



**LEHRSTUHL FÜR TECHNISCHE MECHANIK  
UNIVERSITÄT PADERBORN**



**18. Workshop  
Composite Forschung in der Mechanik  
06. und 07. Dezember 2005  
Paderborn, Liborianum**

**Prof. Dr.-Ing. R. Mahnen  
o. Prof. em. Dr. rer. nat. K. P. Herrmann  
Lehrstuhl für Technische Mechanik  
Universität Paderborn  
Warburger Str. 100  
33098 Paderborn**

**o. Prof. Dr.-Ing. E. Schnack  
Institut für Technische Mechanik  
und Festigkeitslehre  
Universität Karlsruhe  
Kaiserstraße 12  
76128 Karlsruhe**





---

**Dienstag, 06. Dezember 2005****18. Workshop Composite Forschung**

---

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

(Chairman: E. Schnack)

9.10-9.35 **J. Hohe**, Freiburg: "Stochastische Homogenisierung hyperelastischer zellulärer Festkörper"

9.40-10.05 **T. Hauck**, München: "Mathematische Modellierung mikromechanischer Systeme"

10.10-10.35 **A. Shaban, R. Mahnen**, Paderborn: "Simulation of rate dependent plasticity of polymers using the stress mode dependent weighting functions"

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

(Chairman: E. Schnack)

11.05-11.30 **S. Dimitrov, E. Schnack**, Karlsruhe: "Variational formulation and path-domain independent integrals for discrete inelasticity"

11.35-12.00 **J. Utzinger, A. Menzel, P. Steinmann**, Kaiserslautern: "Aspects of well posedness in continuum interface problems"

**12.15-14.00 Mittagspause****SEKTION III: Schädigung und Rissbildung in Composites**

(Chairman: W. H. Müller)

14.00-14.25 **V.V. Koblelev**, Siegen: "Break of fibers by a crack propagating in a composite in the frame of a Cosserat theory of elasticity"

14.30-14.55 **T. Seelig**, Freiburg: "Computational modeling of deformation mechanisms in thermoplastic microlayer composites"

---

**Dienstag, 06. Dezember 2005****18. Workshop Composite Forschung**

---

15.00-15.25 **B. Köster, A. Matzenmiller**, Kassel: "A twoscale damage model for undirectionally reinforced composites"

15.30-15.55 **L. Kärger**, Braunschweig: "Schnelle Impactsimulation von Sandwichstrukturen"

**16.00-16.25 Kaffeepause**

#### **SEKTION IV: Mikrostrukturelle Untersuchungen und Modelle**

(Chairman: R. Mahnen)

16.30-16.55 **W. Dreyer**, Berlin: "Zur Evolution flüssiger Ausscheidungen in kristallinen Festkörpern"

17.00-17.25 **W. H. Müller, T. Böhme**, Berlin: "The description of microstructural changes in lead-free solder alloys by means of phase field theories and LSW-based approaches"

17.30-17.55 **T. A. Langhoff, E. Schnack**, Karlsruhe: "Energetische Modellierung von Mehrphasen-Materialien mit Mikrostruktur"

18.00-18.25 **D. Deltchev, E. Schnack**, Karlsruhe: "Phasenfeldmodellierung für die Temperaturgradienten-Gasphaseninfiltration von Siliziumkarbid"

18.30-18.55 **A. Ekhlov, E. Schnack**, Karlsruhe: "Molekulardynamische Simulation der Abscheidung polyaromatischer Kohlenwasserstoffe auf der Substratoberfläche"

**19.00 Abendessen im Liborianum**

---

**Mittwoch, 07. Dezember 2005****18. Workshop Composite Forschung**

---

**SEKTION V: Verbundwerkstoffe als Konstruktionswerkstoffe**

(Chairman: H. Funke)

- 8.30-8.55      **R. Tsotsova, E. Schnack**, Karlsruhe: "Zerstörungsfreie quantitative Identifikation von Delaminationen in Laminaten"
- 9.00-9.25      **C. Barthel, M. Schlimmer**, Kassel: "Kombination zweier verschiedener Klebschichten in einer Klebfuge-Berechnung und Experiment"
- 9.30-9.55      **M. Hentrich, R. Mahnken**, Paderborn: "Klebtechnik und die FEM – neue Ansätze zur Berechnung geklebter Strukturen"

**10.00-10.20      Kaffeepause****SEKTION VI: Experimentelle Methoden**

(Chairman: K. P. Herrmann)

- 10.25-10.50    **H. Funke**, Dortmund: "LamiCens – Aus der Praxis für die Praxis ein einfaches Werkzeug zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften faserverstärkter Kunststofflaminat"
- 10.55-11.20    **I. Koke, F. Ferber, H. Funke, R. Mahnken**, Paderborn: "Kenngrößenmittlung für Handlaminat und Überprüfung mit LamiCens"
- 11.25-11.50    **K. Weinberg**, Berlin: "Lebensdaueruntersuchungen an mikroelektronischen Komponenten"
- 11.55-12.20    **R. Piat, E. Schnack**, Karlsruhe: "Mehrskalenschädigungsmodellierung der CVI-CFC-Verbundwerkstoffe: Vom Experiment zur theoretischen Betrachtung"
- 12.20            Schlußwort**
- 12.30-14.00    Mittagessen im Liborianum**

## **ABSTRACTS**

## KOMBINATION ZWEIER VERSCHIEDENER KLEBSCHICHTEN IN EINER KLEBFUGE-BERECHNUNG UND EXPERIMENT

C. Barthel, M. Schlimmer

Institut für Werkstofftechnik, Universität Kassel

Bei konstruktiv sinnvoll gestalteten Klebverbindungen wird die Klebschicht auf Schub beansprucht. Würde man z.B. zwei Stahlprofile stumpf miteinander verkleben und daran ziehen, dann könnte man das Potential der Stahlteile, die eine ungefähr 10 mal höhere Festigkeit als der Klebstoff besitzen, nur gering ausnutzen. Verklebt man jedoch dünne Bleche überlappend, wie dies im Fahrzeugbau geschieht, dann kann der Überlappungsbereich so lang gewählt werden, dass die auf Schub beanspruchte Klebstofffläche deutlich größer ist als der Querschnitt der Fügeteile. Damit kann die Verbindung so ausgelegt werden, dass die Möglichkeiten der Stahlfügeteile voll ausgenutzt werden. Die mit der Überlappklebverbindung übertragbare Kraft wächst jedoch nicht proportional mit der Überlappungslänge an. Dies liegt an dem inhomogenen Spannungszustand, der aus der Nachgiebigkeit der dünnen Fügeteile resultiert. Bei unendlich steifen Fügeteilen ergäbe sich ein konstanter Spannungsverlauf über die Überlappungslänge, da sich bei einer Belastung in Längsrichtung alle Bereiche des Fügeteils um denselben Weg verschöben und damit die Klebschicht in allen Bereichen gleichmäßig aktiviert würde. Die im Automobilbau verwendeten Bleche haben eine Dicke von weniger als 2 mm und besitzen dadurch nur eine relativ niedrige Steifigkeit. Deshalb treten an den Überlappungsenden wesentlich höhere Dehnungen als im Mittenbereich der Überlappungsklebung auf. Am Ende des Klebspalts entstehen damit auch große Spannungen, wohingegen der Klebstoff im Mittenbereich niedrig beansprucht ist. Folglich nimmt die Versagensnennspannung für die Klebverbindung mit zunehmender Überlappungslänge ab. Eine Verbesserung der Klebverbindung bezüglich Verbindungsfestigkeit und Steifigkeit lässt sich erzielen, wenn in der Klebfuge zwei oder mehrere Klebschichten mit unterschiedlichen Festigkeits- und Verformungseigenschaften in Richtung der zu übertragenden Last nebeneinander angeordnet werden [1, 2]. Setzt man in den Außenbereichen einen Klebstoff mit niedrigerem Elastizitätsmodul ein, dann wird der Mittelteil der Klebfuge stärker zur Lastübertragung herangezogen. Im Laufe der letzten Jahre wurden zähmodifizierte Klebstoffe auf Epoxidharzbasis entwickelt, wie z.B. der Klebstoff Betamate 1496 V der Firma Dow. Diese Klebstoffe besitzen relativ hohe Festigkeiten und gleichzeitig die Fähigkeit, Spannungsspitzen durch plastische Verformungen abzubauen. An unserem Institut wird untersucht, ob es durch die oben beschriebene „Gradierung“ dennoch gelingt, eine weitere Verbesserung der Klebverbindung zu erzielen. Hierzu werden Finite-Elemente-Berechnungen und Experimente durchgeführt. Eine neuere Quelle [3] befasst sich mit derselben Thematik. Die hier vorgestellten Arbeiten unterscheiden sich jedoch von den in [3] erläuterten Arbeiten unter anderem in der Wahl der Klebstoffe und Fügeteilwerkstoffe, in den Grundversuchen zur Bestimmung der Parameter für die Berechnung und in dem verwendeten Materialmodell.

Für den Innenbereich wird der hochfeste, nicht zähmodifizierte Klebstoff Betamate 5103 ausgewählt. In den Außenbereichen kommen die zähmodifizierten Klebstoffe Betamate 1496 V oder Betamate 1185 zur Anwendung. Zur Charakterisierung der Klebstoffe werden Zugversuche, Torsionsversuche und auch Versuche, bei denen beide Beanspruchungsarten gleichzeitig auftreten, an stumpf geklebten Rohrprobe-

