



**LEHRSTUHL FÜR TECHNISCHE MECHANIK
UNIVERSITÄT PADERBORN**



**17. Workshop
Composite Forschung in der Mechanik
14. und 15. Dezember 2004
Paderborn, Liborianum**

**Prof. Dr.-Ing. R. Mahnen
o. Prof. em. Dr. rer. nat. K.P. Herrmann
Lehrstuhl 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, 14. Dezember 2004**17. Workshop Composite Forschung**

9.00 Eröffnung**SEKTION I: Analytische und numerische Methoden**

(Chairman: R. Mahnken)

9.10-9.35 **Y. Lapusta**, Aubiere: "3D modelling of surface effects and microinteractions during fibre microbuckling in composites"

9.40-10.05 **M. Scherzer**, Freiberg: "Coupled analytical and numerical solution technique of 2D piezoelectric interface corner configurations"

10.10-10.35 **R. Tsotsova**, Karlsruhe: "Lösung eines inversen Problems zur quantitativen Delaminationsbestimmung in geschichteten Verbundwerkstoffen aus Oberflächendaten"

10.40-11.00 Kaffeepause**SEKTION II: Analytische und numerische Methoden**

(Chairman: R. Mahnken)

11.05-11.30 **C. Mittelstedt**, Siegen: "Die Rand-Finite-Elemente-Methode zur Identifikation von 3D-Spannungssingularitäten"

11.35-12.00 **S. Dimitrov**, Karlsruhe: "Incremental Characterization of Inelastic Response via Young Measures"

12.15-14.00 Mittagspause

Dienstag, 14. Dezember 2004**17. Workshop Composite Forschung**

SEKTION III: Schädigung und Rissbildung in Composites

(Chairman: E. Schnack)

- 14.00-14.25 **K. Weinberg**, Berlin: "Localisation of Failure in Shock-Loaded Metals"
- 14.30-14.55 **R. Duduchava, Saarbrücken**: "Interface cracks in anisotropic composites"
- 15.00-15.25 **P. Peters**, Köln: "Thermomechanisches Verhalten der SiC-faserverstärkten Titanlegierung Ti-6242"
- 15.30-15.55 **C. Marotzke**, Berlin: "Mikrorissbildung als Sonde für die Beanspruchungsgeschichte von Faserverbundwerkstoffen"
- 16.00-16.25 Kaffeepause**

SEKTION IV: Mikrostrukturelle Untersuchungen und Experimentelle Methoden

(Chairman: P. Peters)

- 16.30-16.55 **J. Woltersdorf**, Halle (Saale): "Atomare Strukturierung von Composit-Grenzflächen durch Nickel- und Plaktinkatalysatoren"
- 17.00-17.25 **D. Deltchev**, Karlsruhe: "Modellierung und Simulation des Herstellungsprozesses von Bauteilen aus faserverstärktem Siliziumkarbid"
- 17.30-17.55 **A. Ekhlakov**, Karlsruhe: "Modell der Evolution der Substratoberfläche basierend auf der Abscheidung pyrolytischen Kohlenstoffs"
- 18.00-18.25 **J. Sterthaus**, Berlin: „Nanoindentation von Lotwerkstoffen und die eingeschränkte Möglichkeit zur Identifikation lokaler mechanischer Materialparameter“
- 18.30-18.55 **R. Piat**, Karlsruhe: „Two level material modeling of CVI-CFC felt“

19.00 Abendessen im Liborianum

Mittwoch, 15. Dezember 2004**17. Workshop Composite Forschung**

SEKTION V: Verbundwerkstoffe als Konstruktionswerkstoffe

(Chairman: K.P. Herrmann)

- 8.30-8.55 **J. Hohe**, Freiberg: "Ein probabilistischer Zugang zur Homogenisierung fester Schäume"
- 9.00-9.25 **Ch. Ebert**, Dresden: "Versagensanalyse von textilverstärkten Verbundwerkstoffen bei hochdynamischer Belastung"
- 9.30-9.55 **C. Barthel**, Kassel: "Implementierung eines klebstoffgerechten Werkstoffmodells"
- 10.00-10.20 Kaffeepause**
- 10.20-10.45 **U. Schomburg**, Hamburg-Harburg: "Polymerfaserverstärkte Menschliche Weichgewebe"
- 10.50-11.15 **C. Handing**, Paderborn: "Dimensionierung von Klebverbindungen mit Hilfe der Bruchmechanik"
- 11.20-11.45 **T.-A. Langhoff**, Karlsruhe: "Aspekte der CVI-Modellierung"
- 11.50-12.15 **A. Matzenmiller**, Kassel: "FEM-Berechnung von Faserverbundstrukturen mit dem Zellenmodell der Mikromechanik"
- 12.20 Schlußwort
- 12.30-14.00 Mittagessen im Liborianum**

ABSTRACTS

IMPLEMENTIERUNG EINES KLEBSTOFFGERECHTEN WERKSTOFFMODELLS

C. Barthel

Kassel

Die Vorteile der Fügetechnik Kleben führen zum breiten Einsatz dieser Technologie in vielen Bereichen der Technik, so auch in der Automobilindustrie. Die in den kommerziellen FE-Programmen verfügbaren Materialmodelle wie die Theorie nach von Mises oder Drucker/Prager sind aber nicht geeignet, das Verhalten von Klebschichten zu beschreiben.

Der Schwerpunkt Werkstoffverbunde/Verbundwerkstoffe des Instituts für Werkstofftechnik der Universität Kassel befasst sich u. a. mit der Erarbeitung von klebstoffgerechten Rechenmodellen. Unterstützt wird diese Entwicklung durch breit gefächerte Experimente, welche am Institut durchgeführt werden. Der Focus liegt zur Zeit bei den crashoptimierten epoxidharzbasierten Strukturklebstoffen.

Die mathematische Formulierung der geeigneten Materialmodelle und ihre Implementierung über die Schnittstelle Usermat des Programms ANSYS soll im Vortrag dargelegt werden.

Die hochfesten, zähmodifizierten Klebstoffe zeigen im Experiment ein pseudoplastisches Verhalten. Daher kann man sie mit der Plastizitätstheorie beschreiben. Im Gegensatz zu der für metallische Werkstoffe geeigneten MISES-Theorie muss jedoch von plastischer Kompressibilität ausgegangen werden.

Im Vortrag soll aufgezeigt werden, wie man aus den Versuchsergebnissen eine Fließortkurve gewinnt und diese dann mit einem geeigneten plastischen Potential beschreibt. Darauf basierend werden die konstitutiven Gleichungen hergeleitet. Das entstehende System von Differentialgleichungen wird mit dem EULER-Rückwärtschema gelöst. Weitere Umformungen führen auf ein nichtlineares Gleichungssystem, welches sich mit dem NEWTON-Verfahren lösen lässt.

Anhand des aufgezeigten Verfahrens kann verfolgt werden, wie, von den Inputwerten der Usermatschnittstelle ausgehend, die erforderlichen Outputwerte ermittelt werden. Außerdem wird im Vortrag auf das Aufstellen der konsistenten Tangentenmatrix eingegangen.

Abschließend sollen erste Ergebnisse, die mit der neuen Theorie gewonnen wurden, vorgestellt und im Hinblick auf die experimentellen Ergebnisse diskutiert werden.

MODELLIERUNG UND SIMULATION DES HERSTELLUNGSPROZESSES VON BAUTEILEN AUS FASERVERSTÄRKTEM SILIZIUMKARBID

D. D. Deltchev, E. Schnack

*Institut für Technische Mechanik
Universität Karlsruhe*

Es wird ein Modell für die Herstellung von faserverstärkten Siliziumkarbid-Bauteilen durch chemische Gasphaseninfiltration [1] vorgeschlagen und es werden numerische Simulationen für die räumliche und zeitliche Evolution der Substratoberfläche - der Grenze zwischen der festen Phase und der Gasphase - durchgeführt. Die Infiltration wird durch ein Temperaturgradientenverfahren [2] beschrieben, so dass im zu entwickelnden Modell Effekte der örtlich variablen Temperatur erfasst werden. Zur Beschreibung dieser Evolution wird ein Phasenfeldmodell [3] entwickelt, das mit Navier-Stokes-Gleichungen gekoppelt ist, die zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse und Transportprozesse herangezogen werden. Ein umfangreiches und stöchiometrisches Reaktionsschema [4, 5] wird zur Modellierung der chemischen Reaktionen in der Gasphase und der heterogenen Oberflächenreaktionen verwendet.

Referenzen

- [1] William A. (1990) Fiber reinforced ceramic composites, *William Andrew Publishing*
- [2] Kawase M., Ikuta Y., Tago T., Modelling of a thermal-gradient chemical vapour infiltration process for production of silicon-carbide whisker/alumina composite. *Chemical Engineering Science*, **49** (24A), 4861-4870.
- [3] Caginalp. G., An analysis of a phase field model for a free boundary. *Arch. Rat. Mech. Anal.* **92** (1986), 204-245.
- [4] Allendorf M. D., Osterheld T. H. Modeling the gas-phase chemistry of silicon carbide formation, *Proc. Mat. Res. Symp.* **363** (1995), 39-44
- [5] Papasouliotis G. D., Sotirchos S. V., Heterogeneous kinetics of the chemical vapor deposition of silicon carbide from methyltrichlorosilane, *Proc. Mat. Res. Soc. Symp.* **334** (1994), 111-116.

