



**LABORATORIUM FÜR TECHNISCHE MECHANIK  
UNIVERSITÄT PADERBORN**



**9. Workshop  
Composite Forschung in der Mechanik  
3.-4. Dezember 1996  
Paderborn, Liborianum**

**o. Prof. Dr. rer. nat. K.P. Herrmann  
Laboratorium für Technische Mechanik  
Universität Paderborn  
Pohlweg 47-49  
33098 Paderborn**

**o. Prof. Dr.-Ing. E. Schnack  
Institut für Technische Mechanik  
und Festigkeitslehre  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstraße 12  
76128 Karlsruhe**





**LABORATORIUM FÜR TECHNISCHE MECHANIK  
UNIVERSITÄT PADERBORN**



**9. Workshop  
Composite Forschung in der Mechanik  
3.-4. Dezember 1996  
Paderborn, Liborianum**

**o. Prof. Dr. rer. nat. K.P. Herrmann  
Laboratorium für Technische Mechanik  
Universität Paderborn  
Pohlweg 47-49  
33098 Paderborn**

**o. Prof. Dr.-Ing. E. Schnack  
Institut für Technische Mechanik  
und Festigkeitslehre  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstraße 12  
76128 Karlsruhe**

## PROGRAMM

Dienstag, 3. Dezember 1996

9.00 Eröffnung

### **SEKTION I: Analytisch-numerische Methoden**

(Chairman: E. Schnack)

9.10-9.35 **D. Groß**, Darmstadt: "Zum Versagensverhalten von Metall-Keramik-Verbundwerkstoffen"

9.40-10.05 **C.M. Chimani**, Wien: "On the existence of a stress singularity at the free edge of a bimaterial junction - a micromechanical investigation"

10.10-10.35 **C. Maier**, Paderborn: "Thermisch beanspruchte Grenzflächenrisse in metallischen Bimaterialien: Erste Analyse der Anwendbarkeit eines asymptotischen Nahfeldansatzes"

10.40-11.00 Kaffeepause

### **SEKTION II: Analytisch-numerische Methoden**

(Chairman: W. Müller)

11.05-11.30 **K. Türke**, Karlsruhe: "Allgemeine Konstitutivgleichungen thermomechanischer Materialien"

11.35-12.00 **O. Hesebeck**, Karlsruhe: "Ein schadensmechanisches Modell der Delaminationskinetik"

12.15-13.30 Mittagspause

### **SEKTION III: Analytisch-numerische Methoden**

(Chairman: D. Groß)

13.30-13.55 **J. Zhang**, Paderborn: "Constrained transverse cracking and its induced delamination in cross-ply type laminates"

14.00-14.25 **S. Weihe**, Stuttgart: "Rißbildung: Entlang den Gedanken des Geheimrats Otto Mohr"

14.30-14.55 **K. Linnenbrock**, Paderborn: "Numerische Analyse der automatisch erfassten räumlichen Rissausbreitung in thermisch beanspruchten Verbundmodellen"

**15.00-15.25**     **Ch. Marotzke**, Berlin: "Vergleich der Energiefreisetzungsraten bei mikro-mechanischen Versuchen"

**15.30-16.00**     Kaffeepause

#### **SEKTION IV: Mechanisches Verhalten von Composites**

(Chairman: W. Becker)

**16.00-16.25**     **A.S. Herrmann**, Braunschweig: "Multifunktionale Nutzung der Anisotropie faserverstärkter Kunststoffe"

**16.30-16.55**     **R. Meske**, Karlsruhe: "Eigenspannungen bei viskoelastischen Verbundwerkstoffen"

**17.00-17.25**     **Th. Pandorf**, Aachen: "Thermische Einflüsse auf das Versagen von mehrphasigen Werkstoffen"

**17.30-17.55**     **Ch. W. Weber**, Siegen: "Konstruktive Entwurfsmodelle zur Optimierung von Faserverbund-Flächentragwerken"

**19.00**             Abendessen im Liborianum

#### **Mittwoch, 4. Dezember 1996**

#### **SEKTION V: Mechanisches Verhalten und Experimentelle Methoden**

(Chairman: K.P. Herrmann)

**9.00-9.25**        **H.P. Monner**, Braunschweig: "Integration von piezokeramischen Scheibenelementen in Faserverbundstrukturen"

**9.30-9.55**        **E. Schrader**, Braunschweig: "Ermittlung von Dämpfungskennwerten für polymere Faserverbundwerkstoffe mittels der Methode der Finiten Elemente"

**10.00-10.25**     **V. Kouchnevski**, Merseburg: "Identifikation der Interphaseneigenschaften von Faserverbundwerkstoffen"

**10.30-10.50**     Kaffeepause

**10.50-11.15**     **J. Woltersdorf**, Halle: "Modellierung der Reaktionsschichtbildung in Si-C-O-Compositen"

**11.20-11.45**     **H. Ansorge**, Chemnitz: "Ermittlung der Beanspruchung in Kfz-Reifen"

**12.15-13.45**     Mittagessen im Liborianum

# Ermittlung der Beanspruchung in Kfz-Reifen

Hartmut Ansorge  
Lehrstuhl Festkörpermechanik  
TU Chemnitz-Zwickau  
Straße der Nationen 62  
09107 Chemnitz

Der Reifen ist aufgrund seiner heterogenen, anisotropen, mehrschichtigen und nichtlinearen Beschaffenheit eines der am komplex belasteten Produkte. Die Schwierigkeiten, die bei allen Berechnungsformen des Reifens auftreten, haben ihre Ursachen

- in den Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe
- in der Geometrie und den konstruktiven Besonderheiten
- im funktional bedingten Verhalten des Reifens bei der Belastung
- im Kontakt Straße-Reifen und Reifen-Felge

Seine Analyse erfordert die Kenntnis

- der geometrischen Gestalt und Struktur des Reifens
- der relevanten physikalischen Eigenschaften der Materialkomponenten
- der äußeren Belastung und der Randbedingungen
- einer entsprechenden Analysetechnik

Mit dem Ziel, die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Automobilreifen zu gewährleisten, werden seit 1989 an der TU Chemnitz in Kooperation mit der Industrie numerische Berechnungen an Reifen vorgenommen.

Im Vortrag wird auf die oben genannten Besonderheiten, die bei allen Berechnungen von Kfz-Reifen zu berücksichtigen sind, eingegangen.

Die Finite Element-Analyse von Reifen unter einer vertikalen Radlast erfordern dreidimensionale Strukturmodelle. Die exzessive CPU-Zeit, die für solche Modelle erforderlich ist, macht Parameterstudien zeitaufwendig und schwierig.