körpern durchgeführt. Alle Prüfungen erfolgen in derselben MTS-Prüfmaschine mit einer konstanten Hauptdehngeschwindigkeit. Die zur Regelung der Hauptdehngeschwindigkeit benötigten Daten liefert ein auf die Probe aufgesetzter biaxialer Wegaufnehmer. Für den hochmoduligen Klebstoff Betamate 5103 ergibt sich ein Schubmodul von 1100 MPa. Der Schubmodul des Klebstoffs Betamate 1496 V liegt bei 560 MPa, und der des Betamate 1185 beträgt 390 MPa. Unter den drei untersuchten Klebstoffen hat der Betamate 5103 die höchste Festigkeit. Sie beträgt 43 MPa. Die zähmodifizierten Klebstoffe liefern im Torsionsversuch eine annähernd bilineare Schubspannung-Gleitung-Kurve mit einer deutlich niedrigeren Steigung im zweiten Bereich. Der knieförmige Übergangsbereich, der die beiden Abschnitte verbindet, kann als Ausgangsfließgrenze bezeichnet werden. Bei einer Entlastung nach einer Belastung, die nicht zum Erreichen der Fließgrenze führt, gehen die Verformungen wieder zurück, andernfalls stellen sich bleibende Verformungen ein. Daher werden die zähmodifizierten Klebstoffe im Finite-Elemente-Modell elastoplastisch modelliert. Dazu wird neben Berechnungen mit der von-Mises-Plastizität ein auf Schlimmer [4, 5] zurückgehendes und von Mahnken [6] in ABAQUS implementiertes Materialmodell verwendet, das die bei Kunststoffen vorhandene Abhängigkeit vom hydrostatischen Spannungszustand berücksichtigt. Die im Modell benötigten Parameter wurden von Mahnken anhand der experimentellen Ergebnisse aus den Rohrprobenversuchen identifiziert. Für die Berechnungen werden zweidimensionale Modelle mit unterschiedlich feinen Diskretisierungen erstellt. Bei dem sehr fein vernetzten Modell besitzt die 0,2 mm dicke Klebschicht 10 Elemente über die Klebschichtdicke. Bei dem „normal“ diskretisierten Modell sind in der Klebschicht vier Elemente übereinander angeordnet. Die Modellierung der metallischen Fügeteile erfolgt mit der von-Mises-Plastizitätstheorie. Die Materialparameter werden hier anhand von Zugversuchen an Schulterproben bestimmt. Die Proben, bei denen in den Außenbereichen ein anderer Klebstoff als im Innenbereich eingesetzt wird, werden als Klebverbindung mit gradierter Klebschicht bezeichnet. Die Berechnung prognostiziert eine Überlegenheit der Proben mit gradierter Klebschicht gegenüber den Proben, bei denen nur einer der Ausgangsklebstoffe verwendet wird. Sie zeigt sich darin, dass die am Ende des Innenbereichs auftretenden Spannungen deutlich niedriger sind, als am Überlappungsende, wenn der hochfeste Klebstoff Betamate 5103 allein eingesetzt wird. Gleichzeitig reduziert sich der Auslastungsgrad des im Randbereich eingesetzten zähmodifizierten Klebstoffs. Bei den Berechnungen wurden die Längen der Bereiche in einer feinen Abstufung variiert und aufgrund des nichtlinearen Materialverhaltens Berechnungen auf verschiedenen Lastniveaus durchgeführt. Die Auswirkung der Diskretisierung ist bei einer Auswertung in Klebschichtmitte gering. Die Spannungen in unmittelbarer Nähe des Überlappungsendes fallen bei der feinen Vernetzung weiter ab. Verlegt man den Auswertepfad aus der Klebschichtmitte in Richtung der Fügeteile, so stellt man fest, dass sich am Überlappungsende an der Grenze zwischen Klebschicht und Fügeteil eine Singularitätsstelle befindet. Daher ist ein Spannungs- oder Dehnungskriterium für eine Prognose zum Versagen der Klebschicht nicht geeignet. Um die verschiedenen Varianten trotzdem bewerten zu können, wurde bei den weiteren Berechnungen am Lastangriffsknoten eine Verschiebung aufgebracht und für alle Lastinkremente am Lagerknoten die Reaktionskraft ausgelesen. Die Verschiebungsbelastung wurde so groß gewählt, dass alle Berechnungen vor Erreichen der kompletten Last nicht mehr konvergieren. Trägt man die Reaktionskraft über der Verschiebung des Lastangriffsknotens für alle konvergierten Lastschritte auf, so erhält man eine Kraft-Verschiebungskurve. Diese Kurven erreichen bei den Modellen mit gradierter Klebschicht höhere Kräfte als in den Fällen, bei denen die Ausgangsklebstoffe allein modelliert werden. Die rechnerisch höchste Festigkeit ergibt sich für

die Verbindung, bei der der Klebstoff Betamate 1496 V im Außenbereich eingesetzt wird und bei der der Innenbereich, in dem der Betamate 5103 verwendet wird, eine Länge von 10 mm hat.

Für experimentelle Untersuchungen an realen Dünnschleibklebungen wurde eine Fügevorrichtung zur Herstellung von Klebverbindungen mit gradierter Klebschicht hergestellt. Die Vorrichtung ist so konzipiert, dass die Bereichslängen wie in der Berechnung variiert werden können. Während der Zugversuche wird die Verformung der Fügeflächen mit einem optischen Verfahren der „Gesellschaft für optische Messtechnik“ aufgenommen. Die Festigkeiten der gradierten Klebverbindungen liegen auch im Experiment generell über den Festigkeiten der Klebverbindungen mit den Ausgangsklebstoffen. Gegenüber dem für die Dünnschleibverbindung gut geeigneten zähmodifizierten Klebstoff Betamate lässt sich durch die Kombination mit dem Betamate 5103 noch eine Festigkeitssteigerung von knapp 10 % erzielen. Die Übereinstimmung zwischen den in der FE prognostizierten Festigkeiten und den experimentell eingetretenen ist je nach betrachteter Variante sehr gut bis befriedigend. In der Berechnung fällt die Maximalkraft für einen Innenbereich mit mehr als 10 mm Länge wieder ab, im Experiment waren die Proben mit 14 mm langem Innenbereich denen mit 10 mm langem Innenbereich aber noch leicht überlegen. Die Übereinstimmung der Verschiebungen entlang einer ausgewählten Linie zwischen optischer Felddehnmessung und FE-Berechnung ist bis zu einer Last von 60 % der Versagenslast außergewöhnlich gut. Bei noch höheren Lasten treten jedoch Abweichungen auf. Zur Zeit werden am Institut Schwingversuche durchgeführt, um festzustellen, welche Auswirkungen eine 10 % höhere Festigkeit im quasistatischen Zugversuch auf die Versagensschwingspielzahl hat. Erste Versuche und theoretische Überlegungen lassen vermuten, dass das größte Potential der gradierten Klebverbindungen im Bereich der Schwingfestigkeit liegt.

## Literatur

- [1] Althof, W., „Ein Verfahren zur Festigkeitserhöhung von wärmebeständigen Überlappungsklebung“, Aluminium 49, 1973.
- [2] Matting, A., Ulmer, K., „Grenzflächenreaktionen und Spannungsverteilung in Metallklebverbindungen“, Kautschuk, Gummi, Kunststoffe 16, 1963.
- [3] Pires, I., Quintino, L., Durodola, J. F., Beevers, A., „Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints“, International Journal of Adhesion & Adhesives 23, 2003.
- [4] Schlimmer, M., „Fließverhalten plastisch kompressibler Werkstoffe“, Dissertation RWTH-Aachen, 1974.
- [5] Schlimmer, M., „Grundlagen zur Berechnung des mechanischen Verhaltens von strukturellen Klebverbindungen des Fahrzeugbaus, Tagungsband 10. Paderborner Symposium Füge-technik, 2003.
- [6] Mahnken, R., Schlimmer, M., „Simulation of strength difference in elasto-plasticity for adhesive materials“, International Journal for Numerical Methods in Engineering 63, March 2005.

# PHASENFELDMODELLIERUNG FÜR DIE TEMPERATURGRADIENTEN-GASPHASENINFILTRATION VON SILIZIUMKARBID

*D. Deltchev, E. Schnack*

**Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe**

Die chemische Gasphasenimprägnierung eines Substrats mit Siliziumkarbid (SiC) wird untersucht. Dabei spielen die Temperaturgradienten eine entscheidende Rolle. Um die zeitliche und räumliche Evolution der Substratoberfläche, die sich aufgrund der Abscheidung ständig ändert, zu beschreiben, wird ein diffuses Interfacemodell entwickelt. Hierbei wird ein Phasenfeldparameter eingeführt, dessen Verteilung Aufschluss über die Höhe der abgeschiedenen SiC-Schicht liefert. Um die Temperaturgradienten und die Geschwindigkeitsverteilung zu erfassen, werden die Navier-Stokes Gleichungen verwendet. Diese werden entsprechend modifiziert, um eine Kopplung mit dem Phasenfeldmodell zu erreichen. Anhand numerischer Ergebnisse für den Phasenfeldparameter und die Konzentrationen der beteiligten chemischen Spezies soll das Verständnis für die Wechselwirkung für die physikalisch-chemischen Prozesse während dieses Verfahrens erweitert werden, um eine Optimierung der Materialeigenschaften zu erzielen.

## **Literatur**

- [1] Tago, T., Kawase M., Ikuta Y. und Hashimoto K. "Numerical simulation of the thermal-gradient chemical vapor infiltration process for production of fiber-reinforced ceramic composites", Chemical Engineering Science, 56(6), 2161-2170, 2001.
- [2] Nestler, B., "A diffuse interface model for alloys with multiple components and phases", SIAM Journal on Applied Mathematics, 64, 775-799, 2004.
- [3] Deltchev, D., Langhoff, T.-A., Schnack E., "Phase-field model for the chemical vapour infiltration of Silicon Carbide", Preprint 2005-5, Institute of Solid Mechanics, Karlsruhe University, 2005.

## VARIATIONAL FORMULATION AND PATH-DOMAIN INDEPENDENT INTEGRALS FOR DISCRETE INELASTICITY

*S. Dimitrov, E. Schnack*

**Institute of Solid Mechanics, University of Karlsruhe**

A discrete exact-penalty formulation of inelasticity is developed based on the principle of maximum inelastic dissipation. The response of particular inelastic constituent is characterized in terms of incremental stress potential (confer with the conceptual developments in [1,2,3]) depending not only on the energy storage but also on dissipation in particular time increment. The symmetric variational structure of the discrete incremental stress potential is further investigated and material conservation laws are derived by means of Noether's theorem for the case of translational Lie symmetry group. Since dissipative nature of the studied deformation processes the associated Noether's quantity does not possess a divergence free character and thus the application of divergence theorem results in a path-domain independent integral that generalizes the classical J-integral to associative type of inelasticity.

### References

- [1] Cherkhaev, A., "Variational methods for structural optimization", Springer-Verlag, New York, 2000.
- [2] Miehe, C., "Strain-driven homogenization of inelastic microstructures and composites based on an incremental variational formulation", International Journal for Numerical Methods in Engineering 55(11), 559-591, 2002.
- [3] Miehe, C., "Computational micro-to-macro transitions for discretized microstructures of heterogeneous materials at finite strains based on the minimization of averaged incremental energy", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 192(5-6), 559-591, 2003.

