



Fraunhofer

IWM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM



2009
JAHRESBERICHT

Titelbild

Mit experimentellen und numerischen Methoden untersucht das Fraunhofer IWM auf verschiedenen Skalen die Entstehung und Ausbreitung von Rissen in technischen Werkstoffen und Bauteilen.

DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit mehr als 80 Forschungseinrichtungen, davon 59 Institute. 17 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,5 Milliarden Euro. Davon fallen 1,3 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Zwei Drittel dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Ein Drittel wird von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute zukunftsweisende Lösungen für die Probleme erarbeiten können, die in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Niederlassungen in Europa, in den USA und in Asien sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kundinnen und Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studentinnen und Studenten eröffnen sich an Fraunhofer-Instituten wegen der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787-1826), der als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich war.

JAHRESBERICHT 2009

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM

Institutsteil Freiburg
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg

Telefon +49 761 5142-0
Telefax +49 761 5142-110

Institutsteil Halle
Walter-Hülse-Straße 1
06120 Halle

Telefon +49 345 5589-0
Telefax +49 345 5589-101

www.iwm.fraunhofer.de
info@iwm.fraunhofer.de



Das Fraunhofer IWM arbeitet nach
einem Qualitätsmanagementsystem,
das nach ISO 9001:2000 zertifiziert ist.
(Zertifikat D07 / 2316 / 3361)

Verehrte Leserinnen und Leser,

mit dem vorliegenden Jahresbericht geben wir Ihnen wieder einen Einblick in die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM mit seinen Standorten in Freiburg und Halle. Unseren vielen Industriepartnern, denen wir für die Zusammenarbeit im abgelaufenen Jahr herzlich danken, möchten wir zeigen, wo Werkstoffmechanik überall Wirkung zeigt und wie sie von neuen Projekten mit uns profitieren können. Unseren öffentlichen Auftraggebern, denen wir ebenfalls für das entgegengebrachte Vertrauen danken, möchten wir demonstrieren, dass sie die in das Fraunhofer IWM geflossenen Fördermittel gut angelegt haben. Die im Jahresbericht dargestellten Forschungsergebnisse repräsentieren jedoch nur einen kleinen, aber feinen Teil der in 2009 im Fraunhofer IWM bearbeiteten FuE-Projekte.

Wir werden oft gefragt, ob und wie uns die weltweite Wirtschaftskrise getroffen hat. Erfreulicherweise sind die direkten und monetären Auswirkungen auf das gesamte Fraunhofer IWM bislang gering. Unsere Leistungen sind weiter sehr gefragt, und unsere Kunden halten dem Fraunhofer IWM trotz widriger Umstände die Treue.

Wir haben ein sehr erfolgreiches Jahr 2009 hinter uns, in dem die Zahl unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter um weitere zehn Prozent gestiegen ist. Mit so starkem Zuwachs konnte der Anstieg der Industrieerträge jedoch nicht mithalten: Das Wachstum wurde weitgehend durch öffentliche Forschungsaufträge getragen. Diese Projekte eröffnen uns einen vielversprechenden wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Start in das Jahr 2010.

Dennoch hat die Wirtschaftskrise auch bei uns Spuren hinterlassen. In einzelnen Branchen gab es keinen Spielraum für neue Projekte. Durch besondere Anstrengungen konnten Einbrüche, zum Beispiel in der Mikroelektronik, durch neue Projekte in angrenzenden Forschungsfeldern kompensiert und die Weichen für das Erschließen neuer Felder gestellt werden. Dem hohen Einsatz unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ist zu verdanken, dass unser FuE-Portfolio schnell auf die neuen Herausforderungen angepasst werden konnte.

Ein solches neues Thema, dem wir uns seit Mitte 2009 verstärkt zuwenden, ist die Elektromobilität. Hier werden wir mit werkstoffmechanischen Lösungen Beiträge zu leistungsfähigen und crashsicheren Energiespeichersystemen, zum crashsicheren Leichtbau, zur Leistungselektronik und zu reibarmen Antrieben leisten.

Wir wünschen Ihnen eine inspirierende Lektüre.

*Von links: Prof. Dr. Matthias Petzold, Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn,
Dr. Thomas Hollstein, Prof. Dr. Peter Gumbsch, Prof. Dr. Hermann Riedel*



Institutsprofil

Mission des Fraunhofer IWM 6

Unsere Ansatzpunkte, unsere Arbeitsweise 7

Organisation und Ansprechpartner 8

Das Institut in Zahlen 10

Kuratorium 11

Interessante Neuerungen
und strategische Weiterentwicklungen 12

Werkstoffmechanik-Preis,
gestiftet von der Plansee Group 13

Kernkompetenzen des Fraunhofer IWM

Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung 14

Werkstoffmodellierung und Simulation 15

Grenzflächen- und Oberflächentechnologie 16

Ausstattung 17

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Tribologie 20

Werkstoff- und Bauteilverhalten
keramischer Walzwerkzeuge 22

Beschichtungsgerechtes Randschichtdesign
durch Mikro-Kugelstrahlen 24

Die Dynamik von Ni-Nanopartikeln
beim Wachstum von C-Nanofasern 26

Kriechverhalten von Knochenzementen 28

Video-Tribologie: Schnelle Topografiemessung
zum Metall-Einlaufverhalten 29

Fertigungstechnologie 30

Hybridschichten für die Erzeugung
beständiger, funktionaler Komponenten 32

Modellierung der Mikrostruktur von Metallpulvern.. 34

Bleifreie Ferroelektrika für Sensoren und Aktoren ... 36

Hightech-Verglasung verbindet
Wärmeisolierung mit Leichtbau 38

Handhabung und Transport heißer Glaskugeln 39

Bauteilsicherheit 40

Versagensmodellierung für die Simulation
vom Umformen bis zum Crash..... 42

Neue probabilistische Modelle
zur Sprödbruchbewertung 44

CO₂-arme Kraftwerke: eine werkstoff-
technische Herausforderung 45

Prozess- und Werkstoffbewertung 46

Bewertung von
Kunststoff-Metall-Hybridverbunden 48

Biaxiale Beanspruchung von GFK-Rohren 50

Schäden in Windenergieanlagen..... 52

Beherrschung der Umformgrenzen
in Massivumformprozessen 53

Polymeranwendungen	54
Thermoplastische Elastomere auf Basis von Recyclingmaterialien	56
Mesostruktur-Eigenschaftskorrelation bei Polymerhartschaumstoffen	58
Biologische und makromolekulare Materialien	60
Nanoporöse Membranen für die funktionelle Nassbeschichtung	62
Nanostrukturierte und funktionalisierte Oberflächen an Spritzgussteilen	64
Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik	66
Ultraschall-Drahtbonden mit aluminiumbeschichteten Kupferdrähten	68
Mikrostrukturanalyse von Gateoxid-Durchbrüchen in MOSFET-Transistoren	69
Reaktives Bonden für spannungsarmes Fügen in der Mikrosystemtechnik.....	70
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP	72
Versagensverhalten von Solarzellenverbindern in kristallinen Photovoltaikmodulen	74
Mikrokontakte: Struktur und elektrische Charakterisierung	76

Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ	78
---	-----------

Mischelemente zur Optimierung der Dispergier- wirkung im Compoundierprozess	80
--	----

■ **Vernetzung und Kooperation**

Forschungskooperationen	82
-------------------------------	----

Fraunhofer-Innovationscluster	83
-------------------------------------	----

Gemeinschaftsforschung in der Fraunhofer-Gesellschaft.....	84
---	----

Kooperationen mit der Max-Planck-Gesellschaft.....	85
--	----

Anhang

Personen, Ereignisse, Ausbildung	86
--	----

Mitarbeit in Gremien, Ausschüssen, Beratertätigkeiten	89
--	----

Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften.....	91
--	----

Sonstige Veröffentlichungen	93
-----------------------------------	----

Veröffentlichte Konferenzbeiträge.....	93
--	----

Impressum.....	97
----------------	----

Mission des Fraunhofer IWM

Die Fraunhofer-Gesellschaft fördert und betreibt international vernetzt anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für die Wirtschaft und zum Vorteil für die Gesellschaft.

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM charakterisiert, simuliert und bewertet das Verhalten von Werkstoffen, Bauteilen und Systemen unter dem Einfluss äußerer Kräfte in unterschiedlichen Umgebungen. Für Unternehmen und öffentliche Auftraggeber erarbeitet das Fraunhofer IWM Lösungen, die die Sicherheit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Funktionalität von technischen Bauteilen und Systemen verbessern. Damit leistet das Fraunhofer IWM wichtige Beiträge zur Wirtschaftlichkeit, Ressourcenschonung und Energieeffizienz und trägt somit zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei.

Das Fraunhofer IWM stellt an sich selbst höchste wissenschaftliche Anforderungen und ist in seinen Kernkompetenzen Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung, Werkstoffmodellierung und Simulation sowie Grenzflächen- und Oberflächentechnologie führend. Seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet das Fraunhofer IWM ein hohes Maß an Gestaltungsspielraum und fördert sie in ihrer persönlichen Entwicklung und wissenschaftlichen und unternehmerischen Qualifizierung.



Unsere Ansatzpunkte

Steigende Anforderungen an Qualität und Wirtschaftlichkeit bestimmen das Geschehen am Markt und in der industriellen Produktion. Dabei sind immer weniger Schwachstellen und Fehler in der Fertigung und im Einsatz von Bauteilen erlaubt, gleichzeitig soll die Belastbarkeit der Werkstoffe immer weiter ausgereizt werden. Die Auswirkungen vielfältiger externer Belastungen und deren Rückwirkung auf das funktionale Verhalten von Werkstoffen und Bauteilen müssen praxistgerecht und genau beschrieben werden können.

Schneller werdende Entwicklungsprozesse erfordern in stärkerem Maße den Umgang mit virtuellen Bauteilen. Das Entwickeln und Testen von Bauteilen im Computer gewinnt zunehmend an Bedeutung.

Ressourceneffizienz, Leichtbau und Energieeinsparung erfordern, dass Werkstoffe und Bauteile näher an ihren Belastungsgrenzen eingesetzt werden. Die Reserven bei Materialien und Beanspruchbarkeit müssen besser ausgeschöpft und Verluste müssen vermieden werden.

Die Herstellung immer kleinerer Strukturen muss kontrollierbar und steuerbar gemacht werden. Bei deren Bewertung wird die Berücksichtigung der Mikrostruktur und der molekularen Struktur von Werkstoffen immer wichtiger.

Unsere Arbeitsweise

Allen thematischen Herausforderungen, denen sich das Fraunhofer IWM stellt, liegt der Zugang über den Werkstoff zugrunde. Ebenso wichtig ist die Frage, wie sich die Werkstoffeigenschaften und das Bauteilverhalten durch technologie- oder einsatzbedingte mechanische, thermische, chemische oder elektrische Belastungen verändern.

Wir suchen Schwachstellen und Fehler in Bauteilen und klären ihre physikalischen Ursachen auf, um sie bereits in der Designphase zu vermeiden beziehungsweise in ihren Auswirkungen zu beherrschen.

Wir verknüpfen die Mikrostruktur von Werkstoffen mit den Werkstoffeigenschaften und der Anisotropie, um ein besseres Werkstoffverständnis zu bekommen.

Wir untersuchen, wie sich die Miniaturisierung von Bauelementen auf Funktionalität und Herstellbarkeit auswirkt. Dafür entwickeln wir die nötigen Testverfahren, Prüf- und Diagnose-techniken, Modellierungskonzepte und Simulationswerkzeuge.

Wir modellieren Werkstoffeigenschaften und berechnen diese via Multiskalensimulation. Wir simulieren Eigenschaftsveränderungen im Werkstoff während der Fertigung und erarbeiten Vorschläge für eine verbesserte Prozessführung.

Wir sagen in experimentellen und virtuellen Prüflabors das Einsatzverhalten hergestellter Bauteile vorher und bestimmen, ausgehend vom Einsatzverhalten, »rückwärts« ein optimiertes Werkstoff- und Bauteildesign.

Wir entwickeln Beschichtungen, Beschichtungsprozesse und Bewertungsmethoden für die Oberflächen von Werkzeugen und Bauteilen.

ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER

Institutsleiter und Sprecher der Institutsleitung

Prof. Dr. Peter Gumbsch
+49 761 5142-100
peter.gumbsch@iwf.fraunhofer.de

Institutsleiter und Leiter Institutsteil Halle

Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn
+49 345 5589-100
ralf.wehrspohn@iwf.fraunhofer.de

Leiter Institutsteil Freiburg

Dr. Thomas Hollstein
+49 761 5142-121
thomas.hollstein@iwf.fraunhofer.de

Stellvertretender Leiter Institutsteil Halle

Prof. Dr. Matthias Petzold
+49 345 5589-130
matthias.petzold@iwf.fraunhofer.de

GESCHÄFTSFELDER

LEISTUNGSBEREICHE

Tribologie Dr. Thomas Hollstein +49 761 5142-121 thomas.hollstein@iwf.fraunhofer.de	Verschleißschutz, Technische Keramik Dr. Andreas Kailer +49 761 5142-247 andreas.kailer@iwf.fraunhofer.de	Biomedizinische Materialien und Implantate Dr. Raimund Jaeger +49 761 5142-284 raimund.jaeger@iwf.fraunhofer.de
Fertigungstechnologie Dr. Günter Kleer +49 761 5142-138 guenter.kleer@iwf.fraunhofer.de	Bearbeitungs- und Trennverfahren Dr. Rainer Kübler +49 761 5142-213 rainer.kuebler@iwf.fraunhofer.de	Heißformgebung Glas Dr. Peter Manns +49 761 5142-135 peter.manns@iwf.fraunhofer.de
Bauteilsicherheit Dr. Dieter Siegele +49 761 5142-116 dieter.siegele@iwf.fraunhofer.de	Anlagensicherheit, Bruchmechanik Dr. Dieter Siegele +49 761 5142-116 dieter.siegele@iwf.fraunhofer.de	Crashsicherheit, Schädigungsmechanik Dr. Dong-Zhi Sun +49 761 5142-193 dongzhi.sun@iwf.fraunhofer.de
Prozess- und Werkstoffbewertung Dr. Wulf Pfeiffer +49 761 5142-166 wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de	Mikrostruktur- und Schadensanalyse Dr. Wulf Pfeiffer (komm.) +49 761 5142-166 wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de	Ermüdungsverhalten, Eigenspannungen Dr. Michael Luke +49 761 5142-338 michael.luke@iwf.fraunhofer.de
Polymeranwendungen Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn +49 345 5589-100 ralf.wehrspohn@iwf.fraunhofer.de	Polymercompounds Andreas Krombholz +49 345 5589-153 andreas.krombholz@iwf.fraunhofer.de	Polymerbasierte Hochleistungsverbundwerkstoffe Dr. Ralf Schäuble +49 345 5589-151 ralf.schaeuble@iwf.fraunhofer.de
Biologische und makromolekulare Materialien Prof. Dr. Andreas Heilmann +49 345 5589-180 andreas.heilmann@iwf.fraunhofer.de	Polymerfolien und Polymergrenzflächen Prof. Dr. Andreas Heilmann +49 345 5589-180 andreas.heilmann@iwf.fraunhofer.de	Biologische und biokompatible Materialien Dr. Andreas Kiesow +49 345 5589-118 andreas.kiesow@iwf.fraunhofer.de
Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik Prof. Dr. Matthias Petzold +49 345 5589-130 matthias.petzold@iwf.fraunhofer.de	Bewertung mikroelektronische Systemintegration Prof. Dr. Matthias Petzold +49 345 5589-130 matthias.petzold@iwf.fraunhofer.de	Charakterisierung Mikrosysteme Prof. Dr. Matthias Petzold (komm.) +49 345 5589-130 matthias.petzold@iwf.fraunhofer.de

Verwaltung

Wolfgang Thielicke
+49 761 5142-111
wolfgang.thielicke@iwm.fraunhofer.de

Thomas Merkel
+49 345 5589-420
thomas.merkel@iwmh.fraunhofer.de

Qualitätsmanagement

Elke Schubert
+49 761 5142-267
elke.schubert@iwm.fraunhofer.de

Personal

Kerstin A. Drüsedau
+49 761 5142-140
kerstin.druesedau@iwm.fraunhofer.de

Öffentlichkeitsarbeit

Thomas Götz
+49 761 5142-153
thomas.goetz@iwm.fraunhofer.de

Jasmine Ait-Djoudi
+49 345 5589-213
jasmine.ait-djoudi@iwmh.fraunhofer.de

Tribologische Schichtsysteme

Dr. Sven Meier
+49 761 5142-233
sven.meier@iwm.fraunhofer.de

Mikrotribologie

Prof. Dr. Matthias Scherge
+49 761 5142-206
matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de

Multiskalenmodellierung und Tribosimulation

Prof. Dr. Michael Moseler
+49 761 5142-332
michael.moseler@iwm.fraunhofer.de

Funktionale Schichtsysteme

Dr. Frank Burmeister
+49 761 5142-244
frank.burmeister@iwm.fraunhofer.de

Pulvertechnologie

Dr. Torsten Kraft
+49 761 5142-248
torsten.kraft@iwm.fraunhofer.de

Physikalische Werkstoffmodellierung

Prof. Dr. Christian Elsaesser
+49 761 5142-286
christian.elsaesser@iwm.fraunhofer.de

Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik

Dr. Thomas Seifert
+49 761 5142-170
thomas.seifert@iwm.fraunhofer.de

Verbundwerkstoffe

Dr. Bärbel Thielicke
+49 761 5142-192
baerbel.thielicke@iwm.fraunhofer.de

Formgebungs- und Umformprozesse

Dr. Dirk Helm
+49 761 5142-158
dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

Diagnostik Halbleitertechnologien

Frank Altmann
+49 345 5589-139
frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de

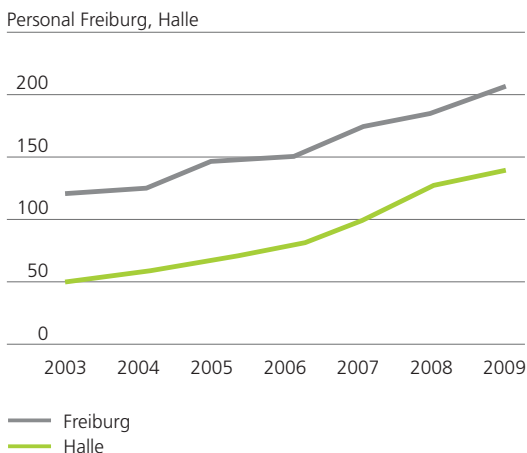
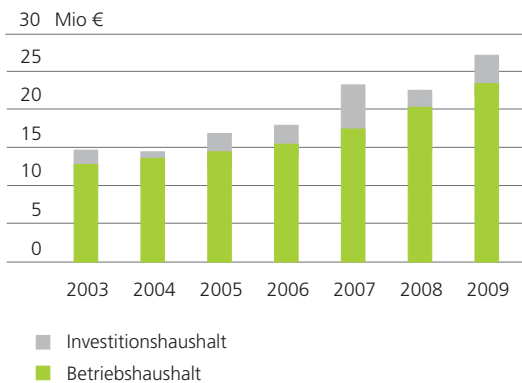
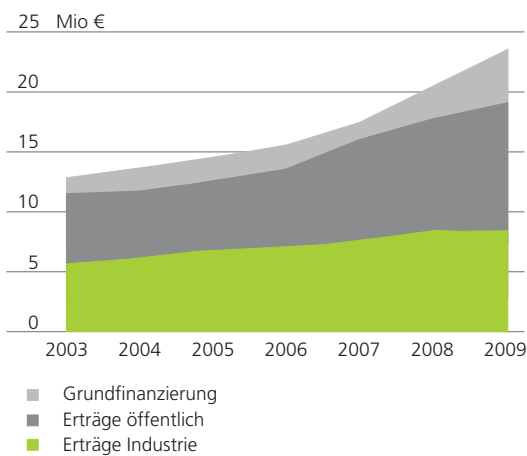
**Fraunhofer-Center für
Silizium-Photovoltaik CSP
(gemeinsame Einrichtung
des Fraunhofer IWM und
des Fraunhofer ISE)**

Prof. Dr. Jörg Bagdahn
+49 345 5589-129
joerg.bagdahn@iwmh.fraunhofer.de

**Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum
für Polymersynthese und
-verarbeitung PAZ
(gemeinsame Einrichtung
des Fraunhofer IWM und
des Fraunhofer IAP)**

Dr. Michael Busch
+49 345 5589-111
michael.busch@iwmh.fraunhofer.de

DAS INSTITUT IN ZAHLEN



Der Haushalt des Fraunhofer IWM setzt sich zusammen aus einem Betriebshaushalt und einem Investitionshaushalt.

Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Diese werden finanziert durch externe Erträge und institutionelle Förderung (Grundfinanzierung).

Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist weiter gewachsen und beläuft sich auf 23,4 Millionen Euro (Hochrechnung Dezember 2009). Davon entfallen 13,5 Millionen Euro auf den Institutsteil Freiburg und 9,9 Millionen Euro auf den Institutsteil Halle.

Der Investitionshaushalt umfasst Normal-, strategische und Projektinvestitionen und betrug 2009 3,7 Millionen Euro. Im Zuge des Konjunkturpakets I der Bundesregierung wurden 2009 im Fraunhofer IWM insgesamt weitere 4,5 Millionen Euro für Geräteinvestitionen aufgewendet.

