



**LABORATORIUM FÜR TECHNISCHE MECHANIK
UNIVERSITÄT PADERBORN**



**14. Workshop
Composite Forschung in der Mechanik
04. - 05. Dezember 2001
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, 04. Dezember 2001

9.00 Eröffnung

SEKTION I: Analytisch-numerische Methoden

(Chairman: E. Schnack)

9.10-9.30 **S. Neumann**, Paderborn: "Ein Vergleich verschiedener DFT basierter Ansätze zur Spannungs-Dehnungsberechnung bei Verbundwerkstoffen"

9.35-9.55 **W.H. Müller**, Berlin: "A convergence study of stress/ strain calculations for composites using discrete Fourier transforms"

10.00-10.20 **H. Andrä**, Kaiserslautern: "Effektive Elastizitätseigenschaften aus Mikrostruktursimulationen"

10.25-10.40 Kaffeepause

SEKTION II: Analytisch-numerische Methoden

(Chairman: W. H. Müller)

10.45-11.05 **A. Dimitrov**, Karlsruhe: "3D-Singularitäten bei Verbundwerkstoffen"

11.10-11.30 **Ch. Marotzke**, Berlin: "Rißphänomene in Modell Composites"

11.35-11.55 **V. Loboda**, Paderborn: "On a possible transition from a perfect thermal contact to a separation in an anisotropic bimaterial"

12.00-12.20 **M. Matczyński**, Warschau: "Thermoelastic problem of a closed interphase crack"

12.25-14.00 Mittagspause

SEKTION III: Mechanisches und thermisches Verhalten von Composites

(Chairman: K.P. Herrmann)

- 14.10-14.30 **W. Dreyer**, Berlin: "Metastabilität"
- 14.35-14.55 **S. Dimitrov**, Karlsruhe: "Computational aspects in the modelling of the thermomechanical behaviour of elastic perfectly plastic materials with damage"
- 15.00-15.20 **L. Juhász**, Karlsruhe: "Modeling of the mechanical behavior of shape memory alloys under general non-proportional thermomechanical loadings"
- 15.25-15.50 Kaffeepause

SEKTION IV: Verbundwerkstoffe als Konstruktionswerkstoffe

(Chairman: Ch. Marotzke)

- 15.55-16.15 **V.L. Popov**, Paderborn: "Mikro- und Nanoskala-Simulationen von Reibung und Verschleiß in Verbrennungsmotoren und in Rad-Schiene-Kontakten"
- 16.20-16.40 **W. Hansel**, Siegen: "Lagenweise Topologieoptimierung von Laminatstrukturen mit Hilfe genetischer Algorithmen"
- 16.45-17.05 **J. Hohe**, Siegen: "Bestimmung der effektiven Biegesteifigkeit von Sandwichplatten mit direkten Verfahren und Zweischritt-Methoden"
- 17.10-17.30 **T. Westphal Jr.**, Karlsruhe: "Von Kirchhoff und Reissner zur Elastizitätstheorie. Eine hierarchische Integralgleichungsformulierung für Plattenbiegungsmodelle"
- 18.30 Abendessen im Liborianum

Mittwoch, 5. Dezember 2001

SEKTION V: Mechanisches Verhalten und Experimentelle Methoden

(Chairman: V.L. Popov)

- 9.00-9.20 **J. Woltersdorf**, Halle (Saale): "Compositgrenzflächen nach Maß durch atomares Design"
- 9.25-9.45 **W. Weikl**, Karlsruhe: "Quantitative Bestimmung von Delaminationsschäden mit dem neuen Verfahren AICRA"
- 9.50-10.10 **V. V. Danishevs'kyi**, Dnepropetrovsk: "Analogy between asymptotic evaluations of transport and elastic properties of fibre-reinforced composite materials"
- 10.15-10.35 Kaffeepause
- 10.40-11.00 **T.-A. Langhoff**, Karlsruhe: "Ein freies Randwert-Problem bei der Modellierung der chemischen Gasphaseninfiltration"
- 11.05-11.25 **R. Piat**, Karlsruhe: "Ein Materialmodell für Pyrokohlenstoff"
- 11.30 Schlußwort
- 12.15-14.00 Mittagessen im Liborianum

ABSTRACTS

EFFEKTIVE ELASTIZITÄTSEIGENSCHAFTEN AUS MIKROSTRUKTURSIMULATIONEN

H. Andrä, V. Rutka und A. Wiegmann

Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern

Im Vortrag wird eine verbesserte Methode zur Berechnung von statistischen Materialeigenschaften für poröse Werkstoffe und Verbundwerkstoffe vorgestellt. Unter statistischen Materialeigenschaften sind gemittelte Eigenschaften für ein repräsentatives Volumenelement (RVE) oder Subsystem zu verstehen. Die Methode kann für thermische, elastische und akustische Eigenschaften eingesetzt werden, und stellt eine Alternative zu analytischen Näherungsmethoden [1] dar. Der Vortrag beschränkt sich auf elastische Materialeigenschaften.

Ausgangspunkt sind räumliche Abbildungen der Mikrostruktur des zu betrachtenden Materials. Derartige Abbildungen können mit Hilfe der Röntgen-Mikrotomographie (XCT) erzeugt werden. Der komplizierte erste Schritt ist die automatische Vernetzung auf Basis der XCT-Grauwertbilder, so dass die Elemente (Tetraeder) des Netzes jeweils vollständig in einer Komponente des Materials liegen. Im nächsten Schritt wird das Spannungs-Verzerrungs-Feld für einen speziell gewählten Satz von Cauchy-Daten (beispielsweise mit FEM) numerisch berechnet. Danach werden aus den numerischen Lösungen mit sogenannten Äquivalenzprinzipien die gemittelten Elastizitätseigenschaften berechnet. Letztere können schließlich für Simulationen des Verhaltens des makroskopischen Bauteils eingesetzt werden.

Gegenüber bisherigen ähnlichen Methoden wird ein größeres RVE betrachtet, in dem keine idealisierte, sondern die reale Mikrostruktur berücksichtigt wird. Dadurch ist der numerische Aufwand zwar höher, jedoch wesentlich geringer als bei der vollständigen Erfassung der Mikrostruktur im gesamten Bauteil. Numerische Beispiele demonstrieren die Eigenschaften der Methode. Schließlich wird auf den Zusammenhang mit *Multiscale-Finite-Element-Methoden* [2] eingegangen.

Literatur:

- [1] Y. Grabovsky, G. W. Milton, and D. S. Sage: Exact relations for effective tensors of composites: Necessary and sufficient conditions. *Comm. Pure Appl. Math.* **53**, 300-353 (2000).
- [2] T. Y. Hou, X. H. Wu, and Z. Cai: Convergence of a multiscale finite element method for elliptic problems with rapidly oscillating coefficients. *Math. Comp.* **68**, 913-943 (1999).

ANALOGY BETWEEN ASYMPTOTIC EVALUATIONS OF TRANSPORT AND ELASTIC PROPERTIES OF FIBRE-REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

I. V. Andrianov, V. V. Danishevs'kyy, D. Weichert

Pydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Dnepropetrovsk, Ukraine

Institute of General Mechanics, RWTH Aachen

The theoretical determination of effective properties is one of the important problems of the theory of composite materials. A lot of results are obtained for transport coefficients, such as electrical and thermal conductivities, magnetic permeability, dielectric constants and so on. Evaluating the elastic moduli in many cases is more difficult. This is not surprising because from the mathematical point of view transport problems are considerably simpler than elasticity problems since vectors take place instead of the second order tensors and the scalar Laplace equation takes place instead of the vectorial displacement equations of the elasticity theory. Hence, an intriguing question arises: can the calculations of different effective properties be linked? Can the determination of transport coefficients provide us with valuable informations about elastic moduli?

In some instances the answer can be alleviated by an asymptotic simplification of the governing elasticity equations. We consider the plane strain deformation of two-component periodical composites with fibrous inclusions. For most of real materials Poisson's ratios of the matrix μ_m and of the inclusions μ_{in} belong to the interval $\mu_m, \mu_{in} = 0 \dots 1$. This allows to introduce natural small parameters

$$\varepsilon_m = (G_m/B_m)^{1/2}, \quad \varepsilon_{in} = (G_{in}/B_{in})^{1/2} \quad (1)$$

where $B_m = E_m/(1-\mu_m^2)$, $B_{in} = E_{in}/(1-\mu_{in}^2)$; G_m , G_{in} and E_m , E_{in} are shear and Young's moduli of the components. The solution of the input plane strain problem is searched as asymptotic series in powers of ε_m , ε_{in} . We also introduce affine transformations of co-ordinates which lead to a change of the geometry of the composite structure. Then in the first approximation by ε_m , ε_{in} we come to two boundary value problems mathematically identical to the transport problem. Within the accuracy of the realized asymptotic procedure we can conclude that effective elastic moduli of the original composite material may be evaluated in the same mathematical way as effective transport coefficients of the composite structure with changed geometry.