INCREMENTAL CHARACTERIZATION OF INELASTIC RESPONSE VIA YOUNG MEASURES"

S. Dimitrov, E. Schnack

**Institute of Solid Mechanics
University of Karlsruhe**

This talk is devoted to the mathematical elements of a fundamentally new semi-computational approach for homogenized modeling a class of rate independent, inelastic processes (ergo, elasticity/damage, elasticity/plasticity, et.c.). The approach is in the same conceptual line with (Biot 1965, Simo & Honein 1990, Mielke, Theil & Levitas 2002) and allows one to analyze the dynamics of the rate independent response using the conceptual framework of convex analysis (cf. the sound mathematical basis in Rockafellar & Wets 1998). The stability of the deformation process then is related to the convexity properties of the functional describing the inelastic energetics.

In essence, the local response of the solid body undergoing particular rate independent process is considered consistent with an incremental constitutive formulation, where the local quasihyperelastic functional $W(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\zeta})$, governing the energy storage and dissipation is obtained as solution of a local constitutive minimization problem, formulated in terms of process specific internal variables, $\boldsymbol{\zeta}$, and Young measures λ_e and λ_{in} . Known $W(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\zeta})$, the microstructural Cauchy stress tensor $\boldsymbol{\sigma}$ can be obtained then in analogy with the well known approach in the finite elasticity theory, i.e. as $\boldsymbol{\sigma} = \partial_{\boldsymbol{\varepsilon}} W$.

The solution of the constitutive minimization problem can, or can not be attained. This depends on the continuity properties of W or corresponding (rank-1) convexity properties of the integrand of W . If latter is non-convex then this is an indication that the material is changed at microstructural level (ergo new microcrack pattern appears or plastic strain localizes in a set of slip bands) and the local constitutive minimization problem for W needs a relaxation in order to obtain a unique value for $\boldsymbol{\sigma}$.

References:

- [1] Biot, M. (1965), *Mechanics of incremental deformations*, John Wiley and Sons.
- [2] Mielke, A., Theil, F. & Levitas, V. (2002), 'A variational formulation of rate-independent phase transformations using an extremum principle', *Archive for Rational Mechanics and Analysis* **162**, 137-177.
- [3] Rockafellar, R. & Wets, R.-B. (1998), *Variational analysis*, Springer-Verlag.
- [4] Simo, J. & Honein, T. (1990), 'Variational formulation, discrete conservation laws, and path-domain independent integrals for elasto-viscoplasticity', *Journal of Applied Mechanics* **57(3)**, 488-497.

INTERFACE CRACKS IN ANISOTROPIC COMPOSITS

R. Duduchava, A. M. Sändig, W. L. Wendland

Saarbrücken

The linear model equations of elasticity give rise to oscillatory solutions in some vicinity of interface crack fronts. In this presentation we apply the Wiener–Hopf method which yields the asymptotic behaviour of the elastic fields and, in addition, criteria to prevent oscillatory solutions. The exponents of the asymptotic expansions are found as eigenvalues of the symbol of corresponding boundary pseudodifferential equations. The method works for three–dimensional anisotropic bodies and we demonstrate it for the example of two anisotropic bodies, one of which is bounded and the other one is its exterior complement. The common boundary is a smooth surface. On one part of this surface, called the interface, the bodies are bonded, while on the complementary part $S \subset \mathfrak{R}^3$ there is a crack. By applying the potential method, the problem is reduced to an equivalent system of boundary pseudodifferential equations (BPE) on the interface with the stress vector as unknown. The BPEs are defined via Poincaré–Steklov operators. We prove the unique solvability of these BPEs and write a full asymptotic expansion of the solution near the crack front ∂S . The resulting asymptotic expansion for the stress field in a vicinity of the crack front ∂S reads

$$\mathbf{T}(\sigma, \rho) = \sum_{k=0}^M K(\sigma) \rho^{-\frac{1}{2} + i\nu(\sigma) + k} K^{-1}(\sigma) \sum_{l=0}^k c_{kl}(\sigma) \log^l \rho + \mathbf{T}_{M+1}(\sigma, \rho), \quad (1)$$

where (σ, ρ) are the local coordinates, ρ is the distance to ∂S and $\sigma \in \partial S$ is the parameter on the boundary. $K_0(\sigma)$, $c_{kl}(\sigma)$ are smooth function on ∂S and $\mathbf{T}_{M+1}(s, \rho)$ is the remainder which is smoother than solution. $\nu := (0, \nu_0, -\nu_0)$, $\nu_0 := (2\pi)^{-1} \log \lambda_0$ is the vector, responsible for the oscillation and λ_0 is the eigenvalue of some explicitly written 3×3 matrix. Logarithmic terms eliminate if $\nu_0(\sigma) = \text{const.}$ is independent on σ and, moreover, the asymptotics (1) simplifies significantly if the oscillation does not occur $\nu_0 = 0$:

$$\mathbf{T}(\sigma, \rho) = \sum_{k=0}^M c_k(\sigma) \rho^{-\frac{1}{2} + k} + \mathbf{T}_{M+1}(\sigma, \rho). \quad (2)$$

We investigate more detailed the interface crack problem for isotropic bodies. As an important consequence we present a criterion for non–oscillating solutions: if

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{1 - 2\sigma_1}{1 - 2\sigma_2},$$

where μ_k are the shear moduli and σ_k are the Poisson ratios ($k = 1, 2$) then and only then the solution is non–oscillating. The same result was already formulated by Williams and Ting. Here we present a rigorous justification for the three–dimensional case. Moreover, we get the explicit formula for the matrix–coefficient $K(\sigma)$ in the asymptotic expansion (1).

VERSAGENSANALYSE VON TEXTILVERSTÄRKTEN VERBUNDWERKSTOFFEN BEI HOCHDYNAMISCHER BELASTUNG

W. Hufenbach, L. Kroll, M. Gude, Ch. Ebert

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK)

TU Dresden

Abstract

Neuartige Verbundwerkstoffe mit dreidimensionaler Textilverstärkung besitzen sowohl hohe spezifische mechanische Eigenschaften als auch ein einstellbares Energieabsorptionsvermögen. Sie sind somit für den Einsatz in impact- und crashrelevanten Leichtbaukomponenten geradezu prädestiniert. Trotz der vorteilhaften Eigenschaftskombination hat die junge Werkstoffgruppe der Textilverbunde jedoch noch nicht die entscheidende Anwendungsreife gefunden. Dies ist im Wesentlichen auf das Fehlen von Modellen zur Beschreibung des komplizierten dehnratenabhängigen Werkstoff- und Versagensverhaltens zurückzuführen, was letztlich eine zuverlässige Auslegung textilverstärkter Verbundbauteile für hochdynamische Anwendungen extrem erschwert.

Zur Entwicklung geeigneter Berechnungsmodelle sind zunächst grundlegende experimentelle Untersuchungen an textilverstärkten Verbundwerkstoffen erforderlich, um fundierte Kenntnisse über deren Deformationsverhalten und Versagensmechanismen bei hochdynamischer Belastung zu gewinnen. Grundlegende Belastungsversuche bei unterschiedlichen Dehnraten dienen dabei zur Erarbeitung von Material- und Versagensmodellen zur realistischen Beschreibung des Werkstoffverhaltens und Bewertung von dreidimensionalen Beanspruchungszuständen infolge hochdynamischer Belastung. Hierauf aufbauend werden im Weiteren textilspezifische Werkstoffmodelle unter Berücksichtigung herstellungsbedingter Restriktionen entwickelt, die zur Berechnung des Impact- und Crashverhaltens mittels numerischer Programmsysteme herangezogen werden.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen liegt der Fokus auf textilverstärkten Verbunden auf Basis neuartiger Mehrlagengestricke des Instituts für Textil- und Bekleidungstechnik (ITB) der TU Dresden. Die am ITB entwickelten Mehrlagengestricke zeichnen sich dabei durch bis zu fünf Lagen in Kett- und Schussrichtung gestreckt angeordneter Verstärkungsrovings (Glas, Aramid oder Kohlenstoff) aus, die durch Maschen aus Verstärkungsfadenmaterial einstellbar fixiert sind. Aus diesem Maschenaufbau resultieren hervorragende Drapier- und Tiefzieheigenschaften sowie deutliche Vorteile hinsichtlich Delaminationsneigung, Energieabsorption und Schadenstoleranz.

MODELL DER EVOLUTION DER SUBSTRAT-OBERFLÄCHE BASIEREND AUF DER ABSCHIEDUNG PYROLYTISCHEN KOHLENSTOFFS

A. Ekhlakov, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik
Universität Karlsruhe

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die zeitliche und räumliche Evolution der Substratoberfläche basierend auf der Abscheidung festen pyrolytischen Kohlenstoffs aus Methan [1, 2] durch chemische Gasphaseninfiltration modelliert. Das Problem wird mittels eines diffusen Grenzflächenproblems eines Phasenfeldmodells [3] entwickelt. Die chemische Gasphaseninfiltration [4] zur Herstellung kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoffe (CFC), die als isotherm und isobar betrachtet wird, ist die Folge einer komplizierten Wechselwirkung verschiedener Prozesse in der Gasphase (Transportprozesse und homogene chemische Reaktionen) und auf der Substratoberfläche (heterogene Abscheidungsreaktionen). Die Evolution wird mittels eines vereinfachten chemischen Reaktionsschemas [5], der Ginzburg-Landau-Gleichung und modifizierter Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben.