Der Anteil der Industrieerträge zur Finanzierung des Betriebshaushaltes liegt bei 36 Prozent.

Ende 2009 waren am Fraunhofer IWM 344 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt, davon 205 in Freiburg und 139 in Halle. Die Beschäftigtenzahl setzt sich zusammen aus 180 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, 84 Ingenieurinnen, Ingenieuren und technischen Beschäftigten sowie 80 Angestellten im Bereich Sekretariat und Infrastruktur.

Inklusive der 88 wissenschaftlichen Hilfskräfte, Diplomandinnen und Diplomanden sowie Praktikantinnen und Praktikanten waren Ende 2009 insgesamt 432 Personen beschäftigt.

Stand: Dezember 2009

KURATORIUM

Das Kuratorium setzt sich aus Persönlichkeiten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft zusammen, die dem Fraunhofer IWM fachlich nahestehen. Gemeinsam mit dem Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft beraten und unterstützen sie das Institut mit ihrer Expertise bei strategischen Themen, Weichenstellungen im Institut und der Entwicklung von Zukunftsperspektiven.

Prof. Dr. Rudolf Stauber
(Vorsitzender)
BMW Group, München

Dr. Florian Holzapfel
Q-Cells AG, Thalheim

Peter Putsch
*Putsch Kunststoffe GmbH,
Nürnberg*

Prof. Dr. Christina Berger
*Technische Universität
Darmstadt*

Dr. Roland Langfeld
Schott AG, Mainz

Dr.-Ing. Robert Ruprecht
*Forschungszentrum Karlsruhe
GmbH,
Eggenstein-Leopoldshafen*

Dr. Karlheinz Bourdon
*KraussMaffei Technologies
GmbH, München*

Prof. Dr. Detlef Löhe
*Technische Universität
Karlsruhe*

Dr. Alexander Sagel
*KS Kolbenschmidt GmbH,
Neckarsulm*

Dipl.-Ing. Siegfried Glaser
*Glaser FMB GmbH & Co. KG,
Beverungen*

Prof. Dr. Ingrid Mertig
*Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg*

Dr. Lorenz Sigl
*Plansee SE,
Reutte (Österreich)*

Dr. Valentin Gramlich
*Kultusministerium des Landes
Sachsen-Anhalt, Magdeburg*

Dr. Christoph Mühlhaus
*DOW Olefinverbund GmbH,
Merseburg*

MinRat Dr. Joachim Wekerle
*Wirtschaftsministerium
Baden-Württemberg, Stuttgart*

MinDirig. Hans Joachim
Hennings
*Ministerium für Wirtschaft
und Arbeit des Landes
Sachsen-Anhalt, Magdeburg*

Prof. Dr. Rolf Mülhaupt
*Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg*

Dipl.-Ing. Jens Wemhöner
*Cerobear GmbH,
Herzogenrath*

Dr. Matthias Müller
*Robert Bosch GmbH,
Gerlingen*

Stand: Dezember 2009

Tribologie:
Herausforderung für Industrie und Wissenschaft

Volkswirtschaftlich betrachtet sind Energie- und Materialverluste durch Reibung und Verschleiß enorm. Zudem ist es wissenschaftlich bislang nicht möglich, die chemischen, physikalischen und mechanischen Prozesse, die bei Reibung und Verschleiß eine Rolle spielen, klar zu trennen und fundiert zu beschreiben. Das Fraunhofer IWM reagiert auf diesen Bedarf und erweitert seine Kapazitäten und Kompetenzen in der Tribologie. Bis 2012 entsteht auf dem Universitätsgelände in Karlsruhe das vom IWM und von der Universität gemeinsam geführte MikroTribologie Centrum μ TC.

Auf dem Gebiet der Mikro- und Nanotribologie forschen zurzeit rund 15 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter unter der Leitung von Professor Matthias Scherge in Räumen des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT in Pfinztal bei Karlsruhe. Sie untersuchen insbesondere die Reibungs- und Verschleißreduktion im Verbrennungsmotor. In Freiburg sind darüber hinaus 30 Personen in den Themen »Reibungsarme Verschleißschutzschichten«, »Verschleißschutz durch keramische Bauteile« und »Simulation tribologischer Systeme« involviert. Das Ziel unserer Tribologieforschung ist, die wissenschaftlichen Grundlagen der Entwicklung von Reibung und Verschleiß aufzudecken. Die Ergebnisse fließen anschließend in Modelle ein und werden in technische Lösungen überführt. So sollen Computersimulationen für tribologische Vorgänge erstellt und die Industrie mit entsprechenden Entwicklungswerkzeugen versorgt werden.

Das μ TC unter der wissenschaftlichen Leitung von Professor Scherge wird neben der anwendungsnahen Forschung die Tribologie auch in Studium und Lehre einbringen.

Elektromobilität

Der Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität hat große Ziele: Eine Million Elektrofahrzeuge sollen bis 2020 auf Deutschlands Straßen rollen. Gleichzeitig will der Bund nachhaltige Mobilitätskonzepte gemeinsam mit der Fraunhofer-Gesellschaft entwickeln und umsetzen. So beteiligt sich das Fraunhofer IWM gemeinsam mit rund 30 weiteren Instituten an Entwicklungen auf allen Wertschöpfungsstufen der Elektromobilität im Verbundprojekt »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität FSEM«.

Die Expertinnen und Experten am Fraunhofer IWM sind daran beteiligt, zwei Prototypen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge zu bauen. Sie sollen den Einstieg der deutschen Autoindustrie in die Elektromobilität vorantreiben. Zum einen hilft die Werkstoffmechanik, eine magnetorheologische Motor-Generator-Kupplung zu entwickeln. Zum anderen liefern die IWM-Expertinnen und -Experten wichtige Beiträge für das Fraunhofer e-concept car »FreccO«: Sie entwickeln Lösungen für crashsichere Batteriegehäuse und Leichtbau-Karosseriekonstruktionen. Zudem sollen atomistische Simulationen helfen, die Einflüsse von Lade- und Entladevorgängen in Lithium-Ionenbatterien auf die Werkstoffe der Elektroden, Separatoren und Elektrolyte besser zu verstehen. Zwei weitere Entwicklungen thematisieren ein reibarmes Radnabenmotorlager und ein Simulationstool zum Pulverpressen und Sintern von Weichmagneten.

Beide Standorte des Fraunhofer IWM sind an den Kernthemen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität FSEM beteiligt: Fahrzeugkonzepte, Energiespeichertechnik sowie Technische Systemintegration.

WERKSTOFFMECHANIKPREIS 2009,
GESTIFTET VON DER
PLANSEE GROUP REUTTE



Von links: Dr. Lorenz Sigl (Plansee Group), Dr. Claas Bierwisch, Dr. Andreas Wonisch, Georg Lorenz, Prof. Dr. Rudolf Stauber (Vorsitzender des Kuratoriums), Prof. Dr. Peter Gumbsch.

Für hervorragende wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik im Rahmen von Diplomarbeiten und Promotionen wird anlässlich der Kuratoriumssitzung des Fraunhofer IWM der Werkstoffmechanikpreis verliehen. Der Preis wird gestiftet von der Plansee Group Reutte. Der Werkstoffmechanikpreis 2009 wurde Andreas Wonisch verliehen.

Aus dem Kreis der Bewerberinnen und Bewerber wurden die folgenden drei Arbeiten für den Preis nominiert.

Claas Bierwisch, Dissertation:

Dreidimensionale Diskrete-Elemente-Methode zur Simulation granularer Werkstoffe für Pulverfließvorgänge

Um das Fließen granularer Werkstoffe wie Metall- oder Keramikpulver exakter simulieren zu können, hat Claas Bierwisch eine Simulation auf Basis der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) entwickelt. Damit ist es möglich, die gesamte Prozesskette Füllen–Pressen–Sintern in der Pulvertechnologie durchgängig zu simulieren. Zudem können erstmals Inhomogenitäten in der Dichteverteilung nach dem Befüllen einer Matrize berechnet werden. Darauf aufbauend kann der Füllprozess mit dem Ziel einer gleichmäßigen Dichteverteilung optimiert werden. Auch kann der Pressplan nun gezielt an die Ausgangsverteilung angepasst werden.

Georg Lorenz, Diplomarbeit:

Charakterisierung der Verformungseigenschaften von Free Air Balls

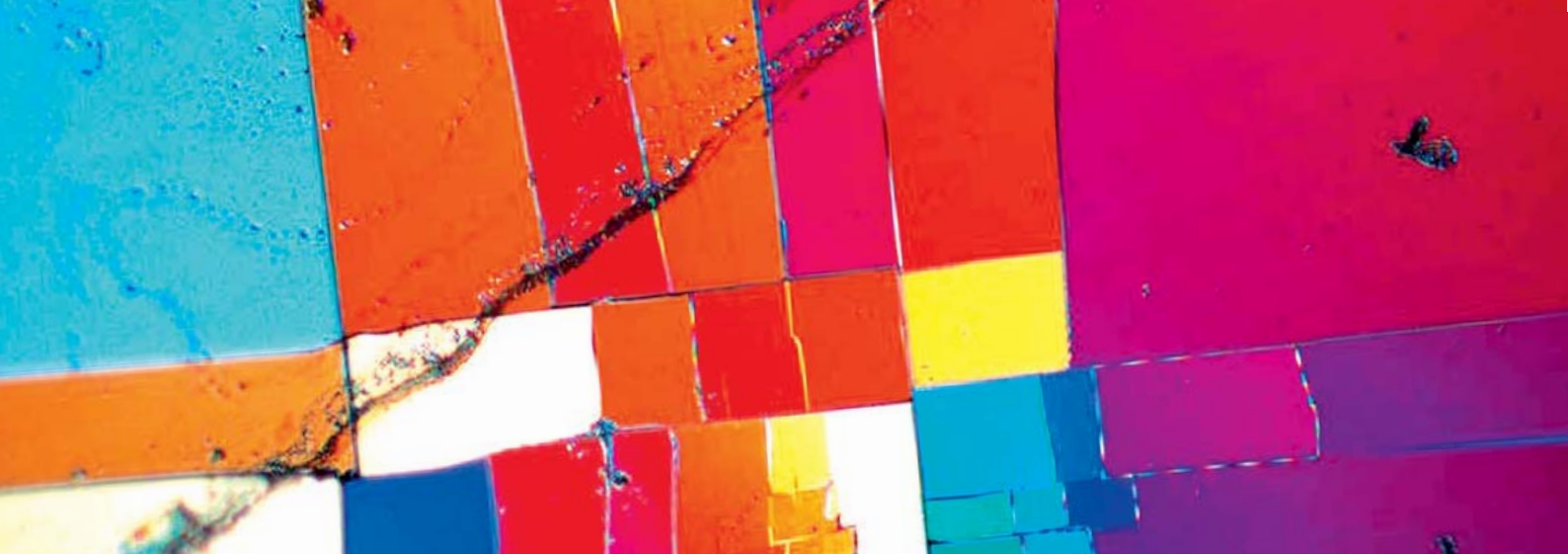
Die häufigste Verbindungstechnologie in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik ist das Drahtbonden. Dafür wird am Drahtende eine kleine Kugel, ein so genannter Free Air Ball, angeschmolzen. Anschließend wird dieses Drahtende unter Wärme auf einen Mikrochip-Kontakt gepresst und so eine Reibschweißverbindung hergestellt. Die von Georg Lorenz entwickelte Versuchsmethode ermöglicht es erstmals,

die mechanischen Eigenschaften von Free Air Balls in der relevanten Belastungsrichtung zu messen. Zudem kann das beim Drahtbonden auftretende Verformungsverhalten dargestellt werden. Die Materialparameter bestimmt er, indem er Experiment und Computersimulation koppelt. Lorenz fand heraus, dass sich die Verformungseigenschaften von Free Air Balls in Abhängigkeit von der Drahtzusammensetzung (legiert, dotiert), den Prozessparametern und der Geometrie verändern.

Andreas Wonisch, Dissertation:

Entwicklung und Anwendung partikelbasierter Simulationstechniken für die Modellierung von Umordnungseffekten und Anisotropieentwicklung in pulvertechnologischen Prozessen

Andreas Wonisch hat ein partikelbasiertes Simulationsverfahren entwickelt, mit dem sich das Verhalten von Pulvern und Suspensionen deutlich genauer als mit den bisher üblichen kontinuumsmechanischen Ansätzen beschreiben lässt, da jedes einzelne Pulverpartikel direkt im Computer nachgebildet wird. Ein Anwendungsbeispiel sind Leiterbahnen, die als leitfähige Pasten per Siebdruck auf Platinen oder Solarzellen aufgetragen und anschließend gebrannt werden. Wonisch kann simulieren, wie die Paste durch die Sieblöcher fließt und sich auf dem Substrat absetzt. In der Partikelsimulation können Material- und Prozessparameter variiert und somit der gesamte Prozess optimiert werden. Auftraggeber müssen lediglich die Paste liefern und ihre Druckmethode beschreiben, um eine realitätsnahe Simulation zu erhalten.



Kernkompetenz

WERKSTOFF- UND BAUTEILCHARAKTERISIERUNG

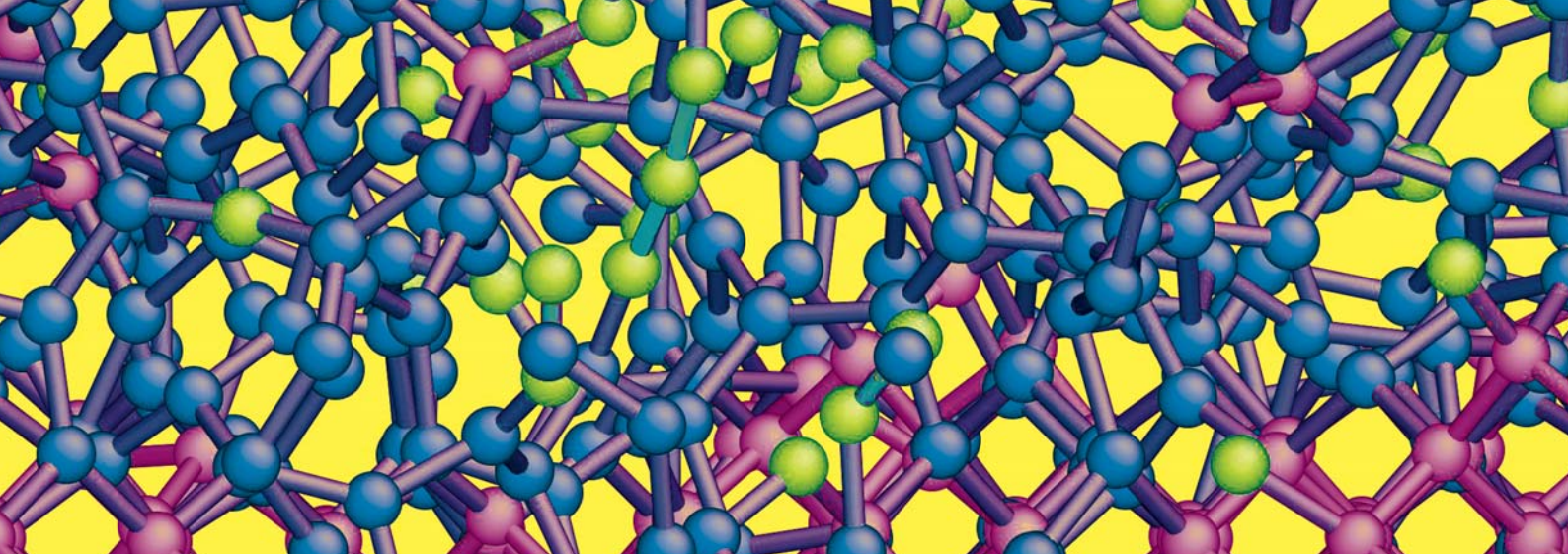
- Werkstoffcharakterisierung und Ermittlung mechanischer Kennwerte
- Bauteilprüfung und Schadensanalyse
- Mikrostrukturanalyse und Fehlerdiagnostik in Mikro- und Nanosystemen

Zur Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung untersuchen wir die Reaktion von Werkstoffen und Bauteilen auf mechanische, thermomechanische und elektromechanische Belastungen und klären Verformungs- und Versagensmechanismen auf. Wir ermitteln die Grenzen der Beanspruchbarkeit von Werkstoffen und Bauteilen und schätzen die Lebensdauer und Betriebssicherheit von Bauteilen ab. Es werden Schadensanalysen durchgeführt und Lösungen erarbeitet, um künftige Schäden zu vermeiden.

Die benötigten Werkstoffkennwerte werden in Korrelation zur Mikrostruktur und zu strukturellen Prozessen auf allen Größenskalen erfasst und bewertet.

Bei der Bauteilprüfung werden lokal variierende Werkstoffeigenschaften berücksichtigt. Für mikroskalige Bauteile beschreiben wir Werkstoffstruktur und Werkstoffverhalten bis in den Bereich der atomaren Auflösung. Bei der Bewertung von Bauteilen berücksichtigen wir die Fehlercharakteristik und Umgebungseinflüsse.

Ansprechpartner: Dr. Michael Luke, Telefon +49 761 5142-338, michael.luke@iwm.fraunhofer.de
Andreas Krombholz, Telefon +49 345 5589-153, andreas.krombholz@iwmh.fraunhofer.de



Kernkompetenz

WERKSTOFFMODELLIERUNG UND SIMULATION

- Entwicklung und Anpassung von Werkstoffmodellen
- Anwendung eines breiten Spektrums numerischer Methoden
- Simulation von Bauteilen und Fertigungsprozessen

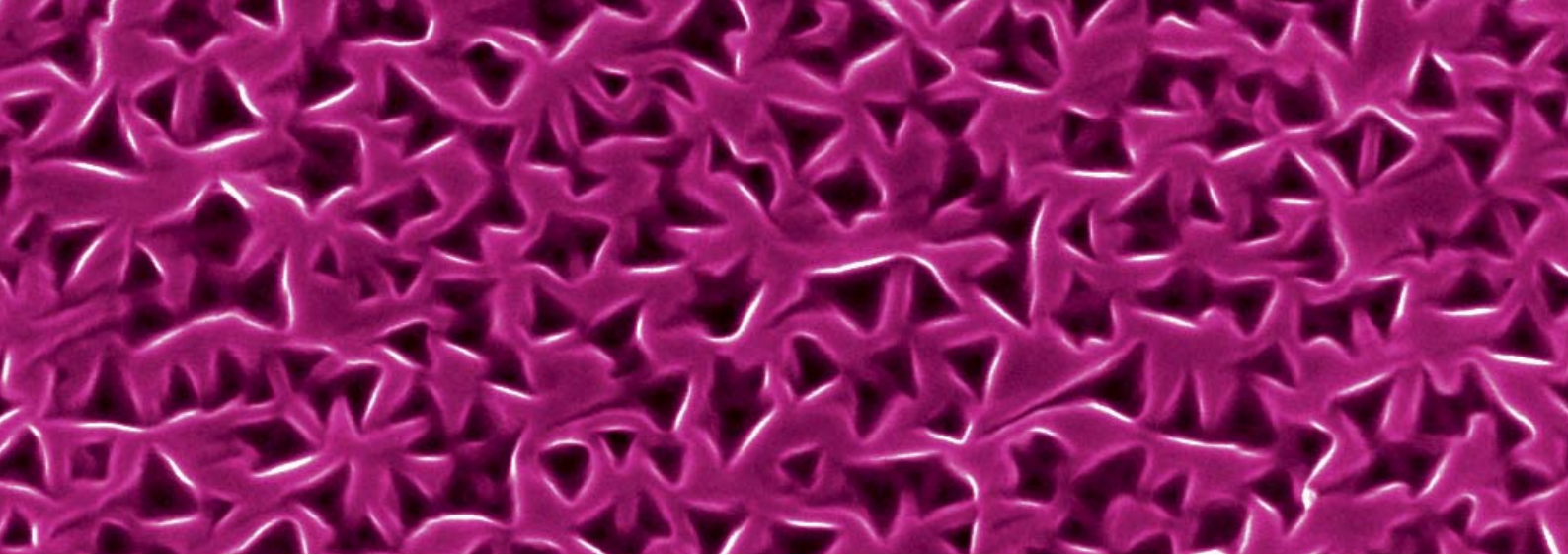
Werkstoffmodellierung und Simulation helfen, Belastungsszenarien und Prozesse für reale und noch zu entwickelnde Werkstoffe und Bauteile im Rechner abzubilden. Damit können Werkstoffe und Bauteile wirtschaftlich entwickelt und Prozesse verbessert werden.

Wir beschreiben das Verformungs-, Schädigungs- und Bruchverhalten von Werkstoffen unter verschiedenen Belastungen und sagen das Einsatzverhalten voraus. Die Bauteilsimulation liefert Aussagen zu deren Sicherheit und Lebensdauer. Die Ergebnisse der Prozesssimulation fließen in die Auslegung von Werkzeugen und in die Prozessführung ein.

Wir modellieren Werkstoffe über verschiedene Skalen hinweg und messen modellspezifische Eigenschaften (Design of Experiments).

