



**LABORATORIUM FÜR TECHNISCHE MECHANIK
UNIVERSITÄT PADERBORN**



**7. Workshop
Composite Forschung in der Mechanik
5.-7. Dezember 1994
Paderborn, Liboranium**

**o. Prof. Dr. rer. nat. K. 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
76131 Karlsruhe**

PROGRAMM

Dienstag, 6. Dezember 1994

- | | |
|-------|---|
| 09.00 | Eröffnung |
| 09.10 | Sektion I "Analytisch-numerische Methoden" |
| 10.40 | Kaffeepause |
| 11.00 | Sektion II "Analytisch-numerische Methoden" |
| 12.30 | Mittagspause |
| 14.30 | Sektion III "Mechanisches Verhalten von Composites" |
| 16.00 | Kaffeepause |
| 16.30 | Sektion IV "Mechanisches Verhalten von Composites" |
| 19.00 | Abendessen im Liborianum |

Mittwoch, 7. Dezember 1994

- | | |
|-------|---|
| 09.00 | Sektion V "Verbundwerkstoffe als Konstruktionswerkstoffe" |
| 10.30 | Kaffeepause |
| 11.00 | Sektion VI "Experimentelle Methoden" |
| 12.30 | Mittagessen im Liborianum |

ABSTRACTS

Breiteneinfluß und Anisotropie bei quasi-isotropen Laminat-Zugproben

Wilfried Becker

Dornier GmbH, Deutsche Aerospace, Abteilung RST43
D-88039 Friedrichshafen

Gegenstand der Betrachtung ist die effektive Zugsteifigkeit endlich breiter Zugproben, die aus einem Laminat mit quasi-isotropem $[\mp 30^\circ/90^\circ]_S$ -Lagenaufbau herausgeschnitten sind. Gemäß der klassischen Laminattheorie müßte die auf die Breite bezogene effektive Zugsteifigkeit dieser Proben sowohl unabhängig von der gegebenen Probenbreite sein als auch unabhängig von der Orientierung, mit der die Proben dem quasi-isotropen Laminat entnommen wurden.

In Wirklichkeit zeigt sich jedoch ein deutlicher nichtlinearer Einfluß der Probenbreite auf die effektive Zugsteifigkeit der endlich breiten Zugproben. Außerdem geht die ursprüngliche Isotropie der ebenen Laminat-Dehnsteifigkeiten verloren.

Die Ursache hierfür liegt im sogenannten Laminat-Randeffekt begründet. Aufgrund des Laminat-Randeffekts kommt es im Randbereich der Laminat-Zugproben zu zusätzlichen Deformationen und zur Ausbildung lokalisierter interlaminarer Spannungen, die von der klassischen Laminattheorie nicht erfaßt werden, und daraus resultiert letztlich auch eine verminderte effektive Zugsteifigkeit.

Zur Erfassung dieses Effektes wird ein geeigneter geschlossen-analytischer Zugang vorgestellt, und die entsprechend resultierende Zugprobensteifigkeit wird in einer konsistenten Weise hergeleitet. Der Vergleich mit Finite-Elemente-Analysen ergibt eine recht zufriedenstellende Übereinstimmung mit den hergeleiteten analytischen Ergebnissen und zeigt, daß diese für die ingenieurmäßige Anwendung sehr brauchbar sind.

Faserverbundwerkstoffen unter transversaler Belastung
- FE-Modellierung mit der Einbettungsmethode -

M. Dong, S. Schmauder

Max-Planck-Institut für Metallforschung
Institut für Werkstoffwissenschaft
Seestraße 92 D-70174 Stuttgart

Metallische Werkstoffe werden häufig durch die Einbringung parallel ausgerichteter harter Faser verstärkt. Die Verstärkung in axialer Richtung ist dabei deutlich besser als senkrecht zu den Fasern. In dieser Arbeit wird daher das mechanische Verhalten von Faserverbundwerkstoffen unter transversaler Belastung in Abhängigkeit von der Anordnung und dem Volumenanteil der Fasern untersucht.

Um Realgefüge mit random angeordneten Fasern zu modellieren, wird die Einbettungsmethode herangezogen. Dazu wird eine elastische Faser mit einem runden Querschnitt in einer duktilen Matrix unterschiedlicher Form modelliert und in einer äquivalenten homogenen Umgebung des gesuchten Verbundwerkstoffs eingebettet. Das mechanische Verhalten der Umgebung wird dann in selbstkonsistenter Weise in 4-5 Iterationen bestimmt.

Die mit Hilfe der Einbettungsmethode gewonnene Fließkurve für den Al/46vol.%B-Faserverbund wurde mit entsprechenden Ergebnissen eines Realgefüges mit random angeordneten Fasern verglichen und es wurde eine mechanische Antwort erhalten, die gut mit dem Experiment übereinstimmt.

Abschließend wurde die Festigkeitssteigerung von Faserverbundwerkstoffen systematisch als Funktion des Faservolumens und der Matrixverfestigung berechnet und mit numerischen Ergebnissen für regelmäßig angeordnete Fasern verglichen.

Bestimmung der einzelnen Brucharten über eine Modalanalyse

H. Eggers
DLR-Institut für Strukturmechanik
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

Der allgemeine Spannungszustand an der Rißspitze läßt sich in drei orthogonale Spannungszustände zerlegen, denen einzelnen Brucharten zugeordnet sind. Bei der Wahl eines bestimmten Koordinatensystems sind die vor der Rißfront aus der fiktiven Rißfläche austretenden Spannungskomponenten (Traktionen) und die bei einer Rißverlängerung entstehenden Rißöffnungsverschiebungen entkoppelt. Schwierig wird die Aufteilung eines gemischten Bruches auf die einzelnen Brucharten immer dann, wenn die theoretische Lösung nicht bekannt ist. Näherungsweise wird für die Zerlegung des allgemeinen Spannungszustandes ein begleitendes Dreibein gewählt, dessen Koordinatenrichtungen normal zur Rißfläche sowie tangential und normal zur Rißfront verlaufen. Damit läßt sich der allgemeine Spannungszustand immer dann entkoppeln, wenn der Riß den Hauptspannungslinien folgt (isotropes Material). Wird der Riß durch eine innere Textur des Materials in bestimmte Bahnen gezwängt, sind die den gewählten Koordinatenrichtungen zugeordneten Traktionen und Rißöffnungsverschiebungen nicht mehr entkoppelt. Je nach Wahl des Koordinatensystems entstehen andere Energiefreisetzungsraten (ERR) für die einzelnen Brucharten, sodaß damit keine eindeutigen Bruchbedingungen entwickelt werden können.

Um hier Abhilfe zu schaffen, wurden die Traktionen und Rißöffnungsverschiebungen über eine Modalanalyse orthogonalisiert. Die zugeordneten ERR sind nur von den Steifigkeiten der Konstruktion abhängig und können zur Entwicklung von eindeutigen Bruchbedingungen herangezogen werden. Da die Eigenrichtungen von dem üblicherweise definierten begleitenden Dreibein abweichen, ist die anschauliche Aufteilung der ERR in die bekannten Brucharten nicht mehr möglich. Außerdem sind in den Eigenvektoren die Komponenten aller Knoten entlang der Rißfront vertreten. Erst wenn der Rißfortschritt in Relation zum Knotenabstand infinitesimal klein wird, verschwinden die Koppelglieder zwischen den Knoten. Nur dann kann jedem Knoten ein orthogonales Dreibein zugeordnet werden, mit dem sich die ERR für die einzelnen Modes eindeutig bestimmen lassen. Da bei einer finiten Elementberechnung das Seitenverhältnis der Elemente nicht beliebig klein werden kann, ist bei einem vorgegebenen Knotenabstand entlang der Rißfront immer ein finiter Rißfortschritt vorhanden. Dadurch entstehen immer Kopplungen mit den Nachbarknoten, sodaß eine eindeutige Zerlegung der ERR in die einzelnen Modes nicht möglich ist. Speziell dieses Problem und die damit zusammenhängenden Phänomene sollen auf dem Workshop diskutiert werden.