Die Ergebnisse dieses Modells dienen als Input für Molekulardynamik-Simulationen zur Bestimmung der Mikrostruktur von CFC. Das Ziel ist, den Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften von CFC zu quantifizieren.

REFERENZEN

- [1] de Pauw V., Reznik B., Gerthsen D. Texture and nanostructure of pyrocarbon layers deposited on planar substrates in a hot-wall reactor, *Carbon* **41**(2): 71-77 (2003)
- [2] Reznik B., Gerthsen D., Hu Z.J., Hüttinger K.-J. Morphology and texture degree of pyrolytic carbon layers deposited at various methane pressures. *CD-ROM ISBN-7-900262-03-7/G.03* of An International Conference on Carbon, Beijing, China, 2002, Session H "Carbon/Carbon and Other Matrix Composites Structural: C/C", paper H12
- [3] G. Caginalp, An analysis of a phase field model for a free boundary, *Archive Rational Mechanics and Analysis* **92**: 205-245 (1986)
- [4] Benzinger W, Hüttinger K.-J. Chemistry and kinetics of chemical vapor infiltration of pyrocarbon-V. Infiltration of carbon fiber felt, *Carbon*, **37**(6):941-946 (1999)
- [5] Dong G. L., Hüttinger K.-J. Consideration of reaction mechanisms leading to pyrolytic carbon of different textures, *Carbon* **40**(14): 2515-2528 (2002)

DIMENSIONIERUNG VON KLEBVERBINDUNGEN MIT HILFE DER BRUCHMECHANIK

O. Hahn, C. Handing, J. Jendrny

**Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF)
Universität Paderborn**

Abstract

Aufgrund des stetig wachsenden Umweltbewusstseins und dem damit verbundenen Bestreben, Energie und Ressourcen zu sparen, sind Industrieunternehmen gezwungen, die Eigenschaften der verschiedenen technisch relevanten Werkstoffe bestmöglich zu kombinieren. Das Kleben bietet in der blechverarbeitenden Industrie aufgrund der flächigen Kraftübertragung eine gute Alternative zu Fügetechniken wie Stanznieten und Punktschweißen. Für einen konsequenten Einsatz der Klebtechnik fehlt jedoch im industriellen Alltag derzeit die notwendige Akzeptanz für diese Technologie. Ein Grund hierfür ist nicht zuletzt der Mangel an entsprechenden Berechnungsmethoden, um das Kurzzeit-, Langzeit- und Crashverhalten abzuschätzen. So wird derzeit vielfach über aufwendige experimentelle Untersuchungen die Einsatzmöglichkeit der Klebtechnik für gewisse Anwendungen nachgewiesen, was einen nicht unerheblichen finanziellen Aufwand mit sich bringt. Durch den zukünftigen Einsatz entsprechender Berechnungsmethoden ist es möglich die Kosten für experimentelle Untersuchungen sowie Entwicklungszeit einzusparen. Hier hat sich die Finite Elemente Methode (FEM) als eine bewährte Hilfe herausgestellt.

In dieser Arbeit wurde der Einsatz der Bruchmechanik für die ergänzende Dimensionierung geklebter Bauteile, neben der klassischen Festigkeitsberechnung, untersucht. Hierzu wurden zunächst experimentelle Versuche an geklebten CTS-Proben unter Mode I, Mode II und diskreten Mixed-Mode Verhältnissen durchgeführt. Mittels FEM-Berechnungen wurden gemäß den Bruchkräften, unter Annahme von linearelastischem Materialverhalten für den Klebstoff, Spannungsintensitätsfaktoren berechnet. Die mittels dieser K-Faktoren bestimmten Bruchgrenzkurven wurden im weiteren Verlauf der Untersuchungen als Dimensionierungsgrundlage verwendet.

Zur Verifikation der aufgestellten Bruchgrenzkurve wurden weitere experimentelle sowie numerische Untersuchungen an dünnen rissbehafteten Zugscherproben durchgeführt. Im Rahmen der experimentellen Streuung ergab sich eine gute Übereinstimmung der ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren für beide Probenformen.

EIN PROBABILISTISCHER ZUGANG ZUR HOMOGENISIERUNG FESTER SCHÄUME

J. Hohe¹, W. Becker²

¹) Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg/ Brsg.

²) Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Mechanik

Feste Schäume spielen als Konstruktionswerkstoffe in vielen Bereichen des modernen Leichtbaus eine wichtige Rolle. Die Analyse von Bauteilen aus zellulären Materialien im Rahmen des ingenieurmäßigen Designprozesses erfolgt üblicherweise mit Hilfe makroskopischer „effektiver“ Eigenschaften, die mit experimentellen oder numerischen Methoden bestimmt werden. Die numerische Bestimmung erfolgt meist mit periodisch idealisierten Modellen, die den speziellen Eigenschaften stochastisch ungeordneter mikroheterogener Materialien jedoch nur eingeschränkt gerecht werden.

Ziel der gegenwärtigen Arbeit ist die numerische Bestimmung der effektiven Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften fester Schäume unter Berücksichtigung der mikrostrukturellen Unordnung. Hierzu wird ein bestehendes verzerrungsenergiebasiertes Homogenisierungsmodell [1] für streng periodische zelluläre Materialien entsprechend erweitert. Die Mikrostruktur wird randomisiert, indem für eine vorgegebene Topologie der Mikrostruktur die Positionen der Zellwandverzweigungen nicht exakt vorgegeben, sondern mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators innerhalb vorgegebener Gebiete bestimmt werden. Die Randomisierung und die anschließende Homogenisierungsanalyse werden wiederholt in einer Anzahl numerischer Experimente durchgeführt, die mit statistischen Methoden ausgewertet werden [2], [3]. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass nicht nur die Mittelwerte der Effektivseigenschaften, sondern auch die zu erwartende Streuung quantifiziert werden kann.

Es zeigt sich, dass die mikrostrukturelle Unordnung signifikante Effekte sowohl im Bereich der effektiven Steifigkeit als auch im Bereich der effektiven Festigkeit hat. Steigende mikrostrukturelle Unordnungsgrade führen nicht nur zu einer starken Streuung der effektiven Materialeigenschaften, sondern, insbesondere im Fall der Querkontraktions- und Koppelkoeffizienten im Vergleich zur perfekt periodisch idealisierten Mikrostruktur auch zu einem deutlichen Absinken der effektiven Steifigkeit.

Im Bereich der effektiven Festigkeit zeigt der probabilistische Zugang, dass ein Materialversagen auch bereits bei deutlich niedrigeren effektiven Belastungen auftreten kann, als dies durch die klassischen deterministischen Modelle vorhergesagt wird.

Literatur:

- [1] Hohe, J. and Becker, W.: *Effective mechanical behavior of hyperelastic honeycombs and two-dimensional model foams at finite strain*, Int. J. Mech. Sci. **45** (2003) 891-913.
- [2] Hohe, J. and Becker, W.: Probabilistic homogenization of hyperelastic solid foams, Proc. 21st Int. Congr. Theoretical and Applied Mechanics (Warschau, 16.-20.08.2004), CD-ROM.
- [3] Hohe, J. and Becker, W.: *A probabilistic approach to the numerical homogenization of irregular solid foams in the finite strain regime*, eingereicht.

ASPEKTE DER CVI-MODELLIERUNG

T.-A. Langhoff, E. Schnack

**Institut für Technische Mechanik
Universität Karlsruhe**

Ein weit verbreitetes Herstellungsverfahren für moderne Hochleistungsverbundwerkstoffe ist die chemische Gasphaseninfiltration (CVI), in deren Verlauf ein poröses Substrat infolge einer komplexen Wechselwirkung von chemischen Reaktionen und Transportprozessen verdichtet wird [1]. Verschiedene Varianten des CVI-Prozesses (isotherm, forced-flow, mit Temperaturgradienten) werden industriell eingesetzt. Die dabei hergestellten Werkstoffe reichen von kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoffen (CFC) über Siliziumkarbid bis Aluminiumoxid und zeigen das breite Anwendungsspektrum dieses Verfahrens.

Dennoch ist das Verfahren bisher mit hohen Kosten verbunden, da eine Prozessoptimierung nur auf Modellen mit sehr vereinfachenden Annahmen beruht [2]. Diese betreffen unter anderem die Reaktionskinetik, die Beschreibung der Abscheidung und die verwendeten Geometrien.

Die mathematische Beschreibung des CVI-Prozesses führt unabhängig von der Variante oder den verwendeten Materialien auf ein nichtlineares freies Anfangs-Randwert-Problem, insofern die Wechselwirkung der sich ändernden Substratgeometrie auf die Transportprozesse berücksichtigt wird. Die räumliche und zeitliche Evolution der Substratoberfläche ist zu beschreiben.

In diesem Vortrag werden verschiedene Aspekte der CVI-Modellierung diskutiert, darunter unterschiedliche Modelle zur Beschreibung poröser Substrate sowie Techniken zur Beschreibung freier Ränder. Die Struktur und damit die Eigenschaften des so hergestellten Werkstoffs mit Prozessparametern quantitativ in Relation zu setzen, ist das Ziel.