Wir koppeln und kombinieren dabei verschiedene Simulationsmethoden. Im »Virtuellen Labor« finden aufwändige numerische Simulationen statt, und durch das »Virtuelle Mikroskop« sind wir in der Lage, Eigenschaften von Werkstoffen vorherzusagen.

Ansprechpartner: Dr. Dirk Helm, Telefon +49 761 5142-158, dirk.helm@iwm.fraunhofer.de
Dr. Matthias Ebert, Telefon +49 345 5589-117, matthias.ebert@iwmh.fraunhofer.de



Kernkompetenz

GRENZFLÄCHEN- UND OBERFLÄCHENTECHNOLOGIE

- Randschichtbewertung und Tribologie
- Beschichtung und Funktionalisierung
- Bio- und Grenzflächenanalytik

Wir bewerten Grenzflächen und Oberflächen mit modernen Analysetechniken, erkennen mögliche Versagensursachen und zeigen Verbesserungspotenziale auf. Wir setzen moderne Beschichtungstechnologien ein, mit denen wir kundenspezifische und anwendungsgerechte Beschichtungslösungen entwickeln. Zudem modifizieren wir die Eigenschaften von Randschichten, um eine bessere Leistungsfähigkeit der Oberflächen zu erhalten.

Wir entwickeln und optimieren fortschrittliche Beschichtungsverfahren und simulieren Schichtwachstum, Tribokontakte und Adhäsionsphänomene. Die Oberflächeneigenschaften von Bauteilen werden hinsichtlich Reibung, Optik, Benetzung, Leitfähigkeit, Topografie und Adhäsion untersucht und eingestellt.

Ansprechpartner: Prof. Dr. Andreas Heilmann, Telefon +49 345 5589-180, andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de
Dr. Frank Burmeister, Telefon +49 761 5142-244, frank.burmeister@iwf.fraunhofer.de

AUSSTATTUNG

Mechanische Prüfung und Bewertung

- Servohydraulische und elektromechanische Prüfmaschinen für Prüfkräfte von 10 mN bis 8 MN mit Prüfkammern von 80 K bis 2 500 K zur statischen, dynamischen und zyklischen Prüfung
- Servohydraulische Torsionsprüfanlage bis ± 4 kNm und ± 50 Grad
- Versuchsstände zur thermomechanischen Ermüdung bis 1 800 °C
- Dynamische mechanische Analyse (DMA, 18 mN bis 500 N)
- Versuchsstände zur Untersuchung des Kriechverhaltens von Kunststoffen und Verbundwerkstoffen
- ARAMIS-Systeme zur optischen dreidimensionalen Dehnungsmessung
- Speckle-Interferometer zur berührungslosen Vibrationsanalyse
- Zweistrahl-Laserextensometer zur berührungslosen Verformungsmessung
- Hochgeschwindigkeitsprüfeinrichtungen für stoß- und crashartige Belastungen bis 360 km/h (Druckgasbeschleunigungsanlage)
- Schnellzerreißmaschinen bis 100 kN und Abzugsgeschwindigkeiten bis 20 m/s
- Pendelschlagwerke von 1 J bis 750 J
- Fallgewichtsanlagen bis 7 000 J
- Hochgeschwindigkeitskameras mit bis zu 1 Million Bilder/s
- Rohrprüfstände für Langzeit- und Innendruckversuche bis 750 °C, mit Wechsellasteinrichtungen zur Überlagerung von axialem Zug und Druck
- Innendruckprüfeinrichtungen und Triaxialpressen bis 7 000 bar und 1 000 K
- Multiaxiale Prüfmaschinen (Spannfelder) zur komplexen Bauteilprüfung
- Mechanischer Solarmodulprüfstand
- Vakuum-, Klima- und Temperaturprüfkammern
- Korrosionsprüfstände für wässrige und gasförmige Medien
- Induktive Erwärmungsanlagen
- Jominy-Versuchsstand
- Gleeble (Thermomechanische Umformanlage)
- Nanoindenter mit Temperierung
- Scratch-Tester mit Scanning-Option
- Mikro- und Makrohärteprüfer (vollautomatisch und manuell), mobile Härtemessung
- Registrierender Eindruckversuch bis 600 °C
- Rücksprunghärtemessgerät
- Mikrotribometer
- Stift-Scheibe-Prüfstände
- Wälz- und Gleitverschleißprüfstände
- Kugellagerprüfstand
- Hochgeschwindigkeits-Gleitringdichtungsprüfstand
- Verschleißmessanlage mit Radionuklidtechnik für kleinste Verschleißraten (1-5 nm/h)
- In-situ-Verformungseinrichtungen für Raster- und Transmissions-Elektronenmikroskope
- Pull- und Schertester für die mikroelektronische Verbindungstechnik
- Mikrooptischer Kraftmessplatz mit Manipulationseinrichtungen
- Mikrosystem-Analysator (MSA) zur berührungslosen Verformungs- und Vibrationsanalyse
- Scannendes Laser-Doppler-Vibrometer
- Versuchsstände zur Festigkeits- und Lebensdauerermessung von Mikrosystemen

AUSSTATTUNG

Material- und Oberflächencharakterisierung

- Transmissionselektronenmikroskop (TEM 200 kV) mit Röntgenanalysesystem (Nanospot-EDX)
- Zweistrahl-Fokussierende Ionenstrahlanlage mit in-situ-Manipulator
- Zweistrahl-FIB-Anlage mit EBSD- und EDX-Analytik
- ESEM-FIB-Anlage mit Kryopräparation und Transferkammer
- Rasterelektronenmikroskope (REM) mit Röntgenanalyse (EDX, WDX), Beugungsanalyse (EBSD) und inverser Lichtmikroskopie
- REM mit elektronenstrahlinduzierter Strommessung (EBIC)
- Präparationstechniken: Ionenätzanlage, Rückseitenpräparationseinrichtung, Kritisch-Punkt-Trocknung
- Time-of-Flight-Sekundärionen-Massenspektroskopie (ToF-SIMS)
- Photoelektronenspektroskopie (XPS)
- Tiefenprofil-Glimmentladungsspektrometer (GDOES)
- ICPMS mit Laserablation, chemischem Aufschluss, elektrothermischer Verdampfung
- Kontaktwinkelmessung
- Plasmaanalytiksystem (OES, VI-Probe, SEERS)
- Rasterkraftmikroskope (AFM), auch mit Lateralkraftmessung
- Weißlichtinterferometer
- Konfokal-Laserscanningmikroskope
- Rauheits-Messeinrichtungen, Profilometer
- Interferometrische Eigenspannungsmessung
- Dynamische Widerstandsmessung für hochohmige dünne Schichten (piezoresistive Effekte messbar)
- Automatischer Messplatz für Picoamperemessungen
- Waferdickenbestimmung
- Lichtmikroskope (bis 1 500fache Vergrößerung)
- Quantitative Bildanalysesysteme
- UV/VIS-Spektroskopie
- Elektrolumineszenz- und Photolumineszenz-Spektroskopie
- Infrarot-Mikroskopie
- ATR-FTIR-Spektrometrie
- Konfokales Raman-Mikroskop
- Mikro-Raman-Spektrometer
- IR-Spannungsoptik
- Röntgendiffraktometer für Spannungsmessung, Texturanalyse mit Hochtemperatureinrichtung bis 2 300 K und Dünnschichtanalyseeinrichtung
- Mobiles Diffraktometer für Eigenspannungsanalysen
- Mikrodiffraktometer (laterale Auflösung von 50 µm)
- Bohrlochverfahren für tiefenauflösende Eigenspannungsanalysen
- 3-D-Röntgen-CT-Inspektionsanlage
- Lock-in-Thermographie mit optischer Anregung
- Akustische Mikroskopie (bis GHz)
- Dynamische Differenzkalorimetrie
- Thermogravimetrische Analyse
- Differential-Thermoanalyse
- Rotationsrheometer
- Hochdruckkapillarviskosimeter
- Schmelzefestigkeits- und Schmelzindex-Messgeräte
- Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsmessung (Laser-Flash-Methode)
- HDT-Wärmeformbeständigkeits- und Vicat-Erweichungstemperaturmessung
- Wasserstoffanalysator inkl. Auslagerungsöfen
- Stickstoff- und Sauerstoffanalysator
- Dichte- und Porositätsmeseinrichtungen
- Wasserstoffpermeationsprüfstand mit Zug- und Temperiereinrichtung

AUSSTATTUNG

- Karl-Fischer-Titrator (Feuchtemessung)
- Restgasanalysator

- Verfahren zur Messung der Ladungsträgerlebensdauer (Mikrowellen-Photoconductance-Decay, quasistatische Photoleitfähigkeit)

Beschichtung, Oberflächenfunktionalisierung

- Plasma-CVD-Beschichtungsanlagen (CCP/ICP)
- DC-Puls-Beschichtungsanlage
- Hochfrequenz-Magnetron-Bias-Beschichtungsanlage
- Ionenstrahlunterstützte Elektronenstrahlverdampfungs- sowie andere Bedampfungs- und Sputteranlagen
- Coronabehandlungsanlagen für Polymerfolien
- Mehrkammerbeschichtungsanlage (ionenunterstützte PVD)
- Anlage zur Plasmapolymersation
- Plasmaätzenanlagen
- Nasschemische Beschichtungsanlagen (Spin-Coating, Rakelbeschichtung, Tauchbeschichtung)
- Elektrostatische Spinneinrichtung
- Ionenätzenanlage zur Probenpräparation und Oberflächenbearbeitung
- Waferbondanlage mit Plasmaaktivierung
- Drahtbondtechnik zur Kontaktierung von mikroelektronischen Bauelementen
- Blankpressanlage für präzisionsoptische Bauteile aus anorganischem Glas
- Pressanlagen für schnelles Heißprägen von Glas
- Laserschneidanlage zum thermischen Trennen von Glas
- Präzisionsdreh- und -fräsmaschinen
- Kugelstrahlanlagen zur Verfestigung und Strukturierung von Oberflächen

Berechnungswerkzeuge

Hardware

- Linux-Serverfarmen und Linux-Cluster mit 32-Bit- und 64-Bit-Prozessoren, Parallel-Rechner auf IA64-Basis mit Shared-Memory (SMP)

Software

- ABAQUS, ANSYS, MSC PATRAN/NASTRAN, MSC MARC, PAM-CRASH, LS-Dyna, FEAP, SYSWELD, DEFORM, simufact
- »Gvect« zur Erzeugung von FE-Modellen aus Messungen von Kornorientierungen mit der »Electron Back Scatter Diffraction«-Methode (ANSYS und ABAQUS)
- »Fitit®« zur Parameteridentifikation
- »ThoMat« zur Lebensdauervorhersage von Hochtemperaturbauteilen mit Finite-Elemente-Programmen
- Modelle zur statistischen Festigkeits- und Lebensdauerbeschreibung für Siliziumkomponenten
- »OpenFOAM« für Strömungsprozesse in der Tribologie
- ATHENE, OREAS, Algorithmen zur Simulation von Mikrorissfeldern: zur Anwendung der Randelementmethode (REM)
- FE-Postprocessing-Tools zur Schädigungssimulation und Festigkeitsvorhersage in Faserverbundlaminaten mit Bohrungen und Kerben (ANSYS, PATRAN/NASTRAN)
- Programme für quantenmechanische Berechnungen und atomistische Simulationen von Werkstoffeigenschaften
- ab-initio-Dichtefunktionaltheorie, semiempirische tight-binding-Elektronenstrukturmethoden, Molekularstatik- und Molekulardynamik-Methoden mit Bond-Order-Potenzialen und mit klassischen Mehrkörper-Kraftfeldern
- »optiSLang« für multidisziplinäre Optimierung, Sensitivitätsstudien, Robustheitsbewertungen, Zuverlässigkeitsanalysen sowie Robust-Design-Optimierung
- »SimPARTIK« zur partikelbasierten Simulation auf Basis der Diskrete-Elemente-Methode und der Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Methode

Geschäftsfeld

TRIBOLOGIE

Mit Hilfe der konsequenten Kombination von Experiment und Simulation bieten wir unserer Kundschaft eine ganzheitliche Problemlösungsstrategie an. Für moderne Materialien und Beschichtungen erschließen wir wettbewerbsrelevante neue Anwendungen vorzugsweise in tribologisch beanspruchten Systemen und ermitteln deren Grenzen. Wir verbessern mit unseren Projektpartnern die Gebrauchseigenschaften der Werkstoffe für die jeweiligen Einsatzbedingungen. Tribologische Optimierungen werden durch gezielt entwickelte Werkstoffe und Oberflächenbehandlungen erreicht. Für den optimalen Werkstoffeinsatz müssen die einwirkenden Belastungen möglichst genau ermittelt werden. Problemlösungen erfolgen auf der Grundlage einer mechanismengetriebenen energetischen Sichtweise. Jede neue Werkstoffpaarung erfordert zudem die genaue Kenntnis der Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften und deren Veränderung im Betrieb. Diese werden mit mechanischen, tribologischen und physikalisch-chemischen Untersuchungsverfahren, die speziell für die praktischen Anwendungen optimiert wurden, ermittelt.

Bemerkenswertes aus 2009

In den vergangenen beiden Jahren haben wir auf dem Gebiet der Tribologie ein bemerkenswertes Wachstum von rund 20 Prozent erreicht. Mit den zudem für die Tribologie in den nächsten Jahren in Aussicht gestellten Bau- und Investitionsmitteln des Landes Baden-Württemberg und des Bundes sowie der Gründung des MikroTribologie Centrums (μ TC) in Karlsruhe unter Leitung von Herrn Professor Scherge können die Tribologieaktivitäten des Geschäftsfeldes signifikant verstärkt werden. Das μ TC ist eine gemeinsame Einrichtung des Geschäftsfeldes Tribologie des Fraunhofer IWM und des Instituts für Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen (IZBS) der Universität Karlsruhe. Reibung und Verschleiß in Motoren, Getrieben, Lagern und Dichtungen zu verstehen, zu modellieren und zu simulieren und mit geeigneten Maßnahmen wie

Oberflächenbehandlungen, Beschichtungen oder modifizierten Werkstoffen beziehungsweise Randschichten zu reduzieren und die Tribologie auf allen Größenskalen berechenbar zu machen, werden die Aufgaben der nächsten Jahre sein.

Leistungsbereich

Verschleißschutz, Technische Keramik

Werkstoffe werden für den Anwendungsfall geprüft, bewertet und ausgewählt, um eine Leistungssteigerung oder einen sicheren Betriebseinsatz zu gewährleisten.

Dr. Andreas Kailer
andreas.kailer@iwm.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Biomedizinische Materialien und Implantate

Schwerpunkte sind die Bewertung der Zuverlässigkeit und des Einsatzverhaltens biomedizinischer Materialien und Implantate. Hierzu werden geeignete Experimente und Simulationstechniken entwickelt.

Dr. Raimund Jaeger
raimund.jaeger@iwm.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Tribologische Schichtsysteme

Entwicklung von maßgeschneiderten Beschichtungslösungen und -verfahren sowie Herstellung und Bewertung von glatten und strukturierten diamantähnlichen Kohlenstoffbeschichtungen für hohe Gleit- und Wälzbelastungen.

Dr. Sven Meier
sven.meier@iwm.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Mikrotribologie

Im Fokus liegt die Aufklärung von Verschleißmechanismen auf Basis der Schädigungsmechanik und Energiebilanzierung unter Verwendung kontinuierlicher Reibungs- und Verschleißmessungen.

Prof. Dr. Matthias Scherge
matthias.scherge@iwf.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Multiskalenmodellierung und Tribosimulation

Die skalenübergreifende Simulation (von atomistischen Methoden bis hin zur Kontinuumsmechanik) dient als Grundlage zum Verständnis von Prozessen in der Tribologie, in Nanomaterialien und in granularen Medien.

Prof. Dr. Michael Moseler
michael.moseler@iwf.fraunhofer.de

Dr. Thomas Hollstein
Geschäftsfeldleiter



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

VERSCHLEISSSCHUTZ, TECHNISCHE KERAMIK

Dr. Andreas Kailer

andreas.kailer@iwmm.fraunhofer.de

WERKSTOFF- UND BAUTEILVERHALTEN KERAMISCHER WALZWERKZEUGE

In der Walztechnik besteht ein erhöhter Bedarf an verschleiß- und korrosionsbeständigen, mechanisch und thermisch hoch belastbaren Komponenten. 2008 wurden weltweit etwa 1,3 Milliarden Tonnen Stahl erzeugt. Ungefähr 90 Prozent davon wurden über einen oder mehrere Walzprozesse zu Halbzeugen weiterverarbeitet. Im Walzwerk werden bis zu 80 Prozent der Nebennutzungszeiten durch verschleißbedingte Werkzeugwechsel verursacht. Es liegt auf der Hand, dass durch eine Erhöhung der Lebensdauer dieser Komponenten kaum abschätzbare Mengen an Energie eingespart werden können.

Im Rahmen eines vom BMBF und von der Industrie geförderten Verbundprojekts wurden keramische Werkzeuge und Komponenten für die Walztechnik entwickelt, um die Wirtschaftlichkeit, Produktqualität und Ressourceneffizienz von Walzprozessen zu verbessern (Abbildung 1).

Vorgehensweise

In Zusammenarbeit mit Herstellern keramischer Werkstoffe und Bauteile wurden für verschiedene Anwendungen Werkzeuge und Komponenten aus der Hochleistungskeramik Siliziumnitrid (Si_3N_4) entwickelt. Gemeinsam mit Anwendern aus den Bereichen Draht-, Band-, Folien- und Profilwalzen wurden diese direkt im Prozess erprobt und bewertet.

Ergebnisse

Von den Keramikherstellern entwickelte Si_3N_4 -Werkstoffvarianten wurden hinsichtlich ihrer Verschleißbeständigkeit und kontaktmechanischen Ermüdungsfestigkeit verglichen. Deutlich erhöhte Verschleißbeständigkeiten ergaben insbesondere TiN-haltige Si_3N_4 -Compounds.

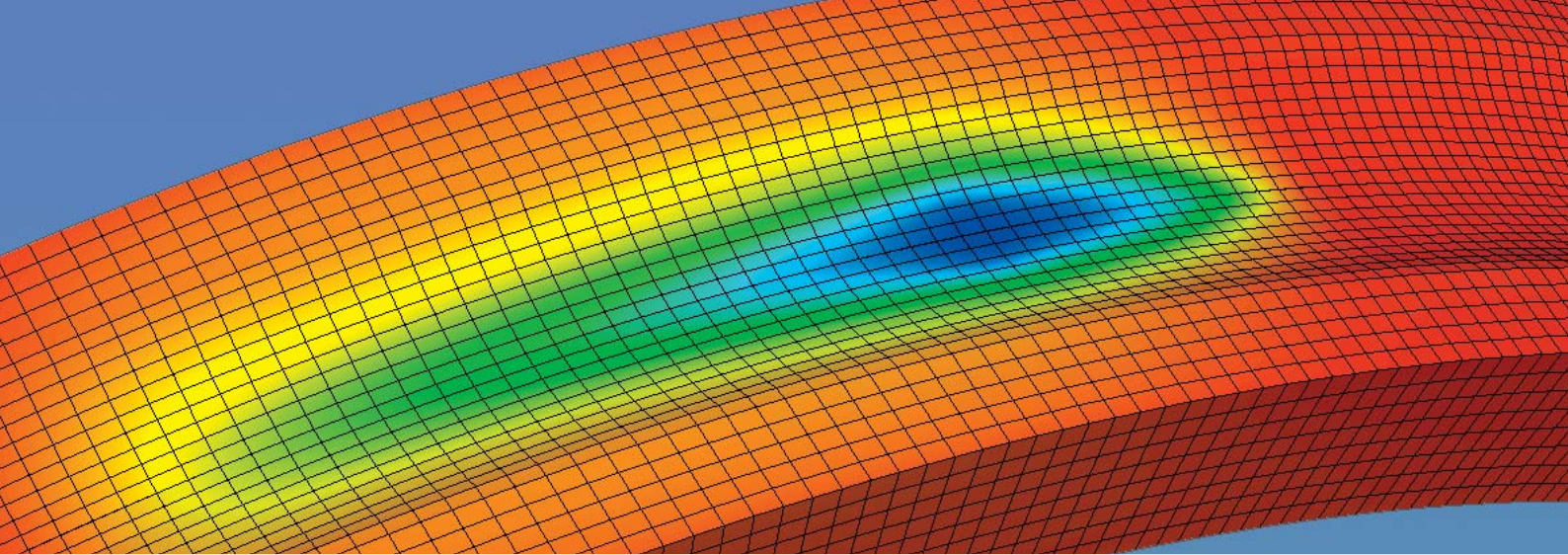
Anhand von Eigenspannungsmessungen an verschiedenen bearbeiteten Walzenoberflächen wurden die Bearbeitungsparameter für das Schleifen optimiert. Eine wesentliche Verbesserung der kontaktmechanischen Tragfähigkeit ergibt sich aus einer optimalen Schleifbearbeitung und zusätzlichem Kugelstrahlen der Keramikoberflächen.

Numerische Simulationen wurden durchgeführt, um die Belastungen der Keramikkomponenten im Einsatz zu modellieren und den Sinterprozess zu optimieren. Anhand von atomistischen Simulationen wurde die Adhäsion von Kupferatomen auf Stahl und Keramik modelliert, woraus sich Hinweise für die Anhaftung und deren Vermeidung von Metallen an Werkzeugoberflächen ergaben.

