



**13. Workshop
Composite Forschung in der Mechanik
05. - 06. Dezember 2000
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**



Dienstag, 05. Dezember 2000

9.00 Eröffnung

SEKTION I: Analytisch-numerische Methoden

(Chairman: E. Schnack)

9.10-9.30 **I. Andrianov**, Köln: "Homogenization approach in mechanics of composite materials"

9.35-9.55 **A. Dimitrov**, Karlsruhe: "3D - Singularitäten bei Verbundwerkstoffen"

10.00-10.20 **J. Hohe**, Siegen: "Spannungssingularitäten in zellulären Sandwichkernen"

10.25-10.40 Kaffeepause

SEKTION II: Analytisch-numerische Methoden

(Chairman: M. Matczynski)

10.45-11.05 **V. Popov**, Paderborn: "Methode der beweglichen zellulären Automaten: Neuer Zugang zur Modellierung von heterogenen Werkstoffen unter komplexen Beanspruchungen"

11.10-11.30 **S. Psakhie**, Tomsk: "Crash energy management on the base of the movable cellular automata method"

11.35-11.55 **R. Schäuble**, Halle: "Ein numerisches Simulationsmodell zur Quantifizierung der Festigkeit von Faserverbundkunststoffen mit Löchern"

12.00-12.20 **R. Piat**, Karlsruhe: "Hierarchisches Materialmodell von CVI-CFC-Werkstoffen und Homogenisierungsvorgänge auf verschiedenen Hierarchieebenen"

12.25-14.00 Mittagspause

SEKTION III: Mechanisches und thermisches Verhalten von Composites

(Chairman: K.P. Herrmann)

14.10-14.30 **M. Matczynski**, Warschau: "Thermoelastic problem of a crack with rough surfaces"

14.35-14.55 **W. Dreyer**, Berlin : "Über die Bewegung von Phasengrenzflächen in mehrphasigen Körpern"

- 15.00-15.20 **T. Hauck**, München: "Analyse der Festigkeit von Silizium/Polymer-Grenzflächen zur Bestimmung der Zuverlässigkeit von Klebverbindungen in Halbleitergehäusen"
- 15.25-15.45 **H. J. Maier**, Paderborn: "Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens mit Verbundmodellen"
- 15.50-16.10 Kaffeepause

SEKTION IV: Verbundwerkstoffe als Konstruktionswerkstoffe

(Chairman: Ch. Marotzke)

- 16.15-16.35 **V. Kobelev**, Attendorn: "Smart composite structures: Effective aeroelastic tailoring of swept-forward wings"
- 16.40-17.00 **A. Hachemi**, Aachen: "Optimum design of composites under shakedown conditions"
- 17.05-17.25 **W. Hansel**, Siegen: "Ermittlung optimaler Lochrandverstärkungen durch lagenweise Topologieoptimierung"
- 19.00 Abendessen im Liborianum

Mittwoch, 6. Dezember 2000

SEKTION V: Mechanisches Verhalten und Experimentelle Methoden

(Chairman: H.J. Maier)

- 9.00-9.20 **S. Neumann**, Paderborn: "Eine analytische Näherungslösung für den Spannungs- und Verzerrungszustand bei Vorliegen eines kreisförmigen Einschlusses in einer unendlichen Matrix aus kubisch anisotropem Material"
- 9.25-9.45 **Ch. Marotzke**, Berlin: "Detektion von Schädigungen in Faserverbundwerkstoffen mittels Röntgenrefraktion"
- 9.50-10.10 **W. Weikl**, Karlsruhe: "Bestimmung von Delaminationsschäden in CFK-Verbundwerkstoffen"
- 10.15-10.35 Kaffeepause

- 10.40-11.00 **V. S. Nguyen**, Paderborn: "Small Punch Test zur Bestimmung mechanischer Modellparameter von bleihaltigen und bleifreien Lotwerkstoffen"
- 11.05-11.25 **T.-A. Langhoff**, Karlsruhe: "Über die Modellierung der chemischen Gasphaseninfiltration"
- 11.30 Schlußwort
- 12.15-14.00 Mittagessen im Liborianum

ABSTRACTS

HOMOGENIZATION APPROACH IN MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS

I. V. Andrianov

**Pridneprovie State Academy of Civil Engineering,
Dnepropetrovsk, Ukraine**

Composite materials are characterized by partial differential equations with rapidly varying or discontinuous coefficients. The problems posed are often solved using numerical methods such as finite element procedures. Nevertheless, a numerical approach does not adequately fit, for example, the requirements of an optimal structural design ideology. Then approximate analytical expressions, if they are accurate enough, will be of great practical advantage for these needs.

The presence of slow and fast varying parts in the solutions is the main obstacle on the way of a numerical investigation. It is the homogenisation method that is aimed for a separation into fast and slow components of the solution. It involves the introduction of "slow" (macroscopic or global) and "fast" (microscopic or local) variables. Then one obtains local and global problems which may be solved sequentially.

The main task in the field of an application of a homogenisation approach consists in the solving of the local (cell) problem (problem for periodically repeated part of governing non-homogeneous media or structures). This problem has been usually treated by numerical methods. We have used asymptotic methods (perturbation of the domain size and form, regular and singular perturbation) and two-point Padé and quasifractional approximants for solving the local problems and have developed the approach in this paper (see also (1-3)).

References

- [1] Andrianov, I.; Danishevs'kyi, V.; Tokarzewski, S.: Two-point quasifractional approximants for effective conductivity of a simple cubic lattice of spheres. *Int. J. Heat Mass Transfer* 39(11), 2349-2352 (1996).
- [2] Andrianov, I.V.; Starushenko, G.A.; Tokarzewski, S.: Torsion of a nonhomogeneous bar with periodic parallelepiped inclusions: analytical expressions for effective shear modulus. *Technische Mechanik* 19(1), 5-12 (1999).
- [3] Andrianov, I.V.; Starushenko, G.A.; Danishevs'kyi, V.V.; Tokarzewski, S.: Homogenization procedure and Padé approximants for effective heat conductivity of composite materials with cylindrical inclusions having square cross-sections. *Proc. R. Soc London A* 455, 3401-3413 (1999).

3D – SINGULARITÄTEN BEI VERBUNDWERKSTOFFEN

A. Dimitrov, H. Andrä, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik,
Universität Karlsruhe (TH)

Es ist bekannt, daß die Lösung eines linear-elastischen Problems Gradientsingularitäten aufweisen kann, die nicht vom Typ $r^{0.5}$ sind. Dies gilt insbesondere für inhomogene, anisotrope Faser-Matrix-Verbunde. Für etwaige bruchmechanische Versagensbetrachtungen solcher Probleme ist eine detaillierte Kenntnis des lokalen Lösungsverhaltens jedoch unumgänglich.

Im Rahmen dieses Vortrags wird eine numerische Methode zur Berechnung der Lösungsasymptotik in solchen Fällen vorgestellt (1). Unter „Lösungsasymptotik“ versteht man dabei die Entwicklung in eine Potenzreihe

$$\mathbf{u} = \sum_i \sum_{k=0}^{k_j} r^{l_i} \ln^k(r) \mathbf{f}_{ik}(\mathbf{q}, \mathbf{J}),$$

bezüglich eines Kugel-Koordinatensystems $r, \mathbf{q}, \mathbf{j}$ mit dem Ursprung im singulären Punkt. Die Glieder dieser Entwicklung stellen solche Zustände dar, die die Gleichgewichtsbedingungen sowie die lokalen Randbedingungen erfüllen, nicht jedoch die Randbedingungen weit entfernt vom singulären Punkt. Nach einer Variationsformulierung des Problems und anschließender Finite-Elemente-Approximation ergibt sich ein nichtlineares Eigenwertproblem

$$(\mathbf{P} + \mathbf{I}\mathbf{Q} + \mathbf{I}^2\mathbf{R})\mathbf{u} = \mathbf{0},$$

aus dem die gesuchten Singulärexponenten g_i und Winkelfunktionen \mathbf{f}_{ij} als Eigenwerte bzw. Eigenvektoren berechnet werden können. Für die effektive Lösung dieses Eigenwertproblems wird zunächst eine Linearisierung sowie eine Spektraltransformation $\mathbf{g} = 1/\mathbf{q}$ durchgeführt. Anschließend wird das transformierte lineare Eigenwertproblem

$$\mathbf{A} \hat{\mathbf{u}} = \mathbf{q} \mathbf{B} \hat{\mathbf{u}}$$

iterativ mit Hilfe der Arnoldi-Methode gelöst. Der größte Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, daß keine explizite Berechnung der vollbesetzten Umkehrmatrix \mathbf{B}^{-1} notwendig ist. Für die Lösung müssen lediglich eine direkte Faktorisierung der Matrix \mathbf{P} sowie einige wenige Matrix-Vektor-Produkte berechnet werden.