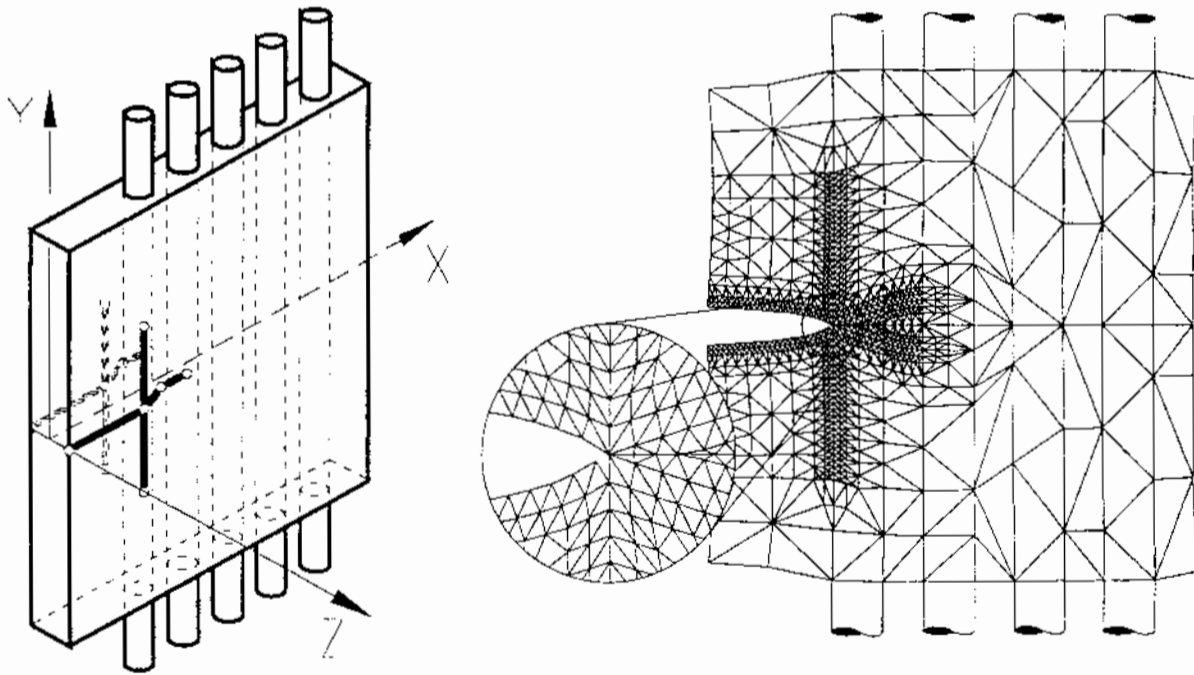
Numerische Simulation verzweigter Rißsysteme in unidirektional verstärkten Faserverbundmodellen

F. Ferber

Laboratorium für Technische Mechanik
Universität Paderborn

Das Modell eines Faserverbundwerkstoffes läßt sich als Zusammenschluß unidirektional angeordneter zylindrischer Fasern in einer hexagonalen Matrixpackung modellieren. Unter mechanischer und thermischer Belastung treten in solchen Verbundstrukturen im wesentlichen drei unterschiedliche Rißsequenzen auf. Diese bestehen aus Kombinationen von geraden bzw. gekrümmten Matrixrissen und gekrümmten Faserrissen, die durch lokale asymmetrische Grenzflächenrißablösung hervorgerufen werden. Aufgrund dieses im Experiment beobachteten Phänomens wurde ein entsprechendes Modell für eine FE-Berechnung aufbereitet.

Die vorliegende Arbeit dient der Präsentation eines Programmsystems zur numerischen Simulation von modellspezifischen Versagensabläufen, zur selbständigen FE-Netzgenerierung, zur Durchführung von Simulationsrechnungen bezüglich der Ausbildung von verzweigten Rißsystemen. Es wird die Anwendung des Programmsystems zur Untersuchung unterschiedlicher Eigenspannungs- bzw. Lastspannungsfälle vorgestellt. Unter Verwendung des Mode-I Rißausbreitungskriteriums ($G_{II}=0$) ist die numerische Ermittlung von Rißverläufen in Abhängigkeit von den gewählten Belastungsparametern durchgeführt worden. Das Modell ist in Anlehnung an die Standard-CT-Probe als Laminat- bzw. als Schichtenmodell konzipiert worden, so daß experimentelle Untersuchungen durchgeführt und die Methoden der ebenen Spannungs- bzw. Schattenoptik eingesetzt werden können.



Ausschnitt aus einem Faserverbundwerkstoff und FE-Diskretisierung des gerissenen Faserverbundwerkstoffmodells mit asymmetrischem Grenzflächenriß

Spröbruchkriterien bei überlagerter Rißöffnung Mode I, III in keramischen Werkstoffen

K.-F. Fischer (Zwickau), W. Brocks (Freiburg) und F. Fischer (Hamburg)

(Abstract)

Der Einsatz von hochbeanspruchten Bauteilen aus Massivkeramik ist eng mit der entsprechenden Bewertung hinsichtlich Festigkeit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit verbunden. Dabei ist es praktisch oftmals notwendig, geeignete Bruchkriterien bei überlagerter Rißöffnung zu formulieren und anzuwenden.

In vielen Beiträgen zum Thema steht vor allem die Überlagerung der Rißöffnungen Mode I (Normalverschiebung der Rißufer zueinander) und Mode II (ebener Schub) im Vordergrund. Dies liegt zum einen in der Notwendigkeit einer praktisch relevanten und grundlegenden theoretischen Behandlung des Problems und zum anderen in der Vergleichbarkeit der theoretischen und experimentellen Ergebnisse begründet. Man formuliert heute derartige Bruchkriterien in Analogie zu den Festigkeits-hypothesen der konventionellen Festigkeitslehre bei weitestgehend homogener Beanspruchung. Dementsprechend liefern die Bruchkriterien für ebene (Mixed-Mode-) Probleme einen Vergleichsintensitätsfaktor, den Rißausbreitungswinkel bei Rißinitiierung und die Bruchgrenzkurve. Die z. T. unterschiedlichen Bruchzähigkeiten des Werkstoffes gegenüber unterschiedlichen Rißöffnungen und damit unterschiedlichen Schädigungsmechanismen kann man in einem sog. bruchmechanischem Anstrengungsverhältnis erfassen.

Der Beitrag zeigt die Formulierung und Anwendung von Bruchkriterien bei überlagerter Rißöffnung Mode I und Mode III (nichtebener Schub) im Rahmen der linear elastischen Bruchmechanik. Dies dient vor allem der Möglichkeit zur Erfassung praktisch relevanter Lastfälle, z. B. Stäbe mit Umlaufkerbe unter gleichzeitiger Zug und Torsionsbeanspruchung. Theoretische Grundlagen und Versuchsergebnisse dazu werden mitgeteilt.

