit CFK-Bändern die hohe Werkstofffestigkeit besser zu nutzen. Schlaff aufgeklebte Bänder schöpfen nur etwa 20 % dieser ausgezeichneten Eigenschaft aus. Es gibt verschiedene Vorspannsysteme auf dem Markt, welche diesem Zweck dienen würden. Die Baustofffirmen sind jedoch am Einsatz vorgespannter CFK-Bänder wenig interessiert, da sie bei schlaff applizierten Bändern mehr CFK und mehr Klebstoff verkaufen können. Außerdem sind die Anforderungen bezüglich Bemessung und Installation, insbesondere im Falle von Endverankerungen, bei vorgespannten Systemen bedeutend höher. Es ist bedauerlich, dass meist der Weg des geringsten Widerstands gegangen wird. Nachträglich applizierte, vorgespannte CFK-Bänder würden den vorhandenen Bewehrungsstahl sehr viel wirkungsvoller entlasten. Insbesondere im Falle von Ermüdungsbeanspruchungen ist dies von großer Bedeutung. Ein an der EMPA entwickeltes System verzichtet auf teure Endverankerungen und arbeitet mit einer auf null auslaufenden, gradierten Vorspannung an den Enden der Bänder [6].

### 3.2 Neubau

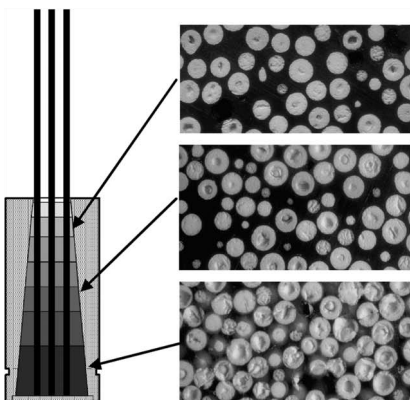
#### 3.2.1 Vorbemerkungen

Im Prinzip könnten heute fast jede Art von Brücken vollständig aus CFK gebaut werden. Die dazu notwendigen Technologien sind vorhanden. Die schwedische Marine beispielsweise hat seit sechs Jahren erfolgreich Fregatten im Einsatz, deren Rumpf aus CFK gebaut wurde. Der 45 Tonnen schwere Rumpf ist 72 Meter lang und 11 Meter breit. Im Prinzip hat er die Form eines Kastenträgers. Wenn wir von wenigen Spezialfällen absehen, macht es aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen für zivile Anwendungen keinen Sinn, Brücken aus CFK zu bauen. Ein CFK-Kastenträger wäre etwa 50% teurer als ein solcher aus Stahl. Die Kohlenstofffaserpreise spielen bei den Kosten für einen solchen Träger die dominante Rolle. Diese korrelieren sowohl bezüglich Rohstoff als auch Produktionskosten mit dem Erdölpreis. Die bezüglich Produktionseffizienz zu erwartenden Gewinne werden langfristig vermutlich durch steigende Erölpreise kompensiert. Aufgrund dieser Überlegungen wird klar, dass der bezüglich Eigenschaften optimal für den Brückenbau geeignete Werkstoff CFK aus wirtschaftlichen Gründen im Normalfall für Stahl, Beton und Holz keine Konkurrenz sein wird. Für hoch beanspruchte Zugglieder

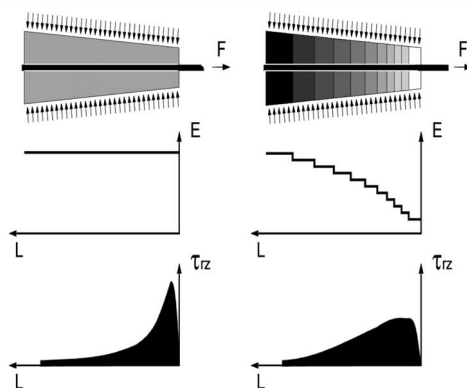
allerdings und vielleicht in sehr ferner Zukunft auch für extrem weit gespannte Brücken [7], sind CFK der optimale Werkstoff.

### 3.2.2 Ausgewählte Systeme von Zuggliedern

**CFK-Paralleldrahtbündel:** Die CFK-Drähte mit denen die Paralleldrahtbündel aufgebaut werden, bestehen aus Toray T700 Fasern mit einer Festigkeit von 4 900 MPa und einem Elastizitätsmodul von 230 000 MPa. Der Faservolumenanteil beträgt 72%. Das Verankerungssystem [8] besteht aus einer Stahlhülse (Bild 1, links) mit konischer Innenform und einer zwischen Stahlhülse und CFK-Drähten liegenden Vergussmasse. Diese ist für die Übertragung der Kräfte von den Drähten auf die Hülse verantwortlich. Die Drähte werden parallel in die Hülse geführt. Die Vergussmasse muss folgenden Anforderungen genügen: die Lastübertragung darf die Langzeiteigenschaften des Zuggliedes bezüglich Festigkeit und Ermüdung nicht beeinträchtigen und es darf keine galvanische Korrosion zwischen den CFK-Drähten und den zurzeit noch metallischen Hülsen entstehen. Deshalb muss die Vergussmasse ein Isolator sein. Die konische Innenform der Hülse gewährleistet die zur Erhöhung der interlaminaren Scherfestigkeit erforderlichen Radialspannungen.