Abschließend werden einige numerische Beispiele präsentiert, die die Effizienz der Methode verdeutlichen sollen. Gezeigt werden die berechneten Singularitätsexponenten und Winkelfunktionen in Abhängigkeit vom Geometrieparameter und den Materialeigenschaften.

Literatur

- [1] A. Dimitrov, H. Andrä, and E. Schnack. Efficient computation of corner singularities in 3d-elasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering, to appear.*
- [2] D. Leguillon and E. Sanchez-Palencia. *Computation of Singular Solutions in Elliptic Problems and Elasticity.* Masson, John Wiley, Paris, 1987.

ÜBER DIE BEWEGUNG VON PHASENGRENZFLÄCHEN IN MEHRPHASIGEN KÖRPERN

W. Dreyer¹, W. Müller²

¹Weierstrass Angewandte Analysis und Stochastik, Berlin

²Department of Mechanical and Chemical Engineering, Heriot-Watt Universität
Riccarton, Great Britain

Phasensfeldgleichungen beschreiben die raumzeitliche Entwicklung von koexistierenden Phasen durch das sogenannte Phasensfeld, welches die Phase angibt, die zu einer Zeit t am Ort x in einem Körper vorliegt. Die Phasengrenzfläche resultiert hier durch einen glatten Wechsel des Phasensfeldes innerhalb eines kleinen Raumbereiches.

Zur Illustration von Phasensfeldmodellen betrachten wir drei unterschiedliche Festkörper und die hierin ablaufenden Phänomene. Im ersten Beispiel untersuchen wir die Vergrößerung der Mikrostruktur von einkristallinen Superlegierungen. Im zweiten Beispiel studieren wir die Phasentrennung in eutektischen Zinn/Blei Legierungen. Beide Materialien sind bei diesen Prozessen äußeren Lasten ausgesetzt. Drittens betrachten wir den α/γ Phasenübergang in Stahl, der durch die Diffusion von Kohlenstoff innerhalb der beiden FCC und BCC Gitter von Eisen induziert wird.

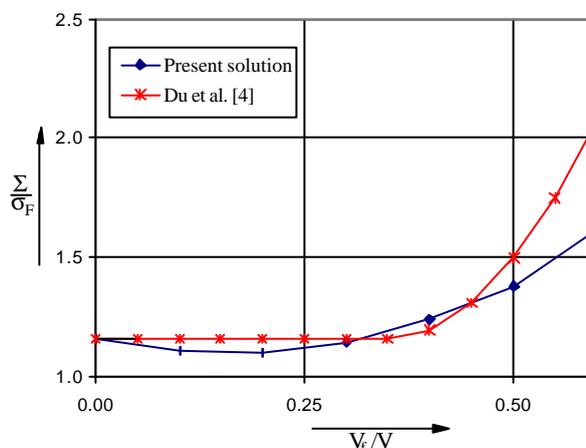
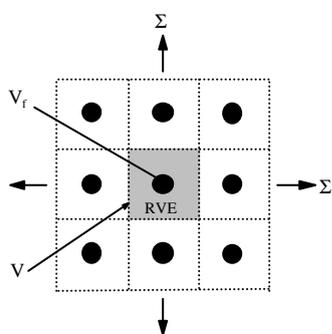
Es gibt zur Beschreibung all dieser Phänomene eine Alternativmethode, welche die Gleichungen der klassischen Thermodynamik benutzt. Hier werden die Phasengrenzflächen als singuläre Flächen betrachtet, an denen sich die Zustandsvariablen unstetig verändern. Die mit singulären Flächen arbeitenden Modelle leiten Relationen ab zwischen den Normalgeschwindigkeiten der Phasengrenzflächen und den hierzu notwendigen treibenden Kräften. Diese Abhängigkeit ist unmittelbar beobachtbar durch *in-situ* Experimente. Die Beziehungen zwischen Phasensfeldmodellen und Modellen mit singulären Flächen werden ausführlich diskutiert.

OPTIMUM DESIGN OF COMPOSITES UNDER SHAKEDOWN CONDITIONS

A. Hachemi, F. Schwabe and D. Weichert

Institut für Allgemeine Mechanik,
RWTH Aachen

The widespread use of composites and the increasing interest in their optimum design makes it necessary to understand the influence and the role of the microstructure of such materials on the overall properties. The material parameters controlling the macroscopic properties are on one hand the morphology of the microstructure and on the other hand the constitutive behaviour of each individual component. In this paper, a methodology is presented how to use shakedown theory (1) for the assessment and the design of such materials. To this end, an idealised class of composite materials with a periodic microstructure is considered, allowing to determine the macroscopic behaviour from the microscopic information by means of the homogenisation theory (2). As usual in the homogenisation technique of a periodic structure, we use a model of this material based on the convenient assumption of periodicity to obtain a failure criterion. For this aim the concept of a representative volume element (RVE) is introduced, which may be viewed as a heterogeneous structure under prescribed boundary conditions which correspond to the uniform local continuum fields. The methodology is based on the finite element method and on a non-linear mathematical programming to determine the admissible range of external loads and to predict failure. The developed methodology is applied for illustration to the problem of the best choice of design parameters for a composite. The software SALIA, developed by IAM is used to modelise such materials (3).



Variation of macroscopic stress with fiber volume fraction.

References

- [1] E. Melan: Ing. Arch. **9**, 116-126 (1938).
- [2] P. Suquet: C.R. Acad. Sci. **296**, 1355-1358 (1983).
- [3] D. Weichert, A. Hachemi and F. Schwabe: Arch. Appl. Mech. **69**, 623-633 (1999).
- [4] Z.Z. Du, R.M. McMeeking and S. Schmauder: Mech. Mat. **21**, 159-167 (1995).

ERMITTLUNG OPTIMALER LOCHRANDVERSTÄRKUNGEN DURCH LAGENWEISE TOPOLOGIEOPTIMIERUNG

W. Hansel und W. Becker

**Institut für Mechanik und Regelungstechnik,
Universität-GH Siegen**

In vielen technischen Anwendungen des Leichtbaus der Luft- und Raumfahrtindustrie werden Verbundstrukturen aus unidirektional verstärkten Lamineinzelschichten eingesetzt. Häufig kommt es vor, dass aus unterschiedlichen Gründen Löcher in die Struktur eingefügt werden müssen. Am Lochrand entstehen dann Spannungsüberhöhungen, wodurch unter Umständen die Festigkeit des Bauteils deutlich verringert wird. Um einen kritischen Festigkeitsverlust zu vermeiden, wird in der Praxis der Lochrand mit Hilfe von aufgesetzten Dopplern verstärkt. Natürlich ist damit gleichzeitig auch eine Zunahme des Gesamtgewichts verbunden. Um die Gewichtszunahme möglichst niedrig zu halten, ist eine Optimierung der Doppler zweckmäßig (1).

Im Gegensatz zur gängigen „Parameteroptimierung“, bei der die Einzelschichtdicken oder Lagenwinkel einer vorgegebenen Topologie lokal variiert werden, werden bei einer Topologieoptimierung die Zusammenhangseigenschaften der Struktur variiert. Dabei wird bei dem hier vorzustellenden Konzept die Topologie jeder Einzelschicht in der Art geändert, dass das Gesamtlaminat dem gegebenen Kraftfluss bestmöglich angepasst ist. Im Hinblick auf eine einfache und kostengünstige Fertigung wird in lokalen Bereichen entweder Material vollständig entfernt oder es bleibt vollständig erhalten. Der Laminatlagenaufbau wird dabei nicht verändert (2).

Die Optimierung erfolgt mit Hilfe eines heuristischen Algorithmus. Material wird aus den Bereichen entfernt, wo es nicht unbedingt benötigt wird, weil entweder die Hauptspannungsrichtung signifikant vom Lagenwinkel abweicht oder weil die Hauptspannung unterhalb einer bestimmten Grenzspannung liegt (3,4). Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass es im Gesamtlaminat nicht zum Versagen kommt.

Der entwickelte Optimierungsalgorithmus wurde innerhalb des Finite-Elemente Programms ANSYS implementiert, so dass neben dem Strukturanalyseprogramm keine zusätzlichen Optimierungsprogramme benötigt werden.