Das hier vorgestellte Modell [3] erlaubt die Beschreibung der CVI von CFC für den Fall zylinderförmiger, einseitig geschlossener Poren. Im Modell wird ein reduziertes Reaktionsschema zur Beschreibung der Gasphasen- und Abscheidungsreaktionen verwendet. Der Einfluss der Krümmung der Substratoberfläche auf die Abscheidung wird - phänomenologisch begründet - beschrieben. Eine Analyse der Zusammensetzung der abgeschiedenen Kohlenstoffschicht kann in Beziehung zu Prozessparametern gesetzt werden. Die Verifikation des Modells anhand experimenteller Daten zeigt für niedrige Drücke eine sehr gute Übereinstimmung.

Literatur:

- [1] S. Middleman, The interaction of chemical kinetics and diffusion in the dynamics of chemical vapor infiltration, *Journal of Materials Science* **4** (1989), 1515-1524
- [2] V. I. Kulik, A. V. Kulik, M. S. Ramm, Y. N. Makarov, Modelling of SiC matrix composite formation by isothermal vapor infiltration, *Journal of Crystal Growth* **226** (2004), 333-339
- [3] T.-A. Langhoff, *Kontinuumsmechanische Modellierung der chemischen Gasphaseninfiltration pyrolytischen Kohlenstoffs*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003

3D MODELLING OF SURFACE EFFECTS AND MICROINTERACTIONS DURING FIBRE MICROBUCKLING IN COMPOSITES

Y. Lapusta

**French Institute of Advanced Mechanics, IFMA-LARAMA,
Campus de Clermont-Ferrand / Les Cezeaux, France**

Microbuckling is an important strength limiting factor. The first models of the phenomenon were 2D. They considered the fibres and matrix as a system of layers [1]. Since that time, a variety of approaches to studying this phenomenon have been proposed. An essentially 3D approach, proposed in [2], treated a double-periodic array of fibres in an infinite matrix and considered the fibres and matrix separately in a linearized formulation. Additional information on 3D approaches and an extended literature listing can be found, for example, in [3]. In this talk, a model for the estimation of the surface effects and of some typical micro-interactions during microbuckling in composites within the framework of a 3D linearized approach is presented. It considers straightforwardly the composite components at the micro-level, including the fibres, the matrix, the interfaces and possible free surfaces. The problem is solved without smearing out these components or reducing the problem to a 2D case. The fibre-matrix interfaces are considered as surfaces, responsible for the correct stress transfer in 3D. Calculations are executed for periodic distributions of fibres along the free surface. Simple material models are applied separately to the matrix and to the fibres to describe their mechanical behaviour. Examples are given of several idealized interface situations. These are a perfect fibre-matrix bonding and a sliding contact without normal displacement discontinuity. In the latter case the fibres are supported by the matrix only by normal forces, shear forces being neglected. The mathematical formulation and the solution procedure is extended to three-phase and multi-phase materials. Critical loads and characteristics of the microbuckling modes are calculated for the considered examples of fibre-matrix systems. We show that these modes depend significantly on the mechanical and geometrical parameters of the microstructure, on the quality of the fibre-matrix interfaces, and on the spacing to the nearest free surface. In order to get micromechanically founded solutions, it is advantageous to employ 3D approaches in such cases.

Literature:

- [1] Rosen B.W. Mechanics of composite strengthening, *Fibre Composite Materials*, American Society of Metals, 37-75, 1965.
- [2] Guz A.N. Construction of a theory of stability of unidirectional fibre composites, *Prikl. Mekhanika*, 5, 62-70 (in Russian), 1969.
- [3] Guz A.N. and Lapusta Y. Three-dimensional problems of the near-surface instability of fibre composites in compression (model of a piecewise-uniform medium), *International Applied Mechanics*, 35, 641-670, 1999.

MIKRORISSBILDUNG ALS SONDE FÜR DIE BEANSPRUCHUNGSGESCHICHTE VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN

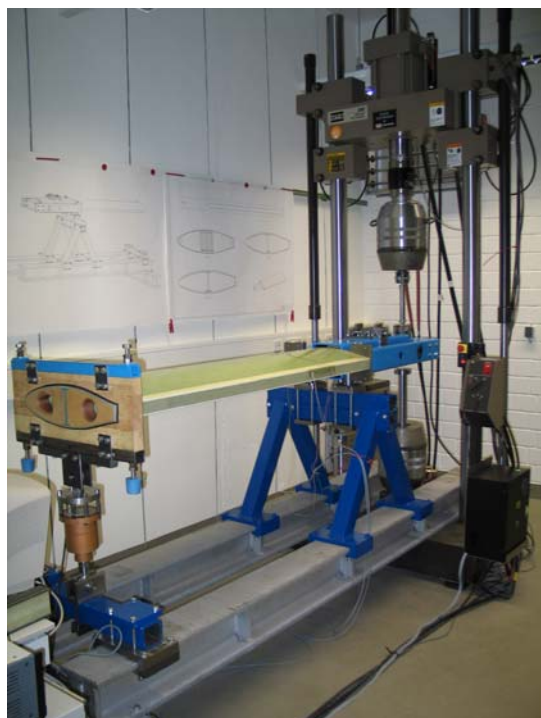
V. Trappe, C. Marotzke

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

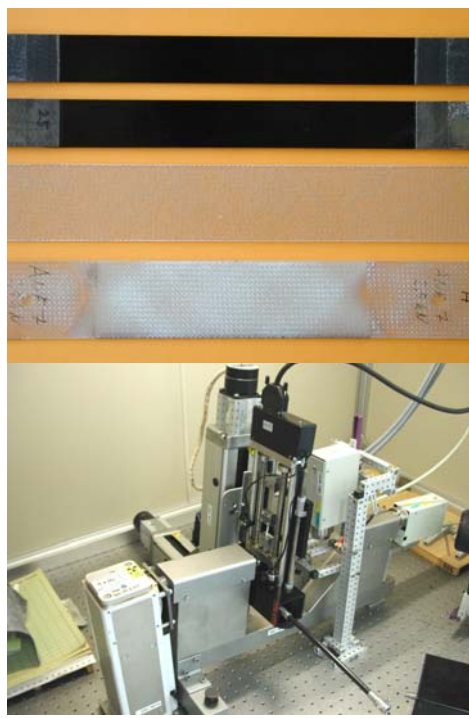
Segel- und Motorflugzeuge aus Faserverbundwerkstoffen (FVW) der ersten Generation erreichen die Lebensdauergerne von 12.000 Flugstunden. Rechnerische Lebensdauernachweise oder Betriebszeitverlängerung nach Zustand, wie bei Metallkonstruktionen etabliert, sind für FVW bisher nicht verfügbar. Segelflugzeuge stehen im Fokus der Untersuchungen, da die zulässigen Werkstoffbeanspruchungen um bis zu 50% größer sind, als bei Verkehrsflugzeugen oder Windkraftanlagen heute üblich. Um dem Gesetzgeber kompetente Entscheidungsgrundlagen über Betriebszeitverlängerung oder Stilllegung an die Hand geben zu können, werden an der BAM Inspektionsverfahren / -befunde mittels Ermüdungsversuche an Proben und einem repräsentativen Bauteil (Flügelabschnitt) erarbeitet. Hierzu soll die Mikrorissbildung (intralaminare Ermüdung) als Sonde für die tatsächliche Lebensdauerbeanspruchung genutzt werden.

Währenddessen in Glasfaserkunststoff (GFK) eine Werkstoffschädigung mit bloßem Auge erkannt werden kann, ist dies bei Kohlenstofffaserkunststoff (CFK) nur mit speziellen zerstörungsfreien Prüf-Verfahren (Röntgenrefraktion) möglich.

Im Vortrag werden Spannungszustand und Mikrorissbildung schwingend beanspruchter Rohr- und Flachproben verglichen. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde von Schadensmechanismen in den Werkstoffproben auf die Beanspruchung im Bauteil geschlossen und ein repräsentativer Komponentenversuch definiert.



Flügelabschnitt als repräsentative Bauteilkomponente



oben: geschädigte und ungeschädigte FVW-Proben (CFK, GFK); unten: Röntgenrefraktion

FEM-Berechnung von Faserverbundstrukturen mit dem Zellenmodell der Mikromechanik

A. Matzenmiller, S. Gerlach and B. Köster

Institute of Mechanics, University of Kassel

Abstract

The mechanical analyses of structures, made of composite materials, can be regarded as a twoscale problem. While a homogeneous medium is assumed within the structural analyses on the macrolevel, one is concerned with a heterogeneous material on a microlevel. The missing link between the different scales is analytically filled by homogenising a representative volume element (RVE). For this purpose use is made of a micromechanical approach, known as the generalised method of cells (GMC).

In order to compute the effective stiffness tensors of homogenised media, concentration tensors are introduced. These 4th order tensors project average composite strains, which describe the state of material points on the macrolevel, to averaged strains of each individual phase within the RVE on the microlevel.

By combining concentration tensors with stiffness tensors of the various phases and their volume fractions the sought after effective material properties are gained.

The generalised method of cells model is applied to unidirectionally reinforced composites. By making use of the GMC, it is not only possible to consider elastic and nonelastic material behaviour of the phases involved, but the flexibility of interfaces/interphases within the fibre-matrix-bond can be taken into account as well. The implementation of a nonlinear debonding model is in progress. By means of this model, it is possible to describe the softening response of composite materials, caused by an increasing decohesion of the fibres from the matrix, during the loading process of structures.

