TECHNISCHE MECHANIK 9 (1988) Heft 4
Manuskripteingang: 29. 06. 1988

Ein stochastisches Modell zum nichtlinearen mechanischen Verhalten faserverstärkter Verbundwerkstoffe

P. Will, W. Totzauer, B. Michel

1. Einleitung

Das zunehmend wachsende Interesse an der technischen Anwendung von Kompositen und damit verbunden an Materialkennwerten derartiger Werkstoffe ist auf ihre hohe Steifigkeit, die ausgezeichnete Festigkeit sowie hohe Temperatur- und Koorosionsbeständigkeiten bei gleichzeitig geringer Masse zurückzuführen. Der effektive Einsatz faserverstärkter Verbunde in Bauteilen, die bis an ihre vorgesehenen Grenzen belastet werden, erfordert bereits in der Entwurfsphase die Einbeziehung von Festigkeitskriterien. Es genügt nicht, sich bei der Entwicklung technischer Konstruktionen aus Faserverbunden allein auf elastische Materialparameter zu stützen, da die entsprechenden Werkstoffe häufig gerade im vorgesehenen Einsatzbereich ein nichtlineares Materialverhalten zeigen, dessen realistische Modellierung von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit der Bauteile ist. Ein wesentlicher Vorteil faserverstärkter Komposite besteht in der erhöhten Bruchzähigkeit, welche derartige Materialien zeigen. Die Überbrückung von Bruchflächen durch die in den Werkstoff eingebundenen Fasern führt dazu, daß die Festigkeitsreserven des Materials in technisch hochentwickelten Konstruktionen auch bei möglicherweise vorhandenen Defekten weitgehend ausgenutzt werden können.

2. Schädigung von Faserverbunden

In Ermangelung allgemeiner Konzepte basiert die Festigkeitsbewertung von Kompositwerkstoffen häufig auf der linear-elastischen Bruchmechanik. Trotz der strukturellen Heterogenität dieser Materialien wird i. a. von einem homogenen, linear-elastischen Medium ausgegangen. Die Modellierung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen setzt üblicherweise ideale Komposite voraus. Derartige Modellmaterialien sind gekennzeichnet durch:

- parallele, unendlich lange Fasern
- ideale Bindung zwischen Matrix und Faser
- Fehlen mikroskopischer Schädigungen

Unterschiede zwischen theoretischen Simulationen und experimentellen Resultaten sind häufig eine Folge dieser Idealisierungen, auf die wegen des Fehlens umfassenderer Konzepte meistens nicht verzichtet werden kann. Im Gegensatz zum Kontinuumsmodell wird jedoch die zur lokalen Schädigung eines Volumenelements aufzuwendende Energie keinesfalls nur durch die Erzeugung neuer freier Oberflächen infolge Materialtrennung bestimmt, sondern sie beinhaltet auch die Arbeit für zusätzliche, energiedissipative Mechanismen im Bereich um den Materialfehler. Als Ursache für das nichtlineare Spannungs- – Verformungsverhalten von Kompositen können mikroskopische Defekte angenommen werden, die sich gleichmäßig über das Material verteilen. Dazu gehören:

- Faseranrisse
- Faserbrüche
- Matrixanrisse
- Delamination von Fasern
- Ausziehen von Fasern aus der Matrix

Mit in situ Untersuchungen [1] an faserverstärkten Epoxidharzen konnten vier unterschiedliche Stadien der Bauteilschädigung mit steigender Belastung nachgewiesen werden. Dem Reißen einzelner Fasern folgt, ausgehend von der Front gebrochener Fasern, eine plastische Deformation im Werkstoff, die sich an den Faserflanken fortsetzt und schließlich zum Bruch des umgebenden Matrixmaterials führt. Kurz vor dem Versagen der Probe ist, ausgehend von den lokalen Schädigungszonen, eine teilweise Delamination der verstärkenden Fasern zu beobachten. Eine strukturorientierte Beschreibung faserverstärkter Verbunde, die der Realität entspricht, führt bei praktischer Anwendung infolge der Vielzahl von Mechanismen zur Werkstoffschädigung schnell ins Uferlose.