As an illustrative example we study a composite with square check-board structure. Evaluations of its elastic moduli are shown to be analogous to the evaluation of transport coefficients of a rectangular check-board field. Analytical formulas for effective elastic constants are derived.

This work has been supported by the Alexander von Humboldt Foundation (for V. V. Danishevs'kyy).

References

- [1] Danishevs'kyy V., Weichert D., Andrianov I.: Asymptotic evaluation of effective elastic moduli of periodical composite materials. Abstracts of the 1st SIAM-EMS Conference "Applied Mathematic in our Changing World", Berlin, Germany, 78., (2001).
- [2] Andrianov I., Danishevs'kyy V., Starushenko G., Tokarzewski S.: Asymptotic representation for effective heat conductivity of a composite material with cylindrical inclusions of rhombic cross section. *Mechanics of Solids* **35**, No.4, 73-82, (2000).
- [3] Andrianov I., Starushenko G., Danishevs'kyy V., Tokarzewski S.: Homogenization procedure and Padé approximants for effective heat conductivity of composite materials with cylindrical inclusions having square cross section. *Proc. R. Soc. Lond. A* **455**, 3401-3413, (1999).

3D-SINGULARITÄTEN BEI VERBUNDWERKSTOFFEN

A. Dimitrov, H. Andrä, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe

Es ist bekannt, dass die Lösung eines linear-elastischen Problems Gradientsingularitäten aufweisen kann, die nicht vom Typ $r^{0.5}$ sind [2]. 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 einer Potenzreihe

$$\mathbf{u} = \sum_i \sum_{k=0}^{k_i} r^{\lambda_i} \ln^k(r) \mathbf{f}_{ik}(\theta, \varphi)$$

bezüglich eines Kugel-Koordinatensystems mit 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

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

aus dem die gesuchten Singulärexponenten λ_i und Winkelfunktionen \mathbf{f}_{ik} als Eigenwerte bzw. Eigenvektoren berechnet werden können. Für die effektive Lösung dieses Eigenwertproblems wird zunächst eine Linearisierung sowie eine Spektraltransformation durchgeführt. Anschließend wird das transformierte lineare Eigenwertproblem iterativ mit Hilfe der Arnoldi-Methode gelöst. Der größte Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass keine explizite Berechnung der vollbesetzten Umkehrmatrix 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 Singulärexponenten und Winkelfunktionen in Abhängigkeit von Geometrieparametern und 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*, **52**, 805-827, (2001).
- [2] D. Leguillon and E. Sanchez-Palencia: *Computation of Singular Solutions in Elliptic Problems and Elasticity*. Masson, John Wiley, Paris, (1987).

**COMPUTATIONAL ASPECTS IN THE MODELLING
OF THE THERMOMECHANICAL BEHAVIOR
OF ELASTIC PERFECTLY PLASTIC MATERIALS WITH DAMAGE**

S. Dimitrov, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe (TH)

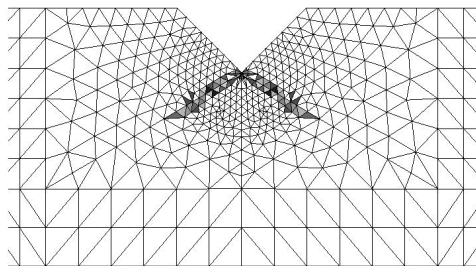


Fig. 1 Damage evolution in a V-notch tip

The process of deformation in elastoplastic bodies with concave regions is attributed with an local instability generated by thermal softening. The physical complexity and heterogeneity of such elastoplastic thermomechanical phenomena invokes a modelling approach based on three different formalisms: quasistatic elastoplasticity, continuum damage mechanics and theory of heat conduction. Additional complications arise from the singularity in the stress-strain field at the tip of the concave region. Mathematical and numerical aspects of the

quasistatic problems in elastoplasticity have been a subject of attention since 1972. In the famous contribution [1], the *Duvaut-Lions* model - recently extended [2] - allows a solution in two phases: firstly, excluding the strain rates, and contract the problem in a variational inequality on a time dependent convex set, and secondly - solution for the strain derivatives. Following this concept, *Simó et al* [4] reformulate the complicating variational inequality from the first stage in a more simple consistent variational framework. Realised in such a manner the formalism stands as a basis for the numerical solution of primal problems in elastoplasticity allowing in addition the introduction of the multiscale treatment. The need of the multiscale treatment comes from the inability of the most empirical conditions and relations to define the development of local rupture (deterioration) in complex situations like mentioned in the beginning. The tool for the modelling of the evolution of a gradual deterioration up to a mesocrack initiation is the continuum damage mechanics [3]. The aim of the following contribution is to present our current state in modelling the thermomechanical behaviour of an elastic-perfectly plastic case when a mesoscale damage develops at the tip of the V-notch.

References:

- [1] G. Duvaut, and J.-L. Lions, *Les Inequations en Mecanique et en Physique*, Dunod, Paris, (1972).
- [2] C. Jonson, A mixed finite element for plasticity, *SIAM Journal of Numerical Analysis*, 14, 575-583, (1977).
- [3] T. Zohdi, M. Feucht, D. Gross, and P. Wriggers, A description of macroscopic damage through microstructural relaxation, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 43, 493-506, (1998).
- [4] J. C. Simo, J. G. Kennedy, and R. L. Taylor, Complementary mixed finite element formulations of elastoplasticity, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 74, 177-206, (1988).

METASTABILITÄT

W. Dreyer

Weierstrass Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, Berlin

Diese Studie ist der Stabilität von Kompositen gewidmet, die aus mehreren Phasen bestehen.

Beispiele hierfür sind:

1. In eutektischen Zinn/Blei Lotverbindungen gibt es einen Mix aus zinnreichen und bleireichen Gebieten der unterschiedlichsten geometrischen Form. Aufgrund von Temperaturänderungen und mechanischen Belastungen kommt es zu Umwandlungen.
2. Eutektische Zinn/Silber Lotverbindungen enthalten intermetallische Ag_3Sn Ausscheidungen in Form von Kugeln oder Stecknadeln.
3. Einkristallines Galliumarsenid, (GaAs), wird als Wafermaterial in der Mikroelektronik eingesetzt. Die benötigten elektrischen Eigenschaften werden durch Arsendotierung erreicht, wodurch es aber bei Wärmebehandlung oberhalb der eutektischen Temperatur zur Bildung von flüssigen Arsentropfen in der festen Galliumarsenidmatrix kommt.
4. Ein alltägliches Komposit ist Nebel, der aus flüssigen Tropfen in Kontakt mit Dampf besteht.

Die Phasen der beschriebenen Beispiele sind nun aber nicht absolut stabil, sondern es sind sogenannte metastabile Phasen, worunter wir Stabilität für eine endliche Zeit verstehen. Die endliche Lebensdauer einer metastabilen Phase hängt ab von der freien Energiebarriere, die die metastabile Phase von der absolut stabilen Phase trennt und von den von außen aufgeprägten Randbedingungen.

Beispielsweise wissen wir, daß ein Wassertropfen mit Radius r , der in Kontakt mit Wasserdampf steht, eigentlich stationär nicht existieren kann. Es gibt einen kritischen Radius r_c , und für $r < r_c$ löst sich der Tropfen auf, während er für $r > r_c$ wächst, bis nur noch Flüssigkeit vorliegt. Allerdings wissen wir auch, daß Nebel, welcher aus vielen derartigen Tropfen besteht, für eine gewisse Zeit stabil sein kann. Die Lebensdauer einer metastabilen Phase kann sogar größer sein als die Einsatzzeit des Komposites in einem technischen Prozeß.

Die verschiedenen Facetten der Metastabilität werden an Hand der genannten Beispiele aufgezeigt. Insbesondere werden einfache Lebensdauerberechnungen von metastabilen Phasen durchgeführt und diskutiert.