Literatur

- [1] Engels, H.; Becker, W.: Optimization of Hole Reinforcements by Doublers, Accepted for publication in: Structural Optimization
- [2] Hansel, W.; Becker, W.: An Evolutionary Algorithm for a Layerwise Topology Optimization of Laminates, Advanced Engineering Materials **7**, 427-430, (2000)
- [3] Hinton, E.; Sienz, J.: Fully Stressed Topology Design of Structures Using an Evolutionary Approach, Engineering Computations **12**, 229-244, (1995)
- [4] Xie, Y.M.; Steven, G.P.: A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization, Computers and Structures **49**, 885-896, (1993)

ANALYSE DER FESTIGKEIT VON SILIZIUM/POLYMER GRENZFLÄCHEN ZUR BESTIMMUNG DER ZUVERLÄSSIGKEIT VON KLEBVERBINDUNGEN IN HALBLEITERGEHÄUSEN

T. Hauck²; K. Linnenbrock¹; F. Ferber¹ & K.P. Herrmann¹

¹Laboratorium für Technische Mechanik, Universität Paderborn
²Motorola GmbH, München

Die thermische Fehlpassung zwischen Halbleiterbauelement, Trägermaterial und Gehäuse bei Mikrochips, die in allen Gebieten moderner Technik, insbesondere auch in der Automobilindustrie, zum Einsatz kommen, kann relativ hohe Eigenspannungen in den beteiligten Materialien hervorrufen. Grenzflächenrißbildung, z.B. zwischen Silizium und Epoxidharzsystemen ist dabei eine häufig beobachtete Schädigung im Verbindungsaufbau. Diese kann entscheidend die mechanische Zuverlässigkeit des Verbindungsaufbaus beeinflussen. Durch eine entsprechende Optimierung der Geometrie- und Materialparameter kann das Risiko für eine Rißbildung und -ausbreitung signifikant verringert werden. Hierfür sind die Definition eines geeigneten Rißausbreitungskriteriums und die Messung zugehöriger Bruchzähigkeitskennwerte für die Grenzfläche erforderlich. Zur Bestimmung dieser Kennwerte ist eine spezielle auf das Problem abgestimmte Prüfanordnung notwendig. Zur Verifikation dieser Prüfanordnung wurden spannungsoptische Experimente und begleitende Finite-Element Simulationen an Araldit-B/Aluminium Grenzflächen durchgeführt.

Die Definition eines Rißausbreitungskriteriums für die Grenzfläche erfordert die Kenntnis der asymptotischen Nahfeldlösung des Spannungszustandes für einen Grenzflächenriß. Unter Verwendung des komplexen Spannungsintensitätsfaktors \mathbf{K} und der Bimaterialkonstanten ϵ können die Normal- und Scherspannungskomponenten, σ_{22} und σ_{12} , auf dem Ligament im Abstand x_1 von der Spitze eines geraden Grenzflächenrisses wie folgt beschrieben werden:

$$\sigma_{yy} + i\sigma_{xy} = \frac{\sqrt{\mathbf{K}\bar{\mathbf{K}}}}{\sqrt{2\pi r}} e^{i\psi} \left(\frac{r}{\delta a} \right)^{\epsilon},$$

wobei ψ den Phasenwinkel des Spannungsvektors im Abstand $x_1 = \delta a$ von der Rißspitze darstellt. Für die Formulierung des Rißausbreitungskriteriums wird die Energiefreisetzungsrate G verwendet.

$$G = \frac{\mathbf{K}\bar{\mathbf{K}}}{16 \cosh^2(\epsilon\pi)} \left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right),$$

Die kritische Energiefreisetzungsrate G_c , bei der instabile Rißausbreitung einsetzt, wird als Maß für die Grenzflächenzähigkeit definiert. Zur Bestimmung der Grenzflächenzähigkeitskurven wird eine modifizierte CTS- (Compact Tension Shear) Probe verwendet.

Literatur

- [1] Hutchinson, J., Suo, Z.: Mixed mode cracking in layered materials. *Advances in Applied Mechanics*, **29**, 64-191, (1991)
- [2] Herrmann, K.P., Noe, A.: Calculation of energy release rates for interface cracks between dissimilar linear elastic isotropic materials. *Int. J. Fracture*, **50**, R51-R58, (1991)
- [3] H.A. Richard, K. Benitz, A loading device for the creation of mixed mode fracture mechanics. *Int. J. Fracture* **22**, pp. R55-R58 (1983)
- [4] T. Hauck, K. Linnenbrock, S. Neumann, F.Ferber, K.P.Herrmann, Flip-Chip Technologie in der Mikroelektronik, Mechanische Zuverlässigkeit, Wärmespannungsbruch. DVM-Bericht 232, 32. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, pp. 53-62, 22. - 23. Februar 2000, Berlin

SPANNUNGSSINGULARITÄTEN IN ZELLULÄREN SANDWICKKERNEN

J. Hohe¹ S. Goswami² und W. Becker¹

¹Institut für Mechanik und Regelungstechnik, Universität Siegen
²Cranfield University, College of Aeronautics, Great Britain

In klassischen Sandwichplatten und -schalen mit zweidimensionalem Zellkern kommt es unter Belastung zu einer gegenseitigen Verspannung zwischen Kern und Deckschichten. Diese Verspannung wird durch die Inkompatibilität der Deformationsmoden des freien Kernes und der Deckschichten hervorgerufen (2). Sie führt in den Zellwänden des Kernes zu einer Spannungskonzentration im Bereich der Deckschichtanbindung. An Zellwandverzweigungen ergeben sich hierbei singuläre Spannungsfelder. Diese bedingen eine erhöhte Delaminationsneigung des Kern-Deckschicht-Verbundes im Vergleich zu Verbunden homogener Materialien. Insbesondere ergeben sich bereits im Anrissstadium vergleichsweise hohe Spannungsintensitätsfaktoren (1).

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind Ordnung und Stärke der Spannungssingularität (3). Die Untersuchung erfolgt vergleichend durch eine vereinfachte asymptotische Analyse in geschlossener Form und auf numerischem Wege mit Hilfe der Methode der finiten Elemente. Die Untersuchung erfolgt in beiden Fällen am Beispiel eines Hexagonalwabenkernes mit veränderlichem Zellwandwinkel.

Im Rahmen der asymptotischen Analyse kann gezeigt werden, dass die auftretende Singularität den Charakter einer reinen, nicht oszillierenden power-law Singularität besitzt. Ihre Ordnung ergibt sich ausschließlich als Funktion des Zellwandwinkels und der Querkontraktionszahl des Zellwandmaterials. Sie liegt niedriger als die aus dem Rissproblem bekannte Wurzelsingularität. Im Fall der im Rahmen der numerischen Analyse bestimmten Stärke der Singularität ergibt sich zusätzlich zum Einfluss des Zellwandwinkels und der Querkontraktionszahl eine lineare Abhängigkeit des Spannungsintensitätsfaktors von der makroskopischen „effektiven“ Dehnung der Sandwichplatte und dem Elastizitätsmodul des Zellwandmaterials. Darüber hinaus ist ein leichter Einfluss der Zellwandstärke zu beobachten. Die Stärke und die Materialeigenschaften der Deckschichten hingegen sind von untergeordnetem Einfluss, sofern diese Größen und damit die Deckschichtsteifigkeit nicht unrealistisch klein angenommen werden.

Eine direkte Anwendung der klassischen elastischen Bruchkonzepte ist aufgrund der unterschiedlichen Ordnung der hier auftretenden Ecksingularität nicht möglich. Eine Übertragung auf das vorliegende Problem kann jedoch mit einfachen Mitteln vorgenommen werden. Eine kurze Diskussion dieser Möglichkeiten beschließt die Arbeit.

Literatur

- [1] Goswami, S. und Becker, W: *Analysis of debonding fracture in a sandwich plate with hexagonal core*, Compos. Struct. **49**, 385-392, (2000)
- [2] Hohe, J. und Becker, W: *A refined analysis of the effective elasticity tensor for general cellular sandwich cores*, Int. J. Solids Struct. zur Veröffentlichung angenommen)
- [3] Hohe, J., Becker, W. und Goswami, S: *Singular stress fields in cellular cores for structural sandwich panels*, Compos. Struct. (zur Veröffentlichung eingereicht)

SMART COMPOSITE STRUCTURES: EFFECTIVE AEROELASTIC TAILORING OF SWEEP-FORWARD WINGS

V. Kobelev¹, A.D. Larichev²

¹Muhr und Bender, Attendorn

²Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Science, Moscow

In considering design problems for aerospace composite structures and by obtaining the integral structural characteristics such as eigenfrequencies, critical buckling loads as well as integral stiffnesses the choice of simple, effective one-dimensional, beam-like and two-dimensional, shell-like models plays an important part. These models give in some cases the possibility to find out analytical solutions and to evaluate the basic properties of the structures.

The lecture presents the solutions of static bending, flutter and divergence problems for anisotropic wings. The wings are modelled as anisotropic thin-walled beams with closed cross-section. The special attention is paid to coupled torsion-bending effects. The variational principles are used for the derivation of the governing equations:

$$(bd_{11}u_x)_{xx} + 2(bd_{16}\Omega_x)_{xx} = c_y^\alpha q b \cos^2 \Lambda (\Omega + u \tan \Lambda)$$

$$2(bd_{16}u_x)_x + 4(bd_{66}\Omega_x)_x - (b^3L_{11}\Omega_{xx})_{xx} = -c_y^\alpha q b e \cos^2 \Lambda (\Omega + u \tan \Lambda)$$

The influence of an aeroelastic tailoring on the critical divergence speed of the wing is investigated analytically. Optimum orientation of the axes of anisotropy for the wing skin was found.