Im Vortrag wird eine Prozedur vorgestellt, die eine Lösung derartiger Probleme effektiver gestaltet.

Der Vortrag schließt mit einigen Beispielen unterschiedlicher Aufgabenstellung.

## 9. Workshop „Composite Forschung in der Mechanik“

### KONSTRUKTIVE ENTWURFSMODELLE ZUR OPTIMIERUNG VON FASERVERBUND-FLÄCHENTRAGWERKEN

Hans A. Eschenauer, Christof M. Weber

Forschungszentrum für Multidisziplinäre Analysen und  
Angewandte Strukturoptimierung FOMAAS, Universität-GH Siegen  
D-57068 Siegen/ GERMANY  
(☎: ++49 271 / 740 2481, FAX: ++49 271 / 740 2461)  
e-mail: cw@fb5.uni-siegen.de

#### ABSTRACT

Die an die Entwicklung moderner und konkurrenzfähiger Produkte gestellten, ständig steigenden Anforderungen hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz erfordern in zunehmenden Maße den Einbezug von Optimierungsmethoden in den Entwurfsprozeß. Dies gilt ganz besonders beim Einsatz von Hochleistungswerkstoffen wie sie z.B. die Faserverbundwerkstoffe darstellen. Bei der Behandlung solch komplexer Bauteile kann allein der Aufwand für eine Strukturanalyse derart ansteigen, daß der gesamte Optimierungsprozeß aufgrund der enormen zu verwaltenden Datenmengen extrem lange Rechenzeiten verursacht. Eine Tatsache, die die Entwicklung und den Einsatz von „intelligenten“ Entwurfsmodellen erfordert. Neben der Reduzierung des Rechenaufwands besteht eine weitere wesentliche Aufgabe dieser Entwurfsmodelle in der Gewährleistung einer direkten Umsetzbarkeit der Optimierungsergebnisse in einen herstellbaren Entwurf. Dadurch entfällt der sonst übliche, explizite Nachbearbeitungsprozeß, bei dem das Optimierungsergebnis an die Erfordernisse des Fertigungsprozesses angepaßt wird. Zu diesem Zweck wurden sog. „konstruktive Entwurfsmodelle“ eingeführt [1].

Solche Entwurfsmodelle, bei denen das Bauteil mittels parametrischer Ansatzfunktionen (Design-Elementen) geometrisch beschrieben wird, haben sich als besonders geeignet erwiesen [1,2]. Die Entwurfsvariablendefinition erfolgt hier auf der Basis der konstruktiven Parameter des Bauteils. Die für die Strukturanalyse erforderlichen Analysevariablen wie z.B. Lagenwinkel und -dicken im finiten Element bzw. Knotenkoordinaten des FE-Netzes können mit Hilfe der parametrischen Bauteilbeschreibung stets automatisch an die innerhalb der Optimierung stattfindenden Entwurfsmodifikationen angepaßt werden.

Die Anwendung konstruktiver Entwurfsmodelle wird anhand von zwei Beispielen gezeigt, nämlich einem versteiften, beulgefährdeten CFK-Panel sowie einem CFK-Flächentragwerk, bei dem speziell die Aspekte einer vollautomatischen, maschinellen Tape-lege-Fertigung berücksichtigt wurden. Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Entwurfsmodelle wird durch die vorgestellten Optimierungsergebnisse belegt.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Schuhmacher, G.: Multidisziplinäre, fertigungsgerechte Optimierung von Faserverbund-Flächentragwerken, Dissertation. Universität-GH Siegen, TIM Forschungsberichte T07-03.95, 1995.
- [2] Eschenauer, H.A.; Weber, C.M.: Stiffened CFRP-Panels Under Buckling Loads - Modeling, Analysis, Optimization, Proceedings of the ASME Design Automation Conference, Boston MA, Sep. 17-21, 1995

# **On the existence of a stress singularity at the free edge of a bimaterial junction - a micro mechanical investigation**

**C.M. Chimani, H.J. Böhm and F.G. Rammerstofer  
Technische Universität Wien  
Institut für Leichtbau und Flugzeugbau  
Gußhausstraße 27-29/317  
A-1040 Wien**

## **Abstract**

Stress fields at the free edge of a bimaterial junction are investigated using homogeneous material models, which typically predict weak singularities at the surface, and by a micro mechanical approach. The latter gives an idealized description for the case that one of the materials contains inhomogeneities of a size comparable to the local region affected by the singularity. Such a model corresponds e.g. to the situation in selectively reinforced structures. It is found that the stress singularities at the surface disappear when such inhomogeneities are accounted for explicitly.

# Zum Versagensverhalten von Keramik-Metall-Verbundwerkstoffen

D. Gross & Th. Emmel

Institute of Mechanics, TH Darmstadt  
D-64289 Darmstadt, Hochschulstr. 1

It is well known that ceramic-metal composites (CMC's) show good toughening properties. These ceramics consist of a brittle matrix reinforced with ductile metal particles or networks of different shape. The details of the failure process of such composites are not well understood, but it is generally accepted that the bridging mechanism of the ductile particles is a main contribution to fracture toughness and crack resistance.

In the lecture, modeling of stable crack growth is described in a composite reinforced with ductile fibers. Failure of the fibers due to plastic deformation is analysed taking into account the interfacial properties between the fiber and the matrix as well as the necking behaviour of the fiber. The damage process in the fiber is described by the Gurson model which is implemented into the finite element method. The results are compared with experimental data for different ceramic-metal composites. The numerical results show good agreement with the experimental data.

Additionally, the failure process in a single fiber is studied in detail. It is shown that the crack surface shape of the fiber is strongly dependent on the interfacial strength between fiber and matrix.

The deformation analysis of the single fiber leads to force-displacement curves which subsequently are used to reduce numerical expense for the simulation of stable crack growth.

Results are presented for different material pairs and debonding length. Furthermore preliminary considerations regarding the failure behavior of spherical particles in the ligament are discussed.