**Bild 1:** Konzept der Gradientenverankerung



**Bild 2:** Schubspannungen an der Drahtoberfläche in Abhängigkeit des E-Moduls der Vergussmasse

Als Vergussmasse wird ein Gradientenwerkstoff eingesetzt. Beim Eintritt des CFK-Drahtes in die Verankerung ist der Elastizitätsmodul der Vergussmasse gering (Bild 2 unten rechts) und nimmt kontinuierlich zu. Auf diese Art und Weise können Spannungsspitzen (Bild 2 unten links) auf der Lastseite vermieden werden. Umfangreiche an der EMPA durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass in der Regel ein kontinuierlicher Übergang durch fünf bis sieben Abstufungen des Moduls ersetzt werden kann.

Der Aufbau des Gradientenmaterials basiert immer auf demselben Korn, bestehend aus Aluminiumoxidgranulat (Bild 1, rechts) mit einem Durchmesser von ca. 2 mm und Epoxydharz. Um eine reduzierte Drucksteifigkeit zu erhalten, werden diese Körner je nach gewünschtem Modul mit einer dünneren oder dickeren Lage Epoxydharz beschichtet. Der maximale Modul

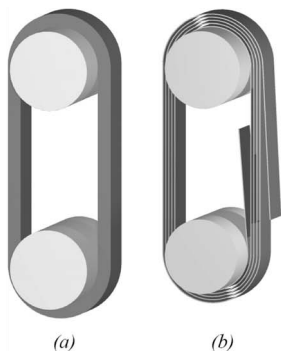
wird durch Verwendung von unbeschichtetem Granulat erreicht. Die verbleibenden Zwischenräume zwischen den Granulatkörnern werden schließlich mit einem Epoxydharz verfüllt.

Umfangreiche Experimente zeigten eine sehr hohe Zuverlässigkeit des Verankerungssystems. Unter statischer Beanspruchung konnten 94 % der Summe der Traglast der Einzeldrähte und damit die theoretische Obergrenze erreicht werden. Die Versuche unter schwingender Beanspruchung bewiesen die hervorragenden Ermüdungseigenschaften von CFK. Schwingbreiten von 900 MPa wurden problemlos über zwei Millionen Lastspiele bewältigt.

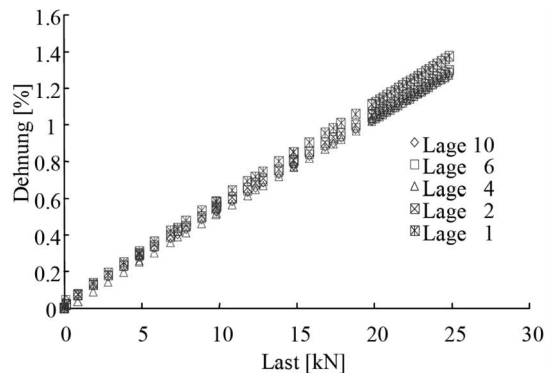
*Nichtlaminierte Strangschlaufen aus CFK:* Seit Beginn der Technikgeschichte spielt das Kettenglied (Bild 3a), oft auch in Form eines Augenstabes, als Konstruktionselement im Maschinenbau und im Bauingenieurwesen eine wichtige Rolle. Ein bedeutender Nachteil dieses klassischen Elementes ist (Bild 3a), dass die Festigkeit des Werkstoffs infolge geometrisch bedingter Spannungskonzentrationen nur unbefriedigend ausgenutzt werden kann. Zweck einer Forschungsarbeit der EMPA war die Entwicklung eines Hochleistungs-Kettenelementes, das diesen Nachteil nicht aufweist und zudem sehr hohen Korrosions- und Ermüdungsbeanspruchungen zu genügen vermag. Das Ziel wurde mit einem modernen konstruktiven Konzept und durch den Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten thermoplastischen Bändern erreicht [9–11].

Die Lösung des Problems bietet die nicht-laminierte Strangschleife. Sie wird aus sehr dünnen (in der Regel 0.12mm), unidirektional kohlenstofffaserverstärkten thermoplastischen Bändern hergestellt. Diese werden um entsprechende Umlenkkörper (Bolzen) gewickelt (Bild 3b). Zwischen den einzelnen Schichten besteht kein Verbund. Die letzte Schicht wird mit der vorletzten auf einer Länge von ca. 90 mm verschweißt und damit verankert.