Die Resultate wurden an Hand einer sehr einfachen Modellierung (Stäbe aus Si_3N_4 und SiC) gewonnen. Erste verallgemeinerbare Ergebnisse sind die Aussagen, daß die *Rißausbreitung im Moment der Rißinitiierung bei beliebiger Überlagerung kollinear verläuft und daß die Bruchgrenzkurve unabhängig von den elastizitätstheoretischen Werkstoffkenngrößen* ist.

Bruchkriterien für Faserverbundwerkstoffe: die Qual der Wahl

Jürgen Häberle

Institut für Werkstofftechnik, Universität Gesamthochschule Kassel

- Abstract -

Ein Ende der Diskussion um das optimale Bruchkriterium für Faserverbundwerkstoffe ist nicht in Sicht. Im Bereich dreidimensionaler statischer oder mehrachsiger schwingender Beanspruchung sind noch viele Fragen unbeantwortet. Aber auch im einfachen Fall der ebenen statischen Belastung eines Laminates herrscht keine Einigkeit darüber, wie zuverlässig Versagen vorhergesagt werden kann. Unsicherheit entsteht vor allem bei der Übertragung des Einzelschichtverhaltens auf das Laminat.

Im Vortrag wird die Frage nach dem optimalen Bruchkriterium nicht beantwortet werden. Dagegen wird aus der Sicht des Ingenieurs ein Aspekt beleuchtet, der nach Meinung des Autors nicht genügend Beachtung findet: der der *effektiven* Einzelschichtfestigkeiten. Die Anwendung von Ergebnissen aus der Prüfung unidirektional verstärkter Proben zur Versagensanalyse des Laminates wird kritisch betrachtet. Anhand von Beispielen aus mehreren Forschungsarbeiten wird versucht, das Problem zu veranschaulichen und eine praxisgerechte Lösung vorzuschlagen. Dabei wird erwartet, daß die 'Workshop'-Atmosphäre eine lebhafte Diskussion und den Austausch von Erfahrungen erleichtert.

Analytische und experimentelle Ergebnisse zum Dämpfungsverhalten polymerer Faserverbundwerkstoffe

Dr.-Ing. Holger Hanselka (Institut für Strukturmechanik der DLR Braunschweig)
Dr.-Ing. Uwe Hoffmann (Ministerium für Finanzen und Energie, Abt. Reaktorsicherheit in Kiel)

Das dynamische Verhalten von Leichtbaustrukturen ist neben der Masse und der Steifigkeit maßgeblich durch die Dämpfung geprägt. Bei Faserverbundwerkstoffen kann durch Auswahl der Werkstoffkomponenten und des Laminataufbaus die Verbunddämpfung bei gleichbleibender Steifigkeit und nur geringfügig erhöhtem Strukturgewicht vervielfacht werden. Zur Optimierung des dynamischen Verhaltens von Faserverbunden sind daher Rechenmodelle zur Abschätzung der anisotropen Dämpfungseigenschaften sowie geeignete Versuchstechniken zur Bestimmung von Einzelschichtdaten zwingend notwendig.

Im Rahmen dieses Vortrages werden auf der Basis linear viskoelastischen Materialverhaltens mikro- und makromechanische Berechnungsansätze zur Bestimmung des anisotropen Dämpfungsverhaltens von Faserverbundwerkstoffen vorgestellt und mit experimentell bestimmten Ergebnissen verglichen. Es wird gezeigt, wie mit diesen Ansätzen das strukturdynamische Verhalten dämpfungsbehafteter Faserverbund-Bauteile analysiert und optimiert werden kann.

Zur Verifikation der rechnerischen Analyse mußten Meßtechniken entwickelt werden, die die vollständige Charakterisierung der dynamischen Viskoelastizitäten auch bei unterschiedlichen Beanspruchungsarten erlauben. Die Vorstellung des Meßprinzips und der wesentlichen Elemente der apparativen Umsetzung sind ebenfalls Gegenstand des Vortrages.

Anhand einer Auswahl von experimentell bestimmten Dämpfungskennwerten unterschiedlicher Materialpaarungen und Laminataufbauten in Abhängigkeit von der Temperatur, Frequenz, Feuchte, etc. wird das Potential der Werkstoffdämpfung von Faserverbunden hinsichtlich der Optimierung strukturdynamischen Verhaltens aufgezeigt und diskutiert. So kann nur durch Variation von Schichtaufbau, Laminatdicke und Temperatur bei gleichbleibender Steifigkeit 10-fache Dämpfung bei nur 10 % mehr an Strukturgewicht erzielt werden.

Durch die gezielte Modifikation des Matrixsystems kann sogar eine steuerbare Dämpfung ohne einhergehende Steifigkeitsverluste erzeugt werden, womit auf dem Weg zu adaptiven Strukturen ein entscheidender Beitrag geleistet werden kann.

Mehrschichtige Hochdruckbehälter in Leichtbauweise

W. Hufenbach, R. Troschitz

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden, 01062 Dresden

Gerichtete Faserverbunde stellen aufgrund ihres ausgezeichneten Leichtbaupotentials sowie nicht zuletzt auch durch ihre einstellbare geringe Wärmeausdehnung einen idealen Werkstoff für innovative Anwendungen dar. Der Einsatz von mehrschichtigen Hochdruckbehältern erfordert dabei in erster Linie die Bereitstellung angepaßter Auslegungskonzepte, die dem hier vorliegenden heterogenen Schichtaufbau und anisotropen Verbundverhalten gerecht werden. So können die bei konventionellen Konstruktionswerkstoffen bewährten Auslegungsmethoden nicht ohne weiteres auf die anisotropen Faserverbundwerkstoffe übertragen werden, da hier sowohl die Beanspruchungsermittlung als auch die Versagensanalyse wesentlich komplizierter und aufwendiger sind.

Darüber hinaus sind neuartige Lösungskonzepte insbesondere für den erforderlichen Festigkeitsnachweis von Kerbstörzonen infolge der verschiedenartigen Stützen heranzuziehen. Denn erst durch eine beanspruchungsgerechte Verbundgestaltung derartiger Störzonen kann eine leichtbaugerechte Werkstoffausnutzung auf hohem Niveau erzielt werden.

Zur Auslegung von Hochdruckbehältern in Leichtbauweise ist es notwendig, modifizierte und verfeinerte Schichttheorien für dickwandige Zylinderschalen anzuwenden, wobei hier der global inhomogenen und anisotropen Struktur Rechnung zu tragen ist. Erst damit kann der Einfluß der hohen Steifigkeitssprünge zwischen den Einzelschichten wie auch die Wechselwirkung zwischen den anisotropen Tragschichten und den isotropen Schutzschichten analysiert und hinsichtlich einer optimalen Verbundgestaltung beurteilt werden.

Im Unterschied dazu bleibt bei der bislang in praxi vornehmlich angewandten vereinfachten Theorie dünnwandiger Zylinderschalen auf Grundlage von Spannungsfunktionen in Verbindung mit der klassischen Laminattheorie die tatsächlich vorliegende heterogene, anisotrope Materialstruktur weitgehend unberücksichtigt, so daß hiermit nur globale Aussagen über das Verbundverhalten möglich sind. Faserverbundstrukturen, die nach der dünnwandigen Theorie ausgelegt werden, sind deshalb aufgrund der überhöhten Sicherheitsfaktoren häufig überdimensioniert, und ihr Versagensverhalten bleibt im allgemeinen weitgehend ungeklärt.

Mit Hilfe der im Vortrag vorgestellten Berechnungskonzepte und Dimensionierungsstrategien zur beanspruchungsgerechten Verbundgestaltung mehrschichtiger anisotroper Zylinderstrukturen mit Anschlüssen wird die optimale Ausnutzung des Leichtbaupotentials faserverstärkter Kunststoffe am Beispiel von Leichtbau-Hochdruckbehältern aufgezeigt; insbesondere sollen die werkstoffspezifischen Einflußvariablen bewertet werden, um dadurch eine Optimierung des Schichtaufbaus und der Faserlagen zu erzielen.