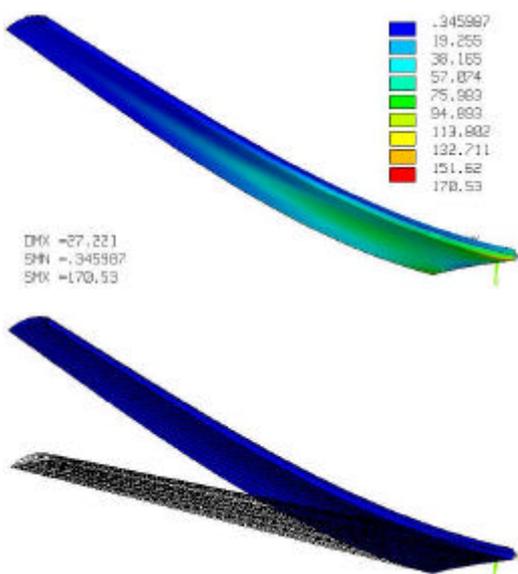


Fig 2. ANSYS-Model of the composite wing

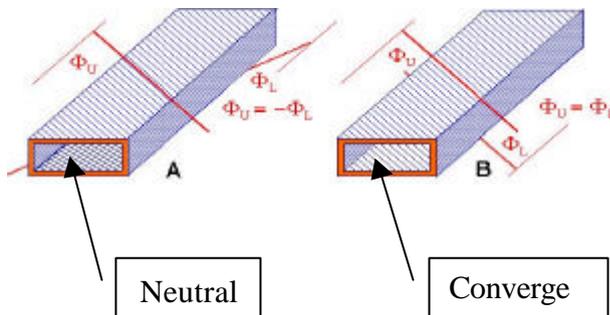


Fig.1 Neutral and converge behaviour of the composite beam

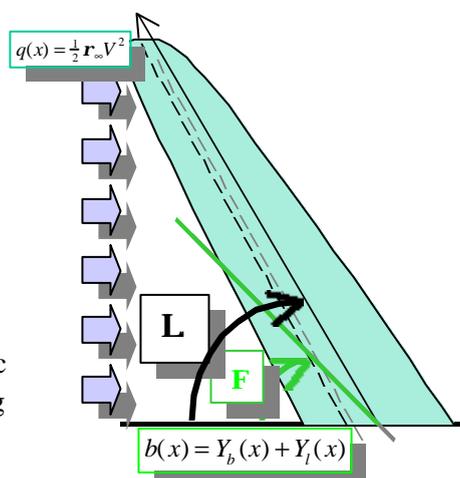


Fig.3 Aerodynamic forces on the wing

ÜBER DIE MODELLIERUNG DER CHEMISCHEN GASPHESENINFILTRATION

T.-A. Langhoff, H. Andrä, E. Schnack

**Institut für Technische Mechanik,
Universität Karlsruhe (TH)**

CFC-Werkstoffe erlangen immer größere Bedeutung und finden in der Industrie vielfältige Anwendungsbereiche. Ein wichtiges Verfahren für deren Herstellung ist die chemische Gasphaseninfiltration (CVI), bei der sich aus der Gasphase abscheidender fester Kohlenstoff auf der Oberfläche eines porösen Werkstoffes bzw. einer Faserstruktur ablagert.

Ziel der Modellierung der CVI ist die Bestimmung von Korrelationen zwischen Prozessparametern und Eigenschaften des entstehenden Werkstoffes. Hierzu muss die Wechselwirkung verschiedenster Effekte (chemische Reaktionen, Transportvorgänge, Änderung der Geometrie und der Porosität durch zunehmende Abscheidung u.a.) studiert sowie das Profil des abgeschiedenen Kohlenstoffes bestimmt werden.

Frühere Arbeiten zur CVI (z.B. (1)) verwendeten zumeist eine zu stark vereinfachte Reaktionskinetik, und die Änderung der Geometrie infolge stattfindender Abscheidung wurde nicht ausreichend berücksichtigt.

Aus mathematischer Sicht liegt ein Anfangs-Randwert-Problem (ARWP) für die Konzentrationen der chemischen Spezies in der Gasphase vor. Die Phasengrenze zwischen der Gasphase und der festen Phase, also genau die Oberfläche der Struktur, bildet den freien Rand.

Zur Modellierung der chemischen Vorgänge in der Gasphase werden reduzierte Reaktionsschemata (2) verwendet, die das Zusammenspiel zwischen homogenen Gasphasenreaktionen und heterogenen Abscheidereaktionen an der Oberfläche beschreiben. Zur Beschreibung des diffusiven Anteils werden binäre Diffusionskoeffizienten verwendet, welches durch die *linearized theory method* gerechtfertigt ist. Zusätzlich wird innerhalb von Poren Knudsen-Diffusion berücksichtigt.

Bei quasi-eindimensionalen Simulationen von Abscheidungsprofilen innerhalb von Modellporen konnte aufgrund der Diskretisierung des Porendurchmessers die Position des freien Randes in jedem Zeitschritt explizit berechnet werden. Experimentelle Ergebnisse konnten qualitativ bestätigt werden. Für verschiedene Werte der Prozessparameter und geometrische Verhältnisse kann entschieden werden, ob eine vollständige Infiltration der Modellporen erreicht wird.

Literatur

- [1] P. McAllister, E. E. Wolf: Modeling of chemical vapor infiltration of carbon in porous carbon substrates, *Carbon* **29**, 387-396, (1991)
- [2] A. Becker, K. J. Hüttinger: Chemistry and kinetics of chemical vapor deposition of pyrocarbon IV. Pyrocarbon deposition from methane in the low temperature regime, *Carbon* **36**, 213-224, (1998)

MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER MODELLIERUNG DES ZYKLISCHEN SPANNUNGS-DEHNUNGSVERHALTENS MIT VERBUNDMODELLEN

H.J. Maier

Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Universität Paderborn

Werkstoffmodelle basieren i.d. Regel auf Laborversuchen, in denen die reale Betriebsbeanspruchung nur sehr begrenzt nachgebildet werden kann. Ein zentrales Problem bei der Modellierung des Verhaltens von extrem beanspruchten Hochtemperaturwerkstoffen ist daher der Nachweis der Übertragbarkeit des Modells zur Beschreibung des realen Bauteilverhaltens. Modelle, die die relevanten mikrostrukturellen Prozesse einbeziehen, erscheinen besonders gut übertragbar zu sein und finden daher zunehmendes Interesse.

Verbundmodelle erlauben eine stark mikrostrukturorientierte Modellierung, da die Heterogenität der Mikrostruktur explizit berücksichtigt wird. Selbst in einphasigen Werkstoffen bilden sich, z.B. in Folge zyklischer Verformung, meist Bereiche unterschiedlich hoher Versetzungsdichte und damit auch unterschiedlicher Streckgrenze aus (1), so dass auch solche Werkstoffe im mesoskopischen Bereich als Verbundwerkstoffe betrachtet werden können.

Die Leistungsfähigkeit eines weiterentwickelten Verbundmodells (2) wurde an einer Reihe von sehr unterschiedlichen Werkstoffen überprüft. Neben einphasigen Modellwerkstoffen wurden vor allem einkristalline Nickelbasis-Superlegierungen, mehrphasige Hochtemperaturtitanlegierungen und SiC-verstärkte Hochtemperaturaluminiumlegierungen untersucht. Für isotherme Beanspruchung ermöglichte das Verbundmodell jeweils eine sehr gute Beschreibung des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens. Auch die Vorhersage des Werkstoffverhaltens bei zyklischer thermisch mechanischer Beanspruchung ist im Rahmen des Modells mit Einschränkungen möglich. Es zeigte sich, dass die mikrostrukturorientierte Modellierung tatsächlich Vorteile hinsichtlich der Übertragbarkeit des Modells auf praxisrelevante Beanspruchungen bietet, da sich aus der Einbeziehung der Mikrostruktur Aussagen über die Veränderung der Modellparameter im Laufe einer Betriebsbeanspruchung ableiten lassen. Das Modell kommt daher ohne frei anpassbare Parameter aus. Der wesentliche Nachteil des Modellansatzes ist im hohen experimentellen Aufwand zu sehen, der mit der notwendigen detaillierten mikrostrukturellen Charakterisierung der Werkstoffe verbunden ist.

Literatur

- [1] Mughrabi, H.: Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals. *Acta Metall.*, **31**, 1367-1379, (1983).
- [2] Maier, H.J., Christ, H.-J.: Modeling of cyclic stress-strain behavior and damage mechanisms under thermomechanical fatigue conditions. *Int. J. Fatigue*, **19**, Suppl. 1, 267-274, (1997).