The algorithm for the homogenisation of the constitutive properties runs simultaneously to the finite element analysis and supplies the constitutive material equations on the basis of continuum mechanics. The advantage of a structural analysis, based on micromechanical constitutive theories, is that one gains a more realistic representation of the mechanical behaviour of the different phases for the compact material as well as a better grasp of the interaction between the constituents including their bonding behaviour.

Verification of the micromechanically based finite element calculations are achieved by comparing numerical results with analytical solutions of certain boundary value problems from the field of continuum mechanics.

Key words: Micromechanics, Homogenisation, Nonelastic Material Response, Finite Element Analysis.

DIE RAND-FINITE-ELEMENTE-METHODE ZUR IDENTIFIKATION VON 3D-SPANNUNGSSINGULARITÄTEN

C. Mittelstedt¹, W. Becker²

¹Fachbereich Maschinentechnik, Institut für Mechatronik, Universität Siegen

²Fachbereich Mechanik, AG 4, Technische Universität Darmstadt

Im Rahmen dreidimensionaler linear-elastischer Festkörperprobleme ist eine Vielzahl von Situationen bekannt, die mit Spannungssingularitäten einhergehen. Hierbei wird das dreidimensionale asymptotische Verhalten von Verschiebungen und Spannungen vom Singularitätszentrum ausgehend i.a. durch eine Reihendarstellung beschrieben. Für die Verschiebungen u_i und die Spannungen σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) gilt dann bei Benutzung eines sphärischen Koordinatensystems r, φ_1, φ_2 mit Ursprung im Singularitätszentrum $r = 0$:

$$u_i = \sum_{m=1}^{m=\infty} K_m r^{\lambda_m} g_{im}(\varphi_1, \varphi_2), \sigma_{ij} = \sum_{m=1}^{m=\infty} K_m r^{\lambda_m-1} f_{ijm}(\varphi_1, \varphi_2). \quad (1)$$

Hierbei wird angenommen, dass in radialer Richtung r ein Potenzgesetz gilt, während die Winkelvariationen durch die Funktionen g_{im} und f_{ijm} gegeben sind. Die generalisierten Spannungsintensitätsfaktoren werden mit K_m bezeichnet, die Größen λ_m sind Problemeigenwerte, die sowohl reellwertig als auch komplex sein dürfen. Gilt für den Realteil des m -ten Eigenwertes $\text{Re}(\lambda_m) < 1$ dann liegen singuläre Spannungen vor für $r \rightarrow 0$. Aus energetischen Gründen ist man nur an solchen Eigenwerten interessiert, für die $0 < \text{Re}(\lambda_m) < 1$ gilt.

Analytische Lösungen für dreidimensionale singuläre Probleme sind nur in den seltensten Fällen verfügbar. Was die numerischen Analysemöglichkeiten dreidimensionaler Spannungssingularitäten betrifft, so bietet sich neben der allgemeinen Finite-Elemente-Methode (FEM) die sog. Rand-Finite-Elemente-Methode (RFEM) an, wie sie als „Scaled Boundary Finite-Element Method“ oder „Consistent Infinitesimal Finite-Element Cell Method“ für allgemeine elastodynamische Probleme erarbeitet wurde [1]. Die RFEM setzt geometrische Gegebenheiten der zu untersuchenden Struktur in der Art voraus, dass das zu erfassende Kontinuum durch die zentrische Streckung eines Brandungsbereichs bezüglich eines Ähnlichkeitszentrums dargestellt werden kann. Ein wesentlicher Vorteil der RFEM ist, dass sie nur eine Rand- oder Oberflächendiskretisierung benötigt. Die RFEM führt auf eine analytische Lösung der betrachteten Problematik in Skalierungsrichtung, in den beiden Umfangsrichtungen konvergiert sie im Sinne der FEM.

Die RFEM vereint in sich damit die speziellen Vorteile der FEM und der Rand-Elemente-Methode (REM), sie ist auch bei beliebig anisotropem Materialverhalten anwendbar und kommt ohne Fundamentallösung aus. Richtig eingesetzt liefert die RFEM bei Spannungssingularitäten aufgrund der Struktur der semi-analytischen Lösung insbesondere die Ordnung der Singularitäten mit erstaunlicher Genauigkeit. Sie setzt sich damit sowohl von der klassischen FEM ab, die insbesondere bei dreidimensionalen Diskontinuitäten schnell mit unverhältnismäßigem numerischen

Aufwand zu Buche schlägt, als auch von der REM, mit deren speziellen Erfordernissen und Problemen.

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst die Genauigkeit und Leistungsfähigkeit der RFEM hinsichtlich der Ordnungen und Moden von Spannungssingularitäten im Vergleich mit bekannten Referenzlösungen demonstriert. Hiernach wird die RFEM auf verschiedene singuläre Problemstellungen im Rahmen der linearen Elastizität geschichteter Strukturen angewendet. Hierbei sind vor allem gerade Ränder ebener Lamine („Laminat-Randeffekt“, [2]) sowie freie Laminat-Ecken („Laminat-Eckeneffekt“, [3-6]) zu nennen, die mit z.T. erheblichen Spannungssingularitäten einhergehen und sich im Verlauf der letzten 3 Jahrzehnte als bedeutende Problemfelder erwiesen haben.

Literatur

- [1] **Wolf, J.P. / Song, C.:** *Finite-Element Modeling of Unbounded Media*, J. Wiley & Sons, Chichester, 1997.
- [2] **Mittelstedt, C. / Becker, W.:** *Interlaminar stress concentrations in layered structures - part I: a selective literature survey on the free-edge effect since 1967*, **J. Compos. Mater.**, Vol. 38, 2004, 1037-1062.
- [3] **Koguchi, H.:** *Stress singularity analysis in three-dimensional bonded structure*, **Int. J. Solids Struct.**, Vol. 34, 1997, 461-480.
- [4] **Labossiere, P.E.W. / Dunn, M.L.:** *Fracture initiation at three-dimensional bimaterial interface corners*, **J. Mech. Phys. Solids**, Vol. 49, 2001, 609-634.
- [5] **Dimitrov, A. / Andrae, H. / Schnack, E.:** *Singularities near three-dimensional corners in composite laminates*, **Int. J. Fract.**, Vol. 115, 2002, 361-375.
- [6] **Mittelstedt, C. / Becker, W.:** *A variational finite layer technique for the investigation of thermally induced stress concentrations in composite structures*, **J. Thermal Stresses**, Vol. 27, 2004, 953-981.

THERMOMECHANISCHES VERHALTEN DER SiC-FASERVERSTÄRKTEN TITANLEGIERUNG Ti-6242

*P.W.M. Peters**, *J. Hemptenmacher**,
*B. Günther***, *D. Bettge***, *P. Portella***

*DLR, Institut für Werkstoff-Forschung, Köln

**BAM, Abt V: Werkstofftechnik der Konstruktionswerkstoffe, Berlin

Im Rahmen einer DLR-BAM-Kooperation, finanziert durch die DFG, wird das thermomechanische Verhalten der SCS-6-(SiC-)faserverstärkten Ti-6242 Legierung untersucht und analysiert. Dieser Werkstoff ist attraktiv für den Einsatz im Kompressor im Flugtriebwerk bei Temperaturen bis 550°C. In der ersten Phase der Kooperation wurde hauptsächlich das Verhalten des Verbundwerkstoffes bei wechselnden thermischen und mechanischen Belastungen untersucht. Dabei wurde Spannung und Temperatur in Phase („in-phase“) und in Gegenphase zu einander („out-of-phase“) variiert, wie in Bild 1 dargestellt ist.

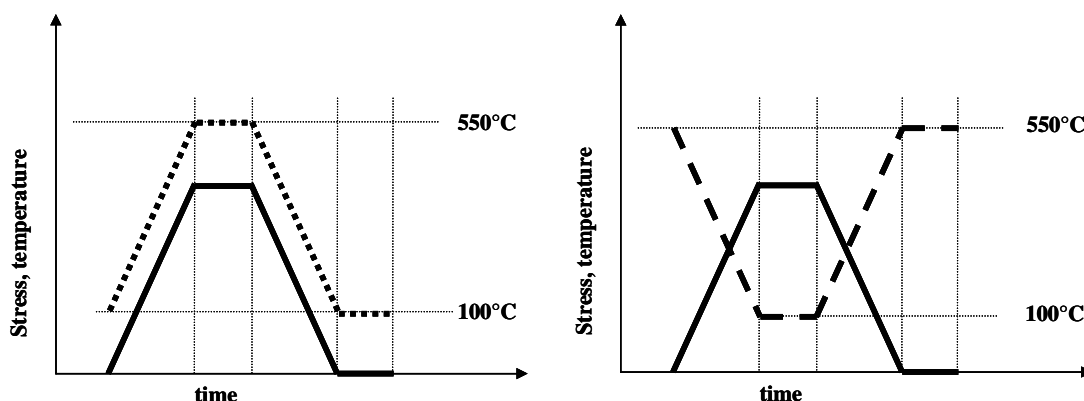


Bild 1: Untersuchte Typen des thermomechanischen Zyklierens mit 2 Min. Haltezeiten, in-phase (links) und out-of-phase (rechts)

Die Temperatur wird zwischen der maximalen Einsatztemperatur von 550°C und der minimalen Temperatur von 100°C variiert. Die Spannung wechselt zwischen minimaler und maximaler Spannung, wobei das Spannungsverhältnis $R = 0.1$ ($\sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0,1$) beträgt. Bei maximaler und minimaler Temperatur und Spannung wird eine Haltezeit von jeweils 2 min. eingehalten. Ergebnisse der in-phase und out-of-phase Versuche sind in Bild 2 im Vergleich zu den isothermen Ermüdungsergebnisse bei Raumtemperatur und 550°C dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse sind in [1] ausführlicher beschrieben.