Room temperature and high temperature strength of unidirectional carbon fibre reinforced carbon

G. Lüdenbach, P.W.M. Peters

DLR, German Aerospace Research Establishment
Institute of Materials Research, Linder Höhe, D-51147 Köln, Germany

Carbon fibre reinforced carbon is a unique material in a sense that its strength generally increases at increasing test temperature (if oxidation is prevented) [1]. Because of the weak carbon matrix carbon/carbon is usually produced with the fibre reinforcement in two or more different directions. Shrinkage of the matrix during carbonization causes a complex state of damage which in addition to the multidirectional reinforcement of the material makes it impossible to separate the influence of the damage state from the properties of fibre, matrix and interface on the strength of carbon/carbon. For this reason a fundamental study was performed to investigate the strength of unidirectional reinforced carbon/carbon as influenced by fibre, matrix and interface properties. Small unidirectional specimens were produced by impregnation of 12k single fibre bundles with phenolic resin (CFRP-bundles) and a following carbonization resulting in CFRC-bundles. The influence of processing on the strength was investigated by comparing loose bundle strength with the strength of the CFRP- and CFRC-bundles, making use of HT-fibre reinforcement (Akzo-HTA) as well as a HM-fibre reinforcement (Toray-M40J) and a phenolic resin system. First results indicate that shrinkage processes during carbonization cause the carbon fibre to be deteriorated leading to a strength falling below the strength of the loose bundles [2]. In the present work the influence of a different heat treatment (up to 2100°C) after carbonization at 920°C on the composite strength is investigated at room temperature and elevated temperatures. Both different fibre reinforced materials show a similar behavior concerning the strength influenced by the heat treatment temperature. As an example Figure 1 shows that the strength of HM-fibre reinforced CFRC-bundles drops to a minimum value after a carbonization temperature of 920°C and a following heat treatment at 1000°C. Higher heat treatment temperatures at 1400°C and 2100°C lead to higher tensile strengths. For the calculation of the composite strength only the cross-sectional area of the fibres were used. At present it cannot be concluded whether the improvement comes from a recovering fibre (a possible healing of defects) or improved matrix or interface properties. The strength of the CFRC-bundles were also determined at elevated temperatures up to the different heat treatment temperatures. These tensile tests were performed in a vacuum chamber with the fibre bundle heated directly through resistance-heating. In the gripping area the specimen is additionally heated with the aid of small heating elements to compensate for the heat flowing into the grips. Results in figure 2 indicate that as expected the strength of the CFRC-bundles increase at increasing test temperature. Ongoing research concentrates on the explanation of this behavior, which certainly is (partly) based on improved matrix or interface properties which can be deduced from increased interlaminar shear strength at elevated temperatures as found in [3]

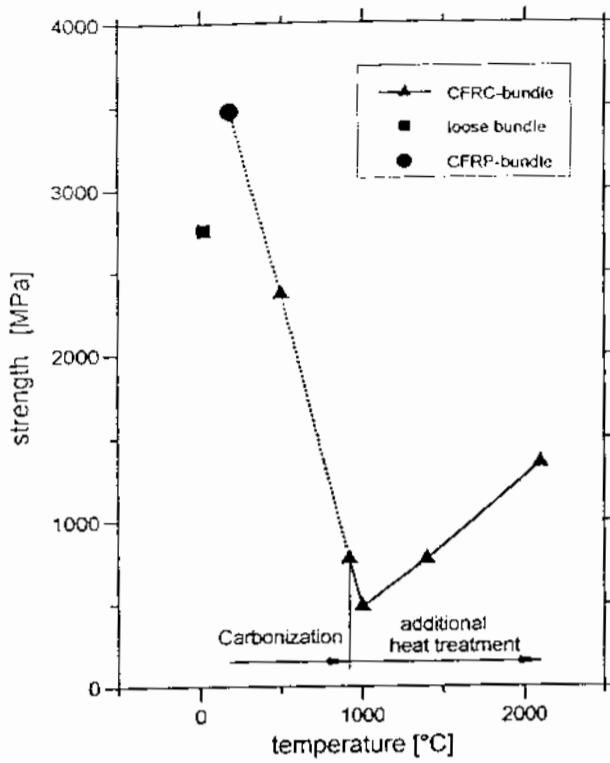
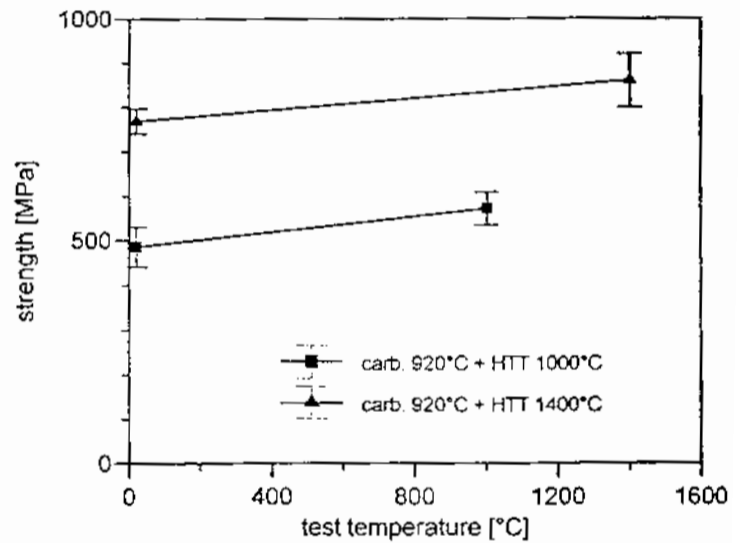


Fig. 1: HM-bundle-strength as a function of processing- and heat treatment temperature

Fig. 2: HM-bundle-strength as a function of test temperature



- [1] Dietrich G., Meistring R.
Entwicklung und Charakterisierung von oxidationsgeschütztem CFC.
In 2. BMFT-Symposium "Materialforschung", Dresden, 26.-29. August 1991
- [2] Peters P.W.M., G. Lüdenbach, R. Pleger, R. Weiß
Influence of Matrix and Interface on the Mechanical Properties of
Unidirectional Carbon/Carbon Composites. In J. Europ. Ceram. Soc., 13
(1994) 561-569
- [3] Thielicke B., U. Soltész, H. Unnasch
The Interlaminar Shear Strength of a Laminated Carbon/Carbon Composite
at Temperatures up to 1800°C. In Proc. ECCM CTS 2, Hamburg, 13-15
September 1994

Untersuchung der Rißausbreitung im Interface beim Single Fiber Pull-out Test

C. Marotzke
Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung, Berlin

Frühere Finite Element Analysen von Single Fiber Pull-out Versuchen zeigen starke Spannungskonzentrationen in der Grenzfläche am Fasereintritt sowie am Faserende. Im Bereich des Fasereintritts sind den Schubspannungen hohe radiale Zugspannungen überlagert. Die Entstehung eines Mode I dominierten Grenzflchenrisses am Fasereintritt ist daher wahrscheinlich.