## **Multifunktionale Nutzung der Anisotropie faserverstärkter Kunststoffe**

von

**Dr.-Ing. A.S. Herrmann**  
**Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt**  
**Institut für Strukturmechanik**  
**Lilienthalplatz 7**  
**38108 Braunschweig**  
**Tel. 0531-295-2310**

Die Faserverbundwerkstoffe werden in der heutigen Praxis als leichter, tragender Werkstoff eingesetzt, wobei die Anisotropie genutzt wird, um eine gegenüber isotropen Werkstoffen weitergehende Werkstoffausnutzung zu erreichen. Das anisotrope Verhalten dieser Werkstoffe kann jedoch auch die Aufgabe komplizierter Verstellmechanismen übernehmen was zu einem multifunktionalen - und damit sehr ökonomischen - Einsatz der Faserverbundwerkstoffe führt. Gegenwärtig werden insbesondere im Flugzeugbau Möglichkeiten untersucht, die elastomechanischen Eigenschaften von Strukturen aus Faserverbundwerkstoffen so zu gestalten, daß der gekoppelte Deformationszustand den Anforderungen aus der Flugmechanik entgegenkommt. Angestrebt wird die in anisotropen Stäben auftretenden Zug-Torsions- bzw. Biegetorsions-Kopplungen zur Verstellung von Rotorblättern oder Tragflächen zu verwenden.

Aufgezeigt wird ein analytischer Wege zur schnellen Abschätzung der "Verstellmöglichkeiten" anisotroper Stäbe, sowie Bauweise und Technologie zur Realisierung gekoppelter Strukturen. In einem weiteren Entwicklungsschritt können die Koppelleffekte nicht nur passiv sondern auch aktiv im Sinne der Adaptronik genutzt werden.

# **Identifikation der Interphaseneigenschaften von Faserverbundwerkstoffen**

von

**Vladislav Kouchnevski  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Institut für Werkstoffwissenschaften  
06099 Halle (Saale)**

## **Abstract**

Die Haftfestigkeit zwischen Faser und Matrix ist entscheidend für die mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen. Die Interface-Qualität wirkt sich auf die Entstehung und Entwicklung von Rissen im Faserverbundwerkstoff aus. In der Untersuchung wurden kombinierte numerische/experimentelle Methoden für die Bestimmung der Interface-Eigenschaften entwickelt. Faserverbundwerkstoffe mit zwei unterschiedlichen Faserhaftungen wurden erforscht. Die Interface-Dicke und die Verteilungsparameter des Interphase E-Moduls wurden bestimmt. Die Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit der Rißfortpflanzung in diesen Faserverbunden.

# Ein schadensmechanisches Modell der Delaminationskinetik

O. Hesebeck, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre  
Universität Karlsruhe

Die Delamination stellt einen wichtigen Versagensmechanismus für geschichtete Composite dar. Zu ihrer Modellierung werden derzeit u.a. verschiedene schadensmechanische Ansätze diskutiert.

Die Schadensmechanik beschreibt die Abnahme der Steifigkeit infolge von Mikrorißbildung durch eine kontinuierliche Schädigungsvariable. Die Entwicklungsgleichungen für diese Zustandsvariable können im Rahmen der Thermodynamik irreversibler Prozesse formuliert werden, jedoch findet man auch vielfältige heuristische Ansätze.

Bei Materialmodellen, welche eine Reduktion der Steifigkeit beinhalten, tritt häufig das Problem einer Lokalisierung der Verformung in einem Punkt auf. Dieses physikalisch unsinnige Resultat bewirkt eine verschwindende Dissipationsleistung. Ein Weg zur Lösung des Problems ist die Verwendung nicht-lokaler Variablen.

Im Falle der Delamination beobachtet man die Bildung von Mikrorissen in einer kleinen Zone vor der Delaminationsfront. Diese Prozeßzone kann durch zwei- oder dreidimensionale Modelle beschrieben werden.

Als Kriterium für das Wachstum des makroskopischen Delaminationsrisses wird in den schadensmechanischen Modellen das Erreichen einer kritischen Schädigung oder einer kritischen Energiefreisetzungsrate vor der Delamination verwendet. Ersterer Ansatz ist physikalisch zu begründen, letzterer erlaubt es, die bruchmechanische Beschreibung als Grenzfall der schadensmechanischen Darstellung zu gewinnen.

# Thermisch beanspruchte Grenzflächenrisse in metallischen Bimaterialien:

## Erste Analyse der Anwendbarkeit eines asymptotischen Nahfeldansatzes

C. Maier, K. Herrmann  
Laboratorium für Technische Mechanik  
Fachbereich 10, Maschinentechnik I  
Universität - GH Paderborn

Die Untersuchung des Verhaltens von Grenzflächenrissen, für die sich die Bruchmechanik als aussagekräftige kontinuumsmechanische Analysemethode erwiesen hat, in thermomechanisch beanspruchten elastoplastischen Bimaterialien sowie die Beschreibung des Spannungs- und Verzerrungsfelder in der Nähe der Rißspitze ist für die Beurteilung des Festigkeitsverhaltens von Verbundmaterialien von entscheidender Bedeutung.

Insbesondere ermöglicht eine Parametrisierung der Felder in Rißspitzennähe eine Aussage über das Ausbreitungsverhalten von Grenzflächenrissen.

Diese Parametrisierung und die damit verbundene Bestimmung bruchmechanischer Parameter wird durch die Entwicklung eines asymptotischen Nahfeldansatzes zur Beschreibung der entsprechenden Randwertprobleme möglich.

Aufbauend auf das Modell von Gao und Lou [1] wird ein asymptotischer Nahfeldansatz zur Charakterisierung der Spannungs- und Deformationsfelder in der Umgebung von thermomechanisch belasteten Grenzflächenrissen in elastoplastischen Bimaterialien entwickelt. Eine erste Analyse dieses Ansatzes zeigt, daß durch den Einschluß thermischer Anteile das Problem durch eine partielle nicht-lineare Differentialgleichung höherer Ordnung beschrieben wird. Eine (numerische) Lösung dieser Gleichung ist nur durch die Annahme spezieller Formen des Temperaturgradienten im Material möglich. Dies bedeutet eine nicht unerhebliche Restriktion, welche die Anwendbarkeit und Nutzbarkeit einer asymptotischen Nahfeldlösung im Falle thermomechanischer Beanspruchung im Vergleich zur Finite-Elemente-Methode bedauerlicherweise deutlich einschränkt.

[1] Y. Gao, Z. Lou. *International Journal of Fracture* **43** (1990) 241-256

# NUMERISCHE ANALYSE DER AUTOMATISCH ERFASSTEN RÄUMLICHEN RISSAUSBREITUNG IN THERMISCH BEANSPRUCHTEN VERBUNDMODELLEN

**K. Linnenbrock; F. Ferber & K.P. Herrmann**

Der Einsatz von Werkstoffverbunden in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie in anderen High-Tech-Bereichen, insbesondere in Form von Bauelementen der Mikroelektronik erweist sich als äußerst problematisch, da die Werkstoffe neben mechanischen Belastungen auch überlagerten zeitlich veränderlichen Wärmespannungsfeldern ausgesetzt sind. Bei der Computer-Chip-Herstellung werden heute Halbleiterwerkstoffe eingesetzt, die bedingt durch die komplexen Herstellungs- bzw. Verarbeitungstechnologien, wie etwa das punktuelle Bonden im Herstellungsprozeß oder aufgrund einer zyklischen thermischen Belastung während des Prüf- und Abnahmeprozesses, bis hin zum Versagen durch die Initiierung von thermischen Eigenspannungsrissen an den Kontaktelementen oder an den Bauteilrändern beansprucht werden. Hierbei können Defekte sogar zu einem vollständigen Funktionsausfall führen.