Beim Belasten der Schleife wird aufgrund auftretender Relativverschiebungen zwischen den benachbarten Schichten eine sehr regelmäßige Dehnungsverteilung erreicht (Bild 4). Die Kraftübertragung zwischen den Schichten erfolgt über Reibung. Diese schlaufenförmigen Hochleistungs-Zugelemente können aus den vorfabrizierten Bändern auf einfachste Art und Weise gefertigt werden. Die Bänder werden im kontinuierlichen Rolltrusionsverfahren produziert.



**Bild 3:** Konzept der Strangschleife  
a) laminiert, b) nicht-laminiert



**Bild 4:** Last-Dehnungsdiagramm für einzelne, über den ganzen Querschnitt verteilte Schleifenlagen

*Laminierte Strangschlaufen aus CFK:* Klassische, laminierte Strangschlaufen erlauben, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, in Folge der Spannungskonzentrationen im Bere-

ich der „Augen“ nicht die hohe Materialfestigkeit wirtschaftlich zu nutzen. Es zeigte sich jedoch bei verschiedenen Anwendungen, dass „kompakte“ Stangen besser geeignet sind als „schlaffe“, nicht-laminierte Strangschlaufen. Das Problem wurde nun durch die EMPA Spin-Off Firma Carbo-Link GmbH basierend auf dem Patent [11] wie folgt gelöst: Anstelle der thermoplastischen CFK-Bänder werden duromere CFK Epoxydharz-Prepregbänder um die Bolzen gewickelt. Vor dem Aushärten wird die Strangschleife auf Nutzlast vorgespannt, analog wie bei den nicht-laminierten, thermoplastischen CFK-Strangschlaufen. Es besteht auch die Möglichkeit die beiden Kettenschenkel, die bis 48 Meter lang sein können, mit Vorspannung zu umwickeln. Auf diese Art und Weise wird ein einschenkliges „Kettenglied“ mit Kreisquerschnitt erreicht. Derartige Zugglieder werden beispielsweise von der Firma Liebherr für die größten Raupenkrane und für Seilbagger sehr erfolgreich eingesetzt.

## 4 Pilotprojekte

### 4.1 Storchenbrücke in Winterthur

Als 1994 das an der EMPA entwickelte Verankerungssystem für CFK-Paralleldrahtbündel zuverlässig genug erschien, wurde nach einem Objekt für den weltweit erstmaligen Einsatz dieser Zugglieder gesucht. Es sollte sich dabei jedoch nicht um eine Fußgängerbrücke, sondern um eine durch Straßenverkehr hoch belastete Brücke handeln. Eine neu zu bauende Schrägseilbrücke, die Storchenbrücke, war in Winterthur in Planung und so kam man mit der Bauherrin, der Stadt Winterthur, ins Gespräch.



**Bild 5:** Storchenbrücke in Winterthur; Länge 124 m



**Bild 6:** CFK-Paralleldrahtbündel mit 241 CFK-Drähten und 1.2 MN Traglast

Es wurde entschieden, bei dieser Weltpremiere vorerst einmal zwei der Stahlseile durch CFK-Zugglieder zu ersetzen. Bis vor kurzem dachte man kaum daran, eine Brücke mit hybriden Zuggliedsystemen auszurüsten, denn das Problem der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und CFK in Längsrichtung schien ein zu großes Hindernis zu sein. Die beiden Werte unterscheiden sich nämlich ungefähr um den Faktor 50. Diesbezüglich ist das Konzept der Storchenbrücke günstig, da es sich bei der Brückenplatte nicht um einen steifen Stahlbetonkasten, sondern um eine relativ weiche Verbundkonstruktion eines Stahlträgerrostes

geringer Bauhöhe mit Betonplatte handelt. Somit äußern sich die unterschiedlichen thermischen Längsausdehnungen der Zugglieder lediglich als geringe Laständerungen.

Die gegenseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Zuggliedmaterialien für verschiedenste Lastfälle wurde für die Storchenbrücke durch das projektierende Ingenieurbüro berechnet. Das Szenario für den Winter sieht so aus: durch die Verkürzung der Stahlzugglieder bei einer Abkühlung um 25 °C werden die CFK-Zugglieder um max. 10 % entlastet. Gleichzeitig liegt die Fahrbahnplatte im Bereich der CFK-Zugglieder um ca. 8 mm tiefer. Das Ganze gilt umgekehrt bei einer Erwärmung um 25 °C. Diese saisonal bedingte Mehrbelastung im Sommer führt nicht zu kritischen Spannungszuständen in den CFK-Zuggliedern.