In dieser Arbeit wird ein sich zunächst vom Fasereintritt her ausbreitenden Grenzflchenriss untersucht und es wird die Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit von der Rißlänge bei konstanter äußerer Last berechnet. Es zeigt sich, daß die vor Rientstehung überwiegenden radialen Spannungen infolge der Rientstehung stark abfallen, während gleichzeitig die Schubspannungen ansteigen. Dies führt zu einem Umschalten des dominierenden Versagensmode von Mode I zu Mode II. Diese Veränderung des Spannungszustandes führt zu einer lokalen Abnahme der Energiefreisetzungsrates in der Nähe der Matrixoberfläche.

In makroskopischen Versuchen wurde ab einer Rißtiefe von einigen Faserdurchmessern ein Ablösen der Faserendfläche mit anschließender Rißausbreitung vom Faserende her beobachtet. Dieses Phänomen wird ebenfalls numerisch simuliert und die Energiefreisetzungsrates für beide Risse berechnet. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, daß die Spannungsverteilung in der Grenzfläche stark vom Steifigkeitsverhältnis sowie vom Verhältnis der Einbettiefe zum Faserdurchmesser abhängen. Um den Einfluß dieser Parameter auf die Rißausbreitung zu untersuchen, werden verschiedene Systeme mit polymerer und keramischer Matrix betrachtet.

Schließlich werden experimentelle Ergebnisse von Pull-out Versuchen mit transparenter Matrix gezeigt, bei denen ein über längere Zeit stabiles Rißwachstum auftritt. Aus diesen Versuchen wird die Energiefreisetzungsrates abgeschätzt.

Beschreibung des Verhaltens halbunendlicher sowie gekrümmter Riß in der Elastostatik: Ein Vergleich

von

Wolfgang H. Müller und G. Kemmer

Universität Paderborn
Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10
Pohlweg 47-49
33098 Paderborn

Es werden zwei mathematische Methoden miteinander verglichen, die es erlauben, das Spannungsfeld um Risse zu berechnen, die sich in der Umgebung von thermisch und/oder elastisch fehlgepaßten Einschlüssen befinden. Der Riß kann dabei sowohl beliebig gekrümmt als auch beliebig lang sein. Insbesondere lassen sich auch halbunendliche Risse studieren: Ein solches Modell ist vorteilhaft, wenn zahlreiche andere Längenparameter wie z.B. Teilchengröße oder Teilchenabstand im Problem auftreten, so daß jeder weitere Parameter (hier die Rißlänge) die Fallstudie unnötig kompliziert.

Das erste Verfahren beruht auf der Integralgleichungsmethode nach Erdogan (1973). Hier werden die Risse durch (unbekannte) Versetzungsverteilungen modelliert, die gewissen Integralgleichungssystemen vom Cauchytyp genügen müssen, was statisches Gleichgewicht entlang der Rißflanken garantiert. Die Integralgleichungssysteme sind i.a. nur numerisch lösbar, wobei sich verschiedene, jeweils auf das Rißproblem zurechtgeschnittene Verfahren anbieten (etwa: Gauss-Lobattomethode für nah am Teilchen liegende Rißspitzen oder Gauss-Laguerremethode für halbunendliche Risse). Für endlich lange Risse ist es darüber hinaus nötig, sog. Abschlußbedingungen zu formulieren, die widerspiegeln, daß der Riß in seinen Spitzen zusammenfällt.

Das zweite Verfahren basiert auf der Methode der komplexen Potentiale nach Muskhelishvili-Kolosov, die bereits von mehreren Autoren erfolgreich auf komplizierte, insbesondere auch krummlinige Rißprobleme angewendet wurde, etwa von Gross, Bettin und Dreilich (1985-1988), Chao und Shen (1987, 1994) oder von Meiners (1994). Dabei werden Integralgleichungssysteme für die Verschiebung oder auch für die komplexen Potentiale selbst hergeleitet und i.a. numerisch gelöst. Die weiter oben beim Verfahren nach Erdogan gemachten Bemerkungen hinsichtlich der Lösungsverfahren sowie der Abschlußbedingungen gelten analog.

Anhand nichttrivialer Beispiele wird gezeigt, daß letztlich beide Verfahren zueinander äquivalent sind. Im Einzelfall ist jedoch mal die eine und mal die andere Methode rechentechnisch günstiger. Insbesondere werden die folgenden Problem untersucht:

- (i) kreisbogenförmiger Riß um und an einem kreisförmigen Einschuß;
- (ii) halbunendlicher, gerader Riß vor einem Einschuß
- (iii) parabelförmiger Riß vor einem Einschuß

Zur Modellierung des nichtlinear-inelastischen Verhaltens zugbelasteter Faserverbundwerkstoffe

J. Pleitner, H. Kossira und V. Trappe

Institut für Flugzeugbau und Leichtbau
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19, 38106 Braunschweig

ABSTRACT

Setzt man Faserverbundwerkstoffe einer genügend großen Zugschwellbelastung aus, bilden sich im Werkstoff Mikrorisse. Faserverbundwerkstoffe mit Mikrorissen verhalten sich nichtlinear-inelastisch. Durch Relativverschiebungen zwischen Fasern und Matrix in der Umgebung der Risse, Rißfortschritt, sowie viskose Dämpfung im Matrixwerkstoff wird Energie dissipiert. Das momentane Materialverhalten ist vom aktuellen Wert und der gesamten Vorgeschichte der meßbaren Zustandsgrößen Spannung, Verzerrung, Temperatur abhängig. Der Werkstoff besitzt ein Gedächtnis. Das Materialgedächtnis läßt sich physikalisch gleichwertig mit Gedächtnisfunktionalen oder aber mit inneren Variablen und deren Evolutionsgleichungen erfassen. Die Werkstoffmodellierung mit inneren Variablen bietet jedoch deutliche rechentechnische Vorteile.

In diesem Beitrag wird ein phänomenologisches, parametrisches Modell mit inneren Variablen für zugbelastete Faserverbund-Flachproben vorgestellt, das das in Ermüdungsversuchen gemessene nichtlinear-inelastische Verhalten berücksichtigt. Das Werkstoffmodell eignet sich zur Beschreibung beliebiger Zeitverläufe der Beanspruchung. Im Gegensatz zu anderen Modellen sind die Parameter dieses Modells sowohl frequenz- als auch verformungsunabhängig. Die Modellparameter und das Modellverhalten lassen Rückschlüsse auf das mikromechanische Tragverhalten im Verbundwerkstoff zu. Das entwickelte phänomenologische Modell ist in Verbindung mit einer geeigneten Versuchsdurchführung in der Lage, Ermüdungsvorgänge in Faserverbundwerkstoffen zu identifizieren und zu quantifizieren. Dazu wird in vorgegebenen Lastspielzahlintervallen der Ermüdungsbeanspruchung das rheologische Verhalten der Proben bei Belastung über vier Dehnungsamplituden und dreieinhalb Frequenzdekaden aufgezeichnet. Die auf Basis dieser Meßergebnisse identifizierten Modellparameter charakterisieren den Schädigungszustand der Probe. Die Änderung der Modellparameter in Abhängigkeit von der Lastspielzahl ermöglicht Aussagen über die Schadensentwicklung. So verschieben sich zum Beispiel mit zunehmender Rißdichte die Anteile der durch Reibung bzw. viskoelastische Vorgänge dissipierten Energie zugunsten der Reibungsanteile. Derartige Effekte geben die Modellparameter wieder.