Die hier beschriebene Problematik ist der wesentliche Grund dafür, weshalb die Analyse des Versagensverhaltens von idealisierten modellhaften Mehrkomponentenverbunden besonderes Interesse in der kontinuumsmechanischen Materialforschung hervorruft.

Zur Durchführung erster systematischer Untersuchungen zur Entstehung und zum Ausbreitungsverhalten von Rissen in dreidimensionalen Modellverbundkörpern unter Einwirkung homogener stationärer Temperaturlasten wurde der Modelltyp QUADER gewählt, da er sich insbesondere zur optischen Vermessung der räumlich gekrümmten Rißgeometrie besonders eignet. Er besteht aus einer Verbundstruktur aus Aluminium und Glas.

Das Eigenspannungsexperiment kann allerdings keine Aussagen über die innerhalb der Bruchmechanik und der Materialforschung gesuchten Kennwerte, Energiefreisetzungsrate oder Spannungsintensitätsfaktor liefern. Dazu bedarf es umfangreicher numerischer Untersuchungen. Die Ergebnisse des Experiments in Form von Stützpunkten der Rißfläche zu verschiedenen Zeitpunkten werden genutzt um hieraus eine Finite-Element Modellierung vorzunehmen.

In einem ersten Schritt wurde die Elemententeilung und speziell die Verfeinerungsstruktur mittels des CAD Programmes IDEAS auf eine zuvor definierte Kugeloberfläche projiziert. Für die weiteren numerischen Untersuchungen wurde das FE-Programmsystem ABAQUS verwendet. Am Beispiel des ungerissenen Referenzzustand und weitere sechs Stadien der Rißfrontentwicklung sind FE-Berechnungen durchgeführt worden

Zur Ermittlung bruchmechanischer Parameter mittels wegunabhängiger Integrale, wie dem J-Integral, wurde ein tubusförmiger Volumenbereich generiert, der die Rißfront umschließt.

# Eigenstressen bei viskoelastischen Verbundwerkstoffen

R. Meske, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre  
Universität Karlsruhe

Bei der Herstellung von multidirektionalen Laminaten aus faserverstärkten Kunststoffen entstehen aufgrund der stark anisotropen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der einzelnen Laminatschichten hohe Eigenstressen im Laminat. Zur optimalen Dimensionierung von Bauteilen ist die Kenntnis dieses Eigenstresszustandes unerlässlich. Ein Verfahren zur Untersuchung der Eigenstressen ist die röntgenographische Spannungsanalyse an einlamierten Sekundärpartikeln.

Bei der Herstellung der Lamine, bei hohen Einsatztemperaturen und bei der Untersuchung des Langzeitverhaltens zeigt das Material aufgrund der Polymermatrix nicht mehr ausschließlich linear-elastisches Verhalten, sondern muß durch ein viskoelastisches Materialgesetz dargestellt werden.

Ein besonders wichtiger Punkt bei der Anwendung der röntgenographischen Spannungsanalyse ist das Spannungsübertragungsverhalten auf die einlamierten Sekundärpartikel. Diese werden zusammen mit der umgebenden Matrix mit der selbst-konsistenten Methode nach HILL [1] als eine homogenisierte Zwischenschicht im Laminat modelliert. Um die auftretenden Relaxationsvorgänge beschreiben zu können, wird der viskoelastische Ansatz nach LAWS & McLAUGHLIN [2] verwendet.

## Literatur

- [1] R. Hill. A self-consistent mechanics of composite materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13:213–222, 1965.
- [2] N. Laws and R. McLaughlin. Self-consistent estimates for the viscoelastic creep compliance of composite materials. *Proceedings Royal Society London A*, 359:251–273, 1978.

# Vergleich der Energiefreisetzungsraten bei mikro-mechanischen Versuchen

C. Marotzke

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Fachgebiet Mechanik der Polymere und Faserverbundwerkstoffe

Die mikromechanischen Tests zur Bestimmung der Haftfestigkeit zwischen Faser und Matrix wie Pull-out, Indentation und Fragmentation Test werden überwiegend bezüglich der im Interface auftretenden Spannungen ausgewertet. Eine Alternative stellt die bruchmechanische Charakterisierung dar. Hierzu wurden einige analytische Ansätze vorgeschlagen, die jedoch starke Vereinfachungen hinsichtlich des Spannungsfeldes beinhalten. Im Rahmen des Vortrages wird die Energiefreisetzungsraten bei der Ausbreitung eines Grenzflächenrisses mit Hilfe der Finite Element Methode berechnet. Dabei werden die drei am häufigsten verwendeten Tests wie Pull-out, Indentation und Fragmentation Test verglichen. Die Spannungen in der Umgebung der Rißspitze unterscheiden sich bei den drei Tests. Während beim Fragmentation und Indentation Test die Rißufer geschlossen bleiben, tritt beim Pull-out Test eine Öffnung des Risses direkt vor der Rißspitze auf, die mit dem Riß mitwandert. Außerhalb dieser Zone schließen sich die Rißufer wieder und es treten Reibspannungen auf.

Die Ergebnisse für den Pull-out Test zeigen, daß die thermischen Eigenspannungen infolge des Abkühlprozesses bei thermoplastischen Matrices zu einem erheblichen Zuwachs an freigesetzter Energie führen, der in den herkömmlichen Auswertungen nicht berücksichtigt wird. Durch den Abkühlprozess werden ebenfalls radiale Druckspannungen in der Grenzfläche erzeugt, die zu merklicher Reibung bei der Rissausbreitung führen. Die dabei dissipierte Energie wird ebenfalls dargestellt.

Am Beispiel des Fragmentation Tests wird die Finite Element Lösung mit einer Näherungsberechnung von Wagner<sup>1</sup> verglichen, die auf der Shear Lag Theorie basiert. In diesem Verfahren wird die freigesetzte Energie für eine vorgegebene Risslänge berechnet. Es zeigt sich, daß die Vereinfachungen im Rahmen der Shear Lag Theorie zu deutlichen Abweichungen führen. Insbesondere hängt die analytische Näherungslösung stark vom wirksamen Matrixquerschnitt ab, der nicht mit dem Probendurchmesser identisch ist sondern als reiner Fittingparameter anzusehen ist.