Bei der Erprobung von Walzen, Drückwalzen und Folienwalzen ergaben sich deutliche Vorteile im Vergleich zu Standardwerkzeugen. Mehr als 10-fache Standzeiten im Vergleich zu Stahl ergaben sich bereits bei diversen Keramikkomponenten, die zur Führung und zum Transport von Walzgut verwendet wurden (Abbildung 2).

Die abschließende Untersuchung der Keramikkomponenten am Fraunhofer IWM ergab nicht nur sehr niedrigen Verschleiß, sondern auch eine starke Einglättung der Keramikoberfläche (A. Kailer: Walzen mit Keramik, Fraunhofer-Verlag, Stuttgart 2009). Durch die Glättung ist es möglich, die Qualität der Walzgutoberfläche noch weiter zu steigern.

Andreas Kailer



Finite-Elemente-Simulation der Belastungen von Keramikwalzen.



1 *Keramische Folienwalze im Walzgerüst bei MK-Metallfolien GmbH. Foto: © Universität Duisburg-Essen.*



2 *Drahtführungsrollen vor und nach Erprobung im Walzwerk bei Böhler Edelstahl GmbH & Co. KG. Die Einglätung der Keramikoberfläche ermöglicht eine sehr gute Oberflächenqualität und eine bis 10-fach höhere Lebensdauer der Führungsrollen. Links: neue Rolle. Rechts: im Walzwerk erprobt.*

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

TRIBOLOGISCHE SCHICHTSYSTEME

Dr. Sven Meier

sven.meier@iwm.fraunhofer.de

BESCHICHTUNGSGERECHTES RANDSCHICHT- DESIGN DURCH MIKRO-KUGELSTRAHLEN

Plasmaunterstützt chemisch abgeschiedene DLC-Schichten zeichnen sich durch einen hohen Verschleißwiderstand und einen geringen Reibkoeffizienten bei Gleitbeanspruchung aus. Unter Überrollungsbeanspruchung zeigt sich jedoch oft eine zu geringe Haftfestigkeit. Nach dem Stand der Technik werden zur Steigerung der Haftfestigkeit metallische PVD-Zwischenschichten eingesetzt. Der Einsatz von PVD-Techniken, die in einen PECVD-Prozess integriert werden müssen, reduziert allerdings viele Vorteile eines Mono-PECVD-Prozesses, bei dem alle Ausgangsstoffe über die Gasphase zur Verfügung gestellt werden. Die eigenständige PECVD-Technologie des Fraunhofer IWM ist ohne integrierte PVD-Technologie weitgehend skalierfähig. Sie arbeitet nahezu reinigungsfrei und ist hervorragend für komplexe dreidimensionale Geometrien geeignet.

Erklärtes Ziel war es daher, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Haftfestigkeit steigern kann. Gleichzeitig sollte es dem Beschichtungsprozess vorgelagert sein, um das Aufbringen haftvermittelnder metallischer Zwischenschichten vermeiden zu können.

Vorgehensweise

Zu diesem Zweck wurde vom Fraunhofer IWM ein Mikro-Kugelstrahlverfahren entwickelt, welches das Einbringen von Druckeigenspannungen in das Substrat erlaubt (Abbildung 1). Die elementaren Mechanismen der beobachteten Haftfestigkeitssteigerung sind noch unzureichend bekannt. Mehrere Faktoren können eine Rolle spielen, beispielsweise die Vergrö-

ßerung der Oberfläche, das Einbringen von Fremdelementen oder die Elimination von Zugeigenspannungen.

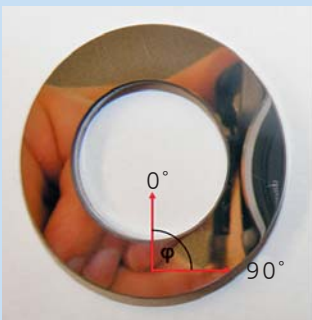
Ergebnisse

Überrollversuche mit definierten Schlupfwerten und Pressungen (Abbildung 2) haben gezeigt, dass durch Mikrostrahlen des Substrats die Haftfestigkeit und die Überrollfestigkeit von DLC-Schichten deutlich verbessert werden können. Die Anzahl der erreichten Überrollungen ist in Abbildung 2 dargestellt. Bei den Ermüdungstests (Amsler), welche von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung durchgeführt wurden, zeigte sich, dass die Beschichtung einer polierten Standardprobe nach rund 400 000 Überrollungen versagt. Dahingegen ist bei mikrogestrahlten Proben nach über 20 Millionen Überrollungen bei identischer Schicht kein Schichtversagen zu erkennen. Auf Basis dieser Ergebnisse werden bereits zahlreiche Anwendungen bedient, für die zuvor metallische Zwischenschichten unabdingbar waren. Außerdem bilden diese Erkenntnisse die Grundlage für weitergehende Untersuchungen, da die Haftfestigkeit eine entscheidende Rolle für viele mechanisch hoch belastete Bauteile wie Kugellager spielt. Es gilt nun zu klären, welcher der Mechanismen für die verbesserten Eigenschaften verantwortlich ist, um den Schicht-Substratverbund für derartige Lastfälle weiter optimieren zu können.

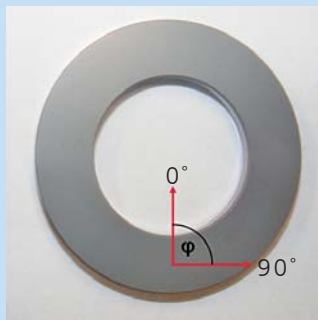
Florian Kurrus, Sven Meier



DLC-beschichtetes Antriebskegelrad.

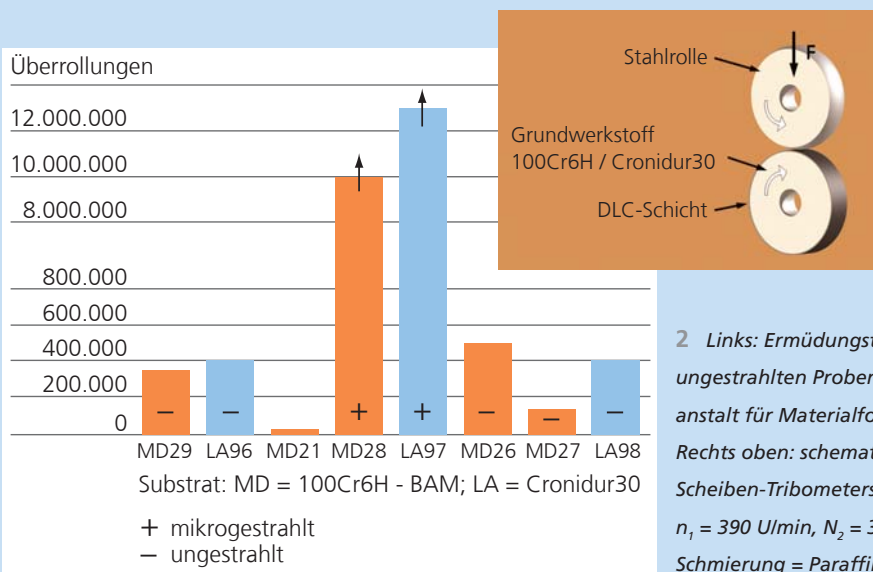


$\sigma_E(0^\circ) = 26,0 \pm 7,4 \text{ MPa}$
 $\sigma_E(90^\circ) = -5,8 \pm 11,2 \text{ MPa}$



$\sigma_E(0^\circ) = -844 \pm 34 \text{ MPa}$
 $\sigma_E(90^\circ) = -891 \pm 18 \text{ MPa}$

1 Polierte (links) und mikrogestrahlte (rechts) Axiallagerscheiben und die röntgenografisch ermittelten Eigenspannungen.



2 Links: Ermüdungstest an mikrogestrahlten und ungestrahlten Proben, durchgeführt von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Rechts oben: schematischer Aufbau eines Zwei-Scheiben-Tribometers vom Typ Amsler. Schlupf = 10 %, $n_1 = 390 \text{ U/min}$, $N_2 = 354 \text{ U/min}$, $\text{Druck} = 1,5 \text{ GPa}$, $\text{Schmierung} = \text{Paraffin 46}$, $\text{Temp.} = \text{RT}$.

DIE DYNAMIK VON NI-NANOPARTIKELN BEIM WACHSTUM VON C-NANOFASERN

Häufig werden Kohlenstoffnanoröhren und -fasern mittels chemischer Dampfabscheidung von Kohlenwasserstoffen hergestellt. Dabei sitzen Ni-, Co- oder Fe-Nanopartikel an einem Ende der Nanoröhren und katalysieren die Aufspaltung der C_xH_y -Spezies in H_2 und C. Der Kohlenstoff wird über das Partikel an den Rand des Nanotubes transportiert und dort in das Graphen-Netzwerk eingebaut.

Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass die Qualität des Kohlenstoffnanomaterials entscheidend von der Dynamik der Katalysatorpartikel abhängt (S. Helveg et al., Nature 427, 426 2004). Die Partikel können während des Wachstums eine Serie von Metamorphosen durchlaufen – oszillierend zwischen einer »Kaulquappe«, deren Schwanz in der Röhre steckt, und einem »Tropfen«, der am Ausgang der Röhre hängt (Abbildung 1A). In diesem Fall kommt es zum Ausbilden von so genannten Bambusstrukturen. Im Gegensatz dazu können Partikel, die ihre Gestalt nicht ändern, ideale Nanoröhren erzeugen. Es ist daher von großer Bedeutung, zu verstehen, wie es zu der seltsamen flüssigkeitsartigen Dynamik dieser Nanokristalle kommt.

Vorgehensweise

Hierzu wurden Multiskalensimulationen eines Ni-Nanopartikels in einer doppelwandigen C-Nanoröhre durchgeführt. Auf der atomistischen Ebene wurde mittels quantenchemischer Rechnungen ein Modell aufgesetzt, mit dem Nickel und seine Wechselwirkung mit dem Kohlenstoffträger beschrieben werden können. Mit klassischer Molekulardynamik wurde dann ausgehend von der Kaulquappenstruktur die Morpholo-

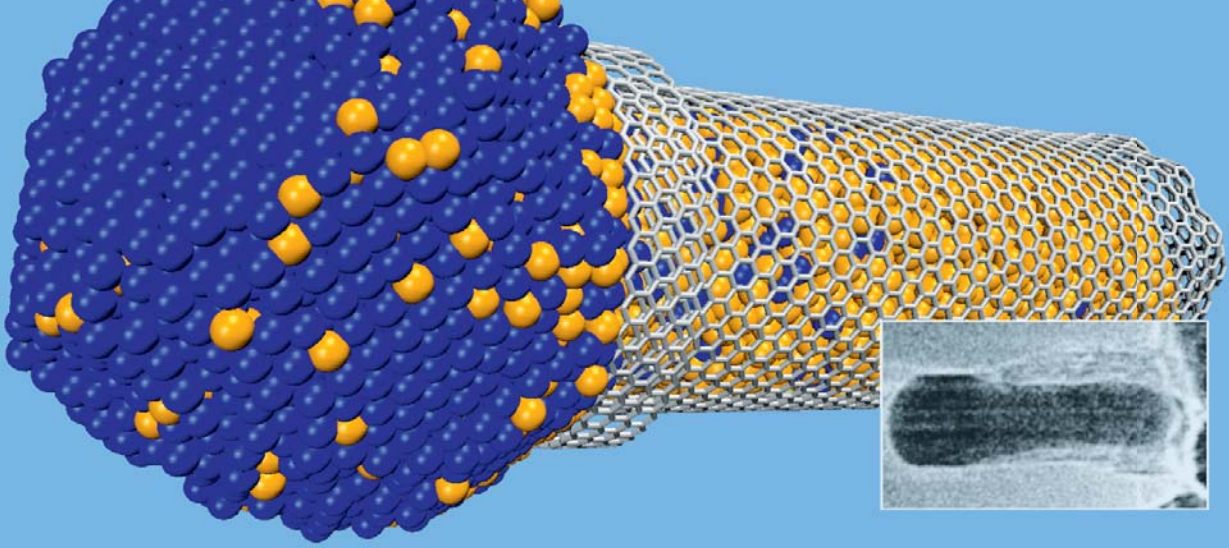
gieentwicklung des Partikels bei einer Temperatur von 1 160 K untersucht.

Ergebnisse

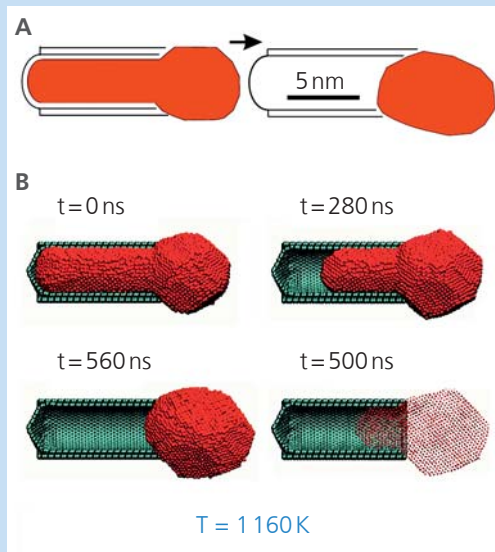
Erfreulicherweise reproduzierte die Simulation die experimentelle Dynamik (Abbildung 1A und 1B). Auch in der Simulation verlässt das Ni-Partikel das Nanotube, wobei es während des gesamten Prozesses kristallin bleibt (Abbildung 2). Der Transport kann hierbei eindeutig auf einen Oberflächendiffusionsprozess zurückgeführt werden (Bewegung der blauen Atome in Abbildung 2). Der Diffusionsprozess wird durch einen chemischen Potenzialunterschied angetrieben: von dem erhöhten Potenzial der Atome auf der stark gekrümmten Endkappe des »Kaulquappenschwanzes« hin zum niedrigen Potenzial auf der weniger gekrümmten Oberfläche außerhalb der Nanoröhre. Da die Temperaturen in den Simulationen jedoch um 360 K höher gewählt wurden als im Experiment (800 K), wird der Ausstoß des Teilchens stark beschleunigt wiedergegeben. Es benötigt anstelle von 0,5 Sekunden nur noch 0,5 μ s.

Um zu klären, ob der gefundene Mechanismus die langsamere experimentell gefundene Zeitskala erklären kann, wurde ein Kontinuumsdiffusionsmodell basierend auf den Molekulardynamikrechnungen entwickelt. Dieses Modell ermöglicht, die experimentelle Dynamik exakt zu reproduzieren. Es steht nun zur Optimierung der Prozessparameter für unseren experimentellen Partner an der Universität Cambridge zur Verfügung.

Michael Moseler

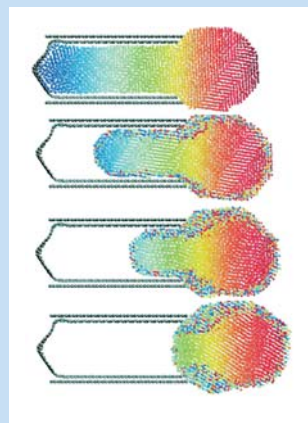


Die Computersimulation zeigt das Wachstum eines Nanoröhrchens aus Kohlenstoff mit Nickel-Partikeln (gelbe und blaue Kugeln) als Katalysatoren.



1 A: Ein Ni-Nanopartikel (rot) verlässt schlagartig das Innere einer C-Nanoröhre (Skizze basierend auf Transmissionselektronenmikroskopie).

B: Die entsprechende atomistische Simulation bei einer Temperatur von 1160 K. Die Abbildung bei 500 ns zeigt einen Querschnitt des Partikels: Er ist kristallin.



2 Schnitt durch das Partikel während des Ausstoßungsprozesses. Die Farben geben die anfängliche Lage der Atome wieder. Blau: am weitesten links. Rot: am weitesten rechts. Es wird deutlich, dass der polykristalline Kern des Partikels kristallin bleibt und lediglich Oberflächenatome zum Transport beitragen.

KRIECHVERHALTEN VON KNOCHENZEMENTEN

Knochenzemente werden zur Verankerung von Prothesen eingesetzt und spielen in der Endoprothetik eine wichtige Rolle. In diesen Anwendungen wird der Knochenzement häufig stark mechanisch belastet.

Unter konstanter mechanischer Belastung können Knochenzemente kriechen und sich plastisch verformen. Die Kriechnachgiebigkeit eines Knochenzements nimmt im Lauf der Zeit ab. Dieser Prozess wird »physikalisches Altern« genannt und beruht darauf, dass sich ein glasig erstarrtes Polymer langsam einem Gleichgewichtszustand nähert. Hierbei nimmt die Mobilität der Polymerketten und damit die Kriechnachgiebigkeit ab. Da Knochenzemente den Glaszustand während der Aushärtung im Patienten erreichen, ist die gesamte Entwicklung der Kriechnachgiebigkeit durch das physikalische Altern klinisch relevant.

Vorgehensweise

Knochenzementproben mit Alterungsperioden t_e von 45 Minuten bis zu 2½ Jahren wurden in einem Drei-Punkt-Biegeprüfstand Kriechversuchen unterzogen. Die Verformungsantwort der Proben wurde mit einem modifizierten Burgers-Modell und Struiks »allgemeinem Kriechgesetz« analysiert.

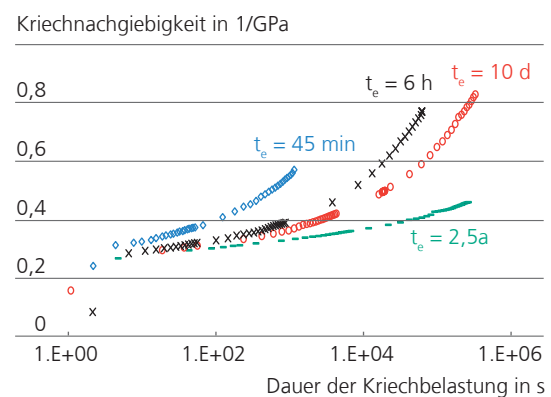
Ergebnisse

Die Kriechversuche zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Kriechnachgiebigkeit von der Dauer der physikalischen Alterung: Länger »gealterte« Proben zeigen bei gleicher Biegespannung einen langsameren Anstieg der Kriechverformung (Abbildung 1). Die Auswertung der experimentellen Ergebnisse mit dem Burgers-Modell zeigt eine Abhängigkeit derjenigen

Modellparameter von der Alterungszeit t_e , die die Dynamik von Polymerketten beschreiben. Struiks Kriechgesetz charakterisiert hingegen den Einfluss des physikalischen Alterns auf das Kriechen mit einem einzigen Parameter, weswegen es sich für den Vergleich von Knochenzementen eignet (Jaeger, R.: Physical aging and the creep behavior of acrylic bone cements, Biomedical Materials Research Part B: Vol. 91B Iss. 2).

Die anfänglich erhöhte Kriechnachgiebigkeit kann sich positiv auf den Abbau von Eigenspannungen auswirken, die während der Aushärtung des Knochenzements entstehen. Hohe mechanische Belastungen, die eine starke Verformung des Zementkörpers verursachen könnten, sollten hingegen vermieden werden.

Raimund Jaeger



1 Die Kriechnachgiebigkeit von Knochenzementproben nach unterschiedlichen Alterungsperioden bei einer Randfaserspannung von 10 MPa.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

MIKROTRIBOLOGIE

Prof. Dr. Matthias Scherge
matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de

VIDEO-TRIBOLOGIE: SCHNELLE TOPOGRAFIE-MESSUNG ZUM METALL-EINLAUFVERHALTEN

Metalloberflächen werden im tribologischen Einlauf starken plastischen Deformationen unterworfen. Sie bewirken, dass sich Struktur, Härte, Zusammensetzung und Topografie des Metalls signifikant verändern. Diese Eigenschaftsänderungen sind für die späteren Verschleiß- und Reibungseigenschaften eines gleitbeanspruchten Bauteils wesentlich mitverantwortlich.

Insbesondere die Dynamik der Topografie und die gegenseitige Wechselwirkung benachbarter Rauheitsspitzen ist nach modernen Kontakttheorien essenziell für die Verteilung und Größe von interagierenden Mikrokontakten. Dies ist experimentell jedoch weitgehend unerforscht. Daher ist die Topografieentstehung während des Einlaufs im Fokus der Forschung der von der DFG geförderten Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe.

Vorgehensweise

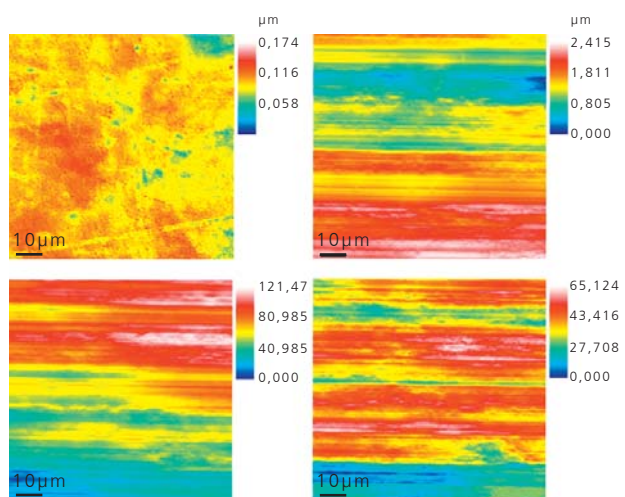
Um Topografieentstehung mit Reibung und Verschleiß koppeln zu können, wurde eine bislang einzigartige Experimentierplattform entwickelt: Die Nano-Experimentierplattform erlaubt, verschiedene Messmethoden an ein- und derselben Stelle mit extrem hoher Wiederholgenauigkeit durchzuführen. Die Evolution der Topografie kann mit Video-Bildraten in Echtzeit verfolgt werden. Ein Rasterkraftmikroskop erlaubt die Messung von Strukturen mit Sub-Nanometer-Auflösung. Zudem kann mit einer Radionuklid-Verschleißmessanlage der Verschleiß in-situ gemessen werden.

Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt vier Frames aus einem Video, welches die Topografieentwicklung einer polierten Kupferoberfläche in einem geschmierten Reibkontakt während des Einlaufs wiedergibt. Dabei wurde jeder Frame direkt nach einer Übergleitung im Schmierfilm gemessen. Diese Oberflächenbilder können mit Videoraten aufgenommen werden. Aus den Topografiedaten lassen sich wichtige Größen wie Rauheit, Welligkeit und lokaler Materialverlust direkt mit tribologischen Größen wie Reibung und Verschleiß vergleichen. Diese Grundlagenuntersuchungen liefern wertvolle Daten für zukünftige Simulationsmethoden für Tribosysteme und für die anwendungsnahe Optimierung von Fertigungsprozessen.

Martin Dienwiebel, Spyridon Korres
(Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe der DFG)

1 Evolution der Topografie nach 0 (links oben), 28 (rechts oben), 112 (links unten) und 540 (rechts unten) Übergleitungen.



Unser Leistungsangebot beinhaltet Untersuchungen und technologische Entwicklungen zur Herstellung von Komponenten mit besonderen funktionalen Eigenschaften sowie Analysen und Optimierungen durch physikalische Werkstoffmodellierung und Simulation. Im Vordergrund stehen Materialbearbeitung, Präzisionsformgebung, Gieß-, Druck und Pressprozesse sowie Beschichtungen und Materialsysteme aus den Bereichen Hartstoffe, Keramiken, Gläser, optische Funktionsmaterialien, Halbleitermaterialien, Ferroelektrika.

Bemerkenswertes aus 2009

Im Rahmen des Verbundprojektes »Flexibles Flachglas-Biegeverfahren« wurden die Arbeiten für die Entwicklung eines neuen, ressourcenschonenden Verfahrens für das Heißbiegen von Flachgläsern zur Erzeugung unterschiedlichster Biegekonturen bis hin zu Freiformkonturen aufgenommen. Der neue Prozess vermeidet eine aufwändige Vollerwärmung des Glases, wie es bisher Stand der Technik ist. Für die entsprechende Technikumsanlage wurde am Institut eigens eine Glasbiegehalle erstellt.

Für eine wirtschaftliche Herstellung hochpräziser abbildender Optiken durch schnelle Heißprägetechniken gelang der vollständige Verfahrens- und Funktionsnachweis. Schlüssel für die Realisierung waren ein neu entwickeltes Beschichtungssystem für die Werkzeugbeschichtung sowie die Weiterentwicklung der IWM-Presstechnik zu einem vollautomatischen Ablauf. Für transparente leitende Oxide für OLED- und PV-Anwendungen wurden mittels quantenmechanischer first-principles-Rechnungen Funktionseigenschaften analysiert und optimiert. Durch atomistische Simulation wurde nachgewiesen, dass Verbesserungen in Transparenz und Leitfähigkeit durch Dotierung von Korngrenzen mit Fremdatomen erreicht werden können.

Leistungsbereich

Bearbeitungs- und Trennverfahren

Wir entwickeln schädigungsarme Bearbeitungs- und Trennverfahren für die Herstellung von Komponenten aus Glas und Silizium mit hochwertigen Kanten und Flächen, führen Schadensanalysen durch und unterstützen unsere Kundinnen und Kunden bei der Steigerung der Gutausbeute in der Fertigung und Einsatzsicherung von Komponenten in Betrieb und Anwendung.

Dr. Rainer Kübler

rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Heißformgebung Glas

Für die Serienproduktion von Optikelementen und Präzisionsbauteilen aus Gläsern entwickeln wir Heißformgebungsverfahren und Werkzeuge bis hin zur Pilotproduktion von Musterbauteilen. Schwerpunkte sind Verfahren zum Blankpressen präzisionsoptischer Linsen mit asphärischen Flächen aus optischen Gläsern sowie das Heißprägen von optischen Komponenten und von mikro- und nanostrukturierten Bauteilen bei kurzen Prozesszeiten.

Dr. Peter Manns

peter.manns@iwm.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Pulvertechnologie

Durch die Simulation von Prozessschritten wie Pressen, Trocknen, Granulieren, Sintern tragen wir dazu bei, die Bauteilherstellung effizienter zu gestalten. Wir verbessern in dieser Weise Halbzeuge und Fertigprodukte, verkürzen

Entwicklungszeiten und sparen Kosten. Neben kontinuumsmechanischen Simulationsansätzen wenden wir diskrete Partikel-Methoden an.

Dr. Torsten Kraft
torsten.kraft@iwf.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Funktionale Schichtsysteme

Für die Beschichtung von Formgebungswerkzeugen sowie für die Funktionalisierung von Komponenten entwickeln wir Schichtsysteme und passen diese für den industriellen Einsatz an. Schwerpunkte bilden auch die Bewertung und die Konfigurierung von Schichten zur definierten Steuerung von Oberflächeneigenschaften und Funktionen wie Reflexion, Benetzung, Adhäsion, Härte, Beständigkeit.

Dr. Frank Burmeister
frank.burmeister@iwf.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Physikalische Werkstoffmodellierung

Mit physikalischen Modellen und numerischen Methoden modellieren wir das Werkstoffverhalten, sagen Struktur-Eigenschaftsbeziehungen voraus und leisten dadurch Beiträge zur Material- und Funktionsoptimierung. Wir decken Einflüsse von Materialdefekten auf das Materialverhalten auf und nutzen die Erkenntnisse, um technische Systeme zu verbessern. Unsere Forschungsergebnisse bilden zudem eine solide Grundlage zur Verfeinerung von Simulationsmodellen für Bauteile im großen Maßstab.

Prof. Dr. Christian Elsaesser
christian.elsaesser@iwf.fraunhofer.de

Dr. Günter Kleer
Geschäftsfeldleiter



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

FUNKTIONALE SCHICHTSYSTEME

Dr. Frank Burmeister

frank.burmeister@iw.fraunhofer.de

HYBRIDSCHICHTEN FÜR DIE ERZEUGUNG BESTÄNDIGER, FUNKTIONALER KOMPONENTEN

Für hochwertige Kunststoffkomponenten aus dem Automobilbereich wie Blenden, Displayabdeckungen, Verkleidungen und Bedienelemente werden neben der Grundfunktion weitere Eigenschaften gefordert: Die Komponenten sollen eine hochwertige, ansprechende Optik besitzen sowie beständig und gut zu reinigen (easy-to-clean) sein. Der Wettbewerb am Markt erfordert, dass die zusätzlichen Funktionalisierungen kostenneutral in den Herstellprozess der Komponente integriert werden können.

Bei Verkleidung wird eine erhöhte Beständigkeit durch Einlegen in ein spezielles Werkzeug und anschließende Überflutung mit einem quervernetzenden Polyurethan-System (PU) realisiert. Aufgrund der hohen Haftneigung reaktiv härtender Formmassen gegenüber der formgebenden Werkzeugwand ist es jedoch erforderlich, das Werkzeug mit flüssigen Trennmitteln einzusprühen. Dies führt zu einer verminderten Oberflächenqualität der damit abgeformten Artikel. Zudem können feinste Strukturen, beispielsweise Narbstrukturen, nicht sauber repliziert werden.

Vorgehensweise

Zur Lösung dieser Probleme wurde eine nanostrukturierte Hybridschicht mit extrem niedrigen Oberflächenenergien entwickelt. Die Schicht besteht dabei aus einer hartstoffbasierten Grundschicht, die über Selbstorganisationsprozesse eine stark korrigierte, optisch wirksame Oberflächenstruktur ausbildet. Darüber wird mittels Plasmapolymersation eine ultradünne organische Trennschicht abgeschieden, die gegenüber PU ein günstiges Entformungsverhalten aufweist. In einem derart beschichteten Versuchswerkzeug wird nun ein thermoplas-

tischer Vorformling eingelegt und mit einem PU-System überflutet. Nach dem Aushärten des PU-Systems durch einen Wärmepuls wird der Artikel aus dem Werkzeug entnommen (Abbildung 1).

Ergebnisse

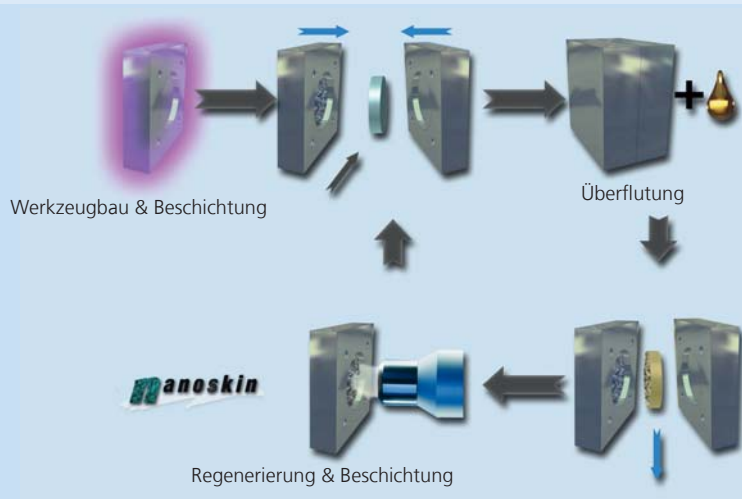
Hierdurch ist es erstmals gelungen, Nanostrukturen direkt in einer Polyurethanhaut zu erzeugen (Abbildung 2). Darüber hinaus konnte das Formteil vom Werkzeug ohne Trennmittel schadensfrei entformt werden. An derart überfluteten Teilen wurde im Vergleich zu einem herkömmlichen Thermoplasten wie PC eine sehr gute Chemikalienbeständigkeit nachgewiesen. Auch die Wischbeständigkeit der nanostrukturierten PU-Haut zeigte sich deutlich verbessert.

Weitere Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich nun auf die Erhöhung der optischen Effizienz der Schichten und die Beständigkeit der organischen Trennschicht in Kombination mit einer Regenerierung der Schicht direkt im Ablauf des Spritz- und Überflutungsprozesses. Neue Anwendungsfelder, die durch diese Entwicklungen erschlossen werden können, umfassen entspiegelte Abdeckungen für Mobilgeräte und Instrumententafeln sowie blendfreie Visiere.

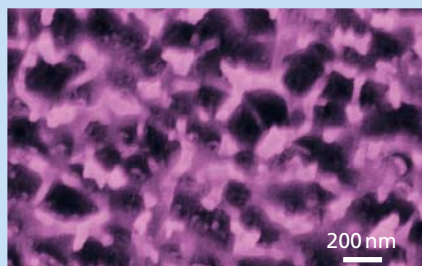
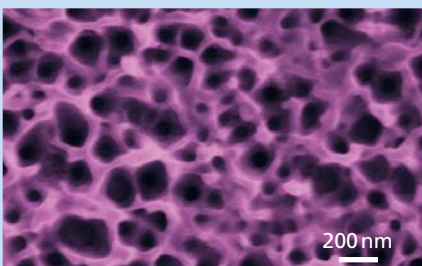
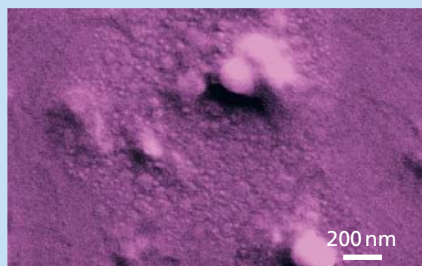
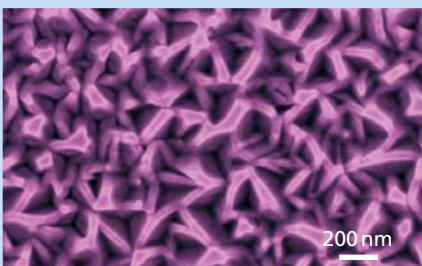
Frank Burmeister



Ultrahydrophobe Hybridschicht mit stark wasser- und medienabweisenden Eigenschaften zur trennmittelfreien Entformung von Polyurethan.



1 Schematische Darstellung des Überflutungsprozesses (im Uhrzeigersinn): Beschichtung, Einlegen des Artikels, Überflutung, Werkzeugregenerierung.



2 Oben: In Polycarbonat abgeformte Nanostruktur vor (links) und nach (rechts) Acetonbehandlung. Unten: Nanostruktur in Polyurethan vor (links) und nach (rechts) Acetonbehandlung.

MODELLIERUNG DER MIKROSTRUKTUR VON METALLPULVERN

Der Herstellungsprozess von pulvertechnologisch gefertigten Bauteilen umfasst im Wesentlichen die Schritte Matrizenfüllen, Pressen und Sintern. Unterschiede bei der Herstellung sind hauptsächlich durch die Materialklassen wie Keramik-, Hartmetall-, Eisenpulver oder anderen gegeben, wobei die gesamte Prozesskette mittels am Fraunhofer IWM entwickelter Simulationsmodelle beschrieben wird. Hieraus resultieren Vorhersagen hoher Genauigkeit.

Dennoch stoßen auch diese Modelle an ihre Grenzen, wenn es um Prognosen von Rissen im gepressten und noch nicht gesinterten Bauteil (Grünling) geht. Solche Risse können im Wesentlichen beim Ausstoßen des Grünlings aus seiner Matrix entstehen, weil dabei starke lokale Spannungsinhomogenitäten in radialer beziehungsweise axialer Richtung auftreten können. Da im Rahmen der Kontinuumsmechanik diskrete Strukturen wie Risse nur sehr aufwändig zu behandeln sind, hat das zu entwickelnde Schädigungsmodell zum Ziel, Orte starker Rissausbildung vorherzusagen zu können.

Vorgehensweise

Zur Entwicklung eines kontinuumsmechanischen makroskopischen Schädigungsmodells sind Kenntnisse über Eigenschaften und Verhalten in der Mikrostruktur essenziell. Deshalb wurde ein Modell einer repräsentativen Einheitszelle entworfen, das eine ausreichende Anzahl an kugelförmigen Partikeln enthält und durch Homogenisierungsmethoden ein unendlich ausgedehntes Pulver darstellt (Abbildung 1). Es können beliebige Größenverteilungen und Kugelpositionen vorgegeben werden. Die Partikel interagieren durch Reibkontakt und besitzen elastisch-plastische Materialeigenschaften. Durch

verschiedene auf die Einheitszelle aufgebrauchte Belastungsschichten (beispielsweise uniaxiale Prekompression) wird die makroskopische Fließkurve berechnet. Diese wird in Bezug zu den vorliegenden Deformationszuständen der Mikrostruktur gesetzt und lässt in weiterer Folge Rückschlüsse bezüglich der Entwicklung eines Schädigungsmodells zu.

Ergebnisse

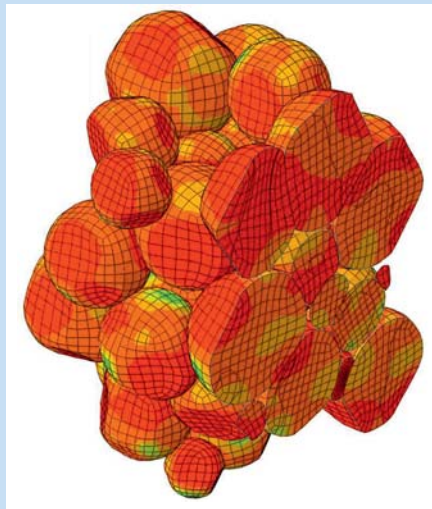
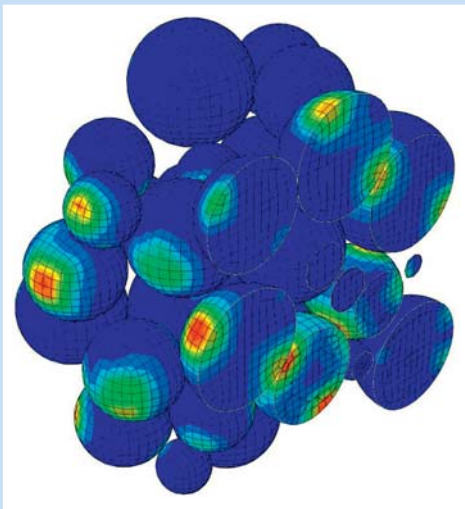
Mit dem verwendeten Ansatz können qualitative Prognosen von Fließflächen für beliebig gegebene Partikelverteilungen errechnet werden. Dies ist durch den bereichsweisen Vergleich zur Form des Drucker-Prager-Cap-Standardmodells belegt. Des Weiteren ergeben sich für definierte Belastungszustände die dominanten Mechanismen, welche zum Fließen des gepressten Pulvers führen (Abbildung 2).

Weitere Simulationen zeigen die Stärke der Abhängigkeiten der Fließflächenform und Lage der Partikelverteilung. Für gleiche, jedoch im Hauptspannungsraum gegeneinander verdrehte Belastungszustände werden anisotrope Eigenschaften vorausgesagt.

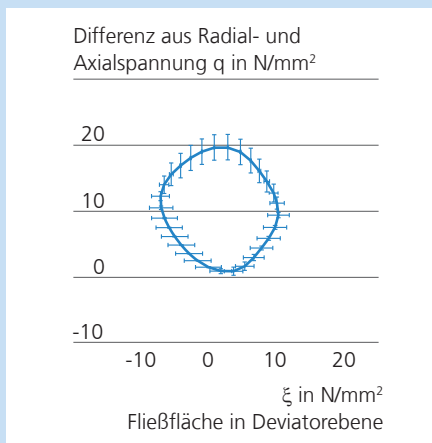
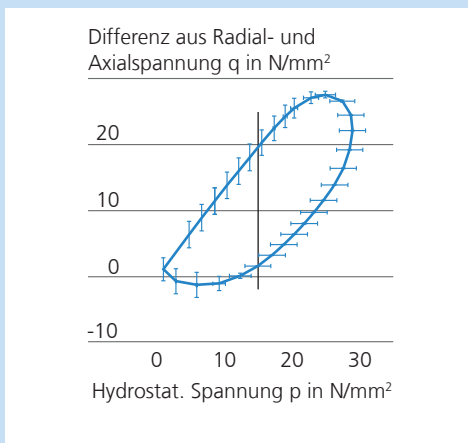
Andreas Trondl



Sinterstahlpulver und daraus durch Pressen hergestelltes Tellerrad.



1 Querschnitt Einheitszelle vor (links) und nach (rechts) uniaxialer Kompression (Farbgebung zeigt Spannungsverteilung an).



2 Aus Homogenisierung berechnete makroskopische Fließkurven. Die Länge der eingezeichneten Linien repräsentieren den relativen Einfluss von Reibung (vertikale Linien) und Plastizität (horizontale Linien).

BLEIFREIE FERROELEKTRIKA FÜR SENSOREN UND AKTOREN

Ferroelektrika sind Materialien mit einer spontanen, schaltbaren elektrischen Polarisierung. Sie sind piezoelektrisch und können als elektromechanische Aktoren oder Sensoren eingesetzt werden. Beispielsweise finden sich Ferroelektrika in modernen Dieselmotor-Einspritzpumpen: Eine piezoelektrische Ventilansteuerung ist schneller als eine elektromagnetische, ermöglicht daher eine genauere Kontrolle des Einspritzvorgangs und bedingt dadurch eine effizientere Verbrennung.

Zurzeit ist Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) eines der am besten geeigneten Materialien für viele elektromechanische Anwendungen. In Zukunft sollen jedoch aus Umweltschutzgründen bleifreie Ersatzmaterialien zum Einsatz kommen. Ein möglicher Kandidat hierfür ist Kalium-Natrium-Niobat (KNN). Beide Materialien kristallisieren in der Perovskit-Struktur. Die Eigenschaften der ferroelektrischen Ausgangsstoffe lassen sich mit Hilfe von Dotierungen, beispielsweise Eisenoxid, optimieren. Bei KNN wird mitunter zusätzlich ein Sinterhilfsstoff, zum Beispiel Kupferoxid, zugesetzt.

Vorgehensweise

In einem DFG-Projekt zusammen mit Experimentalgruppen an den Universitäten Freiburg (Spinresonanz- und elektrische Messungen) und Karlsruhe (Probenherstellung, Strukturbestimmung und elektrische Messungen) untersuchen wir mit Hilfe von Computersimulationen auf atomarer Skala die Auswirkungen von Kupfer- und Eisendotierungen auf die ferroelektrischen Eigenschaften von KNN.