Berechnung des Materialverhaltens von Faserkeramik mit Hilfe eines Schädigungsmodells

R. Schäuble, H. Maschke

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik

06120 Halle

Faserkeramiken (Keramikmatrix-Faserverbundwerkstoffe) stellen auf Grund ihrer Temperatur- und Thermoschockbeständigkeit, ihrer Abriebfestigkeit, ihrer chemischen Beständigkeit sowie auch wegen ihrer breiten Rohstoffbasis und der unproblematischen Entsorgung eine attraktive Alternative der heute noch dominierenden Metalle für einige innovative Anwendungen dar. Anders als konventionelle Konstruktionskeramiken zeigen sie ein ausgeprägtes pseudoplastisches Materialverhalten und haben damit das Potential, das Niveau der Bruchzähigkeit bzw. Bruchdehnung von Metallen zu erreichen. Diese Pseudoplastizität wird durch eine spezifische Schädigung hervorgerufen, die in dieser Form bei keiner anderen Werkstoffklasse beobachtet wird.

Die Entwicklung einer Schädigungsmechanik von Keramikmatrix-Faserverbunden ist deshalb von unmittelbarer Bedeutung für das Verständnis des Materialverhaltens. Damit ein solches Materialmodell das phänomenologische Materialverhalten ursächlich und hinreichend genau beschreiben kann, muß es das wesentliche der Mikrovorgänge erfassen und die Zusammenhänge zwischen ihnen in sachgerechter Weise herstellen. Die Schädigung spröder inhomogener Materialien wird im wesentlichen durch die Bildung von Mikrorißfeldern bewirkt, die einerseits die Materialsteifigkeit reduzieren, andererseits die Voraussetzung für die Betätigung verschiedener dissipativer Prozesse liefern. Die Zusammenhänge zwischen den - durch eine Reihe von Einflußgrößen zusätzlich determinierten - Einzelereignissen werden durch die elastische Wechselwirkung vermittelt.

In dem Vortrag wird ein Schädigungsmodell vorgestellt, in dessen Rahmen sowohl die Bedingungen für die Rißbildung als auch die elastische Wechselwirkung mit Hilfe der Randelementemethode (BEM) berechnet werden. Die benötigten Daten für die Festlegung der Modell-Parameter werden durch Mikrostrukturuntersuchungen, Mikroverformungsexperimente sowie makroskopische Materialcharakterisierung gewonnen. Erste Rechnungen ergaben die für spröde, heterogene Materialien typischen Schädigungsmuster und haben den Nachweis geliefert, daß die Schädigung in signifikanter, werkstoffmechanisch nachvollziehbarer Weise auf Parametervariationen reagiert.

Einsatz von numerischen Methoden bei der Entwicklung von multifunktionalen Werkstoffen

M. Schlecht, K. Schulte

TU Hamburg-Harburg, AB Kunststoffe/Verbundwerkstoffe, 21071 Hamburg

Multifunktionale Werkstoffe

Die Integration von immer mehr Funktionen in eine Bauteilstruktur führt zu "Multifunktionalen Werkstoffen", die ihre Eigenschaften aktiv veränderten Umgebungsbedingungen anpassen können. Für die Entwicklung solcher Strukturen sind Faserverbundwerkstoffe besonders geeignet, da man den Werkstoff umfangreich in seinen Eigenschaften beeinflussen kann. In diesem Projekt wird untersucht, inwieweit aktive Verformungen von unsymmetrischen Laminaten in Verbindung mit Formgedächtnislegierungen (FGL) möglich sind, wobei die Modellierung der Struktur einen hohen Stellenwert hat.

Berechnung der Raumtemperaturgeometrie von unsymmetrischen Laminaten

Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei faserverstärkten Kunststoffen in Faserrichtung und quer dazu, entstehen bei der Abkühlung von der Härtetemperatur auf Raumtemperatur Thermoeigenspannungen, die im Falle von unsymmetrischen Laminaten zu einer out-of-plane Verformung des Laminats führen. Dabei ist von besonderem Interesse, daß sich die Lamine abhängig von der Geometrie (Dicke, Breite, Länge) sowie von dem absoluten Temperaturunterschied nicht immer entsprechend der klassischen Laminattheorie verhalten. Statt einer Sattelform tritt bei Raumtemperatur entweder eine zylindrische Form auf oder die Lamine verfügen über einen Umklappeffekt und haben zwei stabile zylindrische Formen. Für die Berechnung der Raumtemperaturgeometrie stehen in erster Linie die Methode der Finiten Elemente sowie eine erweiterte klassische Laminattheorie [1] zur Verfügung.

Die Verwendung der erweiterten klassischen Laminattheorie setzt voraus, daß man das grundsätzliche Verformungsverhalten eines Laminats kennt und eine Näherungsgleichung für die Beschreibung der möglichen Geometrien vorhanden ist. Unter dieser Voraussetzung kann berechnet werden, ob das Laminat, z.B. abhängig von der Dicke, die zylindrische Form oder die Sattelform aufweist.

Im Gegensatz dazu eignet sich die Methode der Finiten Elemente für die Berechnung der möglichen Geometrien, ohne vorher das wirkliche Verhalten des Laminats zu kennen, sofern die temperaturabhängigen mechanischen Kennwerte bekannt sind.

Modellierung des Formgedächtniseffektes (FGE)

Für die aktive Verformung des Laminats werden FGL Drähte aus NiTi verwendet. Die Berechnung des FGE erfolgt mit einem eindimensionalen Modell [2], daß im weiteren Verlauf der Arbeit für die Berechnung des Verformungsverhaltens verwendet werden soll.

Literatur

- [1] M.W. Hyer, Journal of Composite Materials, 15 (1981), 296 - 310
- [2] L.C. Brinson, Journal of Intelligent Materials Systems and Structures, Vol. 4 - April 1993, 229-242

ENTWICKLUNG EINES GLOBAL-LOKALEN BERECHNUNGSKONZEPTS ZUR ERMITTLUNG DES STABILITÄTS- UND SCHÄDIGUNGS- VERHALTENS VON VERSTEIFTEN COMPOSITE-BAUTEILEN

I.C. SKRNA-JAKL, M.A. STIFTINGER und F.G. RAMMERSTORFER

Institut für Leichtbau und Flugzeugbau, Technische Universität Wien, Österreich

Der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen in versteiften Strukturen, die häufig auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt Anwendung finden, erfordert eine genaue Kenntnis des mechanischen Verhaltens des Bauteils. Daher müssen sowohl globale Effekte (z.B. große Deformationen, Stabilitätsverhalten) als auch lokale Effekte (z.B. interlaminare Spannungen, Faser-Matrix Bruch, Delaminationsbeginn im Steifenbereich und an freien Rändern) berücksichtigt werden.

Das folgende global-lokale Berechnungskonzept stellt eine Methode dar, bei der beide Effekte berücksichtigt werden. Zunächst wird in einer geometrisch nichtlinearen FE-Analyse das Deformations- und Stabilitätsverhalten untersucht. In einer nachfolgenden linearen lokalen FE-Analyse werden, unter Verwendung der Ergebnisse der globalen Analyse, Randeffekte sowie das Schädigungsverhalten im Steifenbereich für ausgewählte Zustände im Vor- bzw. Nachbeulbereich analysiert. Am Beispiel eines imperfekten, versteiften, axial gedrückten, Kastenträgers aus CFK (Bild 1), der den Mittelteil eines Höhenleitwerks repräsentiert, wird das oben beschriebene Berechnungskonzept vorgestellt.