LAGENWEISE TOPOLOGIEOPTIMIERUNG VON LAMINATSTRUKTUREN MIT HILFE GENETISCHER ALGORITHMEN

W. Hansel , W. Becker

**Institut für Mechanik und Regelungstechnik – Mechatronik,
Universität Siegen**

Der Einsatz von Hochleistungsverbundstrukturen aus unidirektional verstärkten CFK-Einzelschichten ist innerhalb des Leichtbaus der Luft- und Raumfahrt fest etabliert. Wegen ihrer gewichtsspezifischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften bieten sie gegenüber herkömmlichen isotropen Leichtbauwerkstoffen enorme Vorteile.

Zur Ermittlung gewichtsminimaler Laminatstrukturen unter Berücksichtigung von Festigkeitsrestriktionen bietet die „Lagenweise Topologieoptimierung“, bei der die Zusammenhangseigenschaften der Laminatstruktur in der Art variiert werden, dass das Material in schwach belasteten Bereichen vollständig entfernt wird und in stark belasteten Bereichen vollständig erhalten bleibt, ein großes Einsparpotential. Mit Hilfe eines heuristischen Optimierungsalgorithmus' lassen sich mit relativ wenig Rechenaufwand dem Kraftflussverlauf optimal angepasste Strukturen bestimmen. Wegen der heuristischen Entscheidungskriterien gelangt man jedoch immer zu ähnlichen Optimalstrukturen, die aber nicht unbedingt das globale Optimum darstellen müssen. Herkömmliche gradientenbasierte Optimierungsverfahren, die die Sensitivitäten der Ziel- und Restriktionsfunktionen bezüglich der Designvariablen benötigen, versagen häufig bei dieser Art von Optimierungsproblemen. Eine Alternative bieten die Verfahren der Evolutionstheorie, die den biologischen Evolutionsprozess nachbilden. Durch eine Art stochastische Zufallssuche wird versucht zu verbesserten Entwürfen zu gelangen. Dadurch ist es dann auch möglich, aus einem einmal gefundenen lokalen Minimum wieder heraus zu kommen und zu einem besseren Design zu gelangen. Der Nachteil dieser Verfahren liegt allerdings darin, dass zur Ermittlung des Optimalentwurfs eine Vielzahl von Funktionsauswertungen benötigt wird, was zu einer Erhöhung der Rechenzeit führt.

Für eine Topologieoptimierung mit einer 0/1-Materialverteilung eignen sich dabei vor allem die Genetischen Algorithmen bei denen der genetische Code ebenfalls in binären Vektoren mit den Werten 0 und 1 abgespeichert wird. Nach dem DARWINSchen "Survival of the fittest"-Prinzip wird dann der biologische Evolutionsprozess nachgebildet. Aus einer Population von n Individuen werden die Besten ausselektiert und in weiteren auf dem Zufallsprinzip basierenden Arbeitsschritten, wie z.B. Mutation und Crossover, zu neuen Individuen zusammengesetzt. Da ein konventioneller Genetischer Algorithmus sehr viele Strukturanalysen benötigt, wird der Genetische Algorithmus mit dem Heuristischen kombiniert. Durch diesen hybriden Ansatz lässt sich die Gesamtzahl der erforderlichen Strukturanalysen deutlich reduzieren.

Literatur:

- [1] Hansel, W.; Becker, W.: *An Evolutionary Algorithm for a Layerwise Topology Optimization of Laminates*, *Advanced Engineering Materials*, **7**, 427-430, (2000).
- [2] Holland, J.H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, (1975).
- [3] Xie, Y.M.; Steven, G.P.: *A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization*, *Computers and Structures*, **49**, 885-896, (1993).

BESTIMMUNG DER EFFEKTIVEN BIEGESTEIFIGKEIT VON SANDWICHPLATTEN MIT DIREKTEN VERFAHREN UND ZWEISCHRITT-METHODEN

J. Hohe

Institut für Mechanik und Regelungstechnik, Universität Siegen

Die Analyse und Berechnung von Sandwichtragwerken mit zweidimensionalem Zellkern erfolgt aus Gründen der numerischen Effizienz üblicherweise nicht mit einem dreidimensionalen Modell sondern im Rahmen einer geeigneten Platten- oder Schalentheorie. Die Bestimmung der effektiven Platten- bzw. Schalensteifigkeiten wird hierbei in der Regel in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt werden die dreidimensionalen Effektiveigenschaften der einzelnen Lagen des Verbundes bestimmt. Im zweiten Schritt erfolgt die Projektion der dreidimensionalen Stoffgesetze auf die Referenzfläche.

Für Flächentragwerke mit einer ausgeprägten Mikrostruktur einer oder mehrerer Lagen liefert dieses Zweischritt-Verfahren jedoch inkorrekte Ergebnisse, wenn die charakteristische Länge der Mikrostruktur und die Dicke des Tragwerks in derselben Größenordnung liegen. (Kohn und Vogelius [1], Lewinski [2]). Im Bereich der Sandwichtragwerke wird dieser Effekt durch eine gegenseitige Verspannung der einzelnen Lagen im deformierten Zustand hervorgerufen. Diese Verspannung wirkt sich bei Zug- und Biegedeformation unterschiedlich auf das effektive Deformationsverhalten aus, was im Rahmen des Zweischritt-Verfahrens nicht adäquat berücksichtigt wird.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Untersuchung und Quantifizierung dieses Effektes. Hierzu werden die effektiven Plattensteifigkeiten eines Sandwichtragwerks vergleichend mit dem herkömmlichen Zweischritt-Verfahren und auf direktem Weg ermittelt. Die Homogenisierung erfolgt in beiden Fällen mit Hilfe eines verzerrungsenergiebasierten Verfahrens. Dieses definiert die mechanische Äquivalenz eines repräsentativen Volumen- bzw. Flächenelementes für die gegebene Mikrostruktur und eines gleichartigen, aus dem effektiven Medium bestehenden Volumen- bzw. Flächenelements dadurch, dass sich bei äquivalenter Deformation beider Elemente die gleiche Verzerrungsenergie ergeben muss. Deformationszustände werden in diesem Zusammenhang als äquivalent angesehen, wenn das Integralmittel des jeweils verwendeten Verzerrungsmaßes gleich ist. Die Berechnung der Verzerrungsenergie kann hierbei sowohl analytisch als auch numerisch erfolgen.

In einer Reihe von Parameterstudien anhand von Sandwichplatten mit Hexagonal- und Tubuskern zeigt sich, dass beide Verfahren bei der Ermittlung der effektiven in-plane Steifigkeiten gleichwertig sind, während sich bei den effektiven Biegesteifigkeiten teilweise erhebliche Abweichungen zeigen.

Literatur:

- [1] Kohn, R.V. and Vogelius, M: *A new model for thin plates with rapidly varying thickness*, Int. J. Solids Struct. **20**, 333-350, (1984).
- [2] Lewinski, T: *Effective stiffnesses of transversely non-homogeneous plates with unidirectional periodic structure*, Int. J. Solids Struct. **32**, 3261-3287, (1995).
- [3] Hohe, J: *Effect of Core and Face Sheet Deformation Constraints on the Macroscopic Bending Stiffness of Structural Sandwich Panels*, Bericht, Universität Siegen, Institut für Mechanik und Regelungstechnik, (2001).

MODELLING OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF SHAPE MEMORY ALLOYS UNDER GENERAL NON PROPORTIONAL THERMO-MECHANICAL LOADINGS

L. Juhász, E. Schnack

Institute of Solid Mechanics, University of Karlsruhe

A new continuum model for the description of the general mechanical behaviour of polycrystalline Shape Memory Alloys (SMA) is introduced in order to represent some particular 3D-effects not described by the usual plasticity like macroscopic models (e.g. reorientation under general loadings). SMA combine sensor and actuator functions and thus belong to the so-called smart materials like piezoelectric and magnetostrictive materials. Most SMA are biocompatible, have a large extensibility (up to 10% reversible strain), but on account of their high price they are used essentially in medical technology and in other high-tech applications. Since SMA are not only an interesting interdisciplinary research topic but have also a high economical potential, such materials have found more and more industrial applications in recent years. The increasing complexity in contemporary devices invokes a more general mechanical description of the behaviour of SMA. Most models described in the literature are limited to proportional loadings which also strongly restricts their practical use. The assumption of proportional loadings is taken in order to apply the more-dimensional evolution of the transformation induced strain tensor (TIS) to the one-dimensional case. In these models the direction of the evolution of the TIS is approximated by the stress direction, and the evolution of the oriented martensitic phase is defined by the one-dimensional phase diagram (Brinson, 1993; Tanaka, 1986).