## ZUR EVOLUTION FLÜSSIGER AUSSCHIEDUNGEN IN KRISTALLINEN FESTKÖRPERN

*W. Dreyer*

**Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics, Berlin**

Die bekanntesten Ausscheidungen in einem gegebenen Material betreffen vermutlich die Bildung von Wassertröpfchen in feuchter Luft. Bei diesem Phänomen sprechen wir von Nebel, und es gehört zu den Aufgaben der Thermodynamik die Evolution von Nebel unter vorgegebenen Randbedingungen zu modellieren und zu simulieren. Das Problem der Bestimmung der möglichen Gleichgewichte wurde am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts gelöst, und die Dynamik von Nebel wurde in den dreißiger Jahre von Becker und Döring mittels eines Modells behandelt, welches das Ziel hat, die Größenverteilung von flüssigen Tropfen in einem Gas bei fester Temperatur und unter festem Druck oder bei festem Volumen zu bestimmen. Zur Illustration des bemerkenswerten Phänomens, das die Dynamik und die resultierenden Gleichgewichte sehr sensibel von der Wahl der beiden zuletzt genannten Bedingungen abhängen, gehen wir zunächst auf diesen einfachen Fall ein.

Eine weitaus kompleXere Situation treffen wir aber an, wenn wir versuchen, das Problem des Entstehens flüssiger Tropfen in einem kristallinen Festkörper mittels eines erweiterten Becker-Döring Modells zu behandeln. Entsteht nämlich in einer festen Matrix durch Phasenübergang ein flüssiger Tropfen, dann treten in dessen Umgebung ein deviatorisches Spannungsfeld, welches dadurch erzeugt wird, dass die flüssige Phase mehr Raumbedarf als die feste Phase hat.

Die geschilderte Situation tritt in semi-isolierendem Galliumarsenid (GaAs) auf, wo es durch Wärmebehandlung bei hoher Temperatur zur unerwünschten Ausscheidung flüssiger arsenreicher Tropfen kommt. Für dieses Beispiel stellen wir ein Becker-Döring Modell auf und diskutieren dessen Eigenschaften. Insbesondere werden wir aufzeigen, welches die entscheidenden Kontrollparameter für Wachstum und Auflösung der Tropfen sind.

### **Literatur**

Wolfgang Dreyer & Frank Duderstadt, *On the Becker/Döring theory of nucleation of liquid droplets in solids*, WIAS-Preprint 997, 2004, erscheint im Journal of Statistical Physics, 2005

# MOLEKULARDYNAMISCHE SIMULATION DER ABSCHIEDUNG POLYAROMATISCHER KOHLENWASSERSTOFFE AUF DER SUBSTRATOBERFLÄCHE

*A. Ekhlakov, E. Schnack*

**Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe**

Die Materialeigenschaften von kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoffen, die mittels chemischer Gasphaseninfiltration hergestellt werden [1], hängen von der Struktur der abgeschiedenen Schicht auf der Nanoskala ab. Die Textur der abgeschiedenen Kohlenstoffschicht wird durch die Orientierung turbostratischer Domänen [2], die durch gleiche Ausrichtung der Basalebenen und gleichförmigen Abstand zwischen diesen gekennzeichnet sind, beschrieben und bei der Abscheidung entstehen.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Texturentwicklung während der Abscheidung unter Verwendung von Methoden der klassischen Molekulardynamik (MD) besser zu verstehen. Dafür werden auf der Substratoberfläche nanoskopisch große Volumenelemente definiert. Das Wechselwirkungspotential wird als Gay-Berne (GB) Potential angenommen, das eine Verallgemeinerung des Lennard-Jones Potentials darstellt und die Berücksichtigung der Anisotropie erlaubt. Verallgemeinerungen des GB-Potentials wurden entwickelt [3], die erfolgreich in der Beschreibung von Flüssigkristallen angewandt werden [4]. Aus den MD Simulationen resultiert eine diskrete Verteilungsfunktion für die Orientierungen der turbostratischen Domänen.

## Literatur

- [1] A. Ekhlakov, T.-A. Langhoff, E. Schnack, Phase field model of the evolution of the substrate surface of pyrolytic carbon deposited from methane, Preprint IMF, No 2005-1, 2005
- [2] 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
- [3] R. Berardi, A. Orlandi, C. Zannoni, A generalized Gay-Berne intermolecular potential for biaxial particles, *Chemical Physics Letters* 236, 462-468, 1995
- [4] C. Zannoni, Molecular design and computer simulation of novel mesophases, *Journal of Materials Chemistry* 11(11), 2637-2646, 2001

# LAMICENS – AUS DER PRAXIS FÜR DIE PRAXIS EIN EINFACHES WERKZEUG ZUR ERMITTLUNG MECHANISCHER EIGENSCHAFTEN FASERVERSTÄRKTER KUNSTSTOFFLAMINATE

H. Funke

Fachbereich Maschinenbau Fahrzeugkonstruktion, Fachhochschule Dortmund

Ein wesentliches Problem für Konstrukteure bei der Anwendung faserverstärkter Kunststoffe ist die Berechnung der anisotropen mechanischen Eigenschaften. Unterschiedliche Fasern und Matrixwerkstoffe, deren vielfältige Kombinationen und auch die Variationen der Faserorientierungen verleihen jedem Laminataufbau individuelle mechanische Eigenschaften.

In diesem Vortrag wird ein neues einfach anzuwendendes Berechnungsprogramm vorgestellt, das auf der Plattform Excel for Windows® die anisotropen Eigenschaften faserverstärkter Kunststoffe ermittelt. Nach dem Algorithmus der klassischen Laminattheorie (CLT) ist es die Philosophie dieses Programmes, Eingabe und Berechnung auf dieselbe Weise aufzubauen, wie auch in der Praxis die Herstellung von Laminaten erfolgt: Der Anwender wählt real verfügbare Faserhalbzeuge aus Datenbanken und stapelt diese zu Laminaten. Faserorientierungen und Faservolumenanteil können lagenweise variiert werden. Das Berechnungsprogramm **LamiCens** ermittelt produktionsspezifische Parameter (Laminatdicke, Laminatgewicht, Harzverbrauch), spezifische Materialkosten wie auch die anisotropen mechanischen Eigenschaften (Elastizitätsmodul, Schubmodul, Querkontraktion). Die richtungsabhängigen Eigenschaften werden graphisch dargestellt; Wertetabellen können in andere Anwendungen exportiert werden. Zusätzlich kann der Anwender Laminatbelastungen eingegeben, zu denen **LamiCens** Verformungen bei einem zweiachsigen Spannungszustand ermittelt. Das Berechnungsprogramm wendet sich insbesondere an Konstrukteure, die ein einfach anzuwendendes Werkzeug zur schnellen Vorkalkulation von Laminateneigenschaften suchen. Außerdem hat sich das Programm in der Ausbildung bereits bestens bewährt, da auf sehr einfache und anschauliche Weise das Verständnis von anisotropem Materialverhalten vermittelt wird.

Bezeichnung: **CFK-Schale**  
erstellt am 30.10.2005 von Herbert Funke

Matrix: **L 1000 / EPH 294** Matrix Wählen

	Faserhalbzeuge	Ablage- Winkel	Faservolumenanteil	
			Vorschlag	Wahl
1. Lage:	Kohlegewebe 160 g/m <sup>2</sup>	45°	35%	45%
2. Lage:	Kohlegelege 250 g/m <sup>2</sup> UD	0°	42%	52%
3. Lage:	Kohlegewebe 160 g/m <sup>2</sup>	45°	35%	45%

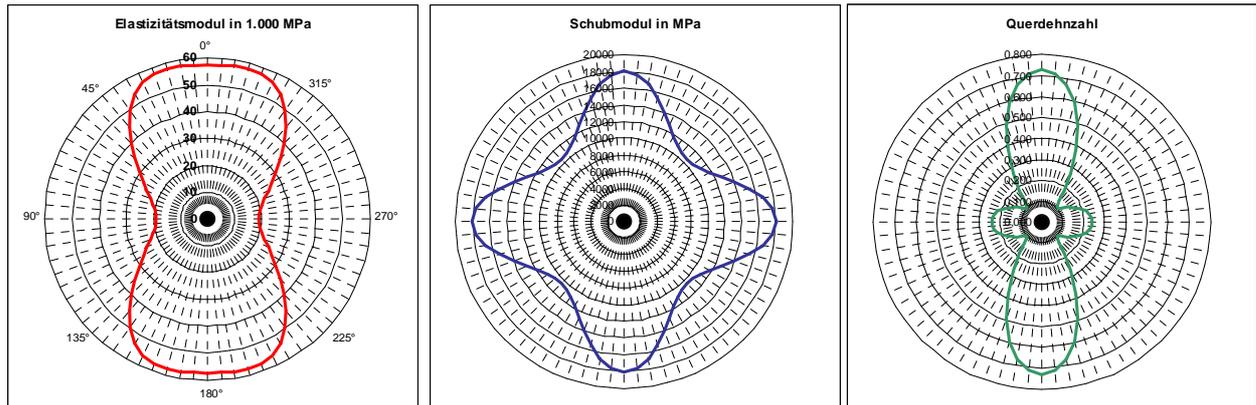
  

produktionsspezifische Kennwerte:	
Laminatgewicht:	966,5 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Fasergewicht:	570,0 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Harzverbrauch:	396,5 g/m <sup>2</sup>
Laminat-Dicke:	0,67 mm
Laminat-Faservolumenanteil:	47,8%

Kostenkennwerte:	
Laminat-Werkstoffkosten:	69,45 €/m <sup>2</sup>
Faserhalbzeugkosten:	66,36 €/m <sup>2</sup>
Matrixkosten:	3,09 €/m <sup>2</sup>

**Abb. 1 Laminataufbau mit berechneten produktionsspezifischen und Kostenkennwerten**



**Abb. 2 Graphische Darstellung anisotroper Lamineigenschaften**

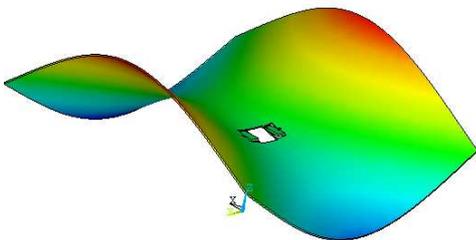
Das Programm **LamiCens** ist seit Frühjahr 2004 frei im Internet verfügbar und wird seitdem von über 3.000 registrierten Anwendern erfolgreich eingesetzt.