Zusätzlich wirken vergleichsweise kurzreichweitige Mechanismen, die Spannungskonzentrationen an der Spitze von Rissen abbauen. Dazu gehören Rißverzweigungen sowie das Abbiegen der Rißfront in der Nähe elastischer Einschlüsse, wie sie verstärkende Fasern darstellen [2], [3]. So wird z. B. in Faserverbunden ein Rißstop durch vorgegebene schwache Bindungen zwischen Faser und Matrix im Rißweg erreicht, die Zugspannungen parallel zum Riß hervorrufen und ein Abbiegen des Risses in die Grenzschicht zwischen beiden Materialkomponenten bewirken [4]. In der engeren Umgebung der Rißfront existiert in Analogie zur elastisch-plastischen Bruchmechanik ein reduziertes Spannungsfeld, das nichtlineares Materialverhalten zeigt.

3. Statistik lokaler Schädigungen

Reale Werkstoffe unterscheiden sich in ihrem Aufbau häufig von idealisierten Modellmaterialien. Die mikromechanischen Parameter weichen nach mehr oder weniger bekannten statistischen Gesetzmäßigkeiten von denen der Idealstruktur ab. In diesem Zusammenhang erscheint es notwendig, eine statistische Komponente strukturbezogener Festigkeitsmodelle in Betracht zu ziehen. Mit wachsender Belastung kumulieren stochastisch verteilte Schädigungen des Werkstoffes. Diese Prozesse führen zu einer effektiven Verringerung tragender Querschnitte in Bauteilen aus faserverstärkten Verbunden.

Am Beispiel eines faserverstärkten 3-Punkt-Biegebalkens

der Höhe h, der Dicke b und des Auflagerabstandes l sollen die verbal angedeuteten Zusammenhänge näher erläutert werden; analoge Überlegungen treffen auch für Zugproben zu. Die Zugspannung σ_z parallel zu den verstärkenden Fasern in der Linie x = 0 der Lasteinleitung berechnet sich bei der Last P nach den bekannten Beziehungen der linearen Biegetheorie aus:

$$\sigma_z = My/I \; ; \qquad -h/2 \leqslant y \leqslant h/2 \tag{1}$$

Der Nullpunkt der Koordinate y liegt auf der neutralen Faser des Balkens. Der Parameter

$$M = \frac{1}{4} Pl \tag{2}$$

steht für das Biegemoment am gewählten Querschnitt mit dem Trägheitsmoment I:

$$I = h^3 b/12 \tag{3}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit Pv dafür, daß ein tragendes Strukturelement in der Linie der Lasteinleitung versagt, ergibt sich gemäß Weibullstatistik [5] (Weibullmodell m) aus:

$$\begin{aligned} Pv &= 1 - \exp\left[-\frac{2}{hb\,\delta x} \int \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_o}\right)^m b\, \delta x dy\right] \\ &= 1 - \exp\left[-c\,(u/u_o)^m\right] \qquad c = 1/(m+1) \end{aligned} \tag{4}$$

Das Integrationsgebiet umfaßt den Querschnittsanteil $0 \leqslant y \leqslant h/2$ unterhalb der neutralen Faser, in dem Zugspannungen auftreten. Eventuelle Schädigungen des heterogenen Materials im Bereich der Druckspannungen [6], [7] werden in die Statistik nicht mit einbezogen.

Die lokalen Biegespannungen beziehen sich auf eine materialspezifische Festigkeit σ_o. Die Verschiebungen u und u_o entsprechen, linear-elastisches Materialverhalten vorausgesetzt, der Biegespannung bzw. der Referenzfestigkeit. Der reziproke Wert 1/m des Weibullmoduls charakterisiert stochastische Schwankungen der lokalen Festigkeit, die ihrerseits wiederum ein Maß für die Initiierung des Rißfortschritts darstellt. Im Gegensatz zu reinem Sprödbruch verhindern jedoch die genannten energiedissipativen Rißstoppmechanismen, die zu einem effektiven R-Kurvenverhalten [8], [9] des Verbundwerkstoffs führen können, das plötzliche, katastrophale Versagen des Bauteils nach Überschreiten der lokalen Festigkeit. Eine Gemeinsamheit im Festigkeitsverhalten von Verbundwerkstoffen besteht darin, daß der Prozeß des Rißwachstums über die Bildung neuer, freier Rißflächen von Energie absorbierenden Mechanismen begleitet wird, die mit dem Wachstum der Prozeßzone verknüpft sind. So kann das heterogene Gefüge in faserverstärkten Kompositen dazu führen, daß sich in der Umgebung eines Makrorisses an der Grenzfläche Faser-Matrix kleinere Nebenrisse ausbilden, die dem Hauptriß Energie entziehen und damit stabiles Rißwachstum ermöglichen. Unterkritisches Rißwachstum hat aber lediglich eine partielle, lokal begrenzte Schädigung der Probe zur Folge.