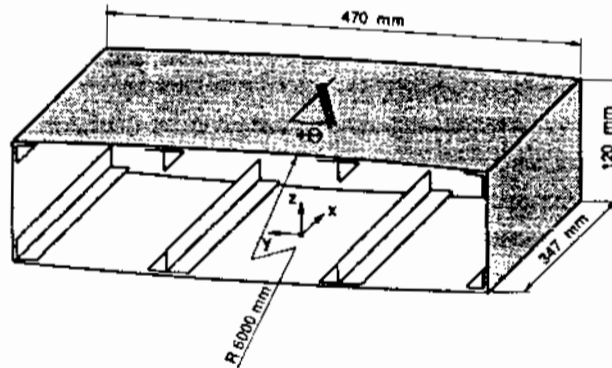


Bild 1. Kastenträger aus CFK

Die Ergebnisse der globalen Analyse zeigen ein stark nichtlineares Verhalten der Struktur, das jedoch vorerst aus der axialen Last-Verschiebungskurve kaum erkennbar ist. Erst die Last-Verschiebungskurve des Mittelpunktes des mittleren Hautfeldes in z-Richtung zeigt deutlich das Stabilitätsverhalten des Bauteils. Für die Berechnung der lokalen Effekte im Steifenbereich werden verallgemeinerte ebene Verzerrungszustände angenommen. Die verwendeten FE-Modelle repräsentieren dünne Scheiben des Steifenbereichs, an deren Schnittpunkten die aus der nichtlinearen globalen Analyse erhaltenen Deformationen aufgebracht werden. Die Ergebnisse zeigen deutlich, in welcher Schicht des Laminataufbaus zuerst mit Delamination bzw. Faser-Matrixbruch zu rechnen ist.

Korrelation des Ansatzes der fiktiven Rißbildung mit der diskreten Bruchmechanik

S. Weihe

Universität Stuttgart, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und
Raumfahrtkonstruktionen, Pfaffenwaldring 27, 70550 Stuttgart

Kurzfassung

Verbundwerkstoffe zeigen ein sehr komplexes Schädigungsverhalten. Die makroskopische Materialantwort ist dabei durch die mikromechanischen Versagensmechanismen und deren Interaktion geprägt. Riprozesse sind die dominierenden Schädigungsprozesse in Verbundwerkstoffen mit einer spröden Matrix. Aufgrund der feingliedrigen Struktur dieser Materialien sind numerische Simulationen auf der Basis von bruchmechanischen Kriterien mit einem hohen Aufwand verbunden.

Die Beschreibung von Riprozessen mittels fiktiver Risse stellt eine zur diskreten Bruchmechanik alternative Beschreibung dar. Die topologische Veränderung der Struktur wird durch eine entsprechende Materialformulierung abgebildet, was u.a. die Berechnung geometrisch komplexer Strukturen stark vereinfacht.

Die Methodik läßt sich für eine diskrete Grenzfläche in Verbindung mit 'Interface'-Beschreibungen effizient einsetzen. Die Verallgemeinerung des Ansatzes für die Rißbildung in einen homogenen Werkstoff ist bisher nicht eindeutig gelungen. Durch die Einführung eines a priori Kriteriums zur Bestimmung der kritischen Ririchtung gelingt es, ein Versagenskriterium zu formulieren, das die bisherigen Ansätze als physikalisch relevante Sonderfälle des so verallgemeinerten Modells identifiziert.

Dieses verallgemeinerte Versagenskriterium erlaubt eine direkte Korrelation der Ansätze der fiktiven Rißbildung und dem Griffith-Kriterium der Bruchmechanik. Es zeigt sich, daß der entscheidende Festigkeitsparameter im Falle des Griffith-Kriterium als eine von der Geometrie des Risses abhängige Größe interpretiert werden muß, während er im Falle der fiktiven Rißbildung eine von der Riform unabhängige Konstante darstellt. Die Einsatzbereiche beider Modellierungsweisen wird so im Sinne des 'Size-Effect' deutlich.

Reaktionskinetik im Faser/Matrix-Grenzbereich

J. Woltersdorf, R. Schneider

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

Zur Optimierung von Verbundeigenschaften müssen Struktur und chemische Zusammensetzung der Faser/Matrix-Grenzbereiche möglichst bis zu atomaren Abmessungen charakterisiert und der Zusammenhang mit den jeweiligen makroskopischen Eigenschaften hergestellt werden.

Außerdem interessiert die zur Ausbildung der oftmals nur wenige Nanometer dicken Schichten führende Reaktionskinetik und ihre Abhängigkeit von Prozeßparametern und Belastungsbedingungen. Dies gilt naturgemäß insbesondere für Hochtemperatur-Kompositwerkstoffe wie C/SiC und SiC/SiC.

Mikrochemie und Reaktionskinetik solcher Systeme wurden unter Nutzung eines dedizierten Rastertransmissionselektronenmikroskopes (STEM) vom Typ Vacuum Generators HB 501 UX untersucht, und zwar mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDXS) und Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS), wobei verschiedene methodische Erweiterungen erforderlich waren. Neben einem qualitativen und quantitativen Elementnachweis im Nanometerbereich gestattet EELS zusätzlich Aussagen zur chemischen Bindung der im untersuchten Volumen vorliegenden Elemente. Dies ist durch die Untersuchung kantennaher Feinstrukturen (ELNES - Energy Loss Near Edge Structure) möglich, welche bei hinreichend guter Energieauflösung (1 eV und kleiner) an der jeweiligen Ionisationskante oberhalb des Schwellwertes in einem Bereich von etwa 30 eV zu beobachten sind. Die ELNES ist auf die Anregung von Elektronen innerer Schalen in unbesetzte Zustände oberhalb der Fermi-Energie zurückzuführen. Die Gestalt, die Energielage und die Signalintensität von ELNES-Merkmalen werden sowohl durch die chemische Bindung als auch durch die Koordination und die Abstände zu nächsten Nachbarn bestimmt. Außerdem tritt in Abhängigkeit von der Elektronegativitätsdifferenz der Bindungspartner eine chemische Verschiebung des Schwellwertes der Ionisationsenergie von einigen eV auf, die gleichfalls Aussagen zur Bindung erlaubt.

Es werden Ergebnisse von ELNES-Analysen an Grenzschichten in faserverstärkten Verbundwerkstoffen vorgestellt. Eine Identifizierung der chemischen Bindung wurde durch den Vergleich mit ELNES-Strukturen von Standardproben durchgeführt. Speziell wird in diesem Zusammenhang auf Verbindungen des Siliciums mit Kohlenstoff und Sauerstoff eingegangen (z.B. SiC, SiO₂ und SiO_xC_y).

Literatur:

- R. Schneider, J. Woltersdorf, *The Microchemistry of Interfaces in Fibre-Reinforced Ceramics and Glasses*, Proc. 5th Conf. Appl. Surf. Interf. Anal. (ECASIA), 1993, Catania, *Surface and Interface Analysis (SIA)*, 1994, in print
- R. Schneider, J. Woltersdorf, E. Pippel, A. Hähnel, A. Röder, F. Syrowatka, *Investigations of the Microchemistry of Interlayers in Composites*, *Fres. Z. Analyt. Chemie*, **349**, 179 (1994)
- A. Hähnel, E. Pippel, J. Woltersdorf, *Nanostructure of Interlayers in Different Fibre/Matrix Composites and their Effect on Mechanical Properties*, *J. Microscopy*, subm. May, 1994
- R. Schneider, J. Woltersdorf, J. Neumann-Zdrálek, A. Röder, *Chemical-bond Mapping of Oxidic Bound Silicon Using the Si-L₂₃ ELNES*, *Ultramicroscopy*, subm. June, 1994