# MATHEMATISCHE MODELLIERUNG MIKROMECHANISCHER SYSTEME

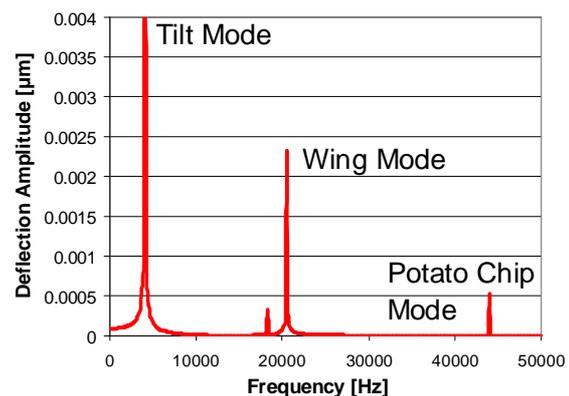
*T. Hauck*

**Freescale Halbleiter Deutschland GmbH, München**

Focus of this paper is the generation of macromodels that capture all relevant information of sensor devices. The approach starts with a finite element model, which considers electromechanical coupling and fluid-structure interaction at the continuous-field level. ANSYS/Multiphysics reduced order model (ROM) procedures are used to reduce the large amount of degrees of freedom of the device model. The procedure is based on a linear modal analysis and the representation of the state variables in terms of a small number of basis functions. The resulting device models are suitable for system simulation. The generation pass and the use of such models will be demonstrated for capacitive sensor devices. Results are compared with analytical solutions and experimental data (ref. Fig. 2). The presented model generation path is part of the sensor design flow. Device models are used for optimization and circuit design.



**Figure 1: Basis Function-Potato**



**Figure 2: AC Analysis of the Sensor Model**

## KLEBTECHNIK UND DIE FEM – NEUE ANSÄTZE ZUR BERECHNUNG GEKLEBTER STRUKTUREN

*M. Hentrich, R. Mahnken*

**Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität Paderborn**

Unter den zahlreichen Fügeverfahren des modernen Maschinenbaus nimmt die Klebtechnik eine herausragende Stellung ein. Neben der Wirtschaftlichkeit dieses Fügeverfahrens bieten insbesondere die mechanischen Eigenschaften der Klebverbindungen neue Möglichkeiten im Hinblick auf die festigkeits- und gewichtsoptimierte Gestaltung von Tragstrukturen. Der linienartige Charakter einer Klebstelle führt zu einem gleichmäßigen Beanspruchungsverlauf ohne ausgeprägte lokale Spannungsüberhöhungen, so daß die Tragfähigkeit sowohl der Fügeteile, als auch des Klebmaterials optimal genutzt werden kann.

Die Auslegung von Klebverbindungen mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) erweist sich jedoch in vielerlei Hinsicht als schwierig. Einerseits steht eine sehr kleine Dicke der Klebschicht den deutlich größeren Abmessungen der Gesamtstruktur gegenüber, eine Situation die bei der Erstellung von Geometriemodellen Kompromisse im Hinblick auf Rechenzeit und Detailgenauigkeit erfordert. Andererseits zeigen Klebstoffe ein sehr komplexes Materialverhalten, welches stark vom jeweiligen Beanspruchungszustand abhängt – hier sind Materialmodelle erforderlich, die üblicherweise nicht in den Standard-Bibliotheken moderner FE-Programme vorhanden sind und über Benutzerschnittstellen implementiert werden müssen.

Sowohl die Modellierung der Geometrie, als auch das Materialverhalten des Klebstoffes stehen in unmittelbarem Zusammenhang bei der Erstellung eines FEM-Modells. Mit einer am Lehrstuhl für Technische Mechanik (LTM) der Universität Paderborn entwickelten Materialroutine, welche über die UMAT bzw. VUMAT-Schnittstelle in das FE-System ABAQUS implementiert wird, lassen sich Grundversuche an einer Doppelrohrprobe mit sehr guter Genauigkeit nachrechnen. Dabei wird neben der präzisen Abbildung der realen Experimente auch der Einfluß der Geometriemodellierung auf die Ergebnisse untersucht, so daß eine Korrelation zwischen Rechenaufwand und Genauigkeit sichtbar wird. Solche Betrachtungen sind insbesondere für den industriellen Einsatz der FE-Simulation bei umfangreichen Strukturen von elementarer Bedeutung und erlauben eine zuverlässige Dimensionierung geklebter Bauteile.

### Dank

Der LTM möchte allen Projektpartnern des Forschungsvorhabens „Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung – P676“, der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen und der FOSTA e. V. für die fachliche und finanzielle Unterstützung danken.

### Literatur

- [1] Schlimmer, M., „Grundlagen zur Berechnung des mechanischen Verhaltens von strukturellen Klebverbindungen des Fahrzeugbaus“, Tagungsband „Mechanisches Fügen und Kleben“, Ed. O. Hahn, 2003.
- [2] Mahnken, R., Schlimmer, M., „Simulation of strength difference in elasto-plasticity for adhesive materials, Int. J. Num. Meths. Eng. 63, 1461 – 1477, 2005.

# STOCHASTISCHE HOMOGENISIERUNG HYPERELASTISCHER ZELLULÄRER FESTKÖRPER

J. Hohe

Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg

Kunststoffschäumen kommt in modernen Verbund- und Leichtbauanwendungen auf Grund ihres geringen spezifischen Gewichts eine große Bedeutung zu. Ein Nachteil dieser Werkstoffgruppe ist die z.T. große Unsicherheit bei der Bestimmung der Materialparameter auf Grund ihrer ungeordneten Mikrostruktur.

Zur Quantifizierung dieser Unsicherheiten im Rahmen der theoretisch-numerischen Analyse des makroskopischen Materialverhaltens wird ein stochastisches Homogenisierungsverfahren vorgeschlagen. Dieses basiert auf einer Randomisierung der Mikrostruktur ausgehend von einer regulären Referenzstruktur, wobei die exakte Position der Zellwandverzweigungen zufallsgesteuert in vorgegebenen Gebieten bestimmt wird (Hohe und Becker [2]). Die Ausdehnung dieser Bereiche stellt einen zusätzlichen Materialparameter dar. Die eigentliche Homogenisierungsanalyse wird im Anschluss mit Hilfe eines bereits früher zur Homogenisierung regulärer zellulärer Mikrostrukturen verwendeten verzerrungsenergiebasierten Verfahrens (Hohe und Becker [1]) ausgeführt.

Die Randomisierung und die anschließende Homogenisierung der Mikrostruktur werden mehrfach durchgeführt. Das Ergebnis dieser numerischen Experimente wird mit stochastischen Methoden ausgewertet. Hieraus werden die akkumulierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die effektive Steifigkeit und die effektive Festigkeit bestimmt, wobei ein einfaches Spannungskriterium für die Festigkeit auf der Ebene der Mikrostruktur postuliert wird.

Es zeigt sich, dass bereits vergleichsweise geringe mikrostrukturelle Unordnungsgrade zu starken Streuungen in den effektiven Steifigkeiten bzw. den effektiven Spannungen bei vorgegebenem Niveau der makroskopischen Dehnungen führen. Dies gilt insbesondere im Druckbereich, da hier im Fall perfekt regulärer Mikrostrukturen mikrostrukturelle Instabilitäten auftreten. In diesem Fall ergeben sich stark asymmetrische Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen.

Bei der Analyse der effektiven Festigkeit kann gezeigt werden, dass diese bei Verwendung perfekt regulärer Mikrostrukturmodelle deutlich überschätzt wird. Im Vergleich zu den effektiven Spannungen bzw. Steifigkeiten gilt dies nicht nur für die möglichen unteren und oberen Extremwerte der entsprechenden makroskopischen Materialparameter sondern in starkem Maß auch für deren Mittelwerte.

## 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.: *A probabilistic approach to the numerical homogenization of irregular solid foams in the finite strain regime*, Int. J. Solids Struct. **42** (2005) 3549-3569.

## SCHNELLE IMPACTSIMULATION VON SANDWICHSTRUKTUREN

*L. Kärger*

**DLR, Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig**

Das Entwurfstool CODAC dient der schnellen Simulation des low-velocity Impacts auf Faserverbundstrukturen [1]. Da das Interesse der Luftfahrtindustrie an leichten doppelschaligen Strukturen auch für primäre Tragfunktionen wächst, wird CODAC aktuell für Sandwichstrukturen weiterentwickelt. Um eine effiziente Verformungs- und Spannungsanalyse zu gewährleisten, die der spezifischen Verformungscharakteristik des Verbundes aus zwei Faserverbunddeckschichten und einem schubweichen Kern Rechnung trägt, kommen dreischichtige finite Schalenelemente zum Einsatz [2], [3]. Zur Beschreibung des Versagensverhaltens des Kerns und der Deckschichten wurden spannungsbasierte makromechanische Schädigungs- und Degradationsmodelle in die Impactanalyse von CODAC eingebunden.

Zur Validierung der Impactsimulation dient eine Impactversuchsreihe, die am Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Dresden durchgeführt wurde. Für den Vergleich von Versuch und Berechnung wurden Kontaktkraft-Zeit-Verläufe sowie die Größen der Kernschäden herangezogen. Der Einfluss verschiedener Versagens- und Degradationsmodelle auf das Impactverhalten wurde untersucht [4]. Die Ergebnisse zeigten, dass CODAC das Kernversagensverhalten sehr gut modelliert. Gleichermaßen können Impactvorgänge mit niedrigen Energien und äußerlich nicht sichtbarem Schaden (transversales Druck-Schub-Versagen des Kerns) bereits gut und schnell simuliert werden. Für die Modellierung des rissartigen Deckschichtversagens während des Impacts erwiesen sich spannungsbasierte Versagenskriterien als weniger geeignet. Hier versprechen energiebasierte Methoden, bessere Simulationsergebnisse zu erzielen.

### Literatur

- [1] Rolfes, R., Baaran, J., Juhasz, J., Kling, A., Nolden, Ph., Kuhlmann, G., "High Performance Tools for Failure, Damage Tolerance and Stability Analysis of Composite Structures", WCCM V., Wien, Österreich, 2002.
- [2] Kärger, L., Wetzel, A., Rolfes, R., Rohwer, K., "A Three-Layered Sandwich Element with Improved Transverse Shear Stiffness and Stresses Based on FSDT", Submitted for publication to Computers and Structures, 2005.
- [3] Wetzel, A., Kärger, L., Rolfes, R., Rohwer, K., "Evaluation of Two Finite Element Formulations for a Rapid 3D Stress Analysis of Sandwich Structures", Computers and Structures 83, 1537-1545, 2005.
- [4] Kintscher, M., Kärger, L., "Impactsimulation von Sandwichstrukturen mit CODAC - Studie zu Degradationsmodellen". IB 131-2005/24, DLR, Institut für Strukturmechanik, Braunschweig, 2005.