Die Beschränkung auf eine 2parametrige Weibullverteilung, wie sie im vorliegenden Beispiel gewählt wurde, ist für die Modellierung des nichtlinearen mechanischen Verhaltens von Kompositen nicht zwingend [10]. Gerade die Erweiterung des Modells auf mehrachsige Belastungen erfordert auch die Einbeziehung anderer Festigkeitsverteilungen und Spannungskriterien [11].

4. Nichtlineares Kraft-Durchbiegungsdiagramm

Die Durchbiegungen des partiell geschädigten Balkens werden in Analogie zum teilweise plastisch verformten Bauteil unter der üblichen Annahme berechnet, daß die bereits gebrochenen Querschnittsanteile die Biegung nicht behindern. Die Durchbiegungen beziehen sich somit ausschließlich auf den elastischen Kern der Probe und entsprechen den zugehörigen Lösungen der elastischen Biegetheorie. Die Wahrscheinlichkeit für das Versagen des Biegebalkens im betrachteten Ligament der Höhe h kann unmittelbar auch als Verhältnis zwischen geschädigten und nicht geschädigten Flächenanteilen A interpretiert werden. Diese Auffassung indiziert die Existenz eines effektiven Trägheitsmomentes I_{eff}, welches sich mit der Last ändert. Ursache sind die lokal begrenzten, stochastisch verteilten mikrostrukturellen Schädigungen des heterogenen Materials.

$$I_{eff} = \int_{-h/2}^{h/2} y^2 \; bdy \; (1 - Pv) \tag{5}$$

Der Faktor (1–Pv) berücksichtigt die Verringerung des effektiv tragenden Querschnittelementes bdy mit wachsender Belastung. Exakterweise müßte davon ausgegangen werden, daß die Versagenswahrscheinlichkeit P_v ihrerseits eine Funktion des tatsächlichen Trägheitsmomentes darstellt; in erster Näherung wird diese Tatsache vernachlässigt. Die Last P, die sich auf das virtuelle Trägheitsmoment I_{eff} bezieht, ist danach über folgende Beziehung mit der Durchbiegung u am Lastangriffspunkt verknüpft.

$$P = \frac{48\, E_{\parallel}}{l^3} u\, I \exp\left[-c\,(u/u_o)^m\right] \tag{6}$$

Der Ausdruck vor der Exponentialfunktion entspricht der bekannten Lösung der linear-elastischen Biegetheorie. Die Größe $E_{\parallel}$ steht für den Elastizitätsmodul des ungeschädigten Materials in Faserrichtung. Der Parameter l kennzeichnet den Abstand der Auflager. Die Last-Verschiebungskurve besitzt, wie durch Differentation der Kurve (6) leicht nachzuprüfen ist, ein Maximum bei:

$$(u_m/u_o)^m = 1/(c\,m) \tag{7}$$

Die Kombination der Gleichungen (4) und (5) gestattet die Ermittelung des Weibullmodul m ausschließlich aus charakteristischen Meßwerten der nichtlinearen Last-Verschiebungskurve (6). Im Bereich niedriger Lasten ist ein nahezu linearer Anstieg dP/du der Kurve feststellbar, welcher dem der Tangente an die Kurve bei Nullast entspricht. Außerdem läßt sich eine Sekante festlegen, die die Last Null und die Maximallast P_m in der Last-Verschiebungskurve direkt verbindet. Die zur Last P_m gehörige Verschiebung eines geeigneten Meßpunktes sei u_m. Der natürliche Logarithmus vom Verhältnis aus dem Anstieg beider Geraden [12] liefert den Wert 1/m.

$$\ln \frac{dP/du}{P_m/u_m} = 1/m \tag{8}$$

Die Beziehung (8) gilt auch für Zugproben. Der danach gewonnene materialspezifische Wert 1/m charakterisiert die relative Streuung der Festigkeiten lokaler Strukturelemente im faserverstärkten Verbundmaterial. Die zunehmende Anzahl lokaler Schädigungen im Werkstoff mit steigender Belastung führt zu einem effektiven nichtlinearen Materialverhalten der kompakten Probe.
Um eine weitgehend von Geometrie und Proben unabhängige Darstellung der Last-Verschiebungskurve zu erhalten, ist es von Vorteil, die Meßwertpaare (P, u) jeweils auf ihre Extremwerte (P_m, u_m) zu beziehen.