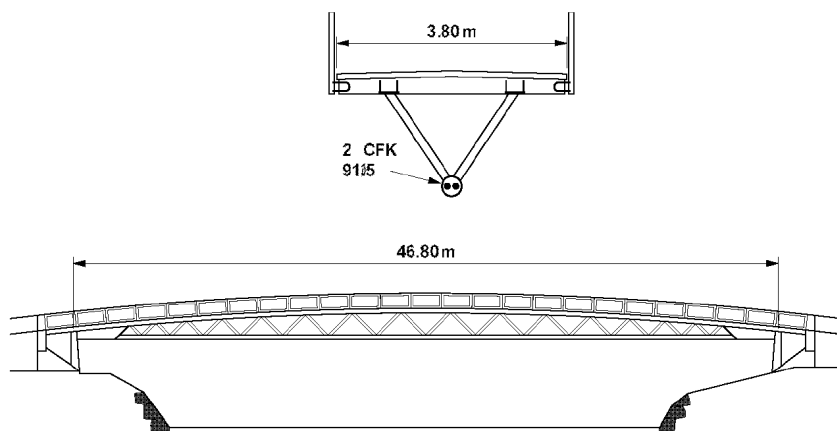
Die Paralleldrahtbündel für die Storchenbrücke wurden aus 241 CFK-Drähten mit Durchmesser 5 mm aufgebaut. Die Brücke wird seit ihrer Inbetriebnahme 1996 überwacht. Ausgewählte Drähte der Paralleldrahtbündel wurden vor dem Zusammenbau mit DMS und faseroptischen Sensoren (FOS) mit Bragg-Gittern versehen. Die sehr leichten CFK-Paralleldrahtbündel mit 7 kg/lfm ließen sich im Gegensatz zu den mit 37 kg/lfm schweren Stahlseilen bedeutend effizienter installieren. Die Ergebnisse des umfangreichen Überwachungsplans entsprechen den Erwartungen.

## 4.2 Brücke Kleine Emme bei Luzern

Über die Kleine Emme bei Luzern wurde ein schlanker einfacher Balken durch zwei im Untergurtrohr verlaufende CFK-Spannglieder unterspannt. Die 47 Meter lange Rad-/Gehwegbrücke wurde auf dem Installationsplatz im Verbund vorfabriziert, vorgespannt und als 130 t schwere Konstruktion mit einem mobilen Raupenkrane versetzt. Bei der Auflösung des einfachen Balkens in seine Tragelemente erwies sich der Druckbogen mit dem Zugband als gegeben. An diesem Objekt kamen bei der Herstellung der Spannglieder erstmals CFK-Drähte mit integrierten faseroptischen Sensoren zum Einsatz [12]. Aus 5 mm dicken CFK-Drähten wurden Paralleldrahtbündel aus je 91 Drähten fabriziert, auf Bobinen von 2,5 m Durchmesser gerollt und nach Emmen transportiert.

Die CFK-Paralleldrahtbündel spannen seit Oktober 1998 den Untergurt der neuen Brücke. Die rechnerische Vorspannkraft wurde infolge der Zeit- und Temperaturabhängigkeit mit den Grenzwerten  $V_{\max} = 4800 \text{ kN}$  und  $V_{\min} = 4300 \text{ kN}$  festgelegt. Dabei beeinflussen Schwinden und Kriechen des Betons diese Untergurtvorspannung der Verbundkonstruktion nur über Deformationen 2. Ordnung. Die Sensoren, die der Prozessüberwachung dienen, übernehmen nun die kontinuierliche Überwachung der Spannglieddehnung und damit der Vorspannkraft im Untergurt. Auf diese oder ähnliche Weise können in Zukunft wichtige strukturelle Komponenten bei Tragwerken dauernd überwacht werden. Die Brücke über die Kleine Emme ist für die weitere Entwicklung von CFK-Spanngliedern aus zwei Gründen von besonderer Bedeutung: erstens wegen des modernen Sensoreinsatzes und zweitens wegen der konstant hohen Beanspruchung der Glieder von rund 1350 MPa, welcher diese ausgesetzt sind. Die Messergebnisse über die vergangenen zehn Jahre entsprechen den hohen Erwartungen. Wie zu erwarten war, konnten in den CFK-Paralleldrahtbündeln keine Vorspannverluste infolge Relaxation festgestellt werden.