1. H. D. Wagner, J. A. Naim, M. Detassis, Applied Composite Materials 2 (1995), pp 107-117

## Thermische Einflüsse auf das Versagen von mehrphasigen Werkstoffen

T. Pandorf, D. Weichert

Institut für Allgemeine Mechanik, RWTH Aachen, Templergraben 64,  
D-52056 Aachen

### Abstract

Ein numerisches Modell wird vorgestellt, das darauf abzielt, das Auftreten und die Evolution von Schädigung in metallischen Werkstoffen mit Einschlüssen (MMC) unter statischen und thermischen Lasten zu simulieren. Diskrete Schädigungsmodelle für verschiedene Versagensmechanismen sind in diesem FE-Programm implementiert. Das Versagen der Einschlüsse soll durch eine kritische größte Hauptspannung gesteuert werden. Das Ablösen der Grenzfläche zwischen Hartphase (HP) und Metallmatrix (MM) soll stattfinden, wenn entweder eine kritische Normalspannung (isotropes Modell) oder eine kritische Scherspannung (orthotropes Modell) erreicht wird.

Als Modellwerkstoffe werden die Stähle ASP30 und ASP60 untersucht. Sie gehören zur Gruppe der Zwei-Phasen-Materialien mit der morphologischen Struktur Matrix-Einschluß. Die Herstellung durch pulvermetallurgische Verfahren (PM) oder Heißisostatisches Pressen (HIP) sorgt für die gleichmäßige Verteilung feiner, kugelförmiger Karbide in der Mikrostruktur. Der hohe Volumenanteil harter Phasen erhöht die Härte und Festigkeit des Werkstoffs, vermindert aber die Duktilität aufgrund lokaler Versagensprozesse.

Die numerischen Simulationen werden auf der Meso-Ebene durchgeführt unter Anwendung des Unit-Cell Konzepts. Die Belastung des Werkstoffs erfolgt sowohl durch statische als auch durch thermische Lasten. Ausgehend von thermischen Randbedingungen wird die stationäre Temperaturverteilung im Werkstoff berechnet, woraus sich Wärmedehnungen ergeben, die denen aus der statischen Belastung überlagert werden. Im vorliegenden Modell werden keine viskoplastischen Effekte des MMC berücksichtigt, da der Temperaturbereich so gewählt wird, daß ein viskoses Verhalten vernachlässigt werden kann. Die statischen Lasten werden inkrementell aufgebracht. Falls ein lokales Versagenskriterium innerhalb eines Lastschritts erfüllt wird, erfolgt die Berechnung des nächsten Inkrements ohne weitere Laststeigerung, so daß eine Spannungsumverteilung aufgrund der aufgetretenen Materialschädigung berücksichtigt wird. Auf das makroskopische Materialverhalten wird durch das homogenisierte Verhalten der Unit-Cell geschlossen.

Ein Vergleich der Materialbeanspruchung mit und ohne thermische Lasten läßt Rückschlüsse darauf zu, inwieweit thermisch bedingte Spannungen die Schädigung in mehrphasigen Materialien beeinflussen. Weiterhin wird durch die Berechnung und den Vergleich eines effektiven Damage-Parameters, der sich aus der makroskopischen Dehnung und der Gesamtdehnung ergibt, eine Aussage über das globale Verhalten des Werkstoffs mit und ohne thermische Lasten möglich.



# Integration von piezokeramischen Scheibenelementen in Faserverbundstrukturen

H.P. Monner, H. Hanselka, V. Krajenski  
Institut für Strukturmechanik  
Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt  
Lilienthalplatz 7  
38108 Braunschweig

## Abstract:

Im Leichtbau kommen zunehmend Faserverbundwerkstoffe (FVW) zum Einsatz. Sie besitzen den Vorteil gegenüber den traditionellen Leichtbaumaterialien, wie z.B. Aluminium, daß sie bei gleicher Steifigkeit ein geringeres Gewicht aufweisen und zudem die Möglichkeit bieten, die anisotropen Stoffeigenschaften gezielt zur lokalen Steifigkeitsoptimierung einsetzen zu können. Auch diesen modernen Leichtbaustrukturen sind natürliche Grenzen gesetzt, die eine Ausweitung des operationellen Einsatzspektrums verhindern. Unterschiedliche Betriebsbedingungen erfordern z.T. sich gegenseitig ausschließende strukturelle Eigenschaften. Ändern sich diese Bedingungen, kann die geforderte Funktionsfähigkeit oft nicht mehr gewährleistet werden.

Unter diesem Gesichtspunkt werden am Institut für Strukturmechanik der DLR Braunschweig Materialsysteme untersucht, die eine aktive Beeinflussung elasto-mechanischer Faserverbundstrukturen ermöglichen. Als Aktivierung bietet es sich an, piezoelektrische Scheibenelemente in eine Faserverbundstruktur zu integrieren. Diese Materialkombination erlaubt es, bei einem hohen Integrationsgrad gewichtsoptimal eine Faserverbundstruktur zu kontrollieren und zu verformen.

Vorgestellt wird eine Konzeptstudie zur Realisierung der variablen Hinterkantenverwölbung eines Verkehrsflugzeuges, in dem das Hautfeld der Start- und Landeklappen mit piezokeramischen Scheibenelementen versehen wird. Bei Optimierung der Anordnung und Anzahl der piezokeramischen Scheibenelemente lassen sich auf diese Weise die geforderten Verformungen erzielen.

Desweiteren wird aufgezeigt, wie die Kombination Piezokeramik/Faserverbundwerkstoff zur aktiven Lärmunterdrückung verwendet werden kann. Durch Anregung einer FVW-Platte durch eine integrierte Piezoscheibe mit einer Schwingung phasenverschoben zu einer auf ihr auftreffenden Schallwelle, kann der durchgehende oder reflektierte Schall an einem gewünschten Ort nahezu vollständig ausgelöscht werden.

## **Ermittlung von Dämpfungskennwerten für polymere Faserverbundwerkstoffe mittels der Methode der Finiten Elemente**

Erik Schrader und Holger Hanselka

DLR Braunschweig  
Institut für Strukturmechanik

Bei dynamisch beanspruchten Bauteilen und Strukturkomponenten technischer Konstruktionen kann die Werkstoffdämpfung gezielt zur Reduktion von Schwingungen eingesetzt werden. Im Bereich kritischer Drehzahlen von rotierenden Maschinenteilen läßt sich auf diese Weise etwa eine Amplitudenbegrenzung herbeiführen. Hierbei zeichnen sich polymere Faserverbundwerkstoffe aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens des Matrixwerkstoffes durch ein hohes Dämpfungspotential aus. Da das Dämpfungsverhalten, wie auch die Steifigkeit, bei Faserverbundwerkstoffen stark richtungsabhängig ist, variiert es je nach Art der tatsächlich ausgeführten Schwingungsform erheblich.