$$P/P_m = u/u_m \exp\left\{[1-(u/u_m)^m]/m\right\} \qquad (9)$$

Gleichung (9), die in dieser Form auch für Zugproben gültig ist, ermöglicht in Verbindung mit der Beziehung (8) zur Ermittelung des Weibullmoduls eine quantitative Charakterisierung des gemessenen nichtlinearen mechanischen Verhaltens von unidirektionalen Faserverbunden. In Ergänzung dazu seien noch die Bestimmungsgleichungen für den Skalenparameter σ_o der Weibullverteilung bzw. für den entsprechenden Bezugswert der Verschiebung u_o vorgestellt.

$$\sigma_o = \frac{6E\|h}{l^2} u_o \qquad (10)$$

$$u_o = u_m \left(\frac{m}{m \cdot l}\right)^{1/m} \qquad (11)$$

Bild 1 zeigt die Anpassung des Modells (9), welches auf einer modifizierten Statistik des schwächsten Glieds beruht, an experimentelle Ergebnisse, die an einem Glasfaserverbund ermittelt wurden. Aus den Meßdaten lassen sich näherungsweise die Werte des Weibullmodul m sowie der Bezugsspannung σ_o abschätzen:

$m = 4.5$ und $\sigma_o = 760\ N/mm^2$

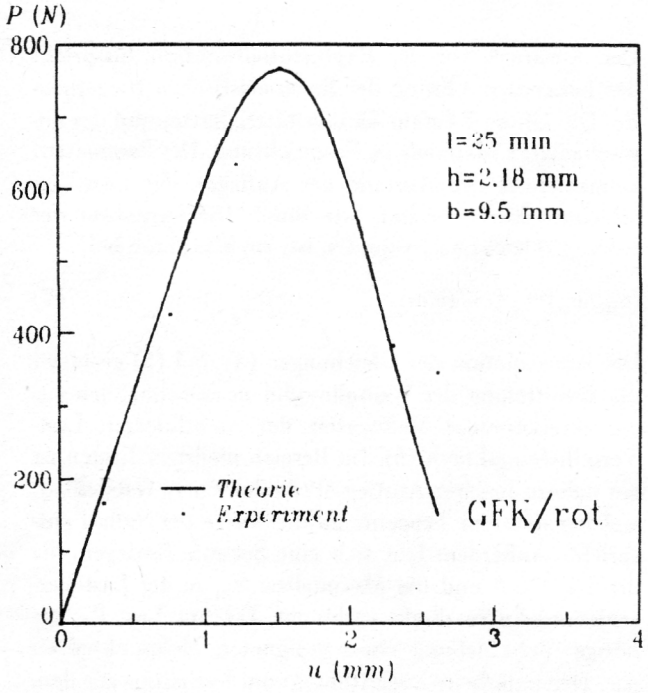

Bild 1
Last-Durchbiegungskurve
(glasfaserverstärktes Epoxidharz: l = 25 mm, h = 2.18 mm, b = 9.5 mm)

In Zusammenhang mit der vorgeschlagenen Ermittelung des Weibullmoduls sei darauf hingewiesen, daß im Gegensatz zur Festigkeitsverteilung der singulären Strukturelemente [13] im Verbundwerkstoff eine Weibullstatistik der gesamten kompakten Probe wegen des effektiven nichtlinearen Materialverhaltens unangepaßt ist [14]; das Versagen des Bauteils fällt nicht mehr mit dem Versagen des schwächsten Volumenelementes zusammen.
Das vorliegende Beispiel zeigt, daß applikationsorientierte lokale Festigkeitskriterien heterogener Werkstoffe, d. h. die Verwendbarkeit makroskopischer Spannungen und Dehnungen als Kennwerte für das örtliche Versagen vom Kompositen gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung (4), die mechanische Bewertung derartiger Materialien mit Mikrostruktur erheblich erleichtert. Unabhängig von der realen Mikrostruktur der faserverstärkten Materialien indiziert diese pragmatisch orientierte Betrachtungsweise eine breite Anwendung.