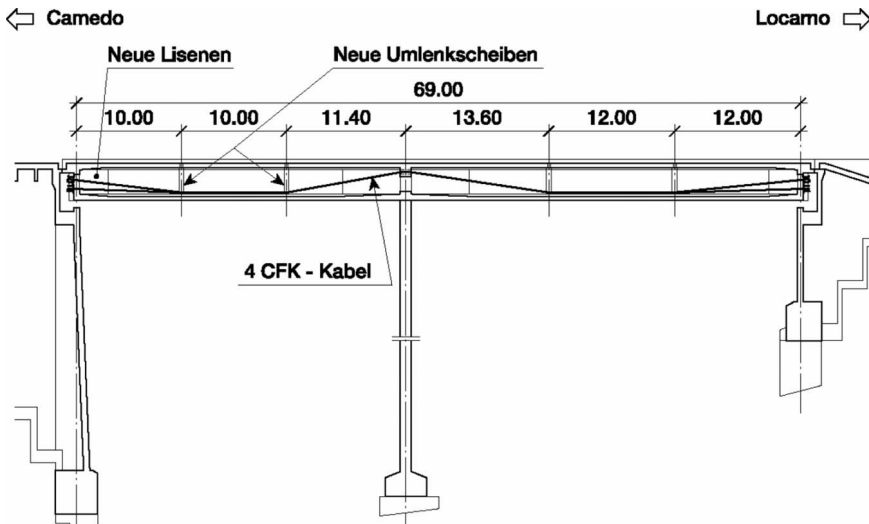
**Bild 7:** Brücke „Kleine Emme“

#### 4.3 Brücke Verdasio im Tessin

Beim zweiten Objekt, das im Herbst 1998 mit CFK-Spanngliedern ausgerüstet wurde, handelt es sich um die Strassenbrücke über den Ri di Verdasio in Intragna (Südschweiz). Die Brücke wurde als zweifeldriger Stahlbeton-Kastenträger mit Spannweiten von 31,4 und 37,6 m konzipiert (Bild 8). Die Höhe der Mittelstütze beträgt 25 m. Die zweispurige Fahrbahn ist 6 m breit. Der einzellige Kastenträger ist mit 6 bzw. 8 Spanngliedern pro Feld voll vorgespannt.

Eine routinemäßige Zustandsuntersuchung zeigte nach nur 14 Jahren Gebrauchsdauer nebst den „üblichen“ Schäden und Mängeln ein gravierendes Schadensbild. Die im Abstand von rund 2 m talseitig versetzten Belagsentwässerungsröhrchen, welche die Kragplatte beim Konsolkopf durchdringen, waren zu kurz und undicht. Salzhaltiges Wasser lief an diesen Stellen von der Fahrbahn durch die Kragplatte, an deren Unterseite entlang, über den Steg und um die Ecke bis an die Unterseite der unteren Kastenplatte.

Eine umfassende Untersuchung ergab Chloridgehalte auf Höhe der schlaffen Bewehrung von bis zu 2,8 und auf Höhe der Vorspannung bis zu 2,0 Massenprozent bezogen auf die Zementmasse. Die Chloride drangen dabei bis zu 12 cm in den Steg ein. Ein Sondierfenster im Tiefpunkt der Vorspannung, Seite Locarno, eröffnete folgendes Schadensbild: die schlaffe Bewehrung wies lokal bis zu 100 % Querschnittsverlust auf. Das unten und außen liegende Stahlkabel zeigte nach Öffnung des korrodierten Hüllrohrs erhebliche Spuren von Lochfrasskorrosion, was an sechs weiteren Stellen bestätigt wurde, die restlichen drei Kabel waren trotz des hohen Chloridgehalts noch intakt. Die Tragsicherheit der Brücke wurde unter Annahme des Ausfalls des korrodierten sowie eines zweiten Kabels und unter Berücksichtigung der lokal korrodierten Bügelbewehrung überprüft. Vor allem aufgrund der durch die volle Vorspannung vorhandenen Tragreserven konnte die Tragsicherheit der Brücke auch in diesem kritischen Zustand dennoch nachgewiesen werden.



**Bild 8:** Längsschnitt der Brücke über den Ri di Verdasio

Um ein weiteres Fortschreiten der sich im Gange befindlichen Korrosion zu stoppen und um die noch intakten Vorspannkabel vor Korrosion zu schützen, wurde die Brücke umgehend instand gesetzt. Obwohl die Tragsicherheit auch beim Ausfall des korrodierten Stahlkabels noch gegeben gewesen wäre, wurde seitens der Bauherrschaft gefordert, die ursprüngliche Tragfähigkeit der Brücke wiederherzustellen. Die Tragkraft des talseitig korrodierten Kabels sollte durch eine externe, im Brückenkasten verlaufende Vorspannung ersetzt werden. Die erforderliche Brückenverstärkung erfolgte mit polygonal verlaufenden Paralleldrahtbündeln aus CFK.