The model describes qualitatively correct the one-way and the pseudoelastic shape memory effects as well as their transient effects under reorientation of the martensite by arbitrary thermomechanical loadings. The main idea for the description of the phase change and the martensite reorientation consists of the assumption that the driving forces of the phase transformation depend on both the actual stress state and the TIS. In order to describe the change of the martensite structure the TIS is used as a tensorial internal variable. The evolution of the TIS is described by a new evolution equation without using a plastic analogy. The questions of the definition of the evolution direction as well as of the thermodynamical consistency are discussed in detail. Numerical results are presented in order to show typical problems of nonproportional loadings. A FEM discretisation was applied in order to solve practical problems with high complexity.

Keywords: polycrystalline SMA; macroscopic description; thermodynamical consistency; 3D general nonproportional loadings; reorientation; finite element discretisation

- [1] L.C. Brinson: One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. *J. Int. Mat. Sys. Struct.*, **4**, 229-242, (1993).
- [2] S. Leclercq and C.: Lexcelent: A general macroscopic description of thermomechanical behavior of shape memory alloys. *J. Mech. Phys. Solids*, **44**, 953-980, (1996).
- [3] K. Tanaka: A thermomechanical sketch of the shape memory effect: One-dimensional tensile behavior. *Res. Mechanica*, **18**, 251-263, (1986).

EIN FREIES RANDWERT-PROBLEM BEI DER MODELLIERUNG DER CHEMISCHEN GASPHASENINFILTRATION

T.-A. Langhoff, H. Andrä, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe (TH)

Hochleistungsverbundwerkstoffe wie zum Beispiel kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffe (CFC) erlangen immer größere Bedeutung und finden in der Industrie vielfältige Anwendungsbereiche. Ein wichtiges Verfahren zur Herstellung von CFC ist die chemische Gasphaseninfiltration (CVI), bei der sich aus der Gasphase abscheidender fester Kohlenstoff auf der Oberfläche eines porösen Werkstoffes bzw. einer Faserstruktur ablagert. Im Hinblick auf die Eigenschaften des entstehenden Werkstoffs ist zumeist eine vollständige Infiltration der ursprünglich porösen Struktur erwünscht. Ziel der Modellierung der CVI ist die Bestimmung von Korrelationen zwischen Prozessparametern und Eigenschaften des entstehenden Werkstoffs, um so eine Optimierung des sehr langwierigen und daher kostspieligen Verfahrens zu erreichen. Hierzu muss die Wechselwirkung verschiedenster Effekte (homogene Gasphasenreaktionen, heterogene Oberflächenreaktionen, Transportvorgänge, Änderung der Geometrie durch zunehmende Abscheidung u.a.) studiert sowie das Profil des abgeschiedenen Kohlenstoffs in Abhängigkeit von Ort und Zeit bestimmt werden. Frühere Arbeiten zur CVI (z.B. [1]) verwendeten zumeist eine sehr stark vereinfachte Reaktionskinetik. Auch wurde die Änderung der Geometrie infolge stattfindender Abscheidung nicht ausreichend berücksichtigt.

Aus mathematischer Sicht liegt ein freies Randwert-Problem (FRWP) 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, dessen Bestimmung in Raum und Zeit die Hauptaufgabe darstellt. Zur Beschreibung dieses freien Randes wird ein Phasen-Feld-Modell vorgeschlagen, in welchem die scharfe Grenzfläche auf eine endliche Dicke aufgeweicht sowie ein Phasenfeld als Ordnungsparameter eingeführt wird, dessen Werte kontinuierlich zwischen denen für die feste Phase und die Gasphase variieren. Zur Modellierung der chemischen Vorgänge in der Gasphase werden reduzierte Reaktionsschemata verwendet, die das Zusammenspiel zwischen homogenen Gasphasenreaktionen und heterogenen Abscheidereaktionen an der Oberfläche beschreiben. Zur Beschreibung des diffusiven Anteils werden sowohl binäre als auch Knudsen-Diffusionskoeffizienten berücksichtigt. Vor allem innerhalb poröser Strukturen stellt die Knudsen-Diffusion den dominierenden Transportmechanismus dar.

Im Vortrag wird das Modell [2] mit vielen Einzelheiten vorgestellt, und Simulationsergebnisse der Infiltration für verschiedene Werte der Prozessparameter werden präsentiert. Auf Basis solcher Berechnungen kann entschieden werden, ob eine gegebene Struktur für bestimmte Werte der Prozessparameter vollständig infiltriert wird oder nicht.

Literatur:

- [1] P. McAllister, E. E. Wolf: Modeling of chemical vapor infiltration of carbon in porous carbon substrates, *Carbon* 29, 387-396, (1991).
- [2] T.-A. Langhoff, H. Andrä, E. Schnack: A moving boundary problem in chemical vapour infiltration, Preprint 2001-3, Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe (TH)

ON A POSSIBLE TRANSITION FROM A PERFECT THERMAL CONTACT TO A SEPARATION IN AN ANISOTROPIC BIMATERIAL

V. Loboda¹, K.P. Herrmann²

¹Department of Theoretical and Applied Mechanics,
Dniepropetrovsk National University

²Laboratorium für Technische Mechanik, Paderborn University

The problem of a possible transition from a perfect thermal contact of two anisotropic bodies to their separation is discussed in this work. For the case of isotropic materials this problem has been reviewed in the paper [1] where it was particularly indicated that such a possibility essentially depends on the material properties and on the direction of the heat flux.

Two anisotropic semi-infinite spaces $x_2 > 0$ and $x_2 < 0$, which are compressed to each other with a uniform stress at infinity are considered. A uniform temperature flux q_0 in the direction normal to the interface is assumed to be prescribed at infinity as well. The region $|x_1| \leq a$ of the material interface is assumed to be thermally insulated and mechanically free of stresses, whereas the other part of the interface is in a mechanically frictionless and thermally perfect contact. The physical ability of such a formulation is the subject of the present investigation.

By means of the matrix-vector presentations of thermomechanical values via sectionally-holomorphic functions [2] the problem is reduced to a matrix Hilbert boundary value problem which has been solved exactly. An associated analysis of the stresses and displacement jumps at the edge $x_1 = a$ of the thermally insulated region defines that a transition from a perfect thermal contact to a separation of the considered semi-infinite planes is only possible if

$$\alpha q_0 > 0, \quad (1)$$

where the parameter α is defined by the thermomechanical properties of the materials considered. It is important to note that in the particular case of isotropic materials the parameter α is proportional to the difference $(\delta_1 - \delta_2)$ of the distortivities of the semi-infinite spaces and completely agrees with a conclusion of the paper [1] on this question. As an application of the obtained result a possible crack opening under the action of a remote compressive load and a temperature flux has been demonstrated, and an interface crack with a contact zone in a thermomechanically loaded anisotropic bimaterial has been investigated.

References:

- [1] Martin-Moran, C.J.; Barber, J.R.; Comninou, M.: The penny-shaped interface crack with heat flow. Part 1: Perfect contact. J. Appl. Mech. 50, 29-36, (1983).
- [2] Herrmann, K.P.; Loboda, V.V.: Contact zone models for an interface crack in a thermomechanically loaded anisotropic bimaterial. J. of Thermal Stresses 24, No 5, 479-506, (2001).

RISSPHÄNOMENE IN MODELL COMPOSITES

C. Marotzke

BAM, Fachgruppe VI.2, Berlin

Neben der Abschätzung der Haftung zwischen Faser und Matrix können aus mikro-mechanischen Tests Erkenntnisse hinsichtlich des elementaren Bruchverhaltens von Faserverbundwerkstoffen gewonnen werden. Für das Versagen eines Faserverbundwerkstoffs stellt der Faserbruch das wesentliche elementare Versagensereignis dar. Bei einem Faserbruch wird eine erheblich höhere Energie freigesetzt als zur Schaffung der reinen Faserbruchflächen notwendig ist. Das heißt, dass neben kinetischer Energie, z.B. in Form von Schockwellen, auch gleichzeitige Matrix- oder Interfacerisse wahrscheinlich sind.

Experimentelle Untersuchungen an Modell Composites (Fragmentation Tests) zeigen, dass unterschiedliche Rissformen in Abhängigkeit von der Bruchzähigkeit der Matrix sowie der Haftung auftreten. Es können sowohl reine Matrixrisse ohne erkennbares Debonding als auch reines Debonding ohne Matrixrisse auftreten sowie beliebige Mischformen.