5. Bauteilanalyse

Im allgemeinen sind detaillierte Festigkeitsanalysen für faserverstärkte Komposite nur noch unter Verwendung moderner numerischer Berechnungsmethoden tragbar. Konventionelle FEM- und BEM-Programme, die dem Anwender die effektive Bewertung realer Bauteile gestatten, sind häufig nur für homogene Materialien ausgelegt. Da die üblichen, technisch orientierten Berechnungsmethoden in der Regel nur das makroskopische, integrale Werkstoffverhalten erfassen, empfiehlt sich eine theoretische Betrachtungsweise, die Faserverbunde nur noch gemittelt in ihrem makroskopischen Gesamtverhalten berücksichtigen. Sie werden durch ein homogenes, fiktives Ersatzmaterial ersetzt. Das Ersatzmaterial selbst zeigt Anisotropie und häufig ein nichtlineares Spannungs- – Verformungsverhalten. Letzteres wird durch die stochastische Ausbreitung mikroskopisch kleiner Schädigungen im Werkstoff hervorgerufen. Die Anisotropie unidirektionaler Faserverbunde äußert sich in effektiven Materialkonstanten E‖, E⊥, ν‖, ν⊥ sowie entsprechenden Komponenten des Schubmoduls; die Kennzeichnung bezieht sich auf die Richtungen parallel und senkrecht zu den Fasern. Eine einfache Modellierung derartiger Werkstoffe in Form paralleler festverbundener Zugelemente führt nach den bekannten Mischregeln der linearen Elastizitätstheorie zu folgenden Beziehungen für die effektiven Elastizitätsmoduln des Ersatzmaterials:

$$\begin{aligned} E\| &= c_f E_f + c_m E_m \\ E\perp &= [c_f/E_f + c_m/E_m]^{-1} \\ G &= [c_f/G_f + c_m/G_m]^{-1} \end{aligned} \qquad (12)$$

Die Indizierung bezieht sich auf die Materialkomponenten Faser (f) und Matrix (m), welche näherungsweise gleichverteilt mit den Volumenanteilen c_f bzw. c_m auftreten.
Im Gegensatz zum isotropen Werkstoff bei dem die Elastizitätsmatrix mit 2 unabhängigen Konstanten beschrieben werden kann, sind im vorliegenden Fall transversaler Anisotropie 5 unabhängige Konstanten zur vollständigen

Charakterisierung der Hooke'schen Matrix erforderlich [15].

Die Belastungsanalyse faserverstärkter Bauteile könnte, die Berücksichtigung eines nichtlinearen Materialverhaltens infolge kumulierender, lokaler Schädigungen eingeschlossen, mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (FEM) nach folgendem vereinfachten Schema [16] geschehen. Innerhalb jeder Masche des FEM-Netzes werden über die Gaußpunkte gemittelt Durchschnittswerte σ_{ij} aller Spannungskomponenten berechnet. Anschließend wird jeder Masche (Querschnitt Ω, Dicke 1) eine auf die gemittelten Spannungskomponenten bezogene, geeignete Beanspruchungsgröße, z. B. die größte Zugspannung σ_z in Faserrichtung, zugeordnet. Im Querschnittselement Ω wächst mit steigender Last σ_z die Anzahl lokaler mechanischer Materialschädigungen proportional zur Initiierungswahrscheinlichkeit des Rißfortschritts:

$$P_v = 1 - \exp\left[-(\sigma_z/\sigma_0)\,m\right] \tag{13}$$

Unter der bereits genannten Voraussetzung, daß die Wahrscheinlichkeit P_v auch als Verhältnis zwischen geschädigten und nichtgeschädigten Flächenanteilen interpretiert werden kann, ergibt sich für effektive Dehnungen ϵ_{eff} infolge makroskopischer Zugspannungen σ_z am scheinbar tragenden Querschnitt Ω näherungsweise der Wert:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\sigma_z}{E\,\|\,(1-P_v)} \tag{14}$$

Die Gültigkeit des statistisch orientierten Festigkeitsmodells (13) vorausgesetzt, basieren die Berechnungen der makroskopischen Spannungen und Dehnungen im Bauteil nach dem vorgestellten Schema interessanterweise fast vollständig auf dem bekannten Apparat linear-elastischer FEM-Verfahren. Aussagefähige Resultate zu einer gegenwärtig laufenden Erprobung der Methode und eventuell notwendigen Verbesserungen liegen noch nicht vor.