Zur Berücksichtigung des modalen Verformungsverhaltens bei der Dämpfungsanalyse sind am Institut für Strukturmechanik der DLR in Braunschweig geeignete Finite Elemente entwickelt worden. Diese machen es durch den Einsatz verschiedener Ansätze (Energimethode, Verfahren der komplexen Moduln) möglich, das modale Dämpfungsverhalten von Schalenstrukturen aus Faserverbundwerkstoffen zu berechnen.

Da bei dickwandigen Strukturen oder einem hohen Grad der Anisotropie die klassische Laminattheorie nur unzureichend genaue Ergebnisse liefert, sind die Elemente mit der erweiterten Laminattheorie nach Whitney/Pagano implementiert worden. Hierbei entsteht jedoch das Problem, die mit den interlaminaren Schubspannungen korrespondierenden Dämpfungsgrößen zu ermitteln.

Im Rahmen dieses Vortrages wird ein Modell vorgestellt, das es erlaubt, sämtliche Eingangsgrößen in einem rechnerisch-experimentellen Verfahren zu ermitteln. Mit diesen Größen lassen sich dann Schalenstrukturen hinsichtlich des modalen Dämpfungsverhaltens berechnen und optimieren.

# Allgemeine Konstitutivgleichungen thermomechanischer Materialien

K. Türke und E. Schnack, Karlsruhe

Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe

## Zusammenfassung

Die Grundlage der Kontinuumsmechanik zur Bestimmung mechanischer und thermischer Feldgrößen sind allgemeingültige Bilanzgleichungen für Masse, Impuls, Drehimpuls, Energie sowie Entropie. Darüber hinaus ist die Formulierung sog. Konstitutivgleichungen erforderlich, die die spezifischen Besonderheiten der Kontinua beschreiben.

In diesem Vortrag wird einerseits eine allgemeine Vorgehensweise zur deduktiven Herleitung von Konstitutivgleichungen bei Betrachtung phänomenologischer Materialeigenschaften dargestellt. Ausgehend vom Rahmen der Bilanzgleichungen wird eine Einengung auf spezifische Materialklassen mit Hilfe der Axiome der Materialtheorie vorgenommen. Zu berücksichtigen sind das Kausalitätsprinzip, das Determinismusaxiom, das Axiom der materiellen Objektivität, das Axiom der lokalen Wirkung sowie das Gedächtnisprinzip. Durch Beachtung oben genannter Prinzipien wird gewährleistet, daß die erhaltenen Gleichungen thermodynamisch konsistent sind. Über die Einbeziehung von inneren Variablen lassen sich auch dissipative Effekte wie Verfestigungen, plastische Verzerrungen oder allgemeine Schädigungen mit den hergeleiteten Konstitutivgleichungen beschreiben.

Dem wird die in der Ingenieurpraxis vielfach angewandte induktive Herleitung von Materialgleichungen gegenübergestellt. Hierbei werden einfachste experimentelle Erfahrungen, die meist anhand von einachsigen Versuchen gewonnen werden, induktiv verallgemeinert.

Diese allgemeine Darstellungsform soll die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen einer phänomenologisch formulierten Kontinuumsmechanik aufzeigen und so Ansatzpunkte für weitere Entwicklungen geben.

# Modellierung der Reaktionsschichtbildung in Si-C-O-Compositen

J. Woltersdorf, A. Hähnel

Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik  
06120 Halle, Weinberg 2

Bekanntlich können sich neue langfaserverstärkte Keramiken und Gläser schadenstolerant und quasiduktile verhalten, wenn die für diese Composite typischen Energiedissipations- bzw. Verstärkungsmechanismen in geeigneter Weise aktiviert werden, wobei den Faser/Matrix-Grenzschichten eine entscheidende Rolle zukommt /1-3/. Diese Grenzschichten, deren Dicke, Struktur und Zusammensetzung eigenschaftssteuernd wirken, können sowohl durch Faservorbeschichtung als auch durch festkörperchemische Transport- und Austauschreaktionen während der Prozeßführung entstehen /4, 5/.

Am Beispiel des ternären Systems Si-C-O, das für viele Hochtemperaturwerkstoffe und Spezialgläser von Bedeutung ist, wird die Faser/Matrix-Reaktionsschichtbildung untersucht und - aufbauend auf HREM- und ELNES-Analysen sowie thermodynamischen Betrachtungen - durch ein vierstufiges Modell erklärt.

Ausgehend von einem durch die Spezifik des jeweiligen Matrixmaterials vorgegebenen  $p_{O_2}$  liefert die passive Faseroxidation eine erste  $SiO_2$ -Schicht, die als Diffusionsbarriere wirkt. Der dadurch an der Reaktionsfront verminderte Sauerstoffpartialdruck führt zur aktiven SiC-Oxidation unter Bildung von CO. Danach kann eine Kohlenstoffschicht abgeschieden werden, oder es entsteht, bei hohem SiO-Partialdruck, eine aus  $SiO_2$ - und C-Bestandteilen gemischte Schicht.

- /1/ J. Woltersdorf, E. Pippel, Microstructure of Interfaces in Fibre-Reinforced Ceramics and Glasses, Euroceramics II (Eur. Ceram. Soc.), 2, 1651 (1993).
- /2/ J. Woltersdorf, E. Pippel, Ceramic Materials: Microstructural and Interface Analysis as a Prerequisite for the Optimisation of Microstructures, Pract. Metallogr. 29, 204, 241, 388 (1992).
- /3/ G. Grathwohl, M. Kuntz, E. Pippel, J. Woltersdorf, The Real Structure of the Interlayer between Fibre and Matrix and its Influence on the Properties of Ceramic Composites, phys. stat. sol. (a) 146, 393 (1994).
- /4/ A. Hähnel, E. Pippel, J. Woltersdorf, Nanostructure of Interlayers in Different Fibre/Matrix Composites and their Effect on Mechanical Properties, J. Microscopy (London), 177, 264 (1995)
- /5/ A. Hähnel, E. Pippel, R. Schneider, J. Woltersdorf, D. Suttor, Formation and structure of reaction layers in SiC/glass and SiC/SiC composites, Composites Part A 27A, 685 (1996)

# RISSBILDUNG: ENTLANG DEN GEDANKEN DES GEHEIMRATS OTTO MOHR

S. Weihe und B. Kröplin

Universität Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und  
Raumfahrtkonstruktionen, Pfaffenwaldring 27, 70569 Stuttgart

Mit den Ansätzen der Bruchmechanik und denen einer zeitlich veränderlichen Materialfestigkeit bzw. -steifigkeit (im Rahmen einer fiktiven Rimodellierung) stehen zwei Modelle zur Verfügung, die im Rahmen der numerischen Simulation von Versagensprozessen eingesetzt werden können. Die zweite Vorgehensweise läßt sich entsprechend den Ansätzen Otto Mohrs darstellen, wonach die Rißbildung in einem Material allein durch die Beanspruchung der potentiellen Riebene bestimmt wird.