In der letzten Phase des Vorhabens werden nun die verschiedenen Schadensmechanismen, die bei wechselnden thermomechanischen Belastungen auftreten, analysiert und analytisch oder numerisch berechnet. Die wichtigsten Schadensmechanismen sind Faserbruch bei hohen und mittleren Spannungen und Matrixrissbildung bei niedrigen und mittleren Spannungen. Bei allen Versuchsarten ist ein kurzes Leben (< 1000 Zyklen) die Folge von mehrfachem Faserversagen, da die Zyklenzahl zu klein ist für die Bildung von größeren Ermüdungsrissen. Zunächst wird Versagen durch Faserbruch (hohe Spannungen) und Matrixrissbildung (niedrige Spannungen)

getrennt von einander analysiert. In einem ersten Schritt der Analyse werden die Spannungen in den Komponenten (Fasern und Matrix) bestimmt.

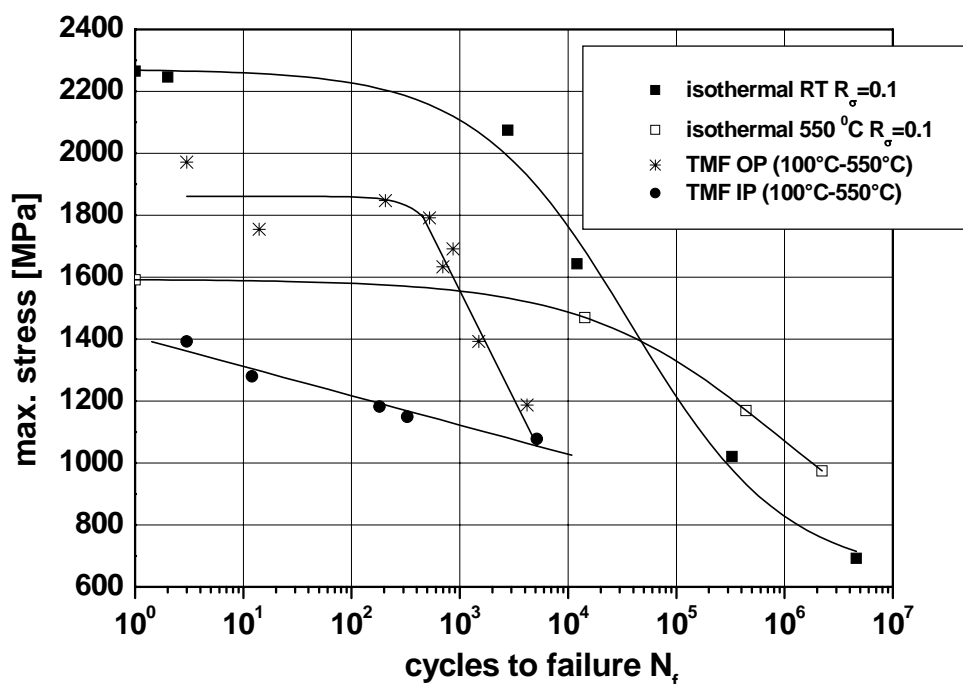


Bild 2: Isothermes Ermüdungsverhalten (bei Raumtemperatur und 550°C) und das thermomechanische Ermüdungsverhalten (in-phase TMF-IP, out-of-phase TMF-OP) des Materialsystems SCS-6/Ti-6242

Von großer Bedeutung bei der Thermomechanik der Titanmatrix-Verbundwerkstoffe ist es, die Zeitabhängigkeit der Spannungen zu berücksichtigen. An einigen Beispielen (isotherme Ermüdung bei 550°C, thermo-mechanisches in-phase Zyklieren) wird gezeigt, dass die (axiale) Spannung in der Matrix relaxiert und folglich die Spannung in den Fasern ansteigt. Dies führt teilweise zu einer Unterdrückung der Schadensmechanismen in der Matrix.

Bei Versuchsarten, wo die Matrixspannung nicht relaxiert, tritt das Phänomen der faserüberbrückenden Matrixrisse auf. Diese Rissausbreitung wurde bereits am System SCS-6/Timetal 834 mit Hilfe von drei-dimensionalen FE-Modellen simuliert [2]. Für das Vorhaben mit dem System SCS-6/Ti-6242 werden zunächst verfügbare analytische Lösungen diskutiert.

- [1] D. Bettge, B. Günther, W. Wedell, P.D. Portella, J. Hemptenmacher, P.W.M. Peters; Fatigue Damage of a SiC fibre reinforced Titanium Matrix Composite, Presented at 5th International Conference of Low Cycle Fatigue, Berlin, September 9-11, 2003
- [2] P.W.M. Peters, W.D. Zeng, J. Hemptenmacher, Z. Xia; Fatigue Life of SCS-6/Timetal 834 at Room Temperature and 600°C: Experiments and Modeling, in Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 1436, 273-288.

TWO LEVEL MATERIAL MODELING OF CVI-CFC FELT

R. Piat, N. Mladenov, E. Schnack

Institute of Solid Mechanics, University Karlsruhe

A material model for prediction of the unknown elastic properties of CVI-CFC felt is proposed. The model, consists of two hierarchical levels with different length scales: micro- and macrolevel. The unknown material properties of each level are obtained with the help of a homogenization procedure.

The representative volume element (RVE) of the material at microlevel presents a part of pyrolytic carbon matrix. The effective elastic properties of the material at this level are calculated using a modification of the rule of mixtures [1,2]. The resulting material response is isotropic.

RVE of the material at the macrolevel includes pyrolytic carbon matrix, random distributed carbon fibers (carbon felt) and pores. The homogenization procedure for this RVE consists of two steps:

- First, homogenization of material response without pores: i.e. homogenization of a media consisting of carbon fibers randomly distributed in an isotropic pyrolytic carbon matrix with overall elastic properties calculated at the microlevel.
- Second, homogenization of material response with presence of pores: i.e. homogenization of a media consisting of elliptical pores embedded in the homogenized matrix from the previous step.

The resulting material response can be isotropic or anisotropic depending on the spatial distribution of pores. Latter is empirically recovered in result of an analytical study of the images (micrographs) of the material at macrolevel. With the help of the developed method, the pores of the cross-section images were approximated with equivalent ellipsoids and further analysis was carried out using the Eshelby's theory of elliptic inclusion [3]. The obtained ellipsoids have the same volume fraction, largest distance between two points on the edge and orientation to the global coordinate system as the authentic pores.

The calculated effective properties of the infiltrated felt were compared with experimental results.

References:

- [1] K.K. Chawla, Composite materials. New York: Springer (1987).
- [2] R. Piat, B. Reznik, E. Schnack, D. Gerthen, Modeling the effect of microstructure on the elastic properties of pyrolytic carbon. Carbon 2003; 41(9):1858-61.
- [3] S. Nemat-Nasser, M. Hori, Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials. Amsterdam: North-Holland (1999).

COUPLED ANALYTICAL AND NUMERICAL SOLUTION TECHNIQUE OF 2D PIEZOELECTRIC INTERFACE CORNER CONFIGURATIONS

M. Scherzer

TUBA Freiberg

The failure assessment of smart composite structures requires efficient analytical and numerical techniques in order to tackle electrical and mechanical field concentrations. The present work is directed to the analysis of interface corner and crack configurations which occur in smart composite materials. It delivers a new technique to solve the corresponding piezoelectric boundary value problems.

The purpose of the given paper is to describe exactly the asymptotic behaviour at piezoelectric interface corner configurations using the eigenfunction expansions on the one hand, and in the linking of these expansions to regular finite elements on the other. Specific singular eigenfunctions for homogeneous and interface crack configurations are discussed. For the considered cases, the classical crack modes (Mode I and Mode II) and a new Electric Mode are identified. The coupling of the full eigenfunction expansions to the finite elements surrounding the tip region is based on the principle of virtual work applied to the orthogonalised eigenfunctions.

Finally, one gets an asymptotic stiffness matrix which does not depend on the distance to the tip. The coefficients of the eigenfunctions can be obtained efficiently from the generalised displacements of the global solution by means of the orthogonalised eigenfunctions. The technique allows to numerically bypass possible singular oscillatory terms in the weak sense, although they actually exist in the strong solution. The given approach is proven and verified in numerical test examples. Standard finite element methods encounter difficulties to give correct solutions at piezoelectric interface crack tips.

POLYMERFASERVERSTÄRKTE MENSCHLICHE WEICHGEWEBE

U. Schomburg, M. Gregor

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg-Harburg

Menschliche Weichgewebe müssen häufig verstärkt werden, weil sonst ihre Funktion nicht mehr gewährleistet ist, wie zum Beispiel bei Verletzungen, Schädigungen, Bindegewebsschwäche, Atrophie oder sogar Brüchen. Zur Verstärkung werden meistens Polymernetze verwendet. Allerdings klagen Patienten manchmal über Schmerzen, Entzündungen, dicke Narbenplatten um die Netze herum und über Brüche an den NetZRändern. Um Abhilfe zu schaffen, sollte das Problem auf dem Rechner analysiert werden.