6. Zusammenfassung

Die Ansammlung örtlich begrenzter, mechanischer Schädigungen führt zu einem effektiven nichtlinearen Spannungs-Dehnungsverhalten in faserverstärkten Verbunden. Es ist möglich, auf der Basis lokaler Versagenskriterien im Rahmen der linear elastischen Kontinuumstheorie das nichtlineare mechanische Verhalten von Kompositen numerisch zu simulieren, indem effektiv tragende, lokale Querschnittsanteile der Berechnung von Spannungen im Bauteil zugrunde gelegt werden. Im Zusammenhang mit dem vorgestellten Modell auf der Basis der Weibullstatistik soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß im Gegensatz zu ideal spröden Werkstoffen eine lokale Initiierung des Rißfortschritts in faserverstärkten Verbunden nicht zwangsläufig das Versagen des Bauteils bedeutet, da unterschiedliche energiedissipative Rißstopmechanismen ein stabiles Rißwachstum ermöglichen. Wegen der vereinfachenden Annahmen und Idealisierungen des vorliegenden Modells sind die Ergebnisse gegenwärtig lediglich als Schätzwerte der interessierenden Materialparameter zu betrachten. Von Interesse wären vor allem weiterführende Untersuchungen zum Einfluß mehrachsiger Spannungsfelder. Ein Vergleich mit konventionellen Messungen zur Ermittelung weibullverteilter, lokaler Festigkeiten steht noch aus.

Die Autoren danken Herrn Dr. sc. techn. Wieghardt, Sektion CWT der TU Karl-Marx-Stadt, für die Überlassung experimenteller Daten von Last-Durchbiegungskurven glasfaserverstärkter Epoxidharze.

LITERATUR

[1] Sato, N.; Kurauchi, T.; Kamigaito, O.: Fracture mechanism of unidirectional carbon-fibre reinforced epoxy resin composite. J. Mater. Science 21(1986) 1005 – 1010.

[2] Stang, H.: A double inclusion model for microcrack arrest in fibre reinforced brittle materials. J. Mech. Phys. Solids 35 (1987) 3, 325 – 342.

[3] Wheeler, L. T.; Chia-Fu, S.: Crack branching in the neighbourhood of a circular elastic inclusion. Int. Conf. on Fracture and Fracture Mechanics. Shanghai (1987) 86 – 87.

[4] Kendall, K.; Alford, N. M.; Birchall, J. D.: The strength of fibres in all ceramic composites. Advanced structural ceramics symposium (Ed. Becher, E.; Swain, P. F.; Somiya, M. V.) Pittsburgh (1987) 181 – 187.

[5] Trustrum, K.: Estimation of the Weibull modulus from bending tests using both the fracture position and the failure stress. J. Mater. Science Lett. 6 (1987) 11, 1351 – 52.

[6] Guz, A. N.: Kriterii chrupkogo razruzenija vozle koncentratorov naprjazenij v kompositych materialach pri czatii. Prikl. Mech. 22 (1986) 12, 46 – 54.

[7] Darby, M. I.; Kanellopoulos, V. N.: Theory of fibre buckling in carbon-fibre reinforced plastics. J. Phys. D, Appl. Phys. 20 (1987) 3, 298 – 302.

[8] Will, P.; Michel, B.: A model for JT_J-controlled crack growth. Int. J. Fatigue (1988), im Druck.

[9] Gomina, M.; Chermant, J. L.; Osterstock, F.; Bernhart, G.; Mace, J.: Applicability of fracture mechanics to fiber-reinforced CVD-ceramic composites. in Bradt, R. C.; Evans, A. G.; Hasselman, D. P. H.; Lange, F. F. (Eds.): Fracture mechanics of ceramics. vol. 7 Plenum Press, New York (1986) 17 – 32.

[10] Neville, D. J.; Knott, J. F.: Statistical distributions of toughness and fracture stress for homogeneous and inhomogeneous materials. J. Mech. Phys. Solids 34 (1986) 3, 243 – 291.

[11] Swanson, S. R.; Messick, M. J.: Failure of carbon/epoxy lamina under combined stress. J. Composite Materials 21 (1987) 7, 619 – 630.

[12] Will, P.; Totzauer, W.: Verfahren zur näherungsweisen Bestimmung des Weibullmoduls von Kompositen. Patentanmeldung WP G01N/315 573–4 (1988).

[13] Kittl, P.; Galleguillos, E.: Statistical analysis of decohesion in a Cu wire/cement interface. Res. Mechanica Letters 1 (1981) 445 – 449.

[14] Pitkethly, M. J.; Bader, M. G.: Failure modes of hybrid composites consisting of carbon fibre bundles dispersed in a glass fibre epoxy resin matrix. J. Phys. D, Appl. Phys. 20 (1987) 3, 315 – 322.

[15] Cowin, S. C.; Mehrabadi, M. M.: On the identification of material symmetry for anisotropic elastic materials. Mech. Appl. Math. 40 (1987) 4. 451 – 476.

[16] Mudry, F.: A local approach to cleavage fracture. Nuclear Engng. Design 105 (1987) 65 – 76.