Um die den beobachteten Phänomenen zugrundeliegenden Mechanismen zu untersuchen, wurden verschiedene Rissprozesse hinsichtlich der freigesetzten Energie bzw. Energiefreisetzungsrate analysiert. Es wurden simultan mit dem Faserbruch stattfindende Matrix bzw. Interface Risse unterschiedlicher Länge untersucht, die aufgrund der wesentlich höheren Bruchzähigkeit erheblich mehr Energie kompensieren als der reine Faserbruch. Es zeigt sich, dass relativ große Matrix- oder Interface- risse zur vollständigen Kompensation der beim Faserbruch freigesetzten Energie notwendig wären, zumal die zusätzlichen Risse zu einer deutlichen Erhöhung der freigesetzten Energie führen. Trotz simultaner Matrix- oder Interface Risse bleibt der Faserbruch ein instabiler Prozess.

Weiterhin wurde die Energiefreisetzung nach vollständigem Faserbruch untersucht. Es zeigt sich, dass bereits sehr kurze, während des Faserbruchs aufgetretene Matrix- oder Interfacerisse die Energiefreisetzung, beispielsweise bei anschließendem Interfaceriss, erheblich verringern. Der Vergleich von Matrix und Interface Riss zeigt, dass die Energiefreisetzungsrate eines Matrixrisses in allen untersuchten Fällen größer als die eines Interfacerisses ist. Das Auftreten von Interfacerissen lässt somit auf eine geringe Bruchzähigkeit des Interfaces schließen.

Die in realen Composites ablaufenden Versagensprozesse sind naturgemäß zu komplex als dass sie mit einfachen Energieabschätzungen beschrieben werden können. Sie ermöglichen aber eine Einordnung der experimentell beobachteten Phänomene.

THERMOELASTIC PROBLEM OF A CLOSED INTER-PHASE CRACK

M. Matczyński¹, R. Martynyak²

¹ Institute of Fundamental Technological Research, PAS, Warsaw

² Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics, NASU, Lviv

The thermoelastic problem of an interphase crack in a nonhomogenous elastic body is considered. The body consists of two elastic half-planes of identical mechanical but different thermal properties. A straight crack with rough surfaces is located between the half-planes. The crack is closed due to the compressive load applied at infinity (Fig. 1). The thermal contact of the crack surfaces is imperfect. According to the theory of thermal conductivity of rough surfaces it is assumed that the crack conductivity depends on the contact pressure between the crack surfaces.

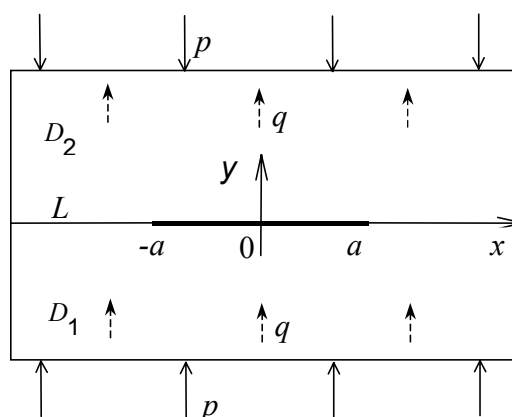


Fig.1

To solve the problem the method of Muskhelishvili's complex potentials is used. The temperature, stresses and displacements are given by

$$T = \operatorname{Re} \left\{ F(z) + \frac{iqz}{\lambda_k} \right\}, \quad q_x - iq_y = -\lambda_k F'(z) - iq,$$

$$\sigma_x + \sigma_y = 4 \operatorname{Re} \{ \Phi_k(z) \} + \sigma_x^0 - p,$$

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = \Phi_k(z) - \Phi_k(\bar{z}) + (z - \bar{z}) \overline{\Phi_k'(z)} - p,$$

$$2G \left(\frac{\partial u}{\partial x} + i \frac{\partial v}{\partial x} \right) = (3 - 4\nu) \Phi_k(z) + \Phi_k(\bar{z}) - (z - \bar{z}) \overline{\Phi_k'(z)} + \beta_k F(z) + \nu p,$$

$$\text{where } \sigma_x^0 = \frac{2\alpha_k(1+\nu)G}{\lambda_k(1-\nu)} q y, \quad k=1,2, \quad \beta_k = 2\alpha_k(1+\nu)G, \quad k=1,2,$$

G – shear modulus, ν - Poisson's ratio, α_k - coefficient of linear thermal expansion, λ_k - thermal conductivity while $F(z)$, $\Phi_k(z)$ are analytical functions of the complex variable $z = x + iy$ at the lower and upper half-plane D_1 and D_2 , respectively.

The solution of the problem is reduced to the solution of a system of nonlinear singular integro-differential equations.

A CONVERGENCE STUDY OF STRESS/STRAIN CALCULATIONS FOR COMPOSITES USING DISCRETE FOURIER TRANSFORMS

C.M. Brown ^a, W. Dreyer ^b, W.H. Müller ^c

^a Department of Mechanical and Chemical Engineering,
Heriot-Watt University, Riccarton, UK

^b Weierstraß Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, Berlin

^c Technische Universität Berlin, Fakultät V, Institut für Mechanik, Berlin

We present in this paper a method for determining the convergence characteristics of the Neumann iterative solution of a discrete version of a second-type Fredholm equation. Implemented as the so-called "equivalent inclusion problem" within the context of mechanical stress/strain analysis, it allows the modelling of elastically highly heterogeneous bodies with the aid of Discrete Fourier Transforms (DFT).

A method is developed with which we can determine pre-analysis (i.e., at iteration zero) whether the choice of an auxiliary stiffness tensor, chosen such that the Neumann scheme becomes convergent, is appropriate, specifically for the linear-elastic case. It is shown that a careful choice of this tensor results in both guaranteed convergence and a smaller convergence radius for the solution.

Furthermore, there is some indication that as the convergence radius decreases, the scheme may converge to a solution at a faster rate translating into an increase in computational efficiency.

References:

- [1] Herrmann, K.P., Neumann, S., Müller, W.H.: Linear and Elastic-Plastic Fracture Mechanics Revisited by Use of Fourier Transforms - Theory and Application, *Computational Materials Science*, **16**, pp. 186-196, (1999).
- [2] Dreyer, W., Müller, W.H.: A Study of the Coarsening in Pb/Sn Solders, *Int. J. Solids and Structures*. **37**(28), pp. 3841-3871, (2000).
- [3] Michel, J.C., Moulinec, H., Suquet, P.: Effective Properties of Composite Materials with Periodic Microstructure: A Computational Approach, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* **192**(1-4) pp. 109-143, (1999).

EIN VERGLEICH VERSCHIEDENER DFT BASIERTER ANSÄTZE ZUR SPANNUNGS- DEHNUNGSBERECHNUNG BEI VERBUNDWERKSTOFFEN

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

¹Laboratorium für Technische Mechanik, Universität Paderborn

²Institut für Mechanik, Technische Universität Berlin

Eine wichtige Aufgabenstellung bei der optimalen Entwicklung und Gestaltung von Verbundwerkstoffen ist die Bestimmung von effektiven Eigenschaften (*Homogenisierung*) des spezifischen Composites. Ein Ansatz in dieser Hinsicht modelliert dabei den Werkstoff durch eine periodische Fortsetzung von Einheitszellen, die als statisch repräsentativ vorausgesetzt werden. Die sich bei vorgeschriebenen Randbedingungen in der Einheitszelle einstellenden lokalen Spannungs-Dehnungsfelder werden dann genutzt, um die effektiven Größen numerisch zu bestimmen. Die konkrete numerische Berechnung der lokalen Feldgrößen gelingt dabei mit verschiedenen Verfahren, wie etwa mit Hilfe der FEM (siehe [5]). Aber insbesondere im Zusammenhang mit dem oben erwähnten Ansatz zur Homogenisierung finden in jüngerer Zeit numerische Methoden Interesse, die auf der Anwendung der diskreten Fouriertransformation (DFT) basieren (siehe [1], [2], [3]).

In unserem Beitrag wird ein DFT-Ansatz vorgestellt, der Ideen einer Arbeit von Milton und Eyre, [4], aufgreift, um die Konvergenz einer Funktionalgleichung zu verbessern, wenn große Steifigkeitsunterschiede bei den beteiligten Materialien vorliegen.

Der Vortrag gestaltet sich in der folgenden Weise:

- Die wichtigsten Eigenschaften der DFT werden kurz angegeben.
- Die Herleitung der ursprünglichen und der Funktionalgleichung nach Milton und Eyre zur Spannungs-Dehnungsrechnung wird skizziert.
- Beide Funktionalgleichungen werden auf Grundlagenprobleme der linearen Elastizitätstheorie angewendet und die Resultate diskutiert.