## BREAK OF FIBERS BY A CRACK PROPAGATING IN A COMPOSITE IN THE FRAME OF A COSSERAT THEORY OF ELASTICITY

V. V. Kobelev

Fa. Muhr und Bender, Attendorn und Universität Siegen

Failure of a composite is a complex process accompanied by irreversible changes in the microstructure of the material. The known microscopic mechanisms are: the initial accumulation of damage; localized or multiple ruptures of the fibers; fiber-matrix delamination along interphase boundaries. In the present paper we analyze the localized fracture of fibers due to bending.

The main hypotheses of model are the following. The matrix contains a nucleation crack. When the load increases, the nucleation crack propagates and its edge touches the reinforcing fibers. A further increase of the stress excessively bends the fiber. The curvature of the fiber in the vicinity of the crack edge is determined by the micropolar model of the material. When the fiber curvature and bending stress reach the critical value, the fiber ruptures, and other fibers no longer arrest the crack propagation. The problem of the disk shaped crack in the moment medium is solved using the reciprocity principle and matching of the "internal" and "external" solutions. An "internal" solution is determined in the vicinity of the crack boundary where the stresses have singularities and the moment terms must be taken into account. The "external" solution is the classic solution of the disk-shaped crack in an effectively isotropic medium with effective elastic modules. The outer asymptotic of the "internal" solution matches the inner asymptotic of the "external" solution.

### Literatur

- [1] Eringen A. C., Kafadar C. B., 1976. Polar field theories, in: *Continuum Physics, Vol. 4, Polar and nonlocal field theories*. New York, Academic Press
- [2] Garajeu M., Soos E., 2003. Cosserat Models versus Crack Propagation, *Mathematics and Mechanics of Solids*, **8**, 2, 189-218
- [3] Ostoja-Starzewski M., Boccara S., Jasiuk I., 1999. On Micropolar Elastic Moduli and Characteristic Length of Composite Materials. *Mechanics Research Communications*, **26**, 387-396.
- [4] Sladek J., Sladek V., 1984. The effect of couple stress field around a penny-shaped crack, *Int. J. Fracture*, **21**, 2, 109-120
- [5] Kobelev V., 2005, Micropolar model of fracture for fiber-reinforced material. Submitted to „ *Mechanics Research Communications* “

## KENNGRÖßENERMITTLUNG FÜR HANDLAMINATE UND ÜBERPRÜFUNG MIT LAMICENS

I. Koke, F. Ferber, H. Funke, R. Mahnken

Lehrstuhl für Technische Mechanik, Universität Paderborn

Faserverbundwerkstoffe finden zunehmend Verbreitung in technischen Anwendungen, da wohl eine ihrer herausragenden Eigenschaften neben hoher Festigkeit und Steifigkeit in der auf die Belastung des Bauteils abgestimmten Fasernanordnung liegt, die es ermöglicht, einen Werkstoff zu konstruieren, der genau auf einen speziellen Anwendungsfall abgestimmt ist. Dennoch gelten Faserverbundkunststoffe auch fast fünf Jahrzehnte nach ihrer „Entdeckung“ noch immer als schwierig auszulegende Werkstoffe. Ein großes Defizit besteht in unzureichend vorhandenen Kenngrößen für die praktische Anwendung bei den schier unzähligen möglichen Materialpaarungen. Die rechnerische Dimensionierung von Faserverbundstrukturen erfolgt mittels der klassischen Laminattheorie (CLT), die auf Versuchen mit Glasfasern in den 70er Jahren beruht. Aber auch die Faserhalbzeuge und Matrixwerkstoffe für faserverstärkte Kunststoffe (FVK) unterliegen einer enormen Weiterentwicklung. Eine Hürde bei der Anwendung der CLT stellt die Kenntnis des Faservolumenanteils, welcher in dem Bauteil später realisiert wird, als elementare Eingangsgröße für die Laminatberechnung nach der CLT dar. Eine Recherche experimenteller Faservolumenanteile führt, wenn überhaupt, nur zu rudimentären Angaben für ganze Werkstoffgruppen wie beispielsweise kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK), welche durchaus unterschiedliche Merkmalsausprägungen in Abhängigkeit von Materialpaarung und Herstellungsverfahren aufweisen können. Experimentell ermittelte Kenngrößen mit Angabe konkreter Materialpaarungen vermisst man in der Literatur nahezu vollständig.

Auf Basis der CLT beruht das Berechnungsprogramm *LamiCens*, mit dessen Hilfe wichtige Eigenschaften von Laminataufbauten in Faserverbund-Kunststoffbauweise auf einfache Weise ermittelt werden können. Zur Erweiterung der Datenbank von *LamiCens* sind die Faservolumenanteile von Handlaminaten aus handelsüblichen Verstärkungsfasern (Gewebe und Gelege diverser Glas-, Aramid- und Kohlefasern in einer Matrix aus Epoxidharz L20 mit Härter VE 3261) experimentell ermittelt worden. Wesentlich für die Festigkeit des FVK ist die Faser, die in einen Matrixwerkstoff eingebettet ist. Die Matrix sorgt für den Zusammenhalt und die räumliche Verteilung der Fasern, determiniert jedoch ebenso das Bauteilgewicht. Daher ist entscheidend, wie viel Harz zur vollständigen Benetzung sämtlicher Fasern benötigt wird.

Die Berechnung der Faservolumenanteile erfolgt auf Basis von Wägung und dem Wissen um das exakte Flächengewicht des Gewebes sowie der Laminatfläche. Überwacht werden die Daten vor und nach der Temperierung sowie einige Tage danach, da Epoxidharze Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen. So zeigten bereits erste Untersuchungen eines glasfaserverstärkten Kunststoffs, dass die Herstellerangabe von 40 Prozent FVA schwerlich erreicht werden kann. Das Berechnungsprogramm *LamiCens* schlägt einen Wert von 37 Prozent vor, allerdings erscheint auch dieser zu hoch. Realistischer sind 32 bis 35 Prozent FVA bei kalter Verarbeitung im Handlaminierverfahren. Unter Verwendung von vorgewärmtem Harz lässt sich der FVA auf über 35 Prozent steigern.

Anhand von Laminaten ausgewählter Verstärkungsfasern in Epoxidharzmatrix werden Materialparameter wie der E-Modul und die Querkontraktionszahl experimentell

ermittelt. Zur flächigen Dehnungserfassung soll Photogrammetrie eingesetzt und mit den Ergebnissen von LamiCens unter Verwendung der experimentell ermittelten Faservolumenanteile verglichen werden. Dies ist insbesondere interessant, zugleich aber auch diffizil, da hier sehr geringe Dehnungen auftreten. Erste Ergebnisse werden vorgestellt.

### Literatur

- [1] Ferber, F., Dissertation, Universität Paderborn, 1986.
- [2] Ferber, F., „Numerische und experimentelle Untersuchungen rissbehafteter Strukturen, Berichte aus der Mikromechanik“, Shaker Verlag, Aachen, 2001.
- [3] Ferber, F.; Herrmann, K.P.; Linnenbrock, K., Elementary failure analysis of composite models by using optical methods of stress analysis and modern digital image systems. In: ESDA 1996, (Eds. A. Large and M. Raous) ASME, New York, Vol. 4:55-68, 1996.
- [4] Funke, H., „Systematische Entwicklung von Ultra-Leichtbaukonstruktionen in Faserverbund-Wabensandwichbauweise am Beispiel eines Kleinflugzeuges“, Rheda-Wiedenbrück, 2001.
- [5] Funke, H., LamiCens, R&G GmbH, Version 0.9, 2004.
- [6] Koke, I., „Experimentelle Ermittlung mechanischer Kenngrößen von Faserverbundwerkstoffen“, Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2005.

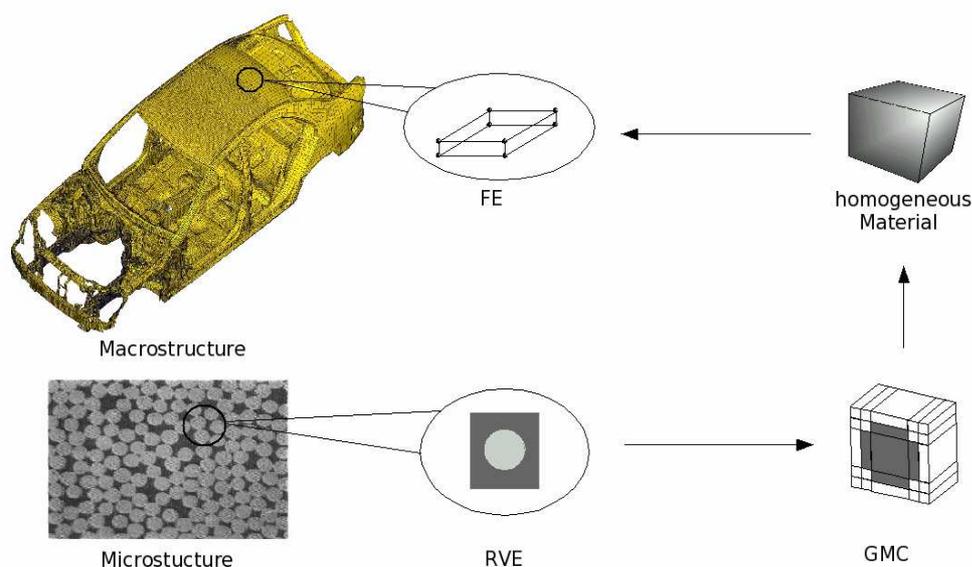
## A TWOSCALE DAMAGE MODEL FOR UNIDIRECTIONALLY REINFORCED COMPOSITES

*B. Köster, A. Matzenmiller*

Institute of Mechanics, University of Kassel

The numerical analysis of engineering structures is usually based upon the assumptions of a homogeneous as well as a continuous medium. These simplifications are maintained also for structures made of fibre reinforced composite materials which possess by definition a heterogeneous finescale architecture. Furthermore in the course of the loading of such structures void nucleations might arise out of the debonding of the embedded fibres or the growth of microcracks inside the matrix phase. Hence, the assumption of a continuous and homogeneous medium is no longer valid from a microscopical point of view. Nevertheless it is numerically advantageous to keep up these simplifying assumptions on the macrolevel. Therefore, the knowledge of the so called macroscopic or effective material behaviour is needed. Since the evolution of damage within composite materials means a rather complex process, a purely phenomenological approach is hardly feasible. Hence, the average properties shall be obtained from a micromechanical analysis of the discontinuous and damaged finescale structure.

The overall properties, that smear the heterogeneities of the microstructure and the influence of its defects, can be obtained via averaging the microscopic fields of stresses and strains over a representative volume element (RVE). The micromechanically based *Generalized Method of Cells* (GMC) gives access to the effective tangential constitutive tensor needed at each integration point in the framework of physically nonlinear finite element analyses of engineering structures. The GMC means an efficient predictive tool to average the material properties on the basis of given phase properties, the bonding characteristics and the volume fractions.