DETEKTION VON SCHÄDIGUNGEN IN FASERVERBUNDWERKSTOFFEN MITTELS RÖNTGENREFRAKTION

C. Marotzke, A. Hampe, V. Rudolph, H. Ivers

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Fachgruppe VI.2,
Berlin**

In den letzten Jahren wurde in der BAM ein Verfahren auf Basis der Röntgenrefraktion entwickelt (Hentschel), das die Detektion von Hohlräumen sowie insbesondere von Grenzflächenablösungen ermöglicht. Das Verfahren beruht darauf, dass Grenzflächen zwischen Körpern unterschiedlicher Dichte zu einer Ablenkung des Röntgenstrahls führen. Die Ablenkungen sind zwar extrem klein, sie können aber noch mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden. Grundsätzlich führen auch intakte Grenzflächen zwischen Faser und Matrix zu einer Ablenkung, sodass auch bei einer Probe ohne Debonding Refraktion gemessen wird. Die bei der Faserablösung entstehenden größeren Dichteunterschiede führen zu einer Verstärkung dieses Effekts, sodass aus der Differenz des Signals vor und nach der Belastung auf die entstandenen Faserablösungen geschlossen werden kann.

Dieses Verfahren ermöglicht keine exakte Messung der entstandenen Hohlräume, da nur ein Bruchteil der abgelösten Interface zum Refraktionssignal beiträgt. Bedingt durch die Summation der Effekte über die durchstrahlte Probendicke kann bei einem Faserverbundwerkstoff nicht das Debonding einzelner Fasern sichtbar gemacht werden. Trotzdem zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass die Zunahme der Schädigung, beispielsweise bei einer zyklischen Beanspruchung, mit der Röntgenrefraktion charakterisiert werden kann (Abb. 1). Der Vergleich des mittels Röntgenrefraktion gemessenen Schädigungsparameters mit der Restfestigkeit zeigt, dass zumindest bei dem getesteten Material eine Korrelation besteht.

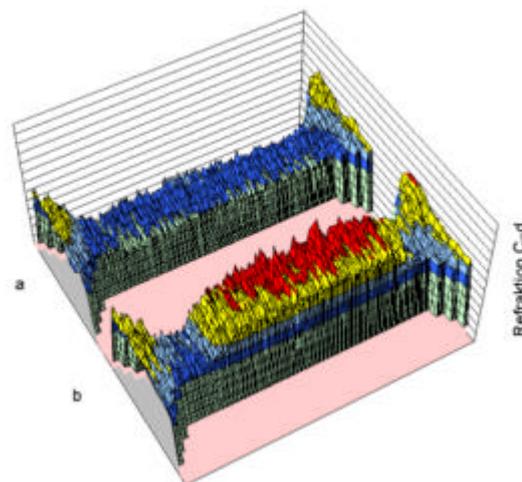


Abb. 1 Schädigungsakkumulation bei zyklischer Belastung
a: vor Belastung b: nach 5000 Lastzyklen

Literatur

- [1] Hentschel., M. P., Harbich, K.-W., Lange, A.: Nondestructive evaluation of single fiber debonding by X-ray refraction, NDT&E International **27**, (1994)

THERMOELASTIC PROBLEM OF A CRACK WITH ROUGH SURFACES***M. Matczyński¹, R. Martynyak²*****¹Institute of Fundamental Technological Research, PAS, Warsaw****²Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, NASU, Lviv**

A two-dimensional thermoelastic problem of an infinite body containing a crack with rough surfaces is considered. A uniformly distributed compressive load p and a heat flux q are applied at infinity. The compressive load closes the crack and a thermal contact of its surfaces is imperfect due to micro-gaps between them. The imperfect thermal contact is modeled by the thermal resistance which depends on the contact pressure of its surfaces and the thermal conductivity of the medium filling the gaps. Temperature, displacements and stresses within the body are expressed in terms of jumps of the temperature and the tangential displacement along the crack. To solve the problem the method of complex potentials and singular integro-differential equations is used. Numerical results show the dependence of temperature, tangential displacements of crack surfaces and the stress intensity factor k_2 on the external load and the thermal conductivity of the medium filling the micro-gaps between the crack surfaces.

EINE ANALYTISCHE NÄHERUNGSLÖSUNG FÜR DEN SPANNUNGS- UND VERZERRUNGSZUSTAND BEI VORLIEGEN EINER KREISFÖRMIGEN EINSCHLUSSES IN EINER UNENDLICHEN MATRIX AUS KUBISCH ANISOTROPEM MATERIAL

K. Herrmann¹, W.H. Müller², S. Neumann¹

¹Laboratorium für Technische Mechanik, Universität Paderborn

²Department of Mechanical and Chemical Engineering, Heriot- Watt- University, Riccarton, GB Edinburgh

In Anlehnung an die Arbeiten der Autoren im Zusammenhang mit der Untersuchung von Verbundwerkstoffen auf der Grundlage der diskreten Fouriertransformation (DFT) soll geklärt werden, inwieweit der kontinuierliche Fall dieser Transformation (KFT) geeignet ist, um elastisch heterogene Materialien zu analysieren. Hierbei geht es konkret darum, auch bei anisotropen Materialien Näherungslösungen in einer geschlossenen Form zu bestimmen. Aufbauend auf den Ergebnissen für elastisch homogene Materialien unter Eigendehnung, wo für zwei- und dreidimensionale Probleme analytische Lösungen bestimmt werden konnten (siehe (1), (2)), wird die dortige Methodik weitergeführt. Die Vorgehensweise ist dabei grundsätzlich analog zu der bei der DFT und orientiert sich an den klassischen Veröffentlichungen von Mura, Kinoshita und anderen (siehe etwa (3), (4)).

In unserem Beitrag soll diese Lösungsmöglichkeit anhand des Problems einer kreisförmigen Inhomogenität in einer Matrix aus kubisch anisotropem Material unter äußerer Belastung vorgestellt werden. Der Vortrag ist nach den folgenden Schritten gegliedert:

- Die kontinuierliche Fouriertransformation wird kurz vorgestellt.
- Die Grundlagen der linearen Elastizitätstheorie im Zusammenhang mit der „equivalent inclusions method“ werden skizziert.
- Eine Integralgleichung, basierend auf der KFT, zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen in einem heterogenen Körper wird angegeben.
- Der Lösungsweg der Integralgleichung für das oben genannte Problem wird skizziert.
- Die Lösung wird auf verschiedene Fälle angewendet und in geeigneter Form dargestellt.

Literatur

- [1] W. Dreyer, W.H. Müller, J. Olschewski: An approximate analytical 2D-solution for the stresses and strains in eigenstrained cubic materials. Acta mechanica, 1998, in print.
- [2] W.H. Müller, S. Neumann: An approximate analytical 3-D solution for the stresses and strains in eigenstrained cubic materials. Int. J. Solids Structures, **35**, 2931-2958 (1998).
- [3] T. Mura, R. Furuhashi, K. Tanaka: Equivalent inclusion method in composite materials. In Composite Materials, herausgegeben von K. Kawata und T. Akasaka, Proceedings of the Japan-U.S. Conference, Tokyo, 1981, pp. 71-77.
- [4] N. Kinoshita, T. Mura: Elastic fields of inclusions in anisotropic materials. Phys. Stat. Sol. (a), **5**, 759-768 (1971).

SMALL PUNCH TEST ZUR BESTIMMUNG MECHANISCHER MODELLPARAMETER VON BLEIHALTIGEN UND BLEIFREIEN LOTWERKSTOFFEN

K.P. Herrmann¹, W.H. Müller², V.S. Nguyen¹

¹Laboratorium für Technische Mechanik, Universität Paderborn

²Department of Mechanical and Chemical Engineering,
Heriot-Watt University, Edinburgh, GB

Bei der Packageherstellung werden Materialkombinationen eingesetzt, die bedingt durch die komplexen Herstellungs- bzw. Einsatzbedingungen durch isotherme und thermozyklische Belastungen während des Belastungsprofils bis hin zum Versagen durch die Initiierung von thermomechanischen Spannungsüberhöhungen an und in den stoffschlüssigen Verbindungen führen. Miniaturisierte Halbleiterbaugruppen erfahren durch Ein- und Ausschaltprozesse ständig wechselnde Temperaturen. Dabei führen die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der einzelnen Komponenten einer solchen Baugruppe zu mechanischen Beanspruchungen wie Alterung und Versprödung, die ein Versagen im Bereich der Lotverbindungen bewirken können (1).

Der Einsatz von Lotwerkstoffen erstreckt sich von der Verwendung konventioneller bleihaltiger SnPb-Lotlegierungen bis zur Verwendung von „neuartigen“ bleifreien Loten. Hierbei ist in Japan, USA und Europa ein wachsender Trend für einen Wechsel von bleihaltigen Lotlegierungen aufgrund ihrer gesundheitlichen Risiken zu den bleifreien Loten erkennbar (2-3).