Beispielhaft wird das Problem von Narbenbrüchen im Bauchraum herangezogen. Narbenbrüche treten manchmal nach Operationen im Bauchraum auf, weil die Verschlussnähte mit ihrer Vernarbung im günstigsten Falle 80 % der ursprünglichen Festigkeit erreichen. Ein neuerliches Vernähen führt meistens sehr schnell wieder zum Aufreißen. Das Implantieren von Polymernetzen hat die Rezidivrate zwar drastisch reduziert, aber manchmal treten die oben genannten Beschwerden auf.

Um das Problem zu analysieren, wurden zunächst die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Schichten (Muskeln, Faszien) und der gebräuchlichen Netze gemessen. Es wird gezeigt, wie durch Strukturoptimierung der Netzstruktur eine Reduzierung der Spannungsspitzen an den NetZRändern erreicht werden kann. Dabei sind die Nebenbedingungen der biologischen Kompatibilität (u. a. Vermeidung von Narben), der erforderlichen Netzfestigkeit und der mechanischen Inkompatibilität der vorhandenen Materialsteifigkeiten von Netz und Weichgewebe zu berücksichtigen.

NANOINDENTATION VON LOTWERKSTOFFEN UND DIE EINGESCHRÄNKTE MÖGLICHKEIT ZUR IDENTIFIKATION LOKALER MECHANISCHER MATERIALPARAMETER

***T. Hannach, A. Häse, A. Juritza,
W.H. Müller, J. Sterthaus***

**Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie - LKM -
Institut für Mechanik
Fakultät V. Verkehrs- und Maschinensysteme
Technische Universität Berlin**

In dem Vortrag wird auf die am LKM Berlin durchgeführten werkstoffmechanischen Untersuchungen an intermetallischen Phasen, wie sie auch an den Verbindungsstellen mikroelektronischer Bauteile vorkommen, eingegangen. Das dafür verwandte Verfahren der Nanoindentation ist eine etablierte Methode zur Ermittlung lokaler mechanischer Eigenschaften von Mikrostrukturen. Ein Nanoindentationsexperiment liefert primär Last-Verformungskurven, aus denen direkt Härte, E-Modul und anfängliche Fließspannung abgeleitet werden können. Das Ziel ist es jedoch mit Hilfe der inversen Methode, etwa aus einer FE-Modellierung des Versuches und unter Annahme eines geeigneten konstitutiven Zusammenhangs, die gesamte uniaxiale Spannungs-Dehnungskurve zu generieren.

Nähere numerische Untersuchungen am konischen Indenter, der als rechentechnisch günstigeres Modell zu dem im Versuch verwendeten Berkovich-Indenter zugrunde gelegt wurde, zeigen, dass die Möglichkeit zur Bestimmung weiterer Parameter eingeschränkt ist. Schon bei Verwendung einfacher, zeitunabhängiger Materialmodelle, wie z.B. einem bilinearen elasto-plastischen oder einem modifizierten Ramberg-Osgood Modell erweist es sich, dass diese Versuchsanordnung insensitiv für alle über den E-Modul hinausgehenden Parameter ist.

Die Erprobung eines bereits an 1D Zugproben erfolgreich getesteten Verfahrens basierend auf einem gradientenfreien, nichtlinearen Optimierer und einem FE-Programm erscheint erst dann sinnvoll, wenn Indentergeometrien verwendet werden, die zu einer höheren Sensitivität der Versuchsanordnung führen.

Der Vortrag diskutiert im Detail diese Probleme, und es wird versucht Lösungen aufzuzeigen. Zukünftige Betrachtungen werden sich der Abhängigkeit der Sensitivität von der Geometrie der Probe und des Indentors widmen.

LÖSUNG EINES INVERSEN PROBLEMS ZUR QUANTITATIVEN DELAMINATIONSBESTIMMUNG IN GESCHICHTETEN VERBUNDWERKSTOFFEN AUS OBERFLÄCHENDATEN

R. Tsotsova, E. Schnack

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe

Delaminationen stellen den am meist verbreiteten und kritischen Versagensmechanismus in geschichteten Verbundwerkstoffen dar, der im allgemeinen zu einer reduzierten Steifigkeit oder sogar zum Totalversagen der Bauteile führen kann.

Zur Bestimmung der Lage, Größe und Topologie der Delaminationsgebiete ist ein inverses Problem zu lösen, d.h. die Rekonstruktion des Verschiebungssprungs in den geschädigten Gebieten nur unter Verwendung von Oberflächenranddaten.

Es wird das Oberflächenverschiebungsfeld unter Zugbelastung durch zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mittels digitaler Phasenschiebe-Shearographie untersucht. Das betrachtete Cauchy-Problem wird bei a priori vorgegebenem Rissinterface in Subprobleme unterteilt und von einem schlecht-gestellten in ein gut-gestelltes Problem umgewandelt. Die betrachteten Delaminationsgebiete werden als Lipschitzstetig angenommen und der singuläre Anteil der Lösung wird nach den Prinzipien der linearen elastischen Bruchmechanik (als planares Problem) betrachtet. Die Lösung erfolgt iterativ nach dem von Weigl entwickelten Algorithmus AICRA (Alternating Iterative Crack Reconstruction Algorithm) [2], basierend auf dem iterativen Algorithmus von Kozlov zur Lösung von elliptischen Differentialgleichungen [1]. Der AICRA-Algorithmus wird in zwei Varianten vorgeschlagen: die 2-Rand-Variante, wenn die vollständigen Cauchydaten an der Oberfläche aus der Messung und dem Belastungsfall bekannt sind oder die 3-Rand-Variante, wenn ein Fall von überbestimmten Daten nur an einem Teil des Randes vorliegt.

Die Konvergenz- und Regularisierungseigenschaften des Algorithmus werden anhand von Testrechnungen im Falle von ebenen elliptischen Rissen in isotropen elastischen Körpern demonstriert und dazu werden konkrete Anwendungen von Berechnungsfällen an Proben aus geschichteten CFK vorgeführt.

REFERENZEN

- [1] Kozlov, V., Mazya, V. and Fomin, A., An iterative problem method for solving the Cauchy problem for elliptic equations, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 31(1), 45-52, (1991)
- [2] Weigl, W., Andrä, H. and Schnack, E., An alternating iterative algorithm for the reconstruction of internal cracks in a three-dimensional solid body, *Inverse problems*, 17(6), 1957-1975, (2001)

LOCALISATION OF FAILURE IN SHOCK-LOADED METALS

K. Weinberg

**Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie - LKM -
Institut für Mechanik
Fakultät V. Verkehrs- und Maschinensysteme
Technische Universität Berlin**

Abstract:

We present here a variational formulation of constitutive updates for porous elasto-plastic materials. The material model combines von Mises plasticity with volumetric plastic expansion as induced, e.g., by the growth of voids and defects in metals. The finite deformation theory is based on the multiplicative decomposition of the deformation gradient and an internal variable formulation of continuum thermodynamics. In that way the time-discretized version of the constitutive updates is fully variational. This applies even in the presence of viscosity and inertia.

The predictive capabilities of the model are demonstrated by a numerical simulation of the forced expansion and fragmentation of U-6%Nb rings. The presented constitutive model is employed here in conjunction with a special finite element technique well-suited for the simulation of nucleation and propagation of ductile fracture. Comparisons show a good agreement to experimental results.

ATOMARE STRUKTURIERUNG VON COMPOSIT-GRENZFLÄCHEN DURCH NICKEL- UND PLATINKATALYSATOREN

J. Woltersdorf, A. Hähnel

Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle

Die eigenschaftssteuernden Grenzschichten zwischen den Verbundkomponenten haben oft nur Abmessungen im Nanometerbereich. Da sie eine Folge chemischer Transport- und Austauschreaktionen während der Compositherstellung sind, ist ein optimiertes Design dieser Schichten durch geeignete Prozeßführung möglich. Dies erfordert eine reaktionskinetische Modellierung der Schichtbildung und eine Charakterisierung der Mikrostruktur und der chemischen Zusammensetzung bis hinab zum atomaren Niveau [1-5], einschließlich der Identifizierung der chemischen Bindungszustände, mittels hochauflösender und analytischer elektronenmikroskopischer Methoden (HRTEM, EDX, EELS, ELNES, EFTEM) und ihrer quantenmechanischen Interpretation [6].

Am Beispiel des ternären Systems Si-C-O, das für mechanisch und thermisch hochbelastbare Bauteile in Energietechnik, Antriebstechnik und Luftfahrt von großer Bedeutung ist, werden die atomaren Strukturen der Grenzschichten und abgeleitete Modelle für die in ihnen ablaufenden thermodynamischen Prozesse vorgestellt. An Sandwiches aus polykristallinem SiC und Borosilikatglas, die speziellen Wärmebehandlungen ausgesetzt waren, wurde die Gültigkeit des von uns entwickelten Vierstufenmodells der Si-C-O-Reaktionsschichtbildung [5] auch für diese Verbundmaterialien nachgewiesen. Als Steuerparameter fungieren die strukturellen Besonderheiten der Reaktionspartner, die Prozeßtemperatur und der Sauerstoffpartialdruck an der SiC-Reaktionsfront [7]. Zusätzlich bewirkt eine Vorbeschichtung der SiC-Oberfläche mit den katalytisch aktiven Übergangsmetallen Nickel und Platin eine Graphitisierung und Mikrotextrurierung des Kohlenstoffes in der Reaktionsschicht zwischen SiC und Glas [8, 9]. Die beobachteten Effekte eröffnen die Möglichkeit eines composit-mechanisch optimierten Nano-Designs von Grenzschichten.