**Abb. 1 Twoscale modelling of composite structures**

# ENERGETISCHE MODELLIERUNG VON MEHRPHASEN-MATERIALIEN MIT MIKROSTRUKTUR

*T.-A. Langhoff, E. Schnack*

**Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe**

Im Zuge fortschreitender technologischer Entwicklung zielt die ingenieurwissenschaftliche Forschung an Kompositen immer mehr auf Eigenschaften und Strukturen auf mikroskopischen Längenskalen ab. In vielen Materialien treten unter thermischer und/oder mechanischer Belastung Phasenübergänge auf, welche die Mikrostruktur und damit die makroskopischen Eigenschaften verändern. Zur Beschreibung des Materialverhaltens wurden für unterschiedliche Situationen (u.a. Versagen durch Sprödbbruch, Formgedächtnislegierungen, Plasizität) Modelle entwickelt, die auf einer Energiebetrachtung basieren. In den letzten Jahren wurden Fragestellungen in dieser Richtung in Verbindung mit nicht-konvexen Funktionalen aufgegriffen [1]. Seit kurzer Zeit findet der Begriff der Gamma-Konvergenz im Zusammenhang mit Fragestellungen der Homogenisierung in der ingenieurwissenschaftlichen Forschung Beachtung [2]. Für ratenunabhängige Prozesse wurden inkrementelle Variationsformulierungen vorgeschlagen [3].

In diesem Beitrag werden Bedingungen an ein energetisches Modell für Mehrphasenmaterialien diskutiert, das sowohl den Einfluss von Mikrostrukturen auf verschiedenen Längenskalen als auch die Evolution auftretender Phasenübergänge beschreiben kann. Eine wichtige Rolle spielen Oberflächeneffekte, deren Beitrag zur Energie zur einer Relaxierung führen kann. Solche Modelle lassen sich z. B. auf das makroskopische Materialverhalten von kohlenstofffaserverstärkten Kohlenstoffen anwenden, bei denen Phasenübergänge zwischen unterschiedlichen Texturen in der Matrix auftreten und auf einer größeren Längenskala weitere kolumnare Mikrostrukturen beobachtet wurden [4].

## Literatur

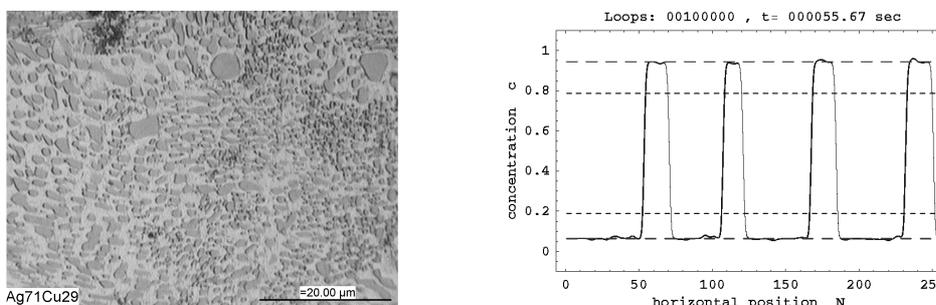
- [1] Bartels, S., Carstensen, C., Hackl, K., Hoppe, U. "Effective Relaxation for Microstructure Simulations: Algorithms and Applications", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. submitted
- [2] Mora, M. G., Müller, S. "Derivation of the nonlinear bending-torsion theory for inextensible rods by  $\Gamma$ -convergence", Calculus of Variations and Partial Differential Equations, no. 18, pp. 287-305, 2003
- [3] Mainik, A., Mielke, A. "Existence results for energetic models for rate-independent systems", Calculus of Variations and Partial Differential Equations, no. 22, pp. 73-99, 2005
- [4] De Pauw, V., Reznik, B., Kalhöfer, S., Gerthsen, D., Hu, Z.J., Hüttinger, K.J. "Texture and nanostructure of pyrocarbon layers deposited on planar substrates in a hot-wall reactor", Carbon, no. 41, pp. 71-77, 2003

# THE DESCRIPTION OF MICROSTRUCTURAL CHANGES IN LEAD-FREE SOLDER ALLOYS BY MEANS OF PHASE FIELD THEORIES AND LSW- BASED APPROACHES

*W. H. Müller, T. Böhme*

Technische Universität Berlin, Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme,  
Institut für Mechanik, Berlin, Germany

Experimental investigations show that the microstructure of solders changes over time. In order to estimate the reliability and the lifetime of microelectronics it is important to predict the rate of microstructural changes. Starting with an overview on coarsening phenomena and intermetallic growth as observed in lead-free solder alloys this talk concentrates on the description of nucleation and spinodal decomposition as well as subsequent phase growth that occurs in various solder alloys below a critical temperature (cf., Fig. 1).



**Fig. 1 Left: The microstructure of eutectic AgCu after 40h heat treatment (700°C).  
Right: 1D-simulation of phase separation in eutectic AgCu at 1273°C.**

An extended diffusion equation of the phase field type is presented which can be interpreted as a generalization of the well known Cahn-Hilliard equation. It takes diffusion of the Fickian type, surface tensions along the phase boundaries as well as local mechanical stresses into account [1]. The required material parameters can be determined either from the literature / databases or from calculations based on the embedded atom method which is suitable to describe atomic interactions in metals [2]. As an example the FCC-structured lead-free solder alloy AgCu is considered and numerical results are presented for the one-dimensional and stress-free case. Finally we turn attention to the formation of scallop-shaped intermetallic compounds observed at the interface between solder material and substrate. A LSW-based ansatz is presented that allows the prediction of the development of the mean grain radius followed by exemplary results for  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ -scallop on Cu substrate.

## Literatur

- [1] Dreyer, W., Müller, W.H., "A study of coarsening in tin/lead solders," International Journal of Solids and Structures 37, 3841-3871, 2000.
- [2] Johnson, R.A., "Alloy model with the embedded-atom method," Physical Review B, Vol. 39, 12554-12559, 1989.

# MEHRSKALEN-SCHÄDIGUNGSMODELLIERUNG DER CVI-CFC- VERBUNDWERKSTOFFE: VOM EXPERIMENT ZUR THEORETISCHEN BETRACHTUNG

*R. Piat, E. Schnack*

Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe

In den letzten Jahren wurde ein wachsendes Interesse zu Mehrskalenmaterialien festgestellt, die man auch als Materialien mit struktureller Hierarchie bezeichnen kann. Ein Beispiel solcher Materialien sind die CVI-CFC-Verbundwerkstoffe. In mikroskopischen Untersuchungen lässt sich nachweisen, dass diese Materialien eine sehr komplizierte Struktur auf mehreren Längenskalen besitzen [1]. Zur Beschreibung des Materialverhaltens dieses Materials wurde ein hierarchisches Materialmodell [2] entwickelt. Einen weiteren Schritt in der Modellierung dieser Materialien stellt die Mehrskalen- Schädigungsmodellierung dar.

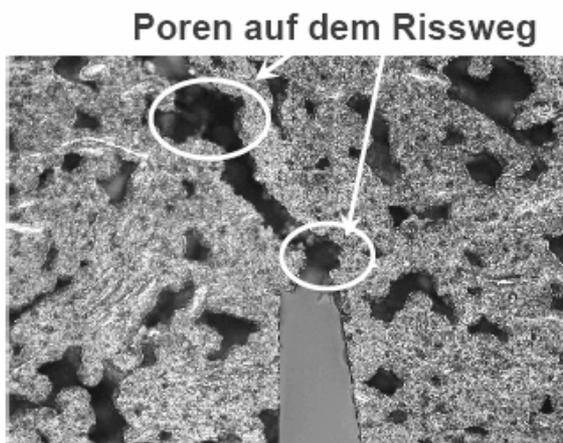


Abb. 1 Rissverlauf ab Kerbenspitze

Um dieses Phänomen zu verstehen, wurden zwei CVI – infiltrierte C-Filze, die unterschiedliche Mikrostruktur haben, experimentell untersucht. Bei den Experimenten handelt es sich um einen Vierpunkt-Biegeversuch, der mit V-gekerbten Proben bei der thermomechanischen zyklischen Belastung durchgeführt wurde. Nach dem Experiment wurden die gebrochenen Proben auf verschiedene Auflösungsstufen mikroskopisch untersucht und der von der Mikrostruktur abhängige Rissverlauf bestimmt. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde ein für diese Materialien geeignetes Rissausbreitungskriterium

identifiziert [3]: Dieses Kriterium erlaubt die Berücksichtigung der Mikrostruktur auf niedrigeren Ebenen. Die dargestellten experimentellen und theoretischen Untersuchungen sind die Grundlagen der weiteren numerischen Simulation.

## Literatur

- [1] Reznik B, Gerthsen D, Hüttinger KJ. „Micro- and nanostructure of the carbon matrix of infiltrated carbon fiber felts”, Carbon; 39(2), 2001.
- [2] Piat R, Schnack E. “Hierarchical material modeling of carbon/carbon composites.” Carbon, 41(11), 2003.
- [3] Leguillon D., Yosibash Z. “Crack onset at a v-notch. Influence of the notch tip radius”. Int.J.of Fracture 122, 2003.

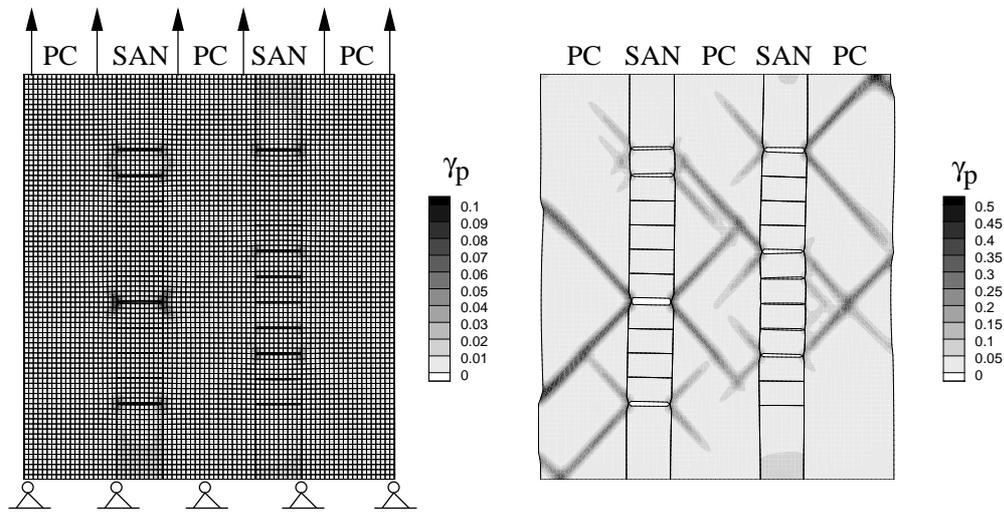
## COMPUTATIONAL MODELING OF DEFORMATION MECHANISMS IN THERMOPLASTIC MICROLAYER COMPOSITES

*T. Seelig*

Fraunhofer-Institute for Mechanics of Materials, Freiburg, Germany

Amorphous thermoplastic polymers display an ambivalent and complex mechanical behavior, ranging from the ability to undergo large inelastic deformations (e.g. shear banding) to brittle failure by crazing. Typical examples are polycarbonate (PC) and styrene-acrylonitrile (SAN), where the former is known to be ductile while the latter is rather brittle.