Die Modellierung des mechanischen Verhaltens und der Alterung von Lotmaterialien sowie deren Lebensdauervorhersage erfordert die möglichst genaue Kenntnis der Modellparameter (4). In dieser Studie werden SPT-Ergebnisse für bleihaltige und bleifreie Lotwerkstoffe, welche nach unterschiedlichen Alterungsprozessen getestet und geprüft wurden, demonstriert. Dabei wird die numerische Simulation mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente verwendet, um die mechanischen Modellparameter von Lotmaterialien zu ermitteln.

Literatur

- [1] Darveaux R.; Banerji K.; Mawer A.; Dody G.: Reliability of Plastic Ball Grid Array Assembly, Chapter 13, in Ball Grid Array, J. H. Lau (editor), McGraw Hill, New York, 379-442, (1995).
- [2] Miric, A. Z.: Bleifreie Lotlegierungen, VTE 11, H. 5, 259-269, (1999).
- [3] Crum, S.: Lead-free search intensifies as time runs short, EPP, 26-32, (2000).
- [4] Nguyen, v.S.; Herrmann, K.P.; Müller, W.H.: Determination of mechanical parameters of solder materials using the miniature measuring method „Small Punch Test“ and an appropriate FE-simulation, ZAMM 80, 427-428 (1999).

HIERARCHISCHES MATERIALMODELL VON CVI-CFC-WERKSTOFFEN UND HOMOGENISIERUNGSVORGÄNGE AUF VERSCHIEDENEN HIERARCHIEEBENEN.

R. Piat

**Institut für Technische Mechanik,
Universität Karlsruhe (TH)**

Die hier betrachteten, durch die chemische Gasphaseninfiltration (CVI) hergestellten CFC-Werkstoffe bestehen aus mit Pyrokohlenstoff beschichteten Fasern und Poren [1-3]. Es wurde festgestellt, dass die Beschichtung der Fasern sehr komplex ist und aus verschiedenen Modifikationen des Pyrokohlenstoffs besteht. Diese Pyrokohlenstoffmodifikationen können grob in folgende drei Klassen unterteilt werden: 1) *rough-laminare* Kohlenstoffschicht (RL), 2) *smooth-laminare* Kohlenstoffschicht (SL), 3) isotrope Kohlenstoffschicht (ISO). Die Klassen haben unterschiedliche Polykristallstruktur (unterschiedliche Größe, Ausrichtung, Krümmung und Abstand der *Graphene*-Ebenen). Um eine erfolgreiche Modellierung des anisotropen Verhaltens von CFC-Werkstoffen zu erreichen, wurde ein hierarchisches Materialmodell vorgeschlagen, das aus 4 Hierarchieebenen besteht: *Nanoebene* $\leq 100\text{nm}$, *Mikroebene*, *Mesoebene*, *makroskopisches Bauteil*. Das Material wird hierbei auf jeder Hierarchieebene in einem repräsentativen Volumenelement (RVE) beschrieben.

Das RVE der *Mikroebene* wird durch eine beschichtete Faser des Verbundes repräsentiert. Die Pyrokohlenstoffschichten sind für jede Art des Pyrokohlenstoffs durch Integralgrößen der Struktur von der *Nanoebene* beschrieben. Um den Elastizitätstensor \bar{C} des Materials der *Mikroebene* zu definieren, wird eine Homogenisierung mit Hilfe der *Multi-Inclusion*-Methode [4,5] durchgeführt :

$$\bar{C} = C : \left\{ I^{4s} + \sum_{a=1}^4 f^a (S - I^{4s}) : (A^a - S)^{-1} \right\} : \left(I^{4s} + \sum_{a=1}^4 f^a S : (A^a - S)^{-1} \right)^{-1} \quad (1)$$

Das RVE der *Mesoebene* besteht aus mehreren beschichteten Fasern (*Mikroebene*) und Poren. Für den Werkstoff, der aus vielen Fasern mit dem jeweiligen Elastizitätstensor \bar{C} besteht, wird eine Homogenisierung mit Hilfe der *selbstkonsistenten* Methode [6] durchgeführt und der Elastizitätstensor \hat{C} berechnet.

$$\hat{C} = f^0 \bar{C} + (1 - f^0) C_k \quad (2)$$

Literatur

- [1] Benzinger W., Hüttinger K.L, Carbon , Vol. **31**, 1311-1322 (1999)
- [2] Savage G., Carbon-Carbon Composites, Chapman & Hall, London (1993)
- [3] Bouchard E., Etude par microscopie champ proche de la surface des fibres de carbon et de leur interface avec des matrices de pyrocarbone, L'Université Bordeaux I (1999)
- [4] S. Nemat-Nasser, M. Hori, Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials, Elsevier Science B.V. (1999)
- [5] T. Mura, Micromechanics of Defects in Solids, Martinus Nijhoff Publishers (1982)
- [6] B.Balendran, S. Nemat-Nasser, J.Mech.Phys.Solids, **43**, N.11, 1825 (1995)

METHODE DER BEWEGLICHEN ZELLULÄREN AUTOMATEN: NEUER ZUGANG ZUR MODELLIERUNG VON HETEROGENEN WERKSTOFFEN UNTER KOMPLEXEN BEANSPRUCHUNGEN

V.L. Popov¹, S. G. Psakhie²

¹Theoretische Physik, Universität Paderborn

²Institut für Festigkeitsphysik und Werkstoffkunde,
Russische Akademie der Wissenschaften, Tomsk

Die Methode der beweglichen zellulären Automaten (**M**ovable **C**ellular **A**utomata – **MCA**) dient zur numerischen Simulation komplexer Systeme, wie z.B. von Verbundwerkstoffen oder auch von technischen Konstruktionen: Gebäude, Brücken...

Theoretische Basis der Methode bilden zum einen die Kontinuumstheorie elastoplastischer Medien mit Mikrostruktur (Theorie der Cosserat Kontinua), zum anderen die Ideen der herkömmlichen Methode der zellulären Automaten.

Grundsteine der MCA-Methode:

- Das zu modellierende System wird als Gesamtheit diskreter Elemente – "Automaten" dargestellt.
- Deren Wechselwirkung wird aufgrund der Cosserat-Theorie so formuliert, daß das System im Bereich elastischer und kleiner plastischer Deformationen die Eigenschaften des Kontinuums exakt wiedergibt.
- Die "Umschaltregeln" für die Änderung der Zustände von Automaten-Paaren (gekoppelt – entkoppelt) werden unter der Berücksichtigung von Ideen der zellulären Automaten so formuliert, daß die für die Mesoteilchen-Methoden üblichen Schwierigkeiten weitgehend vermieden werden.

Im Gegensatz zu den herkömmlichen auf dem Kontinuums-Zugang basierenden Methoden, erlaubt die MCA-Methode solche Effekte wie die Generierung von Schäden, Bildung und Wachstum von Rissen, Effekte der mechanischen Mischung u.s.w. „direkt“ zu simulieren. Die durchgeführten Berechnungen zeigten gute Übereinstimmung mit Experimenten.

Die allgemeinen Ideen werden im Vortrag mit mehreren Simulationsbeispielen illustriert:

- Deformation und Bruchverhalten von metallischen und keramischen Werkstoffen
- Einfluß von Poren und Einschlüssen auf die Festigkeit der ZrO₂-Keramik
- Mechanisches Verhalten von Betonbauteilen
- Stoßwellenkompaktierung von Pulvergemischen
- Anwendungen in der Tribologie
- Anwendungen in der Bodendynamik

CRASH ENERGY MANAGEMENT ON THE BASE OF THE MOVABLE CELLULAR AUTOMATA METHOD

S.G. Psakhie

**Laboratory of Computer Aided Design of Advanced Materials
Institute of Strength Physics and Materials Science RAS
Tomsk, Russia**

One of the main problems of the modern technology consists in the increase of the viability of materials and structures under dynamic loading.

In general, a solution is the management of the transformation of the energy of loading to the energy of destroying of the least important parts and details of the structure. It has to be noted that a similar problem also exists in materials science, since a majority of modern composite materials is heterogeneous and thereby having a complex internal structure. To optimize this structure for a working under dynamic loading it is necessary to take into account the redistribution of the elastic energy (for instance, connected with phase transitions, generation and accumulation of micro-damages, etc) influences on changing the strength characteristics of a composite material under loading. As far as real failure experiments concerning complex objects are rather expensive and a getting of detailed information is often associated with essential difficulties, nowadays the methods of computer modeling on a continuum mechanical basis are used for solving similar problems. Although essential achievements have been obtained on the basis of these methods in the given area, the continuum approach has several restrictions connected first of all with the possibility of the description of a damage generation as well as an initiation and a development of cracks. These problems may be solved on the basis of the Movable Cellular Automata (MCA) method which has been successfully used for modeling the fracture of different types of composite materials and structures.