Zum Einsatz kommen die ab-initio-Dichtefunktionaltheorie (DFT) sowie Atomistik-Simulationen mit empirischen inter-

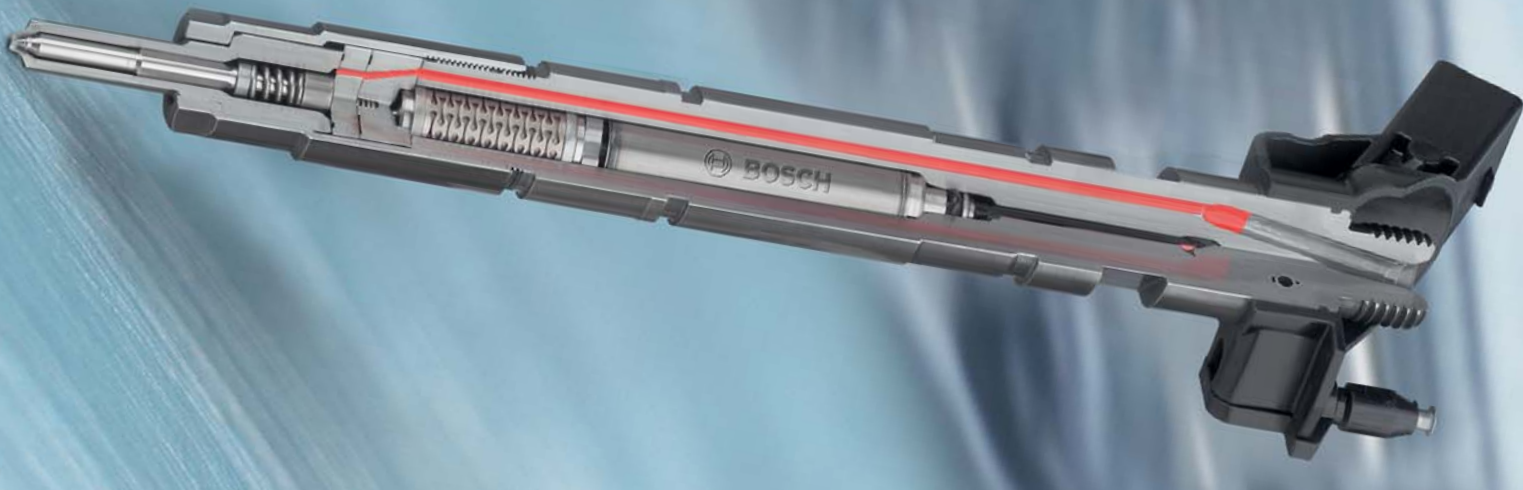
atomaren Potenzialen. Mit beiden Methoden lassen sich Gesamtenergien und Kräfte von kristallinen Materialien mit Strukturdefekten berechnen. Die quantenmechanischen ab-initio-Rechnungen sind wesentlich genauer, die empirischen interatomaren Potenziale ermöglichen eine schnellere Simulation größerer atomistischer Modellsysteme mit ausgedehnten Defektstrukturen.

Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt ein Phasendiagramm des stabilsten Gitterplatzes für Kupfer-Fremdatome in KNN unter verschiedenen chemischen Bedingungen (μ : chemisches Potenzial). Bei Gasen, beispielsweise Sauerstoff, ist das chemische Potenzial ein Maß für den Partialdruck. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist die Perovskitphase nur im farbig markierten Bereich der chemischen Potenziale stabil. Bei einer sauerstoffreichen Umgebung (grün) ersetzt Kupfer eher ein Niob-Atom, bei sauerstoffarmen Bedingungen (rosa) eher ein Alkali-Atom.

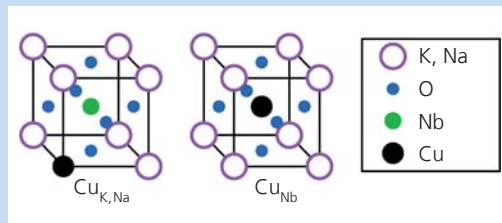
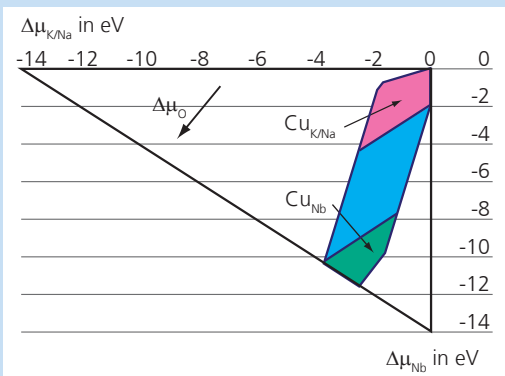
Abbildung 2 zeigt die Energieprofilkurven für Übergänge zwischen verschiedenen ferroelektrischen Polarisationsrichtungen ([001], [011] und [111]) und der paraelektrischen Struktur (PE). Bei einer Dotierung von Kupfer auf dem Niob-Platz wird das Schalten ersten Ergebnissen zufolge erleichtert, bei einer Dotierung auf einem Alkali-Platz mitunter erschwert. Mit entsprechenden Simulationen kann auch der Einfluss von Defektkomplexen aus Fremdatomen und Sauerstoffleerstellen auf das Schaltverhalten untersucht werden.

Sabine Körbel

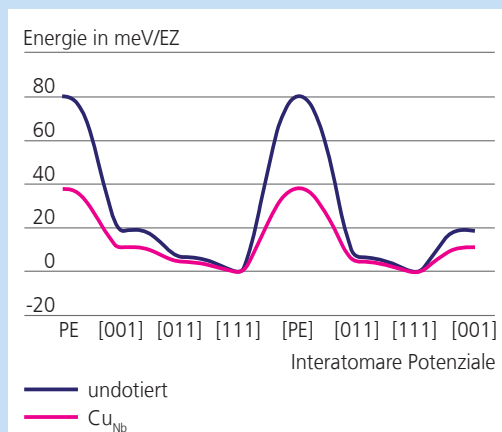
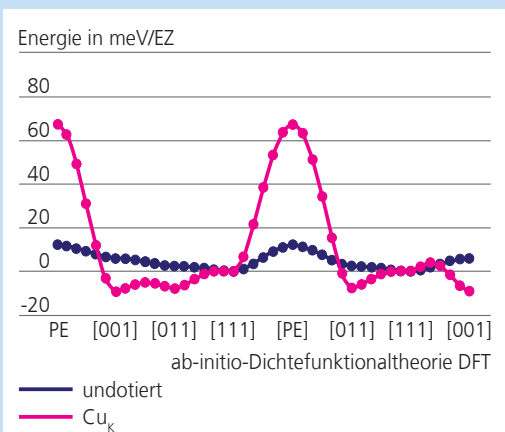


Ein Anwendungsbeispiel für Ferroelektrika:
Piezo-Injektor für Dieselmotor-Einspritzsysteme.

Foto: © Robert Bosch GmbH



1 Energetisch bevorzugter Gitterplatz für Kupfer in Kalium-Natrium-Niobat (KKN). Grün: Niob-Platz. Rosa: Alkali-Platz. Das chemische Potenzial für Sauerstoff (Partialdruck) nimmt von rechts oben nach links unten zu.



2 Energieprofilkurven für das Schalten der ferroelektrischen Polarisierung in reinem beziehungsweise Kupfer-dotiertem KNN. Der Energieunterschied zwischen paraelektrischer (PE) und in [111]-Richtung polarisierter Struktur ist bei einer Cu_K -Dotierung (links) stark erhöht, bei einer Cu_{Nb} -Dotierung (rechts) deutlich abgesenkt.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

BEARBEITUNGS- UND TRENNVERFAHREN

Dr. Rainer Kübler
rainer.kuebler@iw.fraunhofer.de

HIGHTECH-VERGLASUNG VERBINDET WÄRMEISOLIERUNG MIT LEICHTBAU

Fossile Energieträger, unsere Hauptenergieressourcen, sind ein begrenztes Gut. Durch den zudem global unaufhaltsam steigenden Bedarf an Energie sind in den letzten Jahren die Rohstoff- und Energiekosten in die Höhe gestiegen. Daher werden konsequente Energieeinsparung und effiziente Ressourcennutzung immer wichtiger.

Bei Gebäuden lässt sich durch effektive Isolierung der Fassaden außerordentlich viel Energie einsparen, wodurch der Bau von Niedrigenergie- und Passivhäusern ermöglicht wird. In den vergangenen Jahren wurden bei der Wärmeisolierung von Fensterscheiben bereits enorme Verbesserungen durch Beschichtungen mit niedriger Wärmeemission (low-E) und dem Einsatz von 3-fach-Verglasungen mit Xenon-Edelgasfüllung erzielt. Diese 3-fach-Verglasungen haben allerdings einige gravierende Nachteile: Sie sind mit rund 30 kg pro m² sehr schwer, und das Edelgas Xenon ist sehr teuer und nur begrenzt verfügbar. Aus diesem Grund wird am Fraunhofer IWM an alternativen Scheibenaufbauten geforscht, die ähnlich einer Thermoskanne ein Vakuum zwischen den Scheiben besitzen und damit sehr gute Wärmeisolationseigenschaften bei kompakter Bauform und geringem Gewicht aufweisen (Abbildung 1, links).

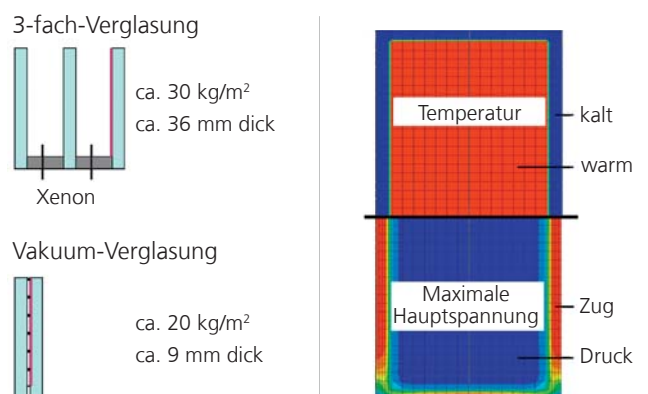
Vorgehensweise

Das Fraunhofer IWM arbeitet gemeinsam mit anderen Forschungsinstituten und Industriepartnern aus den Bereichen Maschinenbau und Glasverarbeitung an einem vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Forschungsprojekt zum Bau von Vakuumisolierverglasung und dessen Untersuchung und Bewertung auf Einsatztauglichkeit.

Ergebnisse

Im Projekt werden die Fertigungstechnologien für die Herstellung von Vakuumisolierverglasung vollständig neu entwickelt und das Vakuumisolierverglasung hinsichtlich seiner Funktion und Langzeitstabilität getestet und bewertet. Das Fraunhofer IWM entwickelt mit seinen besonderen Kenntnissen und Erfahrungen auf dem Gebiet der spröden und metallischen Werkstoffe und deren Verhalten unter thermischer und mechanischer Belastung intensiv einzelne Fertigungsschritte mit, bringt eigene Entwicklungen zum Fügen von Glas mit Metall ein und bewertet Funktionsmuster und Prototypen.

Tobias Rist



1 Links: Vergleich 3-fach-Verglasung mit Vakuumisolierverglasung. Rechts: Simulation zur Belastung einer Scheibe bei Sonnenwärme in frontaler Ansicht: Der Rahmen bedingt Temperatur- und Spannungsunterschiede. Die Simulation zeigt in der oberen Hälfte die Temperatur, in der unteren die Spannungsverteilung in Falschfarben (blau = niedrige, rot = höchste maximale Hauptspannung).

HANDHABUNG UND TRANSPORT HEISSER GLASKUGELN

Für Heißformgebung von asphärischen optischen Linsen aus Glas sind bisher Zykluszeiten von 10 Minuten und mehr erforderlich. Wegen der dadurch bedingten hohen Stückkosten werden für eine wirtschaftliche Serienproduktion künftig wesentlich schnellere Prozesse mit kurzen Zykluszeiten benötigt.

Ziel eines vom BMBF geförderten Verbundprojekts mit mehreren Industriepartnern ist daher die Entwicklung einer angepassten Verfahrens- und Anlagentechnik, mit der solche kurze Prozesszeiten in einem industriellen Fertigungsprozess realisiert werden können.

Vorgehensweise

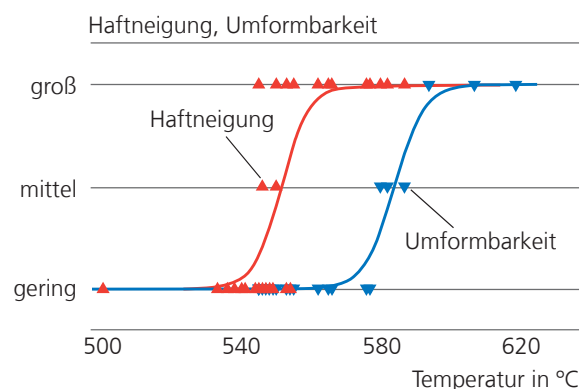
Zur Erreichung kurzer Prozesszeiten ist es erforderlich, die Zeitdauer für das Erhitzen und das Abkühlen der Linsen in der Pressform wesentlich zu verringern. Dies soll erreicht werden, indem die Glasrohlinge in einem externen Ofen erhitzt und im heißen Zustand in die Pressform eingebracht werden. Dort wird das Glas in einem nicht-isothermen Pressprozess schnell umgeformt.

Das externe Erhitzen und der Transport des heißen Glases stellen dabei hohe Anforderungen an die zu verwendenden Auflagematerialien. Für diese Anforderungen wurde das Kontakt- und Klebeverhalten verschiedener Materialien im Kontakt mit heißem Glas systematisch untersucht. Dazu wurden Glasrohlinge in einem Ofen aufgeheizt, in der Pressstation abgelegt und unter definierten Bedingungen verpresst. Bewertet wurden jeweils das Klebeverhalten an den Auflagematerialien sowie der erreichte Umformgrad.

Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die qualitativen Ergebnisse aus Untersuchungen mit Glaskugeln aus der Glasart F2 und Auflagematerial aus BN-Sinterkeramik. Mit Erhöhung der Temperatur beginnt dieses Glas bei etwa 540 °C am Auflagematerial anzuhaften, bevor eine vollständige Abformung erreicht wird. Materialien wie Glaskohlenstoff Bornitrid und Ti₂B-BN zeigten zudem einen erheblichen Partikelabrieb und verursachten Defekte der Glasoberfläche. Sehr gute Ergebnisse wurden mit edelmetallbasierten Beschichtungen auf metallischen Grundkörpern erzielt. Weitere Untersuchungen zielen auf die Optimierung der Greifergeometrie zur Vermeidung von Kontaktmarken im optischen Bereich des Glases.

Mario Hug



1 Haftneigung und Umformverhalten des Glases F2 im Kontakt mit Bornitrid-Greifermaterial (BN) bei unterschiedlichen Aufheiztemperaturen im Ofen.

Die Bewertung der Sicherheit und der Gebrauchseignung von Bauteilen mit hohen sicherheitstechnischen Anforderungen steht im Mittelpunkt unseres Aufgabenspektrums. Die Palette der Anwendungen reicht von Sicherheitsnachweisen von Kraftwerkkomponenten über Lebensdaueranalysen von thermomechanisch beanspruchten Bauteilen aus dem Kraftwerk- und Automobilbau, Nachweisen zur Fehlertoleranz geschweißter Komponenten aus dem Maschinenbau und der Raumfahrt bis zur Crashanalyse von Fahrzeugkomponenten. Schwerpunkte der Arbeiten sind dabei die Weiterentwicklung und Anwendung bruch- und schädigungsmechanischer Bewertungskonzepte unter Berücksichtigung der jeweiligen bauteilrelevanten Beanspruchungssituation und der Streuung der Werkstoffeigenschaften und Fehlergrößen. Zur detaillierten Beschreibung des Verformungs- und Versagensverhaltens von Bauteilen werden für die verschiedensten Anwendungen mechanismenbasierte Werkstoffmodelle entwickelt und eingesetzt. Solche Modelle erlauben die Lebensdauerbewertung von Bauteilen sowohl unter mechanischen als auch thermomechanischen Belastungen bis zu hohen Einsatztemperaturen und Temperaturwechselbeanspruchungen. Im Rahmen der Bewertung der Crashesicherheit von Automobilstrukturen stehen zunehmend der Einfluss des Herstellungsprozesses auf das Versagensverhalten sowie die experimentelle und rechnerische Beschreibung des Crashverhaltens von Verbindungen, wie Schweiß- oder Klebverbindungen von verschiedenen Werkstoffen oder komplexen Verbunden, im Vordergrund der Forschungsaufgaben.

Bemerkenswertes aus 2009

Trotz wirtschaftlich schwieriger Randbedingungen konnten die Aktivitäten im Geschäftsfeld im Jahr 2009 weiter ausgebaut werden. Schwerpunkte der Forschungsaufgaben waren dabei im Automobilbereich die Modellierung des Versagensverhal-

tens von Fahrzeugkomponenten unter Berücksichtigung des durch Umformen bedingten Herstellungsprozesses einschließlich der experimentellen Bestimmung der hierfür erforderlichen Werkstoffeigenschaften. Im Bereich fossiler Kraftwerke stehen die CO₂-Reduktion und die damit verbundene Erhöhung des Wirkungsgrads im Vordergrund. Hier müssen neue Werkstoffe für höhere Einsatztemperaturen qualifiziert und entsprechende Lebensdauermodelle weiterentwickelt werden. Im Bereich der Anlagensicherheit standen im Berichtsjahr die Entwicklung statistischer Versagenskonzepte unter Berücksichtigung des lokalen Beanspruchungszustands sowie die Weiterentwicklung des analytischen Fehlerbewertungsprogramms VERB im Vordergrund der Aktivitäten.

Leistungsbereich

Anlagensicherheit, Bruchmechanik

Mit experimentellen und rechnerischen Methoden insbesondere der Bruch- und Schädigungsmechanik wird das Werkstoff- und Bauteilverhalten analysiert und die Sicherheit und Verfügbarkeit von Komponenten bewertet.

Dr. Dieter Siegele
dieter.siegele@iwf.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Crashsicherheit, Schädigungsmechanik

Für die Crashsimulation werden Werkstoffmodelle entwickelt, implementiert und angewendet. Werkstoffcharakterisierung und Bauteilprüfung werden mit speziellen Versuchstechniken durchgeführt. Fügeverbindungen werden unter crashrelevanter Belastung charakterisiert und mit Ersatzmodellen simuliert.

Dr. Dong-Zhi Sun
dong-zhi.sun@iwf.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik

Mechanismenbasierte Werkstoffmodelle ermöglichen verlässliche Vorhersagen in Bauteilsimulationen. So können Entwicklungskosten und -zeit eingespart und gleichzeitig die Bauteilqualität erhöht werden.

Dr. Thomas Seifert
thomas.seifert@iwf.fraunhofer.de

*Dr. Dieter Siegele
Geschäftsfeldleiter*



VERSAGENSMODELLIERUNG FÜR DIE SIMULATION VOM UMFORMEN BIS ZUM CRASH

Die mechanischen Eigenschaften von Ausgangsblechen können nicht direkt für die Crashsimulation einer durch Tiefziehen hergestellten Automobilkomponente verwendet werden, da durch Tiefziehprozesse Vordehnungen und Vorschädigung in der Komponente verursacht werden. Die lokalen Fließspannungen und Bruchdehnungen in solchen Komponenten sind aufgrund unterschiedlicher Deformationsgrade nicht homogen. In welchem Maß wird das Crashverhalten der Komponente dadurch beeinflusst? In der Umformsimulation werden häufig Werkstoffmodelle mit kinematischer Verfestigung eingesetzt, während in der Crashsimulation nur Werkstoffmodelle mit isotroper Verfestigung betrachtet werden. Welche Werkstoffmodelle beziehungsweise Versagensmodelle sollten für eine durchgängige Simulation vom Tiefziehen bis Crash verwendet werden? Während beim Tiefziehen eine biaxiale Belastung vorliegt, ist beim Crash hauptsächlich eine einachsige Belastung vorhanden. Wie kann man den Einfluss der Belastungsgeschichte auf die Schädigungsentwicklung berücksichtigen?

Vorgehensweise

Einflüsse der Mehrachsigkeit und Belastungsgeschichte auf das Versagen eines TRIP-Stahls wurden mit speziellen Versuchen charakterisiert. Die Mehrachsigkeit wurde von Scherung über Scherzug und einachsigem Zug bis Biaxialzug variiert. Der Belastungspfad wurde zum Teil von Biaxialzug auf einachsigen Zug und Scherung geändert. Dafür wurden zunächst Marciniak-Proben unter Biaxialzug bis zu einer definierten Ziehtiefe belastet und entlastet. Aus den entlasteten Marciniak-Proben wurden Zug- und Scherzugproben entnommen und bis zum Versagen geprüft. Zur Untersuchung

der kinematischen Verfestigung wurden Zug-Druck-Versuche durchgeführt. Ein Versagensmodell zur Beschreibung des Scher- und Wabenbruchs wurde entwickelt und für Umform- und Crashsimulationen verwendet. Zur Validierung wurden Komponentenversuche unter Biegung mit überlagertem Zug durchgeführt und simuliert.