Subject of this paper is the numerical simulation of the deformation behavior of composites which consist of many alternating layers of PC and SAN (see Fig.). Microlayer composites of this type have been experimentally studied in [1] where several aspects of the microscopic deformation mechanisms have been revealed in a qualitative manner. The present work aims at gaining some additional insight from micro-mechanical models and detailed finite element simulations. Therefore, the rate-dependent deformation behavior of the glassy polymers is described by an appropriate viscoplastic constitutive model [2] while the formation of crazes is treated within the framework of cohesive surfaces [3]. This approach allows to reproduce and analyze the network-like interaction of shear bands and crazes (see Fig.) observed in tensile tests on this class of composite materials.



### References

- [1] Im, J., Baer, E. and Hiltner, A., "Microlayer Composites", in: Baer, E. and Moet, A. (Eds.) "High Performance Polymers", pp. 175-198, Hanser Publishers, 1991
- [2] Boyce, M.C., Parks, D.M. and Argon, A.S., "Large inelastic deformations of lassy polymers", Mech. Mater. no. 7, pp. 15-33, 1988
- [3] Tijssens, M.G.A., Van der Giessen, E. and Sluys, L.J., "Modeling of crazing sing a cohesive surface methodology", Mech. Mater. no. 32, pp. 19-35, 2000

# **SIMULATION OF RATE DEPENDENT PLASTICITY OF POLYMERS USING THE STRESS MODE DEPENDENT WEIGHTING FUNCTIONS**

***A. Shaban, R. Mahnken***

**University of Paderborn, Germany**

Polycarbonate is an amorphous polymer which exhibits nonlinear deformation before failure. It shows a pronounced strength-differential effect between compression and tension. Strain rate influences the mechanical response of the polycarbonate. In particular, the yield stress is increased with increasing strain rate [1]. The concept of stress mode dependent weighting function is used in the proposed model to simulate the asymmetric effects for different loading speeds. In this concept, an additive decomposition of the flow rule is assumed into a sum of weighted stress mode related quantities. The characterization of the stress modes is obtained in the octahedral plane of the deviatoric stress space in terms of the mode angle, such that stress mode dependent scalar weighting functions can be constructed [2]. The resulting evolution equations are updated using backward Euler scheme and the algorithmic tangent operator is derived for the finite element equilibrium iteration. The numerical implementation of the resulting set of constitutive equations is used in a finite element program for parameter identification. The proposed model is verified by showing a good agreement with the experimental data.

## **References**

- [1] Richeton, J., Ahzi, S., Vecchio, K. S., Jiang, F. C., Adharapurapu, R.R., "Influence of Temperature and Strain Rate on the Mechanical Behavior of Three Amorphous Polymers: Characterization and Modeling of the Compressive Yield Stress," *Int. J. Solids Struct.*, accepted.
- [2] Rolf Mahnken, "Creep Simulation of Asymmetric Effects by Use of Stress Mode Dependent Weighting Functions," *Int. J. Solids Struct.* 40 (2003) 6189-6209.

## ZERSTÖRUNGSFREIE QUANTITATIVE IDENTIFIKATION VON DELAMINATIONEN IN LAMINATEN

*R. Tsotsova, E. Schnack*

**Institut für Technische Mechanik, Universität Karlsruhe**

Delaminationen erweisen sich als der am meist verbreitete und kritische Versagensmechanismus in geschichteten Verbundwerkstoffen, deren Entstehung durch eine fehlerbehaftete Herstellung oder durch die Belastungsart bedingt werden kann. Der heutzutage stark zunehmende Einsatz von Composites in der Luft- und Raumfahrt verlangt eine rechtzeitige zerstörungsfreie Erkennung der Schädigungslage, -größe und -topologie. Diese stellt ein kompliziertes inverses Problem dar.

Wird das Oberflächenverschiebungsfeld shearographisch [3] unter statischer Zugbelastung getestet, kann das inverse Problem zur Rekonstruktion des Verschiebungssprunges für eine vorgegebene Rissinterface iterativ nach Weikl [1,2] gelöst werden. Angewandt für alle Zwischenschichtlagen und kombiniert mit der Idee der Optimierungsstrategien zur Risserkennung bietet der Algorithmus AICRA auch die Möglichkeit außer Größe, Topologie und Position in der betrachteten Ebene zusätzlich noch die interlaminaire Delaminationslage zu bestimmen. Die durch AICRA iterativ gewonnene Lösung des inversen Problems, die den wahren Riss enthält, soll die Funktion der relativen Fehler zwischen den experimentellen Daten und den Oberflächendaten aus der nachfolgenden direkten Prüfrechnung minimieren.

### Literatur

- [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, no. 31(1), 45-52, 1991.
- [2] Weikl, W., Andrä, H. and Schnack, E., "An alternating iterative algorithm for the reconstruction of internal cracks in a three-dimensional solid body", Inverse problems, no. 17(6), 1957-1975, 2001.
- [3] Yang, L., Chen, F., Steinchen, W and Hung, M, "Digital Shearography for Nondestructive testing: Potentials, Limitations and Applications", Journal of Holography and Speckle, no. 1(2), 63-73, 2004.

## ASPECTS OF WELL POSEDNESS IN CONTINUUM INTERFACE PROBLEMS

*J. Utzinger, A. Menzel, P. Steinmann*

Chair of Applied Mechanics, TU Kaiserslautern

Within the computation of composites, continuum interface problems are analyzed. In this contribution, the bonding of a bulk material to a rigid substrate by an interface layer is discussed. In the interface, the relative displacement of the interface edges and the traction vector are energetically conjugated. Depending on the choice of material laws in the bulk and in the interface, problems such as the loss of well posedness of the resulting boundary value problem can occur. Using an ansatz of stationary wave type, two conditions for well posedness can be investigated. The first condition is the ellipticity of the bulk material, the second one is the so-called boundary complementing condition [1] which is the main objective of this talk. While assuming linear elasticity for the bulk material, elasticity, damage and elastoplasticity for the interface are studied in this context by introducing and investigating a complex surface acoustic tensor.

### REFERENCE

- [1] A. Benallal, R. Billardon and G. Geymonat. *Bifurcation and Localization in Rate-Independent Materials. Some General Considerations*. CISM Courses and Lectures, 327:1-45, 1993

## **LEBENSDAUERUNTERSUCHUNGEN AN MIKROELEKTRONISCHEN KOMPONENTEN**

*K. Weinberg*

**Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie - LKM – Institut für Me-  
chanik, Fakultät V. Verkehrs- und Maschinensysteme  
Technische Universität Berlin**

In den HDS-Chips mikroelektronischer Bauteile verbinden kleine Kupferröhrchen, sogenannte Vias, die einzelnen Schichten von Chip und Platine. Gefertigt werden die Vias aus elektrolytisch abgeschiedenem Kupfer, einem Material mit sehr hoher Zähigkeit aber auch einer gewissen Porösität. Entstehen während des Betriebs Schädigungen in den Vias wie, z.B. Rissen und Poren, kann das zum Verlust der elektrischen Leitfähigkeit des Vias und damit letztlich zum Versagen des gesamten Chips führen.

Wir stellen hier ein Materialmodell vor, das sowohl die plastische Dehnung als auch das Wachsen von Poren im Kupfer berücksichtigt. Mit diesem Modell wurden zahlreiche Rechnungen für Vias in unterschiedlichen Positionen auf einem HDS-Chip durchgeführt. Aus den Ergebnissen wird eine Strategie zur Einschätzung der voraussichtlichen Lebensdauer der Vias abgeleitet.

## **TEILNEHMERLISTE**

<b>Barthel</b>	<b>Clemens</b>	Dipl.-Ing. Institut für Werkstofftechnik Universität Kassel Mönchebergstraße 3 34125 Kassel <a href="mailto:c-barthel@uni-kassel.de">c-barthel@uni-kassel.de</a>
<b>Caylak</b>	<b>Ismail</b>	Dipl.-Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Ismail.Caylak@ltm.uni-paderborn.de">Ismail.Caylak@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Cochran</b>	<b>Sandra</b>	Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Sandra.Cochran@ltm.uni-paderborn.de">Sandra.Cochran@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Deltchev</b>	<b>Dragomir</b>	Dipl.-Ing. Institut für Technische Mechanik Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe <a href="mailto:dragomir.deltchev@imf.mach.uka.de">dragomir.deltchev@imf.mach.uka.de</a>
<b>Dimitrov</b>	<b>Slav</b>	Dr. Institut für Technische Mechanik Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe <a href="mailto:slav.dimitrov@mach.uni-karlsruhe.de">slav.dimitrov@mach.uni-karlsruhe.de</a>
<b>Dirkmorfeld</b>	<b>Heinrich</b>	Ing. grad. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Heinrich.Dirkmorfeld@ltm.uni-paderborn.de">Heinrich.Dirkmorfeld@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Dreyer</b>	<b>Wolfgang</b>	PD Dr. rer. nat. Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik Mohrenstr. 39 10117 Berlin <a href="mailto:dreyer@wias-berlin.de">dreyer@wias-berlin.de</a>