In this paper the behavior and the peculiarities of a failure of complex structures and composite materials under dynamic loading are studied on the basis of a computer modeling. The results show that even small changes of the internal structure sometimes lead to a significant increase of the viability of complex structures and composite materials. The reason is due to the elastic energy flux change during a dynamical loading.

This effect may be explained by the fact that elastic energy fluxes define the current stress concentration. Namely, because the area of inclusions is subjected by the largest displacement and due to a smaller Young's modulus of the inclusions the loading pulses are transferred towards the other parts of the sample. This leads to a "blurring" of the stress concentrators and to a conservation of the wholeness of the structure. In its turn, this leads to an essential rise of the threshold value of the "injected" energy, i.e. the energy absorbed by the structure before a loss of its carrying capacity. Practically, the elastic energy "circulates" in the structure until a stress concentrator appears the power of which will be sufficient for a formation of macro-cracks.

The results received demonstrate obviously a possibility of managing the fracture and raising viability of structures and heterogeneous materials by changing their internal structure and geometry, e.g. by entering of specific inclusions.

EIN NUMERISCHES SIMULATIONSMODELL ZUR QUANTIFIZIERUNG DER FESTIGKEIT VON FASERVERBUNDKUNSTSTOFFEN MIT LÖCHERN

R. Schäuble, M. Busch

**Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik,
Halle**

Zur Realisierung von Bolzen-, Niet- oder Schraubverbindungen zwischen FVK-Bauteilen müssen Löcher in das Laminat gebohrt werden. Diese Bohrungen stören jedoch die "Idealstruktur" der faserverstärkten Kunststoffe und führen hinsichtlich der mechanischen Bewertung zu immensen Schwierigkeiten. Sowohl an Laminaten mit unbelasteten (offenen) als auch belasteten (Krafteinleitung über den Bolzen) Löchern wurden zahlreiche Effekte der Festigkeit beobachtet, die von anderen, einfacher aufgebauten Materialien her nicht bekannt sind. So existieren beispielsweise deutliche Abhängigkeiten der Festigkeit von Lochdurchmesser, Lagenaufbau, Tapedicke und Beanspruchungsrichtung.

In gelochten Laminaten setzt unter Belastung bereits bei einem bezogen auf die Festigkeit niedrigen Lastniveau eine ausgedehnte Schädigung (Matrixbruch) in der Umgebung des Loches ein. Die lokale Schädigung kann sowohl belastungsverstärkend wirken als auch lokale Spannungskonzentrationen abbauen. Für eine Festigkeitsvorhersage müssen diese Schädigungsprozesse deshalb im Detail erfasst werden. Vorhersagen auf der Basis von Belastungsanalysen im ungeschädigten Material liefern in der Regel falsche Ergebnisse und zum Teil völlig falsche Trends. Berechnungen auf der Basis von Kontinuumsmodellen im homogenisierten Laminat führen ebenfalls nicht zum Erfolg.

Für die Vorhersage der Festigkeit unbelasteter, offener Löcher in FVK-Laminaten aus UD-Tapes wurde ein Modell entwickelt, das die verschiedenen Schädigungszustände in einem schrittweisen numerischen Simulationsverfahren berechnet. Das Material wird als bereichsweise homogenes, orthotropes und linear elastisches Kontinuum modelliert. Als materialeitige Eingangsgrößen müssen die effektiven Steifigkeiten und Festigkeiten der einzelnen UD-Schichten und der Laminataufbau bekannt sein. Auf der Basis der berechneten Spannungen und eines richtungsabhängigen Versagenskriteriums wird in jedem Simulations- bzw. Lastschritt lokales Versagen ermittelt. Die geschädigten Bereiche werden jeweils mit Hilfe eines geeigneten, richtungsabhängig geschwächten Ersatzmaterials im darauffolgenden Simulationsschritt modelliert.

Für eine Simulation der Schädigungsprozesse muss einerseits das FE-Modell für die numerische Analyse so detailliert beschaffen sein, dass alle für die Lastumverteilung im Laminat wesentlichen Schädigungen hinreichend genau approximiert werden können. Andererseits wird eine möglichst grobe Diskretisierung angestrebt, um den Rechenaufwand vertretbar zu halten. Zur Realisierung dieser beiden gegenläufigen Tendenzen wurden optimal an die Materialstruktur und die Schädigung angepasste, nichtkonforme FE-Vernetzungen entwickelt. Hierbei wird jede einzelne Lage unabhängig von den anderen optimal diskretisiert, danach werden die entsprechenden Lagen über Constraint-Gleichungen "verkoppelt". Gleichzeitig lassen sich auf diese Weise FE-Modelle für allgemeine Lagenanordnungen mit beliebigen Faserorientierungen realisieren. Für die Umsetzung des Verfahrens in Form eines anwenderfreundlichen Tools wurde ein Simulationsalgorithmus mit einer automatisierten Netzzerstellung erarbeitet.

Zur Verifikation des Berechnungsverfahrens standen experimentelle Ergebnisse für eine Vielzahl von Parametervarianten zur Verfügung. Die beobachteten Abhängigkeiten der Kerbzugfestigkeit gelochter Laminat aus UD-Tapes von Lochdurchmesser, Tapedicke, Lagenaufbau und Belastungsrichtung werden mit der vorgestellten Methode korrekt berechnet.

BESTIMMUNG VON DELAMINATIONSSCHÄDEN IN CFK- VERBUNDWERKSTOFFEN

W. Weikl, H. Andrä und E. Schnack

**Institut für Technische Mechanik
Universität Karlsruhe (TH)**

Delaminationen stellen einen häufigen und entscheidenden Versagensmechanismus für geschichtete Verbundwerkstoffe dar. In derart vorgeschädigten Materialien sind insbesondere die Größe und (Zwischenschicht-)Lage der Delamination ausschlaggebend für die verbleibende Restfestigkeit des Bauteils. Die zerstörungsfreie, quantitative Identifikation solcher innerer Schädigungen besitzt somit ein großes Anwendungspotential, etwa in der Luft- und Raumfahrtindustrie.

Ausgangspunkt des im Vortrag vorgestellten Prüfverfahrens sind shearografische Messungen der Oberflächendeformation einer geschädigten Probe unter definierter Belastung. Dadurch liegen an Teilen der äußeren Oberfläche sowohl Verschiebungs- als auch Randspannungsdaten vor (vollständige Cauchy-Daten). Bei Vorhandensein von Delaminationen sind an den geschädigten Bereichen im Inneren zusätzliche (spannungsfreie) Randflächen vorhanden, die experimentell nicht direkt zugänglich sind. Ziel des vorgestellten Verfahrens ist es, mit Hilfe der vollständigen äußeren Randdaten die Lage und Berandung der Delaminationsbereiche im Inneren zu bestimmen.

Im ersten Teil des Vortrags wird eine kurze Beschreibung der shearografischen Messtechnik mit Beispielen gegeben. Bei Verwendung der digitalen Shearografie in Verbindung mit der Phasenschiebetechnik können auf den untersuchten Oberflächen pixelgenaue Verschiebungsinformationen erhalten werden.

In einem zweiten Teil werden die mathematischen Eigenschaften der Problemstellung erläutert und numerische Verfahren zur Lösung dieses inversen Problems vorgestellt und diskutiert. Die Bestimmung der Delaminationsberandung geschieht dabei über die näherungsweise Berechnung der Verschiebungssprünge auf den geschädigten Zwischenflächen. Bei einfachen Spezialfällen kann hierfür als direktes Lösungsverfahren das Reciprocity-Gap-Konzept (1) verwendet werden. Für den allgemeinen Fall wird ein iteratives Verfahren vorgestellt, für welches auch erste numerische Ergebnisse unter Verwendung von FEM und BEM präsentiert werden.

Literatur

- [1] Andrieux, S. and Ben Abda, A., Identification de fissures planes par une donnée de bord unique: une procédé direct de localisation et d'identification, C. R. Acad. Sci. Paris, Série I, 315, 1323-1328, (1992).