Die Umlenkung von CFK-Kabeln wurde in der Vergangenheit infolge der Empfindlichkeit der CFK-Drähte bezüglich Schub- und Querbeanspruchung als kritisch erachtet. Nachdem die EMPA an einer Serie von Durchlaufträgern Untersuchungen mit umgelenkten CFK-Paralleldraht- und Litzen-Bündeln [13] erfolgreich abgeschlossen hatte, bot sich bei der Brücke über den Ri di Verdasio erstmals die Gelegenheit, diese CFK-Spannglieder als externe Vorspannkabel einzusetzen. Die Paralleldrahtbündel wurden, wie jene für die bereits erwähnten Objekte, durch Mitarbeiter der BBR Systems Ltd. und der EMPA in den Laboratorien der EMPA zusammengebaut und gerollt auf die Baustelle geliefert.

Es wurden vier CFK-Spannglieder mit je 19 Drähten von 5 mm Durchmesser eingesetzt, wie sie auch bei den erwähnten Versuchen getestet worden waren. Aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse für die Anker in den Widerlagerkammern hätten keine größeren Einheiten verwendet werden können. Bei einem Vorspanngrad von 65 % resultiert eine initiale Spannkraft von  $4 \times 600$  kN. Dies entspricht einer sehr hohen Dauerspannung von 1610 MPa in den CFK-Drähten. Die Bruchlast beträgt  $4 \times 912$  kN. Die vier CFK-Spannglieder sind im Brückenkasten, auf der Innenseite des talseitigen Stegs, nebeneinander liegend und über die gesamte Brückenlänge polygonal verlaufend angeordnet. Der Außendurchmesser der Polyethylen-Hüllröhre beträgt lediglich 32 mm. Diese sind nicht injiziert worden. Auch bei dieser sehr hohen Vorspannung wurden keine Spannungsverluste infolge Relaxation festgestellt.

#### 4.4 Dintelhaven Bridge in Rotterdam

Um die Anwendung von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen beim Bau von Tragwerken zu fördern, wurde im April 1994 in den Niederlanden die ad hoc Kommission PC97 unter der Aufsicht des „Centre for Civil Engineering Research and Codes (CUR)“ gegründet. Ziel der Kommissionsarbeit war Machbarkeitsstudien für Brücken-Pilotprojekte mit CFK-Zuggliedern zu erarbeiten. In April 1996 wurde dem Bereich Bauingenieurwesen des Niederländischen Verkehrsministeriums vorgeschlagen, bei der Dintelhaven-Spannbetonbrücke im Hafen von Rotterdam für die externe Vorspannung eine beschränkte Anzahl von CFK-Spanngliedern einzusetzen. Im November 1996 wurde die CUR Forschungskommission C97A mit der Überwachung dieses Vorhabens betraut.

Die Dintelhavenbrücke ist aus zwei parallelen, durchlaufenden Kastenträgern über drei Felder aufgebaut. Die Hauptspannweite beträgt 185 m. Das Bauwerk wurde im Freivorbau erstellt.

Vier CFK-Spannglieder von je 75 m Länge und je 2.65 MN Vorspannung kamen im Bereich der negativen Momente über den Auflagern des Hauptfeldes zum Einsatz. Die Kabelquerschnitte sind identisch mit jenen bei der oben beschriebenen Brücke über die Kleine Emme. Der TNO-Bericht 2001 kommt zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. Die CFK-Paralleldrahtbündel wurden, abgesehen von gewissen Schwierigkeiten bezüglich Ungenauigkeiten in den Drahtlängen, erfolgreich zusammengesetzt. Es konnten keine Unregelmäßigkeiten festgestellt werden.
2. Die Untersuchung zeigte, dass die bei der Installation beobachteten Probleme hauptsächlich mit der Neuartigkeit der Vorspannglieder zusammenhängen. Es wird erwartet, dass diese Probleme bei häufigerem Einsatz von CFK verschwinden.
3. Messungen der Relativverschiebungen in den Ankerhülsen und des Lastverlaufs während und nach der Vorspannung entsprachen den Erfahrungen aus den Labor-Langzeitversuchen.
4. Obwohl das Verhalten der CFK-Spannglieder den Erwartungen entspricht, wird empfohlen die Messungen langfristig weiterzuführen.

#### 4.5 Brettschichtholz Druckbogen mit CFK Zugband

2007 wurde auf dem Areal der EMPA eine Fußgängerbrücke, bei der erstmals nicht laminierte, thermoplastische Strangschlaufen zum Einsatz kamen, gebaut. Der Brückenträger bestand ursprünglich aus einer ebenen Brettschichtholzplatte von 12 m Länge, 3 m Breite und 16 cm Höhe. Vor der Installation wurde die Platte in Querrichtung mit 40 thermoplastischen CFK-Bändern von je 0,12 mm Dicke vorgespannt. Eine Unterspannung mit 6 Zuggliedern aus thermoplastischen Strangschlaufen in Längsrichtung verformte schließlich die massive Holzplatte elastisch zu einem Bogen mit einer Pfeilhöhe von 11 cm. Die Holzplatte wurde schließlich mit einer auskragenden GFK-Platte abgedeckt, um das Holz vor der Witterung zu schützen. Als Werkstoffe kamen nur Holz (93.8 Vol%), GFK (5.9 Vol%) und CFK (0.3 Vol%) zum Einsatz. Der geringe erforderliche CFK-Materialaufwand ist der beste Beweis für die Leistungsfähigkeit dieses Materials als Zugglied. Die Brücke ist mit verschiedensten Sensorsystemen bestückt. In den ersten 18 Monaten entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen.