Nimmt man Annahmen über Rifronten mit einer ausgeprägten Prozezone hinzu und führt eine beanspruchungsabhngige Abminderung der Materialfestigkeit ein, so kann man die Mohrsche Idee in ein Modell zur Berechnung von Schdigungsprozessen überführen. Entscheidend erweist sich dabei die Berücksichtigung verschiedener Versagensmodi in der fiktiven Riebene, die in direkter Wechselwirkung mit der Orientierung dieser Riebenen steht. Die klassischen Modelle der fiktiven Rißbildung erweisen sich somit als physikalisch relevante Grenzfälle des erweiterten Mohrschen Gedankens.

Hier wird deutlich, in welcher Weise die Orientierung des Risses die Eigenschaften desinfolge der teilweisen Schädigung - anisotropen Werkstoffs entscheidend beeinflt. ber die Untersuchung der Lokalisierungseigenschaften lassen sich die Defizite der ausschließlich beanspruchungsbezogenen Hypothesen zur Riinitiierung identifizieren. Desweiteren zeigt ein Vergleich der Eigenschaften des 'fiktiven' Kontinuums mit weit verbreiteten phänomenologischen Versagenskriterien, daß die Orientierung der Rimuster eine lokale Anisotropie hervorruft, die sich in der Versagensfläche des fiktiven Kontinuums als lokale Abminderung niederschlägt. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur kompakten Beschreibung von lokalen Schädigungen in numerischen Simulationsmodellen.

# Constrained Transverse Cracking and Its Induced Delamination in Composite Laminates

Junqian Zhang  
Department of Engineering Mechanics  
Chongqing University  
Chongqing, 630044, China

Transverse ply cracking and its induced delaminations (local delamination) at the  $\phi/90$  interfaces in  $[\dots/\phi_i/\phi_m/90_n]_s$  laminates are theoretically investigated. Three model cracked and delaminated laminates, one five-layer model laminate  $[S^R/\phi_m/90_{2n}/\phi_m/S^L]_T$  and two three-layer model laminates  $[S^R/90_{2n}/S^L]_T$  and  $[\phi_m/90_{2n}/\phi_m]_T$ , are designed to examine constraining mechanism of constraining plies of the center 90-ply group on the transverse crack induced delamination, where  $S^R$ ,  $S^L$ ,  $S^R$  and  $S^L$  are sublaminates  $[\dots/\phi_i]_T$ ,  $[\phi_i/\dots]_T$ ,  $[\dots/\phi_i/\phi_m]_T$  and  $[\phi_m/\phi_i/\dots]_T$ , respectively. It is assumed that through-width uniform local delaminations initiate and grow from both tips of each transverse crack. A sublaminates-wise first-order shear laminate theory is used to analyses microstress and microstrain field in the three cracked and delaminated laminates loaded in tension. The *in-situ* damage effective function (IDEF)  $\Lambda_{22}$ , introduced in our previous work for reflecting extension stiffness reduction of the constrained 90-ply, are derived in terms of delamination length and transverse crack spacing by using the obtained stress field. The strain energy release rate for local delamination normalized by square of laminate strain are calculated as a function of delamination length and transverse crack spacing. The three model laminates present a comparable result for the stiffness reduction of the constrained transverse plies, suggesting that the nearest-neighboring orientation plies  $\phi_m$  primarily affect the load-capacity of the core 90-ply whereas the constraining effect of rest plies are ignorable. Prediction of the five-layer model laminate for the normalized strain energy release rate due to local delamination is in agreement with that of the three-layer model laminate  $[\phi_m/90_{2n}/\phi_m]_T$  for all delamination length and that of the other three-layer laminate for delamination length longer than about one ply thickness. It could be concluded that a three-layer model laminate  $[\phi_m/90_{2n}/\phi_m]_T$  can be used to model the transverse ply cracking induced delaminations in  $[\dots/\phi_i/\phi_m/90_n]_s$  laminates.