TEILNEHMERLISTE

| | | |
|-------------------|-----------------|---|
| Andrä | Heiko | Dr.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe Heiko.Andrae@mach.uni-karlsruhe.de |
| Andrianov | Igor | Prof. Dr. Willi-Suth-Allee 28 50769 Köln |
| Dimitrov | Atanas | Prof. Dr. Universität Karlsruhe Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe Atanas.Dimitrov@mach.uni-karlsruhe.de |
| Dimitrov | Slav | Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe slav_dimitrov@usa.uet |
| Draht | Torsten | Dipl.-Ing. LWF, Werkstoff- und Fügetechnik FB 10 Universität Paderborn Warburger Str. 100 33095 Paderborn torsten.draht@lwf.uni-paderborn.de |
| Dreyer | Wolfgang | Dr. rer. nat. habil. Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik Mohrenstr. 39 10117 Berlin dreyer@wias-berlin.de |
| Eschenauer | Hans A. | Prof. Dr.-Ing. Forschungszentrum für Multidisziplinäre Analysen u. Angewandte Struktur-optimierung FOMAAS Universität Siegen Am Herrengarten 3 57068 Siegen esch@fb5.uni-siegen.de |

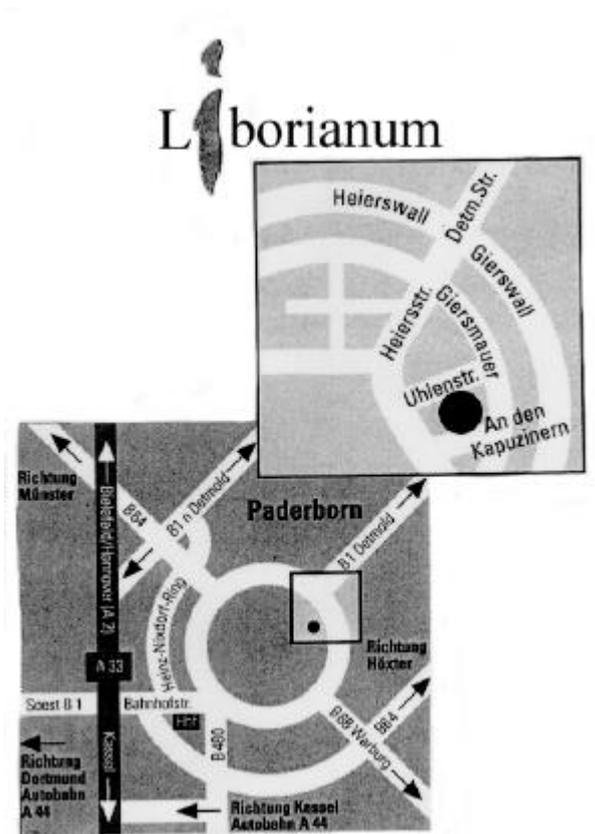
| | | |
|------------------|-------------------|---|
| Ferber | Ferdinand | Dr.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität-GH Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jferb1@ltm.uni-paderborn.de |
| Fortmeier | Manfred | Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität-GH Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jfort1@ltm.uni-paderborn.de |
| Frenz | Sabine | Dip.-Ing. (FH) Institut für Allgemeine Mechanik RWTH Aachen Templergraben 64 52056 Aachen frenz@iam.rwth-aachen.de |
| Hachemi | Abdelkader | Dr.-Ing. Institut für Allgemeine Mechanik RWTH Aachen Templergraben 64 52056 Aachen |
| Hahn | Ortwin | Prof. Dr.-Ing. LWF, Werkstoff- und Fügetechnik FB 10 Universität-GH Paderborn Warburger Str. 100 33095 Paderborn |
| Hansel | Wilfried | Dipl.-Ing. Universität GH Siegen Institut für Mechanik und Regelungstechnik Paul-Bonatz-Str. 9-11 57076 Siegen Hansel@FB5.Uni-Siegen.de |
| Hauck | Torsten | Dr.-Ing. Geschäftsbereich Halbleiter MOTOROLA GmbH/AISL Europe Schatzbogen 7 81829 München Torsten.Hauck@Motorola.com |

| | | |
|-----------------|---------------------------|--|
| Herrmann | Klaus | Prof. Dr.rer. nat. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität-GH Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jherr1@ltm.uni-paderborn.de |
| Hohe | Jörg | Dr.-Ing. Institut für Mechanik und Regelungstechnik Universität-GH Siegen Paul-Bonatz-Str. 9-11 57068 Siegen hohe@imr-sun4.fb5.uni-siegen.de |
| Kobelev | Vladimir | Dr. rer. nat. Firma Muhr und Bender Postfach 360 57427 Attendorn vladimir.kobelev@mubea.com |
| Koyro | Martin | Dipl.-Ing. LWF, Werkstoff- und Fügetechnik FB 10 Universität Paderborn Warburger Str. 100 33095 Paderborn martin.koyro@lwf.uni-paderborn.de |
| Kromholz | Andreas | Dipl.-Phys. Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Heideallee 19 06120 Halle kro@iwmh.fhg.de |
| Langhoff | Tom- Alexander | Dipl.-Phys. Institut für Technische Mechanik/Festig- keitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe Tom-Alexander.Langhoff@mach.uni- karlsruhe.de |

| | | |
|--------------------|--------------------|--|
| Linnenbrock | Klaus | Dipl.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität-GH Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jlinn1@ltm.uni-paderborn.de |
| Maier | Hans Jürgen | Prof. Dr.-Ing. Lehrstuhl für Werkstoffkunde (LWK) FB 10 Universität-GH Paderborn Warburger Str. 100 33095 Paderborn |
| Marotzke | Christian | Dr.-Ing. Fachgruppe VI. 2 BAM Unter den Eichen 87 12205 Berlin christian.marotzke@bam.de |
| Matczynski | Marek | Dozent Dr. rer. nat. Institute of Fundamental Technol. Research Swietokrzyska 21 PI-00-901 Warschau |
| Neumann | Stefan | Dipl.-Math. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität-GH Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jneum1@ltm.uni-paderborn.de |
| Nguyen | Van Son | Dipl.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität-GH Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jnguy1@ltm.uni-paderborn.de |
| Piat | Romana | Universität Karlsruhe Institut für Technische Mechanik Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe Romana.Piat@mach.uni-karlsruhe.de |

| | | |
|-------------------|-----------------|---|
| Popov | Valentin | Prof. Dr. Theoretische Physik, FB 6 Universität-GH Paderborn Warburger Str. 100 33095 Paderborn |
| Psakhie | Serguei | Prof. Dr. Institute of Strength Physics and Materials Science, RAS Russian Academy of Sciences Pr. Academichesky 2/1 634021 Tomsk Russia itech@ispms.tsc.ru |
| Schäuble | Ralf | Dipl.-Ing. Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Heideallee 19 06120 Halle |
| Schnack | Eckart | Prof. Dr.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festig- keitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe eckart.schnack@mach.uni-karlsruhe.de |
| Vollertsen | Frank | Prof. Dr.-Ing. Lehrstuhl für Fertigungstechnik (LUF) FB 10 Universität Paderborn Warburger Str. 100 33095 Paderborn jvol1@mises.uni-paderborn.de |
| Weikl | Wolfgang | Dipl.-Phys. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe wolfgang.weikl@mach.uni-karlsruhe.de |

INFORMATION



KONTAKTADRESSE

Laboratorium für Technische Mechanik

Universität-GH-Paderborn

Pohlweg 47-49

33098 Paderborn

Tel.: +49-5251-60-2284

Fax: +49-5251-60-3483

email: jherr1@ltm.uni-paderborn.de

www: [http://wwwfb10.uni-](http://wwwfb10.uni-paderborn.de/LTM/Forschung/Workshops/AGC_2000/agc_2000.htm)

[paderborn.de/LTM/Forschung/Workshops/AGC_2000/agc_2000.htm](http://wwwfb10.uni-paderborn.de/LTM/Forschung/Workshops/AGC_2000/agc_2000.htm)

TAGUNGSADRESSE

Liborianum Paderborn

An den Kapuzinern 5-7

33098 Paderborn

Tel.: +49-5251-121-3

Fax: +49-5251-121-555

Tagungsbüro: +49-5251-121-442

INDEX

A

Andrä · 9, 16, 26, 28
Andrianov · 3, 8, 28

B

Becker · 12, 14
Busch · 25

D

Dimitrov · 3, 9, 28
Draht · 28
Dreyer · 3, 10, 20, 28

E

Eschenauer · 28

F

Ferber · 13, 29
Fortmeier · 29
Frenz · 29

G

Goswami · 14

H

Hachemi · 4, 11, 29
Hahn · 29
Hampe · 18
Hansel · 4, 12, 29
Hauck · 4, 13, 29
Herrmann · 3, 13, 20, 21, 30
Hohe · 3, 14, 30

I

Ivers · 18

K

Kobelev · 4, 15, 30

Koyro · 30
Kromholz · 30

L

Langhoff · 5, 16, 30
Larichev · 15
Linnenbrock · 13, 31

M

Maier · 4, 17, 31
Marotzke · 4, 18, 31
Martynyak · 19
Matczynski · 3, 31
Matczyński · 19
Müller · 10, 20, 21

N

Neumann · 4, 20, 31
Nguyen · 5, 21, 31

P

Piat · 3, 22, 31
Popov · 3, 23, 32
Psakhie · 3, 23, 24, 32

R

Rudolph · 18

S

Schäuble · 3, 25, 32
Schnack · 3, 9, 16, 26, 32
Schwabe · 11

V

Vollertsen · 32

W

Weichert · 11
Weikl · 4, 26, 32

NOTIZEN