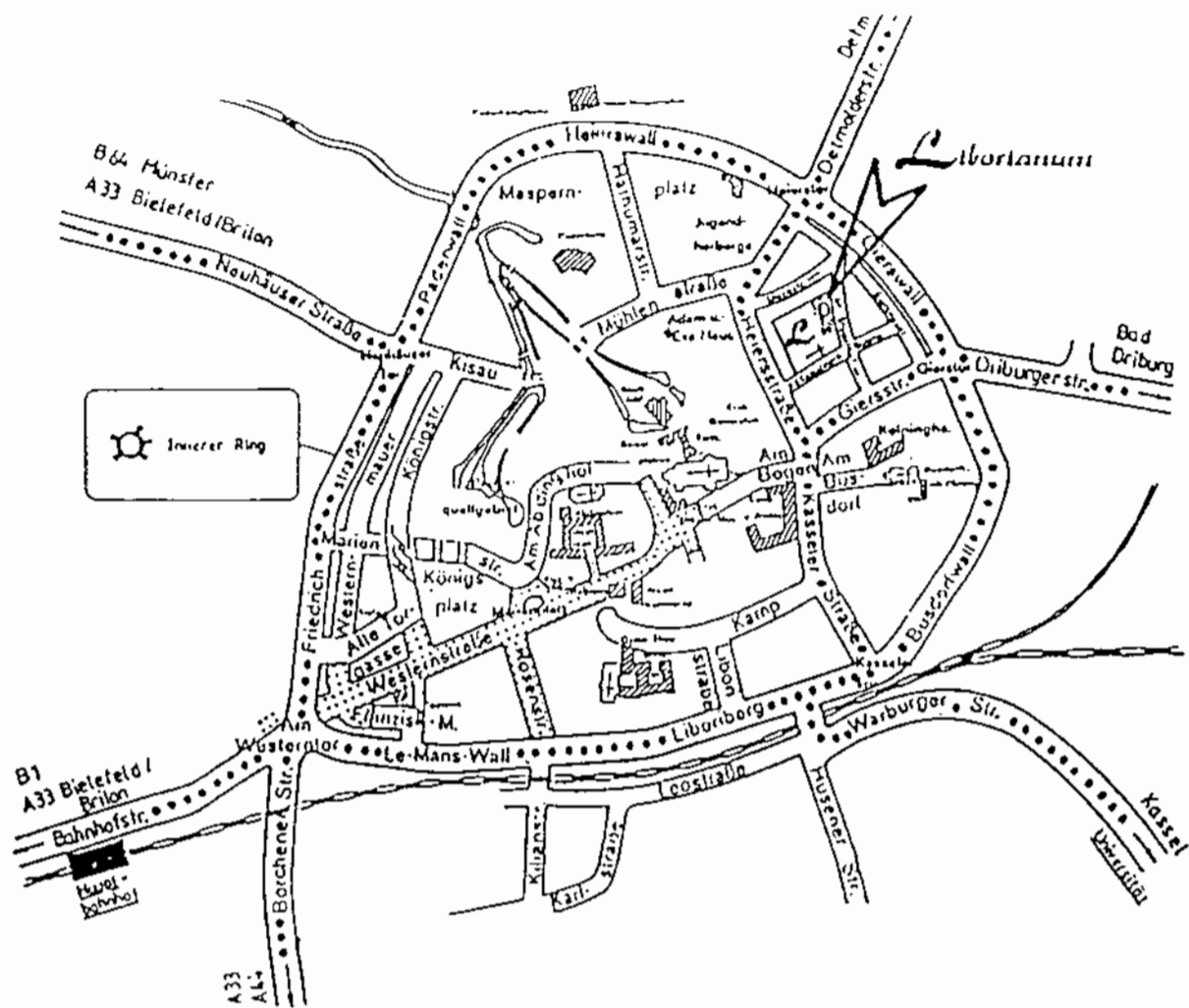
TEILNEHMERLISTE

BECKER	Wilfried	Dr.-Ing. Dornier GmbH, Deutsche Aerospace, Abteilung RST 43 88039 Friedrichshafen
DONG	Ming	Dr.-Ing. Institut für Werkstoffwissenschaft Max-Planck-Institut für Metallforschung Seestraße 92 70174 Stuttgart
EGGERS	Hans	Dr.-Ing. Institut für Strukturmechanik DLR Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
FERBER	Ferdinand	Dr.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
FISCHER	Karl-Friedrich	Prof. Dr.-Ing. habil. Technische Mechanik Hochschule für Technik und Wirtschaft 08001 Zwickau
HÄBERLE	Jürgen	Dr.-Ing. Institut für Werkstofftechnik Universität-GH-Kassel Mönchebergstraße 3 34125 Kassel
HANSELKA	Holger	Dr.-Ing. Institut für Strukturmechanik DLR Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
HAUCK	Torsten	Dipl.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn

HERRMANN	Axel S.	Dr.-Ing. Institut für Strukturmechanik DLR Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig
HERRMANN	Klaus P.	Prof. Dr. rer.nat. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
HOFFMANN	Uwe	Dr.-Ing. Ministerium für Finanzen und Energie Abt. Reaktorsicherheit Postfach 2009 24109 Kiel
ILLING	Karsten	Dipl. math. tech. Institut für Technische Mechanik/ Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76131 Karlsruhe
KROLL	Lothar	Dr.-Ing. Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik Technische Universität Dresden Dürerstraße 26 01062 Dresden
LÜDENBACH	Gereon	Institut für Werkstoffforschung DLR Linder Höhe 51140 Köln
MAROTZKE	Christian	Dr.-Ing. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Lab. 3.23 Unter den Eichen 87 12200 Berlin
MASCHKE	Hans-Günter	Dr. rer. nat. Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Heideallee 19 06120 Halle

MEINERS	Wolfgang	Dr.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
MÜLLER	Wolfgang H.	Dr. rer. nat. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
NOE	Alfons	Dr.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
PETERS	P.W.M.	Dr.-Ing. Institut für Werkstofforschung DLR Linder Höhe 51140 Köln
PLEITNER	Jürgen	Dipl.-Ing. Institut für Flugzeugbau und Leichtbau TU Braunschweig Langer Kamp 19 38106 Braunschweig
POTTHAST	Bernd	Dipl.-math. Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn
PRINZ	Bernhard	Dr.-Ing. Raingasse 37 74542 Braunsbach
SCHÄUBLE	Ralf	Dipl.-Ing. Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Heideallee 19 06120 Halle

SCHNACK	Eckart	Prof. Dr.-Ing. Institut für Mechanik und Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe
SCHULTE	Karl	Prof. Dr.-Ing. Abt. Kunststoffe/Verbundwerkstoffe TU Hamburg-Harburg Denickestraße 15 21071 Hamburg
SKRNA-JAKL	Isabella	Dipl.-Ing. Institut für Leichtbau und Flugzeugbau TU Wien Gußhausstraße 27-29/317 A-1040 Wien
STALLA	Donata	Dipl.-Ing. Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik Technische Universität Dresden Dürerstraße 26 01062 Dresden
TRAPPE	Volker	Dipl.-Phys. Institut für Flugzeugbau und Leichtbau TU Braunschweig Langer Kamp 19 38106 Braunschweig
TROSCHITZ	Ralf	Dipl.-Ing. Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik Technische Universität Dresden Dürerstraße 26 01062 Dresden
WEIHE	Stefan	Dipl.-Ing. Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen Pfaffenwaldring 27 70550 Stuttgart
WOLTERS DORF	Jörg	Dr. rer. nat. habil. Max-Planck-Institut für Mikrostruktur- physik Halle Weinberg 2 06120 Halle



CITY CENTER OF PADERBORN

KONTAKTADRESSE

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

Tel. 05251/60-2284
 Fax 05251/60-3483

TAGUNGSADRESSE

Liboratorium Paderborn
 An den Kapuzinern 5-7
 33098 Paderborn
 Tel. 05251/1213