Literatur

- [1] J.C. Michel, H. Moulinec, P. Suquet: Effective properties of composite materials with periodic microstructure: a computational approach. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 192 (2-4), 109-143, (1999).
- [2] J.C Michel, H. Moulinec, P. Suquet: A computational scheme for linear and non-linear composites with arbitrary phase contrast. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, to be published.
- [3] C.M. Brown, W.H. Müller: On the rapide determination of effective properties of composite materials: discrete Fourier transforms versus finite elements methods. Submitted to *Computational Mechanics*.
- [4] D.J. Eyre, G.W. Milton: A fast numerical scheme for computing the response of composites using grid refinement. *The European Physical Journal Applied Physics*, 6, 41-47, (1999).
- [5] H.J. Böhm, F.G. Rammerstorfer, E. Weissenbek: Some simple models for micromechanical investigations of fiber arrangements effects in MMCs. *Computational Materials Science*, 1, 177-194, (1993).

EIN MATERIALMODELL FÜR PYROKOHLENSTOFF

R. Piat, E. Schnack

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

Als Matrixmaterial von CFC-Werkstoffen wird durch die chemische Gasphaseninfiltration (CVI) hergestellter Pyrokohlenstoff (Pyro-C) benutzt. In Abhängigkeit von den Bedingungen des Herstellungsprozesses weist dieses Material verschiedene Modifikationen der Poly-kristallstruktur (unterschiedliche Größe, Ausrichtung und Krümmung der *Graphene*- Ebenen) auf [1, 2]. Nach neuer Terminologie unterscheidet man grob 4 Material-Modifikationen: hoch-, medium-, schwach-texturierten und isotropen Pyro-C.

Die Pyrokristallstruktur des Pyro-C wird als System von Monokristallen des Graphits modelliert, die in eine unendliche homogene Matrix mit unbekanntem Elastizitätstensor

C eingebettet sind. Für jede Modifikation des Pyro-C wird eine Wahrscheinlichkeits - Dichtefunktion $P^k(\alpha, \beta, r)$ eingeführt, um die räumliche Orientierung und Größe der Monokristalle zu simulieren.

Zur Definition des Elastizitätstensors des Materials wird eine Homogenisierung mit Hilfe der *selbstkonsistenten* Methode [2, 3] durchgeführt. Die Berechnung des unbekanntem Elastizitätstensors \bar{C}^k erfolgt durch die Lösung des Gleichungssystems:

$$\iiint_{\alpha, \beta, r} P^k(\alpha, \beta, r) [D(\alpha, \beta) - H(r) : (\bar{C}^k : D(\alpha, \beta) - I)]^{-1} d\alpha d\beta dr - \bar{C}^k = 0 ;$$

Im Vortrag werden die Resultate der numerischen Auswertung in graphischer Form präsentiert. Theoretische Resultate werden mit experimentellen Daten verglichen.

Literatur:

- [1] Reznik, B.; Gerthsen, D.; Hüttinger, K.J.: Micro- and nanostructure of the carbon matrix of infiltrated carbon fiber felts, *Carbon*, **39**, 215-219, (2001).
- [2] Piat, R.; Schnack, E., Andrä, H.: Entwicklung des hierarchischen Materialmodells von CVI-CFC-Werkstoffen, *Proceed. GAMM 2001*, Zurich, (2001).
- [3] Eshelby, J.D.: Elastic inclusions and inhomogeneities, *Progr. in Solid Mech.*, vol.2, I.N. Sneddon, R.Hill, eds., North-Holland, Amsterdam, 89-140, (1961).
- [4] Nemat-Nasser, S.; Hori, M.: Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials, second ed., North-Holland, Amsterdam, (1999).

MIKRO- UND NANOSKALA-SIMULATIONEN VON REIBUNG UND VERSCHLEISS IN VERBRENNUNGSMOTOREN UND IN RAD-SCHIENE-KONTAKTEN

V.L. Popov

AG Theoretische Physik, Universität Paderborn

Im Vortrag wird eine Übersicht über Simulationen gegeben, die mit der mesoskopischen Methode der beweglichen zellulären Automaten durchgeführt worden sind.

Numerische Simulationen und grundsätzliche theoretische Betrachtungen haben gezeigt, daß das Zusammenspiel von Festigkeit und Viskosität der festen Körper bei Reibungsprozessen zum Mitreißen einer dünnen Oberflächenschicht führt. Die in dieser turbulenten *Grenzschicht* ablaufenden Prozesse beeinflussen wesentlich das makroskopische Verhalten des Reibungssystems.

In einer Simulationsreihe wurden der Reibungskoeffizient und die Dicke der Grenzschicht als Funktion von allen Material- und Beanspruchungsparametern eingehend untersucht. Ergebnisse der Simulationen zeigen, daß der Reibungskoeffizient μ von allen Material- und Beanspruchungsparametern nur über zwei dimensionslose Parameter

$$\kappa_1 = \frac{\rho v^2 E}{\sigma_0^2} \quad \text{und} \quad \kappa_2 = \frac{PE}{\sigma_0^2}$$

abhängt:

$$\mu = \mu(\kappa_1, \kappa_2).$$

Hier ist E der Young-Modul, v ist die Gleitgeschwindigkeit, ρ ist die Dichte, P ist der Normaldruck und σ_0 ist die Zugfestigkeit des Materials.

Speziell für die Verhältnisse, die in Rad-Schiene-Kontakten gefunden werden, wurde eine analytische Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von den Beanspruchungsparametern abgeleitet.

Intensive plastische Deformationen, mehrmalige Brüche und Wiederherstellung des Zusammenhangs des Materials in der Grenzschicht führen uns zum Schluß, daß der herkömmliche Begriff des Verschleißes wesentlich verändert werden muß. Das oft benutzte Verschleißkriterium, bei dem der Verschleiß stattgefunden hat, wenn ein Teilchen herausgelöst wird, scheint in den bei uns durchgeführten Simulationen nicht anwendbar zu sein. Im Fall von plastischen Werkstoffen verläuft der Verschleiß eher als langsamer stochastischer Materialtransport aus der Reibungszone. Dieser Transportprozeß wird analytisch und numerisch untersucht. Eine Verschleißgleichung wird abgeleitet und mit den am Institut für Angewandte Verschleißforschung erhaltenen experimentellen Ergebnissen verglichen [1].

Literatur:

- [1] Popov V.L., Smolin I.Yu., Gervé A. and Kehrwald B.: Simulation of wear in combustion engines. – *Computational Materials Science*, 19, pp. 285-291, (2000).

QUANTITATIVE BESTIMMUNG VON DELAMINATIONSSCHÄDEN MIT DEM NEUEN VERFAHREN AICRA

W. Weigl, E. Schnack

**Institut für Technische Mechanik,
Universität Karlsruhe**

Delaminationen stellen einen wichtigen, da oft entscheidenden Versagensmechanismus für geschichtete Verbundwerkstoffe dar. Insbesondere die Größe und Lage der Delamination ist 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 vorgestellten Prüfverfahrens sind shearografische Messungen der Oberflächendeformation unter definierter Belastung, wodurch auf der äußeren Oberfläche überbestimmte Randdaten vorliegen. Aus der Kenntnis dieser vollständigen Cauchy-Daten ist nun die Lage und Berandung von inneren Delaminationsbereichen zu bestimmen, was bei geeigneter Belastung über den Träger des Verschiebungssprungs erfolgen kann. Das Verfahren von Andrieux et al. [1] ist jedoch auf den Fall von ebenen Rissen in homogenen, isotropen Materialien beschränkt.

Im Vortrag wird das neue Verfahren AICRA (Alternating Iterative Crack Reconstruction Algorithm) vorgestellt, das sich nun insbesondere auch für die Delaminationsbestimmung in ausgewählten Interfaces eignet [2]. Hierbei wird das inverse Problem in Cauchy-Subprobleme unterteilt, die mittels eines alternierend iterativen Verfahrens gelöst werden, das sich durch gute Konvergenz- und Regularisierungseigenschaften auszeichnet. Im Gegensatz zu den oft verwendeten Optimierungsansätzen wird bei AICRA keinerlei a-priori-Information über die Anzahl und Form der Schädigungsgebiete benötigt. Zudem kann das Verfahren auch angewandt werden, falls nur auf einem Teil der gesamten äußeren Oberfläche zusätzliche Messdaten gewonnen werden können.