---

<b>Ekhlov</b>	<b>Alexander</b>	Dr. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe <a href="mailto:alexander.ekhlakov@imf.mach.uka.de">alexander.ekhlakov@imf.mach.uka.de</a>
<b>Ferber</b>	<b>Ferdinand</b>	PD Dr.-Ing. habil. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Ferdinand.Ferber@ltm.uni-paderborn.de">Ferdinand.Ferber@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Fortmeier</b>	<b>Manfred</b>	Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Manfred.Fortmeier@ltm.uni-paderborn.de">Manfred.Fortmeier@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Funke</b>	<b>Herbert</b>	Prof. Dr.-Ing. Fachhochschule Dortmund Fachbereich Maschinenbau Fahrzeugkonstruktion Sonnenstr. 96 44139 Dortmund <a href="mailto:hp-2038687@versanet.de">hp-2038687@versanet.de</a>
<b>Gockel</b>	<b>Franz-Barthold</b>	Dipl.-Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Franz-Barthold.Gockel@ltm.uni-paderborn.de">Franz-Barthold.Gockel@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Hauck</b>	<b>Torsten</b>	Dr.-Ing. Freescale Halbleiter Deutschland GmbH Schatzbogen 7 81829 München <a href="mailto:Torsten.Hauck@freescale.com">Torsten.Hauck@freescale.com</a>
<b>Hentrich</b>	<b>Manuel</b>	Dipl.-Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33100 Paderborn <a href="mailto:Manuel.Hentrich@ltm.uni-paderborn.de">Manuel.Hentrich@ltm.uni-paderborn.de</a>

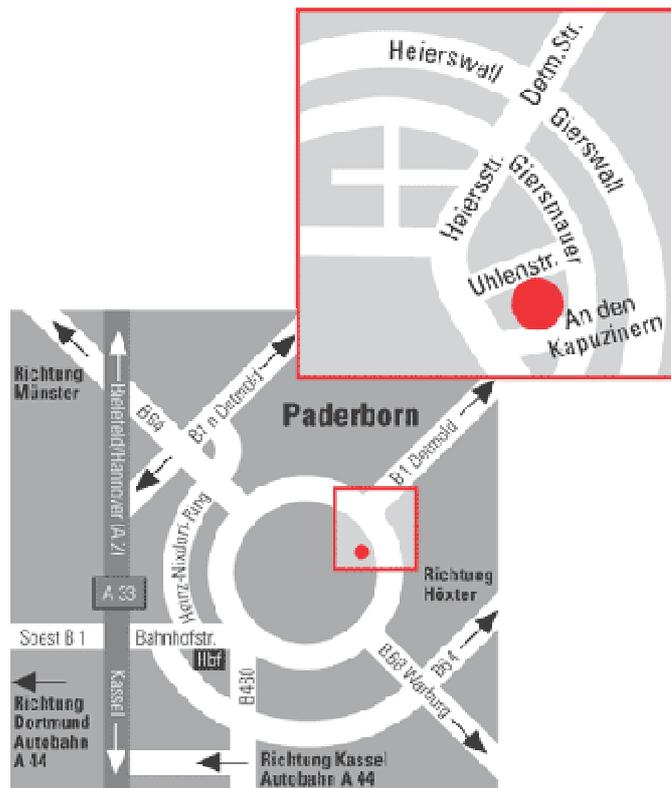
<b>Herrmann</b>	<b>Klaus Peter</b>	o. Prof. em. Dr. rer. nat. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:rkhermann@hotmail.com">rkhermann@hotmail.com</a>
<b>Hohe</b>	<b>Jörg</b>	PD Dr.-Ing. habil. Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Wöhlerstraße 11 79108 Freiburg/Breisgau <a href="mailto:joerg.hohe@iwf.fraunhofer.de">joerg.hohe@iwf.fraunhofer.de</a>
<b>Kärger</b>	<b>Luise</b>	Dipl.-Ing. DLR Braunschweig Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik Lilienthalplatz 7 38108 Braunschweig <a href="mailto:luise.kaerger@dlr.de">luise.kaerger@dlr.de</a>
<b>Kobelev</b>	<b>Vladimir</b>	PD Dr. rer. nat. Universität Siegen Institut für Mechanik und Regelungstechnik FB Maschinenbau Paul-Bonatz-Str. 9-11 57068 Siegen <a href="mailto:vladimir.kobelev@mubea.com">vladimir.kobelev@mubea.com</a>
<b>Kober</b>	<b>Markus</b>	Dipl.-Ing. BTU Cottbus LS Strukturmechanik & Fahrzeugschwingungen Siemens-Halske-Ring 14 03046 Cottbus <a href="mailto:markus.kober@tu-cottbus.de">markus.kober@tu-cottbus.de</a>
<b>Koke</b>	<b>Isabel</b>	Dipl.-Wirt.-Ing., Dipl.-Verw. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33100 Paderborn <a href="mailto:isabel.koke@itm.uni-paderborn.de">isabel.koke@itm.uni-paderborn.de</a>
<b>Köster</b>	<b>Benjamin</b>	Dipl.-Ing. Universität Kassel Institut für Mechanik Mönchebergstrasse 7 34125 Kassel <a href="mailto:koester@ifm.maschinenbau.uni-kassel.de">koester@ifm.maschinenbau.uni-kassel.de</a>

<b>Langhoff</b>	<b>Tom-Alexander</b>	Dr. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe <a href="mailto:Tom-Alexander.Langhoff@imf.uka.de">Tom-Alexander.Langhoff@imf.uka.de</a>
<b>Mahnken</b>	<b>Rolf</b>	Prof. Dr.-Ing. M.Sc. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Rolf.Mahnken@ltm.uni-paderborn.de">Rolf.Mahnken@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Müller</b>	<b>Wolfgang H.</b>	Prof. Dr. rer. nat. Technische Universität Berlin Fakultät V, Verkehrs- und Maschinensysteme Institut für Mechanik, LKM, Sekr. MS 2, Einsteinufer 5 10587 Berlin <a href="mailto:wolfgang.h.mueller@tu-berlin.de">wolfgang.h.mueller@tu-berlin.de</a>
<b>Noe</b>	<b>Alfons</b>	Dr.-Ing. ZF Lemförder Fahrwerkstechnik AG&Co KG Team F-PDP2 (Virtuelle Tests und Simulation) 49441 Lemförde <a href="mailto:Alfons.Noel@zf.com">Alfons.Noel@zf.com</a>
<b>Piat</b>	<b>Romana</b>	Dr. Universität Karlsruhe Institut für Technische Mechanik Kaiserstr. 12 76128 Karlsruhe <a href="mailto:Romana.Piat@mach.uni-karlsruhe.de">Romana.Piat@mach.uni-karlsruhe.de</a>
<b>Schnack</b>	<b>Eckart</b>	Prof. Dr.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe <a href="mailto:eckart.schnack@mach.uni-karlsruhe.de">eckart.schnack@mach.uni-karlsruhe.de</a>
<b>Seelig</b>	<b>Thomas</b>	Dr.-Ing. Fraunhofer-Institute for Mechanics of Materials Crash Simulation, Damage Mechanics Woehlerstr. 11 79108 Freiburg <a href="mailto:thomas.seelig@iwf.fraunhofer.de">thomas.seelig@iwf.fraunhofer.de</a>

---

<b>Shaban</b>	<b>Ahmed</b>	M.Sc. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Ahmed.Shaban@ltm.uni-paderborn.de">Ahmed.Shaban@ltm.uni-paderborn.de</a>
<b>Suhr</b>	<b>Bettina</b>	Dipl.-Math. Universität Bremen AG Numerik Partieller DGL Utbremer Ring 124 28215 Bremen <a href="mailto:bsuhr@math.uni-bremen.de">bsuhr@math.uni-bremen.de</a>
<b>Tsotsova</b>	<b>Rumena</b>	Dipl.-Ing. Institut für Technische Mechanik/Festigkeitslehre Universität Karlsruhe Kaiserstraße 12 76128 Karlsruhe <a href="mailto:rumena.tsotsova@imf.mach.uka.de">rumena.tsotsova@imf.mach.uka.de</a>
<b>Utzinger</b>	<b>Johannes</b>	Dipl.-Ing. TU Kaiserslautern Lehrstuhl für Technische Mechanik Gottlieb-Daimler-Strasse 67653 Kaiserslautern <a href="mailto:utzinger@rhrk.uni-kl.de">utzinger@rhrk.uni-kl.de</a>
<b>Weinberg</b>	<b>Kerstin</b>	Dr. Institut für Mechanik Technische Universität Berlin Einsteinufer 5 10587 Berlin <a href="mailto:kerstin.weinberg@tu-berlin.de">kerstin.weinberg@tu-berlin.de</a>
<b>Wilmanns</b>	<b>Stefan</b>	Dipl.-Ing. Lehrstuhl für Technische Mechanik Fakultät für Maschinenbau Universität Paderborn Warburger Str. 100 33098 Paderborn <a href="mailto:Stefan.Wilmanns@ltm.uni-paderborn.de">Stefan.Wilmanns@ltm.uni-paderborn.de</a>

## INFORMATION



## KONTAKTADRESSE

Lehrstuhl für Technische Mechanik  
 Universität Paderborn  
 Warburger Str. 100  
 33098 Paderborn

Tel.: +49-5251-60-2283 /-2284  
 Fax: +49-5251-60-3483  
 Email: [Rolf.Mahnken@ltm.uni-paderborn.de](mailto: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: +49-5251-121-4555  
 Tagungsbüro: +49-5251-121-4442  
 Email: [liborianum@erzbistum-paderborn.de](mailto:liborianum@erzbistum-paderborn.de)  
 www: <http://www.liborianum.de/>

**INDEX**

---

**B**

Barthel · 5, 7, 33  
Böhme · 4, 25

---

**C**

Caylak · 33  
Cochran · 33

---

**D**

Deltchev · 4, 10, 33  
Dimitrov · 3, 11, 33  
Dirkmorfeld · 33  
Dreyer · 4, 12, 33

---

**E**

Ekhilakov · 4, 13, 34

---

**F**

Ferber · 5, 21, 34  
Fortmeier · 34  
Funke · 5, 14, 21, 34

---

**G**

Gockel · 34

---

**H**

Hauck · 3, 16, 34  
Hentrich · 5, 17, 34  
Herrmann · 3, 5, 35  
Hohe · 3, 18, 35

---

**K**

Kärger · 4, 19, 35  
Kobelev · 3, 20, 35  
Kober · 35

Koke · 5, 21, 35  
Köster · 4, 23, 35

---

**L**

Langhoff · 4, 24, 36

---

**M**

Mahnken · 3, 5, 17, 21, 28, 36  
Matzenmiller · 4, 23  
Menzel · 3, 30  
Müller · 3, 4, 25  
Müller · 36

---

**N**

Noe · 36

---

**P**

Piat · 5, 26, 36

---

**S**

Schlimmer · 5, 7  
Schnack · 3, 4, 5, 10, 11, 13, 24, 26, 29, 36  
Seelig · 3, 27, 36  
Shaban · 3, 28, 37  
Steinmann · 3, 30  
Suhr · 37

---

**T**

Tsotsova · 5, 29, 37

---

**U**

Utzinger · 3, 30, 37

---

**W**

Weinberg · 5, 31, 37  
Wilmanns · 37

# NOTIZEN