Ergebnisse

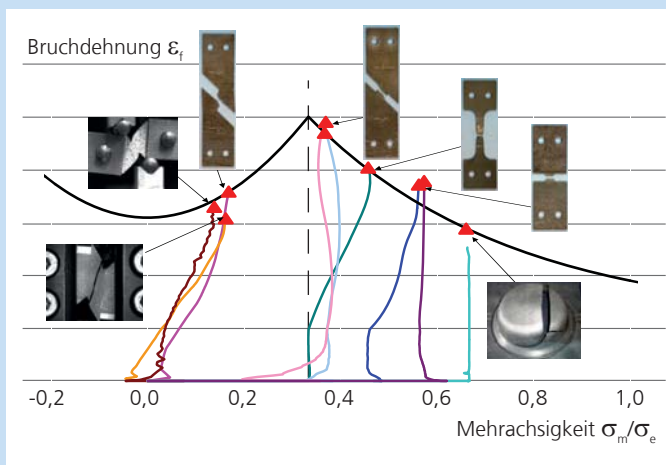
Die Abhängigkeit der Bruchdehnung ϵ_f von der Mehrachsigkeit σ_m/σ_e wurde durch Simulation der unterschiedlichen Probenversuche und Auswertung der lokalen Vergleichsdehnung und Mehrachsigkeit bei der gemessenen Bruchverschiebung ermittelt (Abbildung 1). Die Bruchdehnung unter Scherung ($\sigma_m/\sigma_e = 0$) ist deutlich niedriger als die unter einachsigem Zug ($\sigma_m/\sigma_e = 1/3$). Das im Fraunhofer IWM neu implementierte phänomenologische Versagensmodell kann diesen Effekt und den Einfluss der Belastungsgeschichte auf das Versagen beschreiben.

Die aus der Umformsimulation berechnete Vordehnung und die Vorschädigung wurden auf das Crashmodell mit einem Mapping-Verfahren übertragen. Das Versagensverhalten der Komponente wurde von der durchgängigen Simulation gut wiedergegeben (Abbildung 2). Ohne Berücksichtigung der Vorgeschichte wurde die Kraft bei der Faltenbildung um 20 Prozent unterschätzt. Für den untersuchten Werkstoff ist das Werkstoffmodell mit isotroper Verfestigung für die durchgängige Simulation besser geeignet als das Modell mit kinematischer Verfestigung.

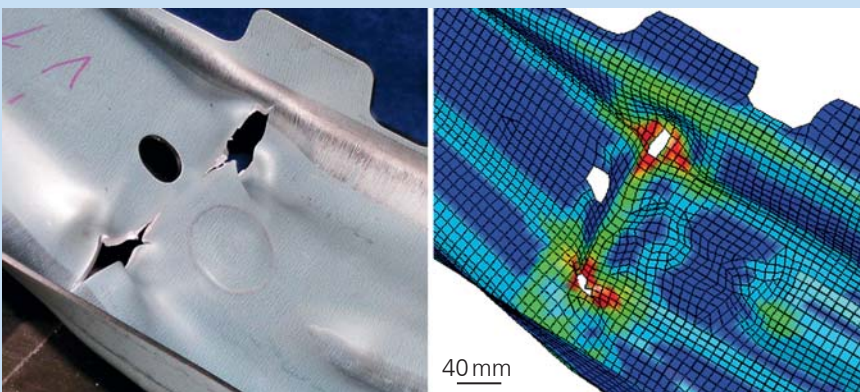
Dong-Zhi Sun



Crashsimulation, Abbildung mit freundlicher Genehmigung der Daimler AG.



1 Bruchdehnung eines TRIP-Stahls als Funktion der Mehrachsigkeit mit Belastungspfaden für unterschiedliche Proben.



2 Links: Schädigung in einer Komponente aus einem TRIP-Stahl nach Komponententest. Rechts: Berechnete Schädigung in einer Crashsimulation.

NEUE PROBABILISTISCHE MODELLE ZUR SPRÖDBRUCHBEWERTUNG

Das spröde Versagen duktiler ferritischer Stähle ist ein probabilistischer Prozess, der seinen Ausgang an stochastisch im Material verteilten spröden Ausscheidungen und Einschlüssen nimmt. Dies führt zu einer starken Streuung gemessener Bruchzähigkeiten und zu einer oft eingeschränkten Übertragbarkeit dieser Werte zwischen verschiedenen Probengeometrien sowie Laborproben und Bauteilen.

Als Alternative wurde ein erweitertes lokales Sprödbrechmodell entwickelt, welches eine Bewertung direkt auf der Basis der lokalen mechanischen Felder in der Spaltbruchprozesszone ermöglicht.

Vorgehensweise

Zur Formulierung des neuen Modells wurden zunächst die Bedingungen für die Spaltbruchauslösung in bruchmechanischen Versuchen an Standardproben verschiedener äußerer Geometrie und unterschiedlicher Risttiefe untersucht. Neben den Standardproben wurden dabei auch neu entwickelte kleinformatige Kreuzbiegeproben geprüft (Abbildung 1), um den Einfluss mehraxialer äußerer Belastungszustände besser berücksichtigen zu können. Durch numerische Simulation wurde die lokale Belastungsgeschichte am fraktografisch ermittelten Ursprungsort des Spaltbruchs bestimmt.

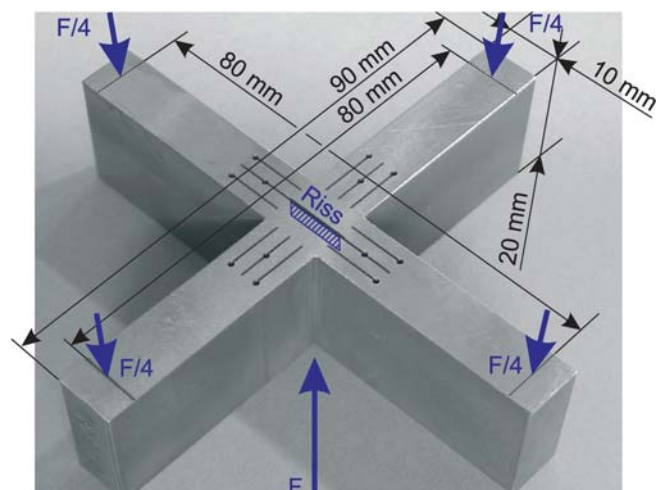
Ergebnisse

Eine wesentliche Einflussgröße – neben der größten Hauptspannung als risstreibende Größe – ist ein kombinierter Parameter aus plastischer Deformation und Spannungsmehrachsigkeit. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein verbessertes lokales Spaltbruchmodell abgeleitet. Zur Validie-

rung wurde das erweiterte lokale Spaltbruchmodell auf die vorliegende experimentelle Datenbasis angewendet. Für alle Probentypen ergeben sich gute Übereinstimmungen zwischen experimentellen Ergebnissen und numerischer Vorhersage.

Die Anwendbarkeit des erweiterten lokalen Spaltbruchmodells auf anwendungsrelevante Fragestellungen wurde durch Simulation von Bauteilexperimenten und in Fallstudien unter Betrachtung einer anlagentechnischen Großkomponente unter Thermoschockbelastung nachgewiesen. Neben zuverlässigen Bruchaussagen auch unter praxisrelevanten Belastungen kann gegenüber der bisherigen Bewertungspraxis die Belastungsgeschichte in verbesserter Form berücksichtigt werden.

Jörg Hohe, Volker Hardenacke



1 Kleinformatige CR(B) 10x20-Kreuzbiegeprobe.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

LEBENSDAUERKONZEPTE, THERMOMECHANIK

Dr. Thomas Seifert

thomas.seifert@iwf.fraunhofer.de

CO₂-ARME KRAFTWERKE: EINE WERKSTOFF-TECHNISCHE HERAUSFORDERUNG

Die Kohlekraftwerke der Zukunft sollen effizienter sein und weniger Kohlendioxid emittieren. Um dies zu erreichen, müssen Dampftemperatur und Dampfdruck deutlich erhöht werden. Die dadurch entstehenden extremen Werkstoffanforderungen machen den Einsatz von hochfesten Nickellegierungen erforderlich. Zudem sind die Werkstoffe durch An- und Abfahrvorgänge belastet, die durch die schwankende Leistung der erneuerbaren Energieträger ausgeglichen werden müssen. In einem mehrjährigen Kooperationsprojekt zwischen RWE Power und ThyssenKrupp VDM mit dem Fraunhofer IWM sollen hochwertige Werkstoffe für neue Kraftwerke erforscht und Simulationsmethoden entwickelt werden, mit denen das Verhalten kritischer Kraftwerkskomponenten vorausgesagt werden kann.

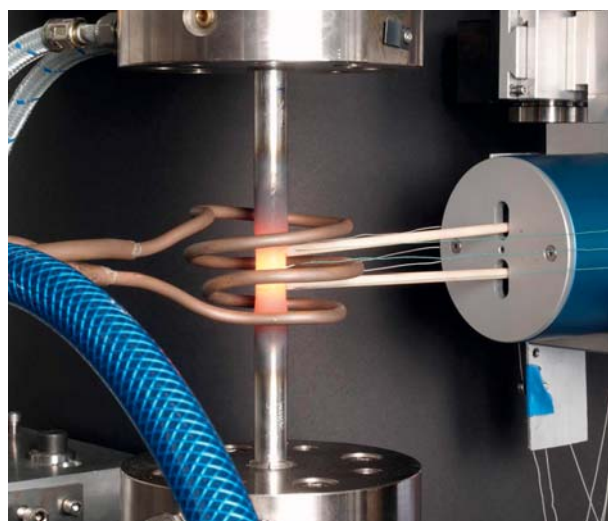
Vorgehensweise

Am Fraunhofer IWM wurden bereits für die Automobilindustrie Simulationsmethoden für hoch belastete Motor­komponenten entwickelt. Diese Methoden werden entsprechend den speziellen Anforderungen kritischer Kraftwerkskomponenten weiterentwickelt. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Veränderung der Mikrostruktur des Werkstoffs durch Betriebsbelastung und die sich damit verändernden Werkstoffeigenschaften und Schädigungsmechanismen. Hierzu werden mechanische Versuche bei konstanten und variablen Temperaturen durchgeführt (Abbildung 1). Zudem wird die sich durch die Belastung verändernde Mikrostruktur des Werkstoffs untersucht. Aus den Erkenntnissen werden mechanismenbasierte Werkstoffmodelle abgeleitet und in die Simulationsmethoden integriert.

Ergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen zeigen: Das Verformungsverhalten im Betrieb hängt stark von der vorgelagerten Wärmebehandlung ab. Im lösungsgeglühten Werkstoff treten temperaturabhängige Veränderungen der Mikrostruktur im Versuch auf, die eine starke Verfestigung und ein verändertes Bruchverhalten zur Folge haben. Eine zusätzliche Wärmebehandlung dagegen führt zu einer annähernd stabilen Mikrostruktur des Werkstoffs. Die Versuchsergebnisse helfen bei der Werkstoffauswahl und Wahl der Wärmebehandlung und werden zukünftig für die Entwicklung verbesserter Simulationsmethoden verwendet.

Gerhard Maier



1 Versuchsaufbau zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens einer Nickellegierung bei hohen Temperaturen.

Wir unterstützen unsere Auftraggeber bei der Auswahl und Substitution von Werkstoffen, bei der Bewertung und Optimierung von Fertigungsschritten und bei der Charakterisierung des Festigkeits- und Einsatzverhaltens von Werkstoffen, Werkstoffverbunden und Bauteilen. Die Simulation und experimentelle Aufklärung der Mikrostruktur von Werkstoffen, deren Veränderung durch beispielsweise formgebende Verfahren oder thermisches Fügen oder durch die Betriebsbeanspruchungen stehen im Fokus der Arbeiten. Es werden Lösungsvorschläge zum Design, zur Beeinflussung des Eigenspannungszustandes und zur Optimierung der Herstellungs- und Beanspruchungsbedingungen erarbeitet.

Die schädigungsfreie Formgebung und Umformung schwer verformbarer Metalle profitiert von der mikrostrukturbasierten Simulation der Gefüge- und Schädigungsentwicklung bei diesen Prozessen. Für die Bewertung von Schadensfällen steht auch ein öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger zur Verfügung.

Bemerkenswertes aus 2009

Angetrieben durch die steigende Ressourcenknappheit, die CO₂-Problematik und den Zwang zu Energieeinsparungen gewinnt die Analyse und Modellierung des Verformungs- und Versagensverhaltens von (Faser-)Verbundwerkstoffen und hybriden Leichtbau-Komponenten zunehmend an Bedeutung. Hier profitieren wir von den langjährigen Erfahrungen bei der Entwicklung von werkstoffgerechten und einsatzrelevanten Prüfmethoden. Unsere langjährige Erfahrung beim Einsatz bruchmechanischer Methoden, zum Beispiel zur Aufstellung von Inspektionsintervallen, konnten wir in Bezug auf Eisenbahn-Radsatzwellen nutzbringend einsetzen.

Unter unserer Federführung wurde unter anderem ein Strategiepapier zur Überführung fortschrittlicher Konzepte in eine an-

erkannte Regel der Technik erstellt. Zukünftige Konzepte der Energieversorgung auf Basis von Wasserstoff sind Anlass für den Ausbau der Kompetenzen zur Analyse, Bewertung und Vermeidung der Degradation von Werkstoffen durch Effekte wie Wasserstoffversprödung und Spannungsrisskorrosion.

Leistungsbereich

Mikrostruktur- und Schadensanalyse

Wir betreiben als neutraler und kompetenter Partner mit unserem akkreditierten Laborbereich ganzheitliche Ursachenforschung über alle relevanten Fertigungsstufen. Zudem konzipieren wir gemeinsam mit den Auftraggebern Maßnahmen zur Fertigungsoptimierung und nachhaltigen Schadensvermeidung. Unsere Schwerpunkte sind hierbei die Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen.

Dr. Wulf Pfeiffer

wulf.pfeiffer@iw.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Ermüdungsverhalten, Eigenspannungen

Der Leistungsbereich entwickelt experimentelle und numerische Methoden zur Festigkeitsbewertung hochbelasteter Werkstoffe, Bauteile und Fügeverbindungen und Verfahren zur Beeinflussung des Eigenspannungszustandes.

Dr. Michael Luke

michael.luke@iw.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Verbundwerkstoffe

Wir untersuchen Struktur-Eigenschaftsbeziehungen von Verbundwerkstoffen mit Polymer-, Keramik- und Metall-Matrix, um ihr Einsatz- und Versagensverhalten zu bewerten. Unsere werkstoffgerechten Prüfkonzepte sowie die neu entwickelten Werkstoff- und Schädigungsmodelle berücksichtigen die Materialstruktur und die realen Beanspruchungsbedingungen.

Dr. Bärbel Thielicke

baerbel.thielicke@iwf.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Formgebungs- und Umformprozesse

Umformwerkzeuge und -prozesse können mit Hilfe der numerischen Simulation wesentlich schneller und kostengünstiger ausgelegt werden als durch Versuch und Irrtum. Dafür werden Modelle zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens entwickelt und auf industrielle Prozesse angewandt.

Dr. Dirk Helm

dirk.helm@iwf.fraunhofer.de

Dr. Wulf Pfeiffer
Geschäftsfeldleiter



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

ERMÜDUNGSVERHALTEN, EIGENSPANNUNGEN

Dr. Michael Luke

michael.luke@iwm.fraunhofer.de

BEWERTUNG VON KUNSTSTOFF-METALL-HYBRIDVERBUNDEN

Ein übergeordnetes Ziel der Entwicklungen in der Automobilindustrie ist die Senkung der CO₂-Emissionen. Die notwendige Gewichtsreduzierung kann unter anderem durch hybriden Leichtbau, beispielsweise der Integration langfaserverstärkter Verbundwerkstoffe in tragende Strukturen, erreicht werden.

Es gilt daher Methoden zu entwickeln, mit denen Strukturen aus hybriden Verbunden bewertet werden können, zum Beispiel langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) oder Sheet Moulding Compounds (SMC) mit lokalen metallischen Einlegern. Diese Arbeiten stellen einen wesentlichen Bestandteil des Karlsruher Innovationsclusters Fahrzeugleichtbau (KITE hyLITE) dar, an dem außer dem Fraunhofer IWM auch das Fraunhofer ICT, das Fraunhofer LBF und Institute der Universität Karlsruhe beteiligt sind.

Vorgehensweise

Für die Bewertung der hybriden Verbindungen müssen sowohl der faserverstärkte Kunststoff und die Grenzfläche zwischen den beiden Materialien (Metall und Kunststoff) als auch der Gesamtverbund analysiert werden.

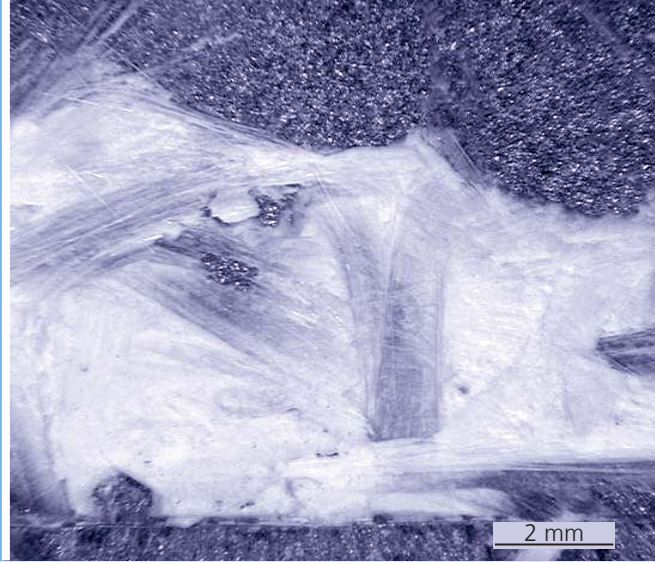
Aufbauend auf den experimentellen Ergebnissen wird dazu ein unter anderem auf bruchmechanischen Methoden (zum Beispiel der Energiefreisetzungsrate) basierendes numerisches Modell erstellt. Damit werden sowohl das Versagens- und Verformungsverhalten der Grundmaterialien (Kunststoff und Metall) als auch die Festigkeiten der Grenzfläche unter statischer, zyklischer und thermischer Belastung beschreibbar.

Ergebnisse

In Abbildung 1 (links) sind zwei unterschiedliche Auszugproben zu sehen, eine mit einer rein auf Adhäsion beruhenden Verbindung, die zweite mit einer Formschlussverbindung. Mit diesen Proben konnte unter anderem der Einfluss verschiedener Oberflächenvorbehandlungen des Metalleinlegers untersucht werden. Außerdem wurden aus den durchgeführten Untersuchungen Erkenntnisse zum Verformungs- und Versagensverhalten der Hybrid-Verbunde aus PP GF30, PA6.6 GF und SMC mit einem Karosseriestahl gewonnen. In Abbildung 1 (rechts) ist das Versagensverhalten einer Verbindung mit Formschluss (über Bohrung im Stahleinleger mit einem Durchmesser von 6 mm) im Vergleich zu einer Verbindung ohne Formschluss dargestellt. Durch den Formschluss kann vor allem bei den thermoplastischen Materialien PP GF30 und PA6.6 GF die Versagenskraft deutlich gesteigert werden. Weitere Untersuchungen zu verschiedenen Formschlussvarianten sind geplant.

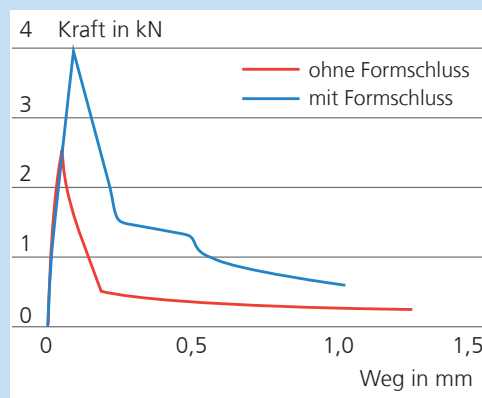
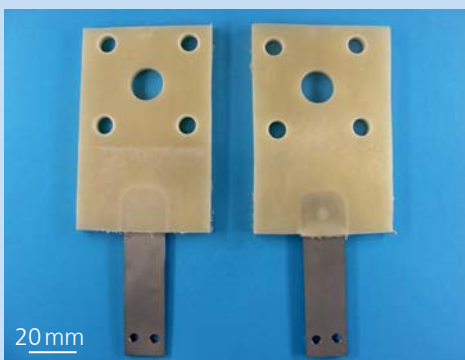
Aufbauend auf den experimentellen Befunden wurde ein numerisches Modell des Auszugversuchs aufgebaut und die Grenzflächen wurden mit Kohäsivzonenkontakten modelliert. Abbildung 2 zeigt das mit einem optischen Verfahren ermittelte Dehnungsfeld im Vergleich zu dem aus der numerischen Simulation berechneten. Das dabei genutzte optische Messsystem ARAMIS® basiert auf Grauwertkorrelationen. Der Vergleich der Dehnungsfelder wird zur Weiterentwicklung und Validierung des Simulationsmodells genutzt.

Hanna Eisler



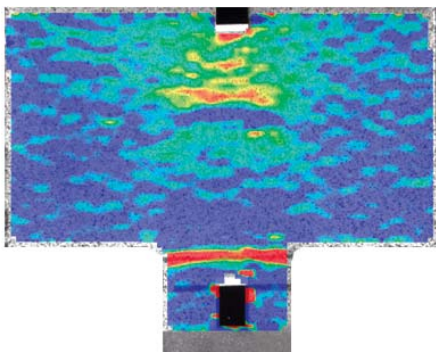
Mikroskopaufnahme der Grenzfläche eines Kunststoff-Metall-Hybridverbunds.