- [1] WOLTERS DORF, J., *Review: Nova Acta Leopoldina* NF 83 (317), 253-282 (2000)
- [2] PIPPEL, E., WOLTERS DORF, J., HÄHNEL, A., SCHNEIDER, R., *Ceram. Trans., Amer.Ceram. Soc.* 57, 273-278 (1995)
- [3] HÄHNEL, A., PIPPEL, E. und WOLTERS DORF, J., *J. Microscopy (London)* 177 (3), 264-271 (1995)
- [4] WOLTERS DORF, J., PIPPEL, E., HÄHNEL, A., *Z. Angew. Math. u. Mechan. (Wiley-VCH)* 78, Suppl.1, 81-84 (1998)
- [5] HÄHNEL, A., PIPPEL, E., SCHNEIDER, R., WOLTERS DORF, J., SUTTOR, D., *Composites Part A* 27A, 685-690 (1996)
- [6] PIPPEL, E., LICHTENBERGER, O., WOLTERS DORF, J., *J. Mater. Sci. Letters* 19, 2059-2060 (2000)
- [7] HÄHNEL, A., PIPPEL, E., WOLTERS DORF, J., *Cryst. Res. Technol.* 35, 663-674 (2000)
- [8] HÄHNEL, A., WOLTERS DORF, J., *Thin Solid Films*, submitted May 2004
- [9] HÄHNEL, A., WOLTERS DORF, J., *Materials Chemistry and Physics* 83, 380-388 (2004)

Abstracts

TEILNEHMERLISTE

Alizadeh	Alasker	Cand. Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe alizadehaa@yahoo.com
Barthel	Clemens	Dipl.-Ing. Institut für Werkstofftechnik Universität Kassel Mönchebergstraße 3 34125 Kassel c-barthel@uni-kassel.de
Brunon	Claire	Cand. Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe cbrunon@msn.com
Cochran	Sandra	Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn Sandra.Cochran@ltm.uni-paderborn.de
Deltchev	Dragomir	Dipl.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe dragomir.deltchev@imf.mach.uka.de
Dimitrov	Slav	Dr. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe slav.dimitrov@mach.uni-karlsruhe.de
Dirkmorfeld	Heinrich	Ing. grad. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn Heinrich.Dirkmorfeld@ltm.uni-paderborn.de

Duduchava	Roland	Prof. Dr. FR 6.1 - Mathematik Universität des Saarlandes Postfach 15 11 50 66041 Saarbrücken dudu@num.uni-sb.de
Ebert	Christoph	Dipl.-Ing. Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik TU Dresden Holbeinstraße 1a 01062 Dresden che@ilk.mw.tu-dresden.de
Ekhlov	Alexander	Dr. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe alexander.ekhlakov@imf.mach.uka.de
Ferber	Ferdinand	PD Dr.-Ing. habil. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn Ferdinand.Ferber@ltm.uni-paderborn.de
Fortmeier	Manfred	Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn Manfred.Fortmeier@ltm.uni-paderborn.de
Gadre	Cinmay Ramesh	Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe gadre_chinmay@rediffmail.com
Gockel	Franz-Barthold	Dipl.-Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn Franz-Barthold.Gockel@ltm.uni-paderborn.de

Handing	Christian	Dipl.-Ing. Lehrstuhl für Werkstoff und Fügetechnik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn christian.handing@lwf.uni-paderborn.de
Hentrich	Manuel	Dipl. -Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn Manuel.Hentrich@ltm.uni-paderborn.de
Herrmann	Klaus Peter	o. Prof. em. Dr. rer. nat. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn rkherrmann@hotmail.com
Hohe	Jörg	PD Dr.-Ing. habil. Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Wöhlerstraße 11-13 79108 Freiburg/Breisgau hohe@iwf.fhg.de
Huneke	Volker	Dipl. Wirt.-Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn volker.huneke@ltm.uni-paderborn.de
Koke	Isabel	Cand. Wirt.-Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn isabel.koke@ltm.uni-paderborn.de
Langhoff	Tom-Alexander	Dr. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe Tom-Alexander.Langhoff@imf.uka.de

Lapusta	Yuri	Prof. Dr. IFM - LARAMA Campus de Clermont-Ferrand Les Cezeaux BP 265 F-63175 Aubiere Cedex Yuri.Lapusta@ifma.fr
Mahnken	Rolf	Prof. Dr.-Ing. M.Sc. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Pohlweg 47-49 33098 Paderborn Rolf.Mahnken@ltm.uni-paderborn.de
Marotzke	Christian	Dr.-Ing. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Unter den Eichen 87 12205 Berlin Christian.Marotzke@bam.de
Matzenmiller	Anton	Prof. Dr.-Ing. Institut für Mechanik, CM Universität Kassel Mönchebergstr. 7 34109 Kassel amat@ifm.maschinenbau.uni-kassel.de
Mittelstedt	Christian	Dipl.-Ing. Universität Siegen Institut für Mechanik und Regelungstechnik - Mechatronik Paul-Bonatz-Straße 9-11 57068 Siegen christian.mittelstedt@uni-siegen.de
Noe	Alfons	Dr.-Ing. ZF Lemförder Fahrwerkstechnik AG&Co KG Team F-PDP2 (Virtuelle Tests und Simulation) 49441 Lemförde Alfons.Noee@t-online.de
Peters	Piet	Dr.-Ing. DLR Institut für Werkstoff-Forschung Linder Höhe 51147 Köln piet.peters@dlr.de

Piat	Romana	Dr. Universität Karlsruhe Institut für Technische Mechanik Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe Romana.Piat@mach.uni-karlsruhe.de
Scherzer	Matthias	Prof. Dr. Institut f. Mechanik und Fluidodynamik TU Bergakademie Freiberg Lampadiusstraße 4 09596 Freiberg Matthias.Scherzer@imfd.tu-freiberg.de
Schnack	Eckart	Prof. Dr.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe eckart.schnack@mach.uni-karlsruhe.de
Schomburg	Uwe	Prof. Dr.-Ing. Helmut-Schmidt-Universität Holstenhofweg 85 22043 Hamburg Uwe.Schomburg@unibw-hamburg.de
Sterthaus	Jens	Dipl.-Ing. Institut für Mechanik Technische Universität Berlin Einsteinufer 5 10587 Berlin Jens.Sterthaus@tu-berlin.de
Tsotsova	Rumena	Dipl.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe rumena.tsotsova@imf.mach.uka.de
Weinberg	Kerstin	Institut für Mechanik Technische Universität Berlin Einsteinufer 5 10587 Berlin kerstin.weinberg@tu-berlin.de
Woltersdorf	Jörg	Prof. Dr. Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik Weinberg 2 06120 Halle wolt@mpi-halle.de

INFORMATION



KONTAKTADRESSE

Lehrstuhl für Technische Mechanik
 Universität Paderborn
 Warburger Str. 100
 33100 Paderborn

Tel.: +49-5251-60-2283 /-2284
 Fax: +49-5251-60-3483
 Email: Rolf.Mahnken@ltm.uni-paderborn.de
 www: <http://mb-s1.upb.de/LTM/Workshop-AGC/>

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
 Email: liborianum@t-online.de
 www: <http://www.liborianum.de/>

INDEX

A**Alizadeh** · 33

B**Barthel** · 5, 8, 33
Becker · 15, 20
Bettge · 22
Brunon · 33

C**Cochran** · 33

D**Deltchev** · 4, 9, 33
Dimitrov · 3, 10, 33
Dirkmorfeld · 33
Duduchava · 4, 11, 34

E**Ebert** · 5, 12, 34
Ekhlakov · 4, 13, 34

F**Ferber** · 34
Fortmeier · 34

G**Gadre** · 34
Gerlach · 19
Gockel · 34
Gregor · 26
Gude · 12
Günther · 22

H**Hahn** · 14
Hähnel · 30
Handing · 5, 14, 35
Hannach · 27
Häse · 27
Hemptenmacher · 22

Hentrich · 35
Herrmann · 3, 5, 35
Hohe · 5, 15, 35
Hufenbach · 12
Huneke · 35, 37

J**Jendrny** · 14
Juritza · 27

K**Koke** · 35, 37
Köster · 19
Kroll · 12

L**Langhoff** · 5, 16, 35
Lapusta · 3, 17, 36

M**Mahnken** · 3, 36
Marotzke · 4, 18, 36
Matzenmiller · 5, 19, 36
Mittelstedt · 3, 20, 36
Mladenov · 24
Müller · 27

N**Noe** · 36

P**Peters** · 4, 22, 36
Piat · 4, 24, 37
Portella · 22

S**Sändig** · 11
Scherzer · 3, 25, 37
Schnack · 3, 4, 9, 10, 13, 16, 24, 28, 37
Schomburg · 5, 26, 37
Sterthaus · 4, 27, 37

T***Trappe*** · 18***Tsotsova*** · 3, 28, 37

W***Weinberg*** · 4, 29, 37***Wendland*** · 11***Woltersdorf*** · 4, 30, 37

NOTIZEN