Die Eigenschaften des neuen Verfahrens werden auch anhand von Testrechnungen unter Verwendung einer FEM-Implementierung numerisch demonstriert. Daneben werden auch konkrete Delaminationsbestimmungen an Proben aus geschichteten CFK-Verbundwerkstoffen präsentiert.

Literatur:

- [1] Andrieux, S., Ben Abda, A. and Bui, H.D., Sur l'identification de fissures planes via le concept d'écart à la réciprocité en élasticité, *C. R. Acad. Sci. Paris, Série I*, 324, pp. 1431-1438, (1997).
- [2] Weigl, W., Andrä, H. and Schnack E., An alternating iterative algorithm for the reconstruction of internal cracks in a three-dimensional solid body, to appear in *Inverse Problems*, 17, (2001).

VON KIRCHHOFF UND REISSNER ZUR ELASTIZITÄTSTHEORIE. EINE HIERARCHISCHE INTEGRALGLEICHUNGSFORMULIERUNG FÜR PLATTENBIEGUNGSMODELLE

T. Westphal Jr. , E. Schnack

**Institut für Technische Mechanik,
Universität Karlsruhe**

Ein hierarchisches Differential- und Integralgleichungssystem zur Berechnung von Plattenbiegungsproblemen wird hergeleitet. Es werden zwei Plattenmodelle berücksichtigt: 1) das bekannte REISSNERSche Modell sechster Ordnung $s(1,0)$ und 2) das REISSNER-PONIATOVSKIISche Modell zwölfter Ordnung $s(3,2)$. Es wird gezeigt, wie die Differential- und Integralgleichungen des Modells $s(1,0)$ durch Vereinfachungen aus dem Modell $s(3,2)$ gewonnen werden können. Die Einführung transversal-isotroper Materialien in die Konstitutivgleichungen hat sich zur Interpretation der resultierenden Gleichungen als vorteilhaft erwiesen. Durch Anwendung des HELMHOLTZschen Zerlegungssatzes wird gezeigt, dass das hier hergeleitete 2D-Differentialgleichungssystem die bessere Annäherung an das 3D-Problem im Vergleich mit bekannten Plattenmodellen liefert.

Die hierarchischen Differentialgleichungen werden durch Anwendung des HELLINGER-REISSNERSchen Variationsprinzips hergeleitet. Kopplungsvariable werden so definiert, dass das Modell $s(1,0)$ direkt aus dem Modell $s(3,2)$ abgeleitet werden kann.

Durch Anwendung des HELMHOLTZschen Zerlegungssatzes werden die LAMÉ-NAVIERSchen Differentialgleichungen entkoppelt. Drei Gleichungssysteme ergeben sich (KIRCHHOFFSche, Schub- und PAPKOVICH-FADLESche Gleichungen). Es wird durch direkten Vergleich mit den entsprechenden Gleichungen der 3D-Elastizitätstheorie gezeigt, dass die Differentialgleichungen der Modelle der s -Gruppe eine passendere Beschreibung als diejenigen der d -Gruppe (verschiebungsbasiert) liefern.

Abschließend werden die allgemeinen Fundamentallösungen betrachtet. Für das Problem $s(1,0)$ wird gezeigt, dass die allgemeine Fundamentallösung widerspruchsfrei ist. Für das Problem $s(3,2)$ wird die allgemeine skalare Fundamentallösung hergeleitet. Alle Informationen der drei Differentialgleichungsfamilien sind in der allgemeinen Fundamentallösung enthalten. Sowohl für das Problem $s(1,0)$ als auch für das Problem $s(3,2)$ sind zwei freie Konstanten vorhanden. Die Fundamentallösung des Problems $s(1,0)$ wird so weiter zerlegt, dass die entsprechende Fundamentallösung des KIRCHHOFFSchen Modells direkt aus der Fundamentallösung des REISSNER-MINDLINSchen Modells gewonnen werden, $U_{ij}^{RM}(r) = U_{ij}^{Sh}(r) + U_{ij}^K(r)$. (RM: Reissner+Mindlin, Sh: Schub, K: Kirchhoff.)

Die Integralgleichungen ermöglichen es, die fest mit Randschichtproblemen verbundenen Plattenaufgaben effektiv zu lösen, da die lokalen Randeffekte direkt von den Fundamentallösungen beschrieben werden. Im Gegensatz dazu ist bei den z.Zt. überwiegend verwendeten FE-Methoden eine aufwändige lokale Netzverfeinerung in Randnähe notwendig, die stark von den Randbedingungen und den transversalen Materialparametern bei transversal-isotropen Materialien abhängt. Derartige Netzverfeinerungen sind bei den Integralgleichungsverfahren in keinem Fall notwendig, da keine inneren Netze erforderlich sind.

COMPOSITGRENZFLÄCHEN NACH MASS DURCH ATOMARES DESIGN

J. Woltersdorf, A. Hähnel

Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle, Weinberg

Neue Hochleistungs-Composite sind das Ergebnis eines beanspruchungsgerechten Maßschneiderns von Strukturen bis hinab zu atomaren Dimensionen. Die immer höher und komplexer werdenden Anforderungen an Verbundwerkstoffe (sowohl mit metallischen als auch mit keramischen Matrices) können nur durch die Entwicklung speziell optimierter Grenzflächen bzw. Grenzschichten erfüllt werden, die in unterschiedlicher Hinsicht jeweils geeignete Parameter kombinieren müssen. Dies betrifft z.B. die chemische Reaktivität, das thermomechanische Verhalten und insbesondere die Hochtemperaturfestigkeit, die Bindungsstärke bzw. Haftvermittlung sowie die und Diffusionshemmung.

Neben der Erzeugung einer Grenzschicht oder Grenzschichtsequenz durch Vorbeschichtung der Einlagerungsphase, die i.a. unter Benutzung pyrolytischer Verfahren aus organischen Präkursoren erfolgt, können die Zwischenphasen auch durch festkörperchemische Reaktionen erzeugt werden, die während oder nach der Prozeßführung auftreten und durch komplexe thermochemische Vorgänge im Nanometerbereich charakterisiert sind.

Der Vortrag berichtet über neue Untersuchungen atomarer Prozesse in und an SiC/Glas-Composit-Grenzflächen, die dem Verständnis der Reaktionskinetik des materialwissenschaftlich interessanten und technologisch vielseitig nutzbaren ternären Systems Si-C-O dienen, das zu hochtemperaturfesten, superharten und darüber hinaus elektronisch interessanten Composit-Werkstoffen führt. Dabei war es das Ziel, Bedingungen zu finden, unter denen die ohnehin inhärent bei der Prozeßführung (d.h. während der Compositherstellung) ablaufenden Reaktionen zwischen den Compositpartnern zu materialtechnisch nutzbaren Schichten führen, so daß sich z.B. die sehr kostenintensiven Faservorbeschichtungen erübrigen, die in den Verbunden des Systems Si-C-O zur Eigenschaftsoptimierung erforderlich sind, weil die gewünschten Plastizierungs- und Energiedissipationsprozesse durch Debonding- und Pullout-Vorgänge sowie durch Rißumlenkungs- und Rißverzweigungsprozesse bewirkt werden [1-5].

Da diese Mikromechanismen im wesentlichen in den Grenzschichten lokalisiert sind, ist eine Materialoptimierung hier gleichbedeutend mit einem optimalen atomaren Design der Grenzschichten.

- [1] Woltersdorf, J., Pippel, E., Hähnel, A.: *Zeitschr. f. angew. Math. u. Mechan. (Wiley-VCH)* **78**, Suppl.1, S81-S84, (1998).
- [2] Woltersdorf, J., Pippel, E., Hähnel, A. und Schneider, R.: *Struktur, Funktion und Nanochemie von Grenzschichten in Verbundwerkstoffen, in: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, ed. by G. Ziegler, DGM-Verlag, Oberursel, 215-227, (1996).*
- [3] Grathwohl, G., Kuntz, M., Pippel, E., Woltersdorf, J.: *phys.stat.sol.(a)* **146**, 393-414, (1994).
- [4] Hähnel, A., Pippel, E., Feldhoff, A., Schneider, R., Woltersdorf, J.: *J. Mat. Sci. Engineering A* **237**, 173-179 (1997).
- [5] Hähnel, A., Pippel, E., Woltersdorf, J.: *J. Microscopy (London)*, **177 (3)**, 264-271, (1995).