## **TEILNEHMERLISTE**

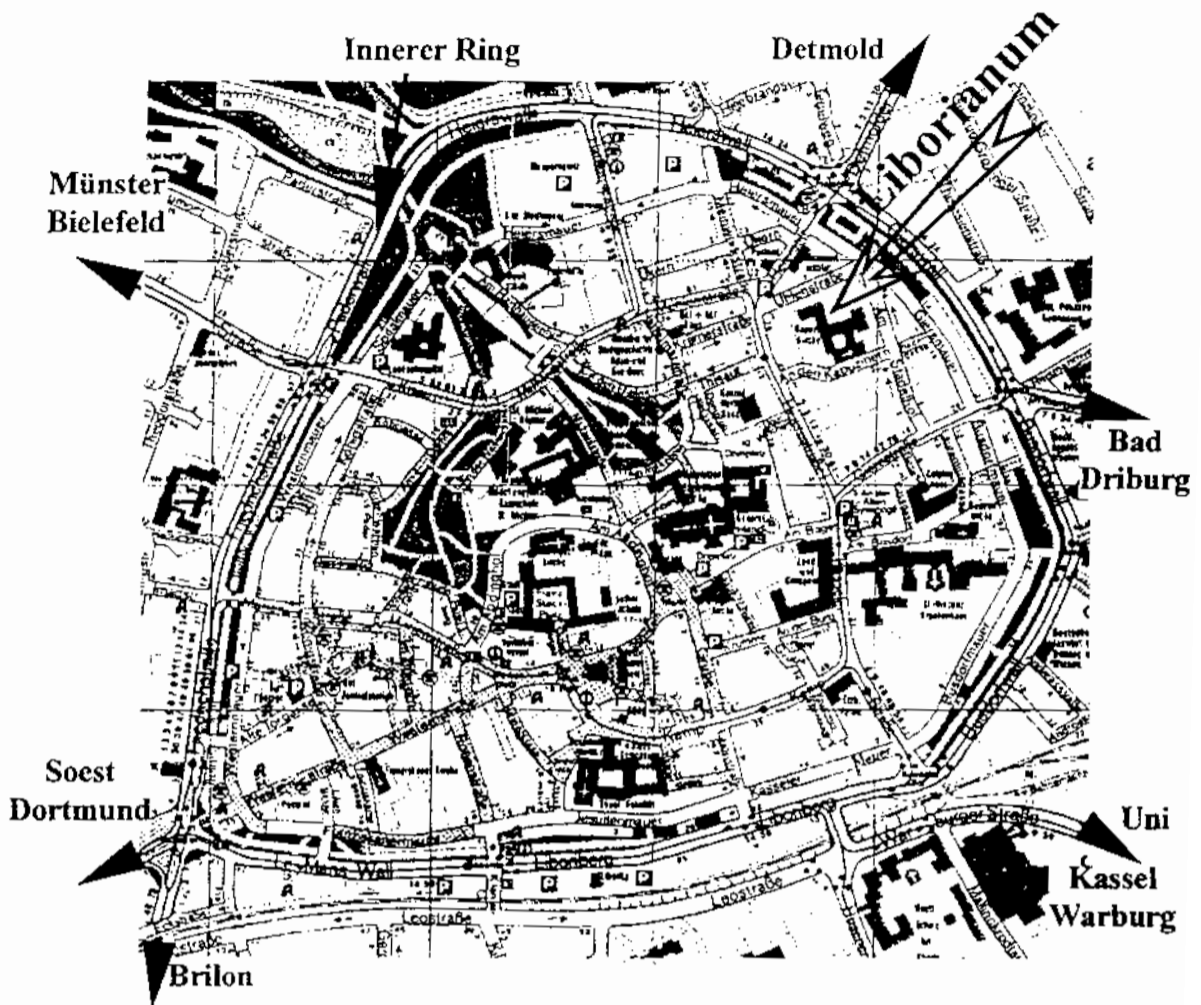
<b>ANSORGE</b>	<b>Hartmut</b>	Dr.-Ing. Lehrstuhl Festkörpermechanik TU Chemnitz-Zwickau Straße der Nationen 62 09107 Chemnitz
<b>BARCHAN</b>	<b>Adam</b>	Dr. Kielce University of Technology Al. Tysiaclecia 7 25 014 Kielce
<b>BECKER</b>	<b>Wilfried</b>	Prof. Dr.-Ing. Institut für Mechanik u. Regelungstechnik, FB 11 - Maschinentechnik Universität-GH-Siegen Paul-Bonatz-Str. 9-11 57068 Siegen
<b>CHIMANI</b>	<b>Christian</b>	Dipl.-Ing. Institut für Leichtbau und Flugzeugbau Technische Universität Wien Gußhausstraße 27-29/317 A-1040 Wien
<b>FERBER</b>	<b>Ferdinand</b>	Dr.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
<b>GROSS</b>	<b>Dietmar</b>	Prof. Dr.-Ing. Institut für Mechanik TH Darmstadt Hochschulstr. 1 64289 Darmstadt
<b>HANSELKA</b>	<b>Holger</b>	Dr.-Ing. Institut für Strukturmechanik Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig



<b>MATCZYNSKI</b>	<b>Marek</b>	Prof. Dr. Institut für Grundlagenforschung Polnische Akademie der Wissenschaften Swietokrzyska 21 00-091 Warschau/Polen
<b>MESKE</b>	<b>Ralf</b>	Dipl.-Ing. Institut für Technische Mechanik und Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe
<b>MONNER</b>	<b>Hans Peter</b>	Dipl.-Ing. Institut für Strukturmechanik Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
<b>MÜLLER</b>	<b>Wolfgang-H.</b>	Dr. rer. nat. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
<b>PANDORF</b>	<b>Thomas</b>	Dipl.-Ing. Institut für Allgemeine Mechanik RWTH Aachen Templergraben 64 52056 Aachen
<b>POTTHAST</b>	<b>Bernd</b>	Dipl.-Math. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
<b>SCHNACK</b>	<b>Eckart</b>	Prof. Dr.-Ing. Institut für Technische Mechanik und Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe

<b>HERRMANN</b>	<b>Axel S.</b>	Dr.-Ing. Institut für Strukturmechanik Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
<b>HERRMANN</b>	<b>Klaus P.</b>	Prof. Dr. rer. nat. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
<b>HESEBECK</b>	<b>Olaf</b>	Dipl.-Phys. Institut für Technische Mechanik und Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12, Postfach 6980 76128 Karlsruhe
<b>KOUCHNEVSKI</b>	<b>Vladislav</b>	Dr.-Ing. Institut für Werkstoffwissenschaften Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 06099 Halle
<b>LINNENBROCK</b>	<b>Klaus</b>	Dipl.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
<b>MAIER</b>	<b>Christine</b>	Dr. rer. nat. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
<b>MAROTZKE</b>	<b>Christian</b>	Dr.-Ing. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Lab. VI 22 Unter den Eichen 87 12205 Berlin

<b>SCHRADER</b>	<b>Erik</b>	Dipl.-Math. Institut für Strukturmechanik Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
<b>TÜRKE</b>	<b>Karsten</b>	Dr.-Ing. Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe
<b>WEBER</b>	<b>Christof M.</b>	Dipl.-Ing. Institut für Mechanik und Regelungs- technik/ FOMAAS, FB 11 Universität-GH-Siegen Paul-Bonatz-Str. 9-11 57068 Siegen
<b>WEIHE</b>	<b>Stefan</b>	Dr.-Ing. Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 27 70550 Stuttgart
<b>WOLTERS DORF</b>	<b>Jörg</b>	Priv.-Doz. Dr. Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Halle (MPG) Weinberg 2 06120 Halle
<b>ZHANG</b>	<b>Junqian</b>	Dr. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn



#### **KONTAKTADRESSE**

Laboratorium für Technische Mechanik  
Universität-GH-Paderborn  
Pohlweg 47-49  
33098 Paderborn

Tel.: 05251/60-2284  
Fax: 05251/60-3483  
www: [http://www.fb10.uni-paderborn.de/LTM\\_dt.html/](http://www.fb10.uni-paderborn.de/LTM_dt.html/)  
email: [sek@ltm.uni-paderborn.de](mailto:sek@ltm.uni-paderborn.de)

#### **TAGUNGSADRESSE**

Liborranum Paderborn  
An den Kapuzinern 5-7  
33098 Paderborn