## 5 Szenarien für die zukünftige Entwicklung

Aus Sicht der Technik sind die bisherigen Ergebnisse der Pilotversuche sehr viel versprechend. Da beim Bau neuer Tragwerke heute meist nur die Investitionskosten und nicht jene über den gesamten Lebenszyklus einer Struktur beurteilt werden, sind die im Vergleich zu Stahl etwa viermal teureren CFK-Elemente nicht konkurrenzfähig. Wie geht es weiter? Haben CFK-Spannglieder für Tragwerke eine Zukunft? Nehmen wir an, wir seien im Jahre 2018. Die praktischen Langzeiterfahrungen mit den Objekten Storchbrücke, Brücke über die Kleine Emme, Ponte Ri di Verdasio und dem Brettschichtholz Druckbogen mit CFK Zugband entsprächen immer noch den ursprünglich gestellten Anforderungen. Die Einfachheit der Strangschlaufe überzeuge die Projektverfasser und steigern deren Innovation für einen vielfältigen Einsatz dieses universellen Zugelementes. Die Preise der Kohlenstofffasern würden aufgrund der heutigen, dramatischen Vergrößerung der Produktionskapazitäten nur noch EUR 20.- per kg im Gegensatz zu EUR 27.- per kg im Jahre 1998 betragen. Der Strangziehprozess zur Produktion von CFK-Drähten wäre mit thermoplastischen Matrixsystemen 50-mal schneller als 1998 mit einer entsprechend großen Reduktion der Produktionskosten. Die Nachhaltigkeit im Bauwesen würde von den Bauherren sehr ernst genommen. Bei Projektevaluationen ständen nicht mehr nur die Kosten für den Neubau bzw. die Erneuerung, sondern die Gesamtkosten über die Lebensdauer des Bauwerks im Vordergrund. Unter diesen Voraussetzungen ist anzunehmen, dass für Einsätze, bei denen Spannglieder aus Stahl unter Korrosions-, Spannungsrisskorrosions- und/oder Ermüdungsproblemen leiden würden, neu CFK-Spannelemente zur Verwendung kämen. Bei weit gespannten Schrägseilbrücken beispielsweise würde zudem die geringe Eigenlast der CFK-Spannglieder (aus Drähten oder Strangschlaufen aufgebaut) und der daraus resultierende bedeutend bessere ideale Modul [7] zu Gunsten dieses modernen Werkstoffs den Ausschlag geben.

Es darf angenommen werden, dass die Markteinführung, falls die oben genannten Annahmen in Erfüllung gehen, ähnlich verlaufen wird, wie dies bei den CFK-Lamellen für die nachträgliche Verstärkung von Bauwerken der Fall war. Im Jahre 1987 wurde die Idee der Verstärkung mit CFK-Lamellen veröffentlicht [1]. Die Erarbeitung der Grundlagen im Laboratorium war zu jenem Zeitpunkt bereits weit fortgeschritten. Erst 4 Jahre später, 1991 kam es zur ersten Anwendung bei der Ibachbrücke in Luzern mit einem Materialaufwand von 6 kg CFK. Es dauerte weitere zehn Jahre bis die Idee zu einem globalen, kommerziellen Erfolg wurde.

Falls sich der Einsatz von CFK-Zugelementen für Neubauten und die Sanierung bestehender Bauwerke in Zukunft auf den Brückenbau beschränkt, wird das Wachstum moderat verlaufen. Sollten allerdings CFK-Spannglieder in Zukunft auch für Objekte wie Off-Shore-Ölplattformen, wo sie prädestiniert wären, eingesetzt werden, wird der Einsatz dieses Materials ebenfalls exponentiell wie seinerzeit bei den CFK-Lamellen steigen. Nach heutigem Wissen ist es wirtschaftlicher, Plattformen, die tiefer als 1100 m („Break-even-Depth“) verankert werden müssen, mit CFK- anstelle von Stahl-Spanngliedern zu verankern. Im Hängebrückenbau liegt die „Break-even-Span“ [7], d. h. die Spannweite, ab der der Einsatz von CFK wirtschaftlicher ist als von Stahl, bei etwas über 4000 m. Für eine einzige Bohrinselform würde mit einem CFK-Aufwand von zirka 600 t gerechnet. Solche Projekte würden Spanngliedern aus CFK natürlich eine ungewöhnliche Dynamik verleihen und Firmen sowie Institutionen, die in den vergangenen 20 Jahren viel in die Entwicklung von Spanngliedern aus CFK investierten, etwas entschädigen.