TEILNEHMERLISTE

Alizadeh	Alesker	cand.-ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe alizadehaa@yahoo.com
Andrä	Heiko	PD Dr.-Ing. Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik Gottlieb-Daimler-Straße 67663 Kaiserslautern Heiko.Andrae@itwm.fhg.de
Andrianov	Igor	Prof. Dr. Willi-Suth-Allee 28 50769 Köln
Cochran	Sandra	Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jcoch1@ltm.uni-paderborn.de
Danischevs'kyy	Vladyslav	Ph.D. Institute of General Mechanics RWTH Aachen Templergraben 64 52062 Aachen vdanish@ukr.net
Dimitrov	Atanas	Dipl.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe Atanas.Dimitrov@mach.uni-karlsruhe.de
Dimitrov	Slav	Dr.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe Slav.Dimitrov@mach.uni-karlsruhe.de

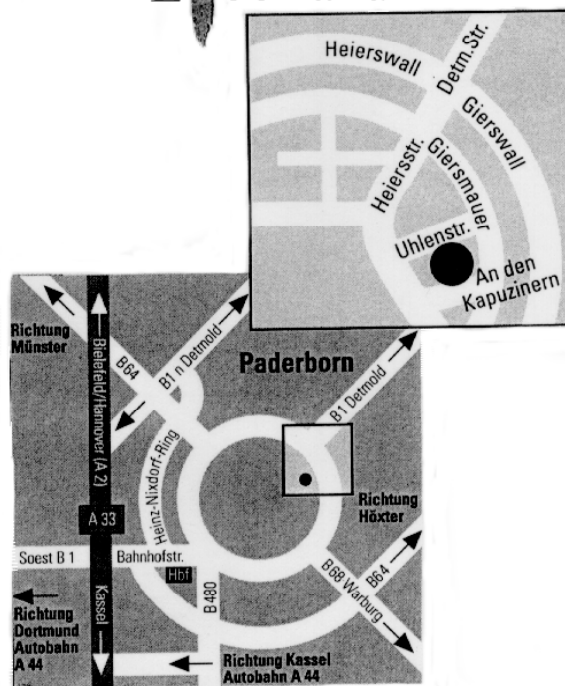
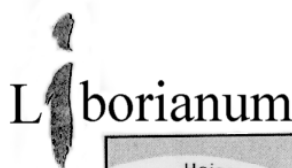
Dreyer	Wolfgang	Dr. rer. nat. habil. Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik Mohrenstr. 39 10117 Berlin dreyer@wias-berlin.de
Ekhlakov	Alexander	Dr. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe
Ferber	Ferdinand	PD Dr.-Ing. habil. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jferb1@ltm.uni-paderborn.de
Fortmeier	Manfred	Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jfort1@ltm.uni-paderborn.de
Frenz	Sabine	Dip.-Ing. (FH) Institut für Allgemeine Mechanik RWTH Aachen Temlergraben 64 52056 Aachen frenz@iam.rwth-aachen.de
Hansel	Wilfried	Dipl.-Ing. Institut für Mechanik und Regelungstechnik Universität GH Siegen Paul-Bonatz-Str. 9-11 57076 Siegen Hansel@FB5.Uni-Siegen.de

Herrmann	Klaus	Prof. Dr. rer. nat. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jherr1@ltm.uni-paderborn.de
Hohe	Jörg	Dr.-Ing. Institut für Mechanik und Regelungstechnik Universität Siegen Paul-Bonatz-Str. 9-11 57068 Siegen hohe@imr-sun4.fb5.uni-siegen.de
Juhász	Levente	Dipl.-math. techn. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe Levente.Juhasz@web.de
Langhoff	Tom-Alexander	Dipl.-Phys. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76131 Karlsruhe Tom-Alexander.Langhoff@mach.uni- karlsruhe.de
Loboda	Volodymyr	Prof. Dr. Dept. of Theor. and Appl. Mechanics Dniepropetrovsk National University Nauchny line 13, Dniepropetrovsk 49050, Ukraine loboda@hello.dsu.dp.ua
Marotzke	Christian	Dr.-Ing. Fachgruppe VI. 2 BAM Unter den Eichen 87 12205 Berlin christian.marotzke@bam.de

Matczyński	Marek	Dozent Dr. rer. nat. Institute of Fundamental Technol. Research Swietokrzyska 21 PI-00-901 Warschau Mmatcz@ippt.gov.pl
Möller	Silvia	Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jmoel1@ltm.uni-paderborn.de
Müller	Wolfgang H.	Prof. Dr. rer. nat. Institut für Mechanik Technische Universität Berlin Straße des 17. Juni 135 10623 Berlin
Neumann	Stefan	Dipl.-Math. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jneum1@ltm.uni-paderborn.de
Nguyen	Van Son	Dipl.-Ing. Laboratorium für Technische Mechanik, FB 10 Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn jnguy1@ltm.uni-paderborn.de
Piat	Romana	Dr. Institut für Technische Mechanik Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe Romana.Piat@mach.uni-karlsruhe.de
Popov	Valentin	Prof. Dr. Theoretische Physik, FB 6 Universität Paderborn Warburger Str. 100 33095 Paderborn popov@phys.uni-paderborn.de

Schnack	Eckart	Prof. Dr.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe eckart.schnack@mach.uni-karlsruhe.de
Weigl	Wolfgang	Dipl.-Phys. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe wolfgang.weigl@mach.uni-karlsruhe.de
Westphal Jr.	Tancredo	Dipl.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe Tancredo.Westphal@mach.uni-karlsruhe.de
Woltersdorf	Jörg	Priv.-Doz. Dr. MPI für Mikrostrukturphysik Weinbergstr. 2 06120 Halle wolt@mpi-halle.de

INFORMATION



KONTAKTADRESSE

Laboratorium für Technische Mechanik Universität Paderborn

Pohlweg 47-49

33098 Paderborn

Tel.: +49-5251-60-2284

Fax: +49-5251-60-3483

email: jherr1@ltm.uni-paderborn.de

http: wwwfb10.uni-paderborn.de//LTM/Forschung/Workshops/AGC/agc.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

http: www.liborianum.de

INDEX

A

Alizadeh · 28
Andrä · 3, 8, 10, 16, 28
Andrianov · 9, 28

B

Becker · 13
Brown · 20

C

Cochran · 28

D

Danishevs'kyy · 5, 9, 28
Dimitrov · 3, 4, 10, 11, 28
Dreyer · 4, 12, 20, 29

E

Ekhlakov · 29

F

Ferber · 29
Fortmeier · 29
Frenz · 29

H

Hähnel · 26
Hansel · 4, 13, 29
Herrmann · 4, 17, 21, 30
Hohe · 4, 14, 30

J

Juhász · 4, 15, 30

L

Langhoff · 5, 16, 30
Loboda · 3, 17, 30

M

Marotzke · 3, 4, 18, 30
Martynyak · 19
Matczyński · 3, 19, 31
Möller · 31
Müller · 3, 20, 21, 31

N

Neumann · 3, 21, 31
Nguyen · 31

P

Piat · 5, 22, 31
Popov · 4, 5, 23, 31

R

Rutka · 8

S

Schnack · 3, 10, 11, 15, 16, 22, 24, 25, 32

W

Weichert · 9
Weigl · 5, 24, 32
Westphal Jr. · 4, 25, 32
Wiegmann · 8
Woltersdorf · 5, 26, 32

NOTIZEN

Paderborner Kolloquium Maschinentechnik

Einladung

Der Fachbereich Maschinentechnik der Universität Paderborn
lädt alle Teilnehmer des 14. Workshop Composite Forschung in der Mechanik
aus Anlass des

*65. Geburtstages
von Herrn Prof. Dr. K. P. Herrmann*

und von

*25 Jahren
Laboratorium für Technische Mechanik*

zu einer Festveranstaltung mit anschließendem Empfang
für Dienstag, den 28. Mai 2002 um 18.00 Uhr
im Audimax der Universität Paderborn
herzlich ein.

Festveranstaltung

Begrüßung (Dekan Prof. J. Gausemeier/ Paderborn)
Grusswort (Rektor Prof. W. Weber/ Paderborn)
Rückblick (PD Dr. F. Ferber/ Paderborn)
Laudatio (Prof. W. H. Müller/ Berlin)
Festvortrag (Prof. W. Becker/ Siegen)
Schlusswort (Prof. K. Herrmann, Paderborn)

Musikalische Umrahmung

durch den Cellisten Ilya Laporev, Gent

Empfang

im Foyer des Audimax