## 6 Literatur

- [1] U. Meier, *Material und Technik* **1987**, 15, 125–128.
- [2] U. Meier, *Construction and Building Materials* **1995**, 9 , 341–351.
- [3] H. R. T. Hamilton III, J. Breen, A.-R. Nasser I, *Stay Cable Surve.*, Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin, USA. February 15, **1995**.
- [4] B. Colford, *Applying Advanced Bridge Management Plans to Achieve Best Value and Minimum Disruption*, Asia Bridge Summit **2008**.
- [5] ACI 440.2R-08 *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute, **2008**.
- [6] I. Stöcklin, U. Meier, *Proceedings FRPRCS-5*, Cambridge, **2001**, 291–296.
- [7] U. Meier, *Urs: Proc Instn Mech Engrs B2 IMechE* 201, 1987, 73–78.
- [8] Meier, U., *US Patent 5'713'169*, **1998**.
- [9] A. Winistörfer, T. Mottram, in *Recent Advances in Bridge Engineering* (Ed.: U. Meier, R. Betti), Columbia University, New York, **1997**, 115–120.
- [10] A. Winistörfer, *Development of non-laminated advanced composite straps for civil engineering applications*, Dissertation University of Warwick, UK, Department of Engineering, **1999**.
- [11] U. Meier, A. Winistörfer, *US Patent 6'209'279*, **2001**.
- [12] R. Brönnimann, P. Anderegg, Ph. M. Nellen, *Schweizer Ingenieur und Architekt* **1999**, 117, 350–354.
- [13] A. Maissen, *Structural Engineering International* **1997**, 284–287.

# Werkstoffe und Technologien für den Automobil Leichtbau

Rudolf Stauber  
BMW Group München

## 1 Einleitung

Der moderne Automobilbau ist mehr denn je geprägt von einer Vielzahl sich häufig widersprechender technischer und wirtschaftlicher Anforderungen. Hoher Nutzen für den Kunden, vor allem Sicherheit, Zuverlässigkeit, Wertigkeit, Fahrdynamik und Wirtschaftlichkeit, aber auch eine bestmögliche Erfüllung von Gesetzen und Auflagen (Altfahrzeugverordnung, Emissions- und Verbrauchsbegrenzung), erfordern die gezielte Weiterentwicklung und den Einsatz von modernen Werkstoffen und Verarbeitungstechnologien [1]. Standardmaterialien mit neuen Eigenschaften, aber auch Verbundwerkstoffe, Verbundbauweisen und hybride Bauweisen erschließen neuartige Möglichkeiten für das Kraftfahrzeug von morgen.

Dieser Beitrag erläutert das komplexe Anforderungsspektrum im heutigen Automobilbau und beschreibt technische und wirtschaftliche Bauteilkonzepte für die Bereiche Karosserie und Struktur, Fahrwerk und Antrieb.

## 2 Metallische Werkstoffe

Schon seit den Anfängen des Automobilbaus kommt den metallischen Werkstoffen eine zentrale Rolle in allen Bereichen von Kraftfahrzeugen zu. In den Anfängen des Automobilbaus bestanden Kraftfahrzeuge zu etwa 70 Gewichtsprozent aus Stahl- und Gusseisenwerkstoffen, *Bild 1*. Leichtmetalle wurden nur vereinzelt eingesetzt. Moderne Kraftfahrzeuge in der Großserie verfügen heute über einen annähernd gleich hohen Gewichtsanteil an metallischen Werkstoffen. Allerdings ist der Anteil an Stahl und Gusseisen auf ca. 60 Gewichtsprozent zurückgegangen, während Leichtmetalle (Aluminium und Magnesium) heute zu etwa 10 Prozent am Gesamtgewicht eines Fahrzeugs vertreten sind, *Bild 2*. Hintergrund dafür sind im Wesentlichen die gestiegenen technischen Anforderungen bezüglich Leichtbau, Verbrauch und Sicherheit.

### 2.1 Stahl- und Gusseisenwerkstoffe

Stahl- und Gusseisenwerkstoffe werden auch heute in vielen Teilbereichen von Kraftfahrzeugen (Karosserie, Fahrwerk, Antrieb) eingesetzt. Neue Werkstoffentwicklungen auf dem Gebiet höherfester Stähle [2] und die Bereitstellung moderner Fertigungstechnologien [3] sichern auch zukünftig die Wettbewerbsfähigkeit von Stahl- und Gusseisenwerkstoffen gegenüber Leichtmetallen und Kunststoffen ab.