Hybridverbund ohne Formschluss Hybridverbund mit Formschluss

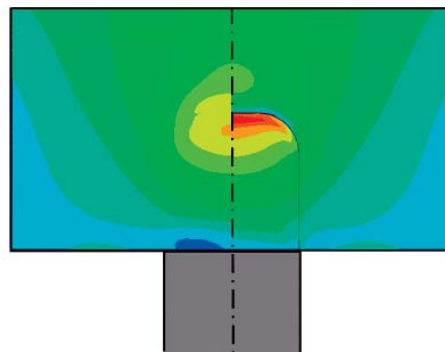


1 Links: Auszugprobe, Kunststoff: PP GF30, Stahleinleger: HC 420LA. Rechts: Versagensverhalten einer Verbindung (PP GF30 mit Stahl) mit Formschluss über Bohrung im Stahleinleger im Vergleich zu einer Verbindung ohne Formschluss.

Oberfläche



Oberfläche Mittelebene



2 Hybridverbund ohne Formschluss. Links: Im Versuch mit dem optischen Auswerteverfahren ARAMIS® ermittelte Dehnungsfelder an der Probenoberfläche. Rechts: Numerisch ermittelte Dehnungsfelder an der Oberfläche und in der Mittelebene. Die maximale Dehnung an der Oberfläche $E_{max} = 0,4 \%$ stimmt bei Versuch und Simulation überein.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

VERBUNDWERKSTOFFE

Dr. Bärbel Thielicke

baerbel.thielicke@iwf.fraunhofer.de

BIAXIALE BEANSPRUCHUNG VON GFK-ROHREN

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sollen zur Gewichts- und Kosteneinsparung für wabenförmige Erdgastanks in Fahrzeugen eingesetzt werden. Das innovative Konzept der Wabentanks (Abbildung 1, links) wurde von den Projektpartnern im Rahmen des Leitprojekts »Lasttragende Leichtbauteile – Gas-Tank« entwickelt, welches vom Land Baden-Württemberg unter Federführung des Stuttgarter DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte gefördert wurde.

Der wesentliche Vorteil dieser Tanks besteht darin, dass einzelne, aus Röhren bestehende Segmente in vorhandenen Hohlräumen im Automobil platzsparender untergebracht werden können, als es mit den bisherigen Bauformen möglich ist. Die Fertigung soll mit großserientauglichen Spritzgussverfahren erfolgen. Für die Werkstoffauswahl sowie die Auslegung der Tanks werden mechanische Kenndaten benötigt, welche unter anwendungsnahen biaxialen Beanspruchungen (Innendruck- und Zugbelastung) ermittelt werden.

Prüfkörper und Versuchsdurchführung

Das Prüfkonzept sieht in Anlehnung an die Wabentankstruktur die Untersuchung von Rohrproben vor, bei denen sich fertigungsbedingt eine vergleichbare Vorzugsorientierung der Fasern wie im Bauteil einstellt (Abbildung 1, rechts). Für diese Tests wurde am Fraunhofer IWM eine neuartige Einspannvorrichtung konstruiert, gefertigt und erprobt. Sie ermöglicht reine axiale, reine Innendruck- oder biaxiale Belastungen der Rohrproben bis zum Versagen (Abbildung 2, links).

Die Vorauswahl der Materialien erfolgte anhand von Zugversuchen. Die aufwändigeren Versuche mit Innendruckbelastungen

wurden nur an Materialien durchgeführt, die sich im Spritzguss gut verarbeiten ließen und ausreichend hohe axiale Zugfestigkeiten aufwiesen.

Bei den biaxialen Belastungen wurde zuerst nur eine der Beanspruchungsgrößen aufgebracht und auf einem Niveau deutlich unterhalb der Versagensspannung konstant gehalten. Währenddessen wurde die zweite Spannungskomponente überlagert und so lange erhöht, bis die Rohre versagten. Aus den Abmessungen der Rohre im Prüfquerschnitt und den Bruchlasten beziehungsweise Berstdrücken wurden jeweils die axialen und tangentialen Versagensspannungen berechnet und in ein Versagensdiagramm eingetragen. Die axialen Spannungen charakterisieren die Belastbarkeit der GFK in Faserrichtung, die tangentialen Spannungen charakterisieren sie quer zu den Fasern.

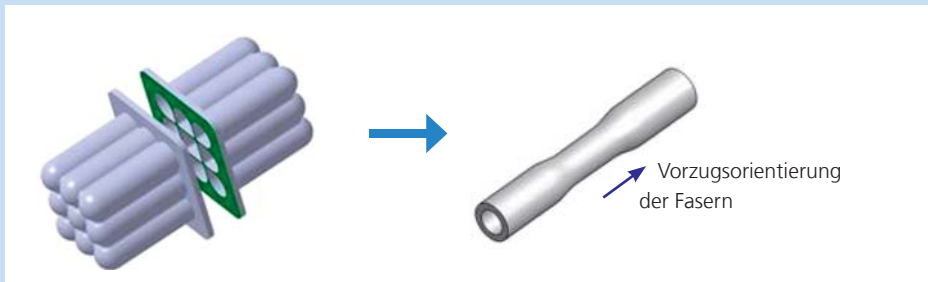
Ergebnisse

Bei den Untersuchungen von mehreren Faserverbundmaterialien aus verschiedenen Thermoplasten mit Glas- oder Kohlenstofffaserverstärkungen in unterschiedlichen Gewichtsanteilen erwiesen sich unter anderem die Materialien mit der Bezeichnung IXEF 1002 und 1022 (30 Prozent beziehungsweise 50 Prozent Glasfasern in Polyarylamid) als aussichtsreich. Die für diese beiden Materialien ermittelten Ergebnisse werden beispielhaft in Abbildung 2, rechts, dargestellt. Sie zeigen eine Anisotropie der Rohre, welche sich typischerweise beim Spritzguss einstellt und aus der Vorzugsorientierung der Fasern resultiert.

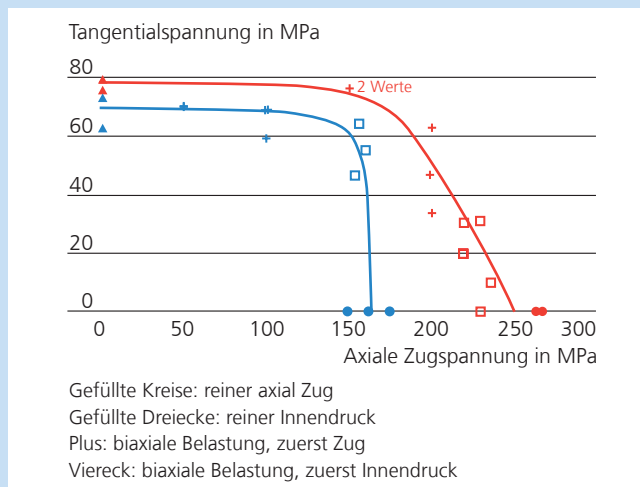
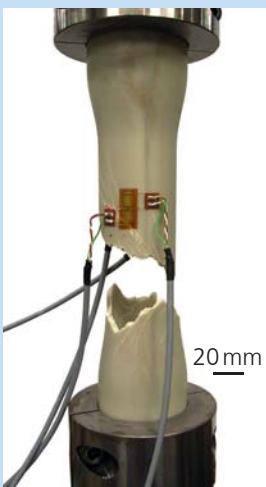
Dr. Bärbel Thielicke



GFK-Rohrprobe nach Berstversuch.



1 Links: Prinzip des Wabentanks für Erdgas (DLR Stuttgart). Rechts: bauteilnahe Rohrprobe.



2 Links: GFK-Rohrprobe in der Einspannvorrichtung hier nach Zugversagen. Rechts: Versagenskurven für GFK-Rohrproben mit 30 % (IXEF 1002, blau) und 50 % Glasfasern (IXEF 1022, rot).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

MIKROSTRUKTUR- UND SCHADENSANALYSE

Dr. Wulf Pfeiffer

wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de

SCHÄDEN IN WINDENERGIEANLAGEN

Bauteile in Windenergieanlagen (WEA) sind in vielfältiger Hinsicht hoch belastet. Bekannt sind hauptsächlich Zahnradschäden, die immer wieder in Getrieben von Windenergieanlagen auftreten. Allen Schäden in WEA ist gemein, dass sie hohe Folgekosten verursachen, die durch Ausfall- und Instandsetzungskosten (besonders durch Kran- sowie Helikoptereinsatz) bedingt sind.

Vorgehensweise

In der Fachgruppe »Schadensanalyse« des Fraunhofer IWM wurden bisher neben den bekannten Zahnradschäden vorwiegend Schäden an Blattlagern, die das Einstellen der Steigung der Rotorblätter erlauben, untersucht. In der Regel handelt es sich dabei um vorgespannte ein- oder zweireihige Kugellager in schlanker Bauform. Während des Betriebs bewegen sie sich nur wenig und müssen fast ausschließlich wechselnde statische Lasten aufnehmen. Diese Beanspruchung ist deshalb so kritisch, weil über längere Zeiträume ein und dieselben Stellen der Kugeln und Laufbahnen durch Hertzsche Pressung beansprucht werden.

Ergebnisse

Die am Fraunhofer IWM durchgeführten Untersuchungen belegen, dass vorgefundene Schäden eindeutig mit dieser Beanspruchungsart zusammenhängen. Teils wurden Eindrücke in die Laufbahnen festgestellt, teils haben einzelne Kugeln durch Überbeanspruchung und letztlich Bruch versagt. Beide Schadensformen konnten in fast allen Fällen auf Fehler in der Wärmebehandlung der Laufbahnen beziehungsweise der Kugeln zurückgeführt werden. Dies konnte unter anderem auch durch hohe Restaustenitgehalte belegt werden.

Ebenso ist es möglich, dass Fremdkörper (wie Teile elektronischer Geräte) durch Unachtsamkeit bei Montage- oder Wartungsarbeiten in die Lager gelangen und dort zu Beschädigungen führen. Ein Nachweis solcher Ereignisse ist dann anhand der in den Laufbahnen vorgefundenen Rückstände möglich. Weitere Probleme sind aber auch unzureichende Planung und Spezifikationen von Blattlagern bezüglich ihrer Abdichtung. Dies hat in einigen Fällen zum Eindringen von Kondenswasser in das Lagerinnere geführt, wodurch Schmierfett ausgewaschen wurde und die Laufbahnen und Kugeln korrodieren konnten.

Rolf Zeller



1 Die Blattlager von Windenergieanlagen müssen fast ausschließlich wechselnde statische Lasten aufnehmen. Ihre Kugeln und Laufbahnen werden dadurch stets an den gleichen Stellen belastet.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

FORMGEBUNGS- UND UMFORMPROZESSE

Dr. Dirk Helm

dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

BEHERRSCHUNG DER UMFORMGRENZEN IN MASSIVUMFORMPROZESSEN

Bei der Massivumformung metallischer Werkstoffe besteht die Gefahr, dass die Grenzen der Umformbarkeit überschritten werden. Neben den Verfahren Walzen, Strangpressen, Fließpressen und anderen ist das Voll-Vorwärtsfließpressen ein typischer Massivumformprozess. Hier treten bei ungünstiger Prozessführung massive Schäden im Werkstück auf. In Abbildung 1 (oben) sind derartige Schäden, die als »Chevron Cracks« bekannt sind, skizziert (Soyarslan et al., ZAMM, 2008).

Die Schädigungsentwicklung kann jedoch signifikant durch die Gestaltung des Umformprozesses beeinflusst werden. Darum stellt sich die Frage, welche Modifikationen an der Prozessführung erforderlich sind, um Gutteile herstellen zu können. Ziel ist es, für einen gegebenen Kaltfließprozess geeignete Parameter beziehungsweise eine optimierte Werkzeuggeometrie zu identifizieren, um »Chevron Cracks« zu vermeiden.

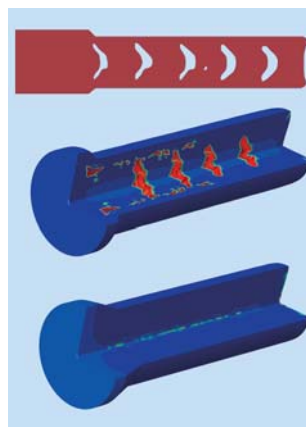
Vorgehensweise

Aufgrund der Ausgangssituation bietet es sich an, numerische Simulationsmethoden anzuwenden. Hierbei sind mechanis-menbasierte Materialmodelle für die Analyse und Optimierung von Umformprozessen prädestiniert. Sie modellieren die physikalische Ursache der duktilen Schädigung infolge von Bildung, Wachstum und Zusammenschluss von Poren auf der Basis der Mikromechanik. Infolgedessen wird das Problem der »Chevron Cracks« mit Hilfe eines am Fraunhofer IWM weiterentwickelten Modells nach Gologanu-Leblond behandelt. Dieses berücksichtigt den Einfluss komplexer Deformationspfade auf die Porenentwicklung und die Porenform.

Ergebnisse

Nach Anpassung der Modellparameter wird der Ausgangszustand des zu optimierenden Umformprozesses zutreffend beschrieben. Die berechnete Periodizität und die Form der »Chevron Cracks« stimmen mit den Versuchsergebnissen überein (Abbildung 1, Mitte). Ferner ist aus der Praxis bekannt, dass mit Bildung der »Chevron Cracks« eine Oberflächenwelligkeit und ein Kraftabfall beim Pressen auftreten. Oberflächenwelligkeit und Kraftabfall werden ebenfalls von dem Modell wiedergegeben. Es stellt sich nun die Frage, welche Änderungen am Prozess möglich und sinnvoll sind, um die Schädigung zu unterbinden. Simulationsstudien zeigen (Abbildung 1, unten), dass durch eine Änderung der Werkzeuggeometrie bei gleichbleibendem Verjüngungsgrad die »Chevron Cracks« effektiv vermieden werden, da in diesem Fall die Porendichte nur geringfügig ansteigt.

Dirk Helm



1 Vergleich zwischen Experiment (Skizze, Bild oben) und Simulation der Massivumformung: Porenverteilung (rot: hohe Porendichte, blau: niedrige Porendichte) im Ausgangszustand (Mitte) und bei optimierter Werkzeuggeometrie (unten).

Polymere substituieren in immer mehr Bereichen konventionelle Materialsysteme und führen durch Kombination mit konventionellen Materialklassen zu höherwertigen Hybrid-systemen. Wir bieten die komplette Entwicklungskette vom Materialdesign bis zum geprüften prototypischen Bauteil. Dies erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum in Schkopau, welches eine Verknüpfung von Polymersynthese und -verarbeitung ermöglicht (siehe Seite 78). Dabei spielt die Vorhersage der Materialeigenschaften und damit der Prototypenersatz eine immer größere Rolle bei kürzer werdenden Entwicklungszeiten. Materialkompetenzen liegen im Bereich thermoplastischer Polymere und Polymercompounds und den polymerbasierten Hochleistungsverbundmaterialien.

Schwerpunkte der Forschung und Entwicklungsleistungen liegen im funktionsintegrierten Leichtbau mit sowohl polymerbasierten Verbundwerkstoffen, CFK-Schaum-Sandwiches als auch Polymerschaumsystemen und der Reduktion des Anteils erdölbasierter Polymere im Bauteil durch naturbasierte Zusatzstoffe wie bei Holz-Polymer-Werkstoffen.

Bemerkenswertes aus 2009

2009 wurden die Kompetenzen im Bereich der polymerbasierten Schäume mit thermo- und duroplastischer Matrices erweitert. Dies betrifft sowohl die Herstellung von Schäumen mittels physikalischer Aufschäumtechniken als auch die Bewertung mittels Röntgen-CT. Die Kompetenzen optimierter Prüf- und Berechnungskonzepte für CFK-Strukturen für hoch beanspruchte Strukturelemente konnte 2009 auch um die 3-D-Röntgen-CT erweitert werden. Durch den Kooperationsvertrag mit der Hochschule für Kunst und Design, Burg Giebichenstein, wurde das Angebot im Bereich der Auslegung von Bauteilen um Aspekte des Industriedesigns ergänzt. Im Bereich der Verarbeitung können wir seit Kurzem unseren Kunden die reaktive Polyurethan-Technologie anbieten.

Leistungsbereich

Polymercompounds

Die systematische Untersuchung des Einflusses von Verarbeitung und Materialmodifikation auf die mechanischen und funktionellen Eigenschaften ermöglicht die optimale Herstellung neuartiger Polymercompounds.

Andreas Krombholz
andreas.krombholz@iwmh.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Polymerbasierte Hochleistungsverbundwerkstoffe

Zur Bewertung des Einsatzverhaltens von Faserverbundwerkstoffen werden Struktur-Eigenschaftsbeziehungen untersucht. Im Fokus steht dabei die Bewertung der Schadenstoleranz unter Einsatzbedingungen.

Dr. Ralf Schäuble
ralf.schaeuble@iwmh.fraunhofer.de

*Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn
Geschäftsfeldleiter*



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

POLYMERCOMPOUNDS

Andreas Krombholz
andreas.krombholz@iwmm.fraunhofer.de

THERMOPLASTISCHE ELASTOMERE AUF BASIS VON RECYCLINGMATERIALIEN

Thermoplastische Elastomere (TPE) sind Produkte, die sich durch eine Zweiphasenstruktur auszeichnen. Eine Phase besteht aus der thermoplastischen Matrix, in die eine zweite gummielastische Phase eingebettet ist. Damit ist es möglich, Eigenschaften von Thermoplasten – beispielsweise die einfache Verarbeitung aus der Schmelze mittels Extrusion oder Spritzguss – mit denen von hochdehnbaren Elastomeren zu verbinden.

Im Rahmen einer langjährigen Zusammenarbeit mit der Deutsche Gumtec AG wird der Einsatz von Gummimehlen aus sortenreinen Recyclingmaterialien als Elastomerphase in TPE untersucht. Dabei kommen Materialkombinationen mit Fluorpolymer beziehungsweise Fluorkautschuk (FKM) zum Einsatz. Ausschussteile aus diesem hochwertigen Elastomer müssen zurzeit noch mit hohen Kosten entsorgt werden und stehen für den Rohstoffkreislauf nicht zur Verfügung.

Potenzielles Einsatzgebiet für die zu entwickelnden Materialien ist die Automobilindustrie. Dieses Anwendungsgebiet legt die werkstoffmechanische Messlatte für das Verbundmaterial sehr hoch. So muss das Produkt kraftstoffbeständig sein und Temperaturen über 180 °C im Einsatz ertragen.

Vorgehensweise

Die Herstellung der Gummimehle für die Elastomerphase erfolgte nach einem speziellen Mahlverfahren aus den zu verwertenden Restmaterialien. Diese werden chemisch modifiziert und zusammen mit einem Haftvermittler auf Fluorpolymerbasis im kleintechnischen Maßstab am Fraunhofer IWM zu Polymerblends verarbeitet.

Im Rahmen der Rezepturenentwicklung sowie Optimierung der Verarbeitungsparameter werden die erhaltenen Verbunde auf ihre mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie Kraftstoffbeständigkeit untersucht.

Ergebnisse

Auf Basis der ausgewählten Materialsysteme konnten thermoplastische Elastomere mit einem Anteil von 50 Prozent recyklierter Werkstoffe hergestellt werden. Unter optimierten Verfahrensbedingungen konnte eine sehr gute Verteilung des FKM-Pulvers in der Fluorpolymermatrix sowie eine gute Benetzung der stark »zerklüfteten« Gummipartikel erzielt werden (Abbildung 1). Die Ausprüfung der Blendproben erfolgte im Vergleich zur Referenz, die aus einer Standardmischung FKM-Kautschuk mit 50 Prozent FKM-Pulver bestand.

Aussagekräftige Kennwerte der beiden Materialgruppen sind Abbildung 2 zu entnehmen. Hier werden die jeweiligen Ausgangswerte »Zugfestigkeit« und »Reißdehnung«

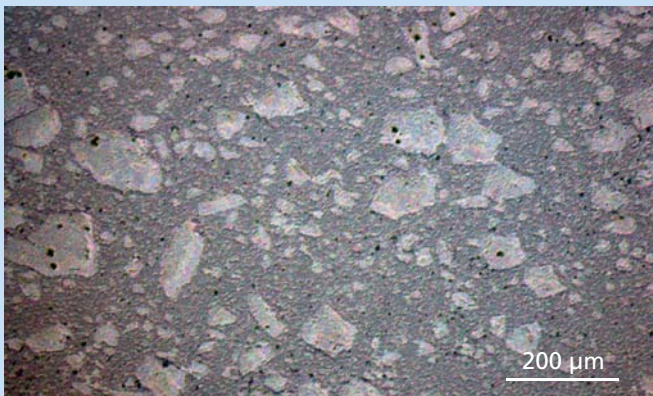
- a) unter Normalbedingungen (Abbildung 2, Säule 1 und 5),
- b) nach 48 Stunden Lagerung in Diesel und Biodiesel mit Rücktrocknung und 22 Stunden bei 80 °C (Säule 2 und 6 sowie 3 und 7)
- c) sowie nach Wärmealterung 48 Stunden bei 220 °C (Säule 4 und 8)

gegenübergestellt. Die Kennwerte des Referenzsystems werden mit dem TPE-Recyclingsystem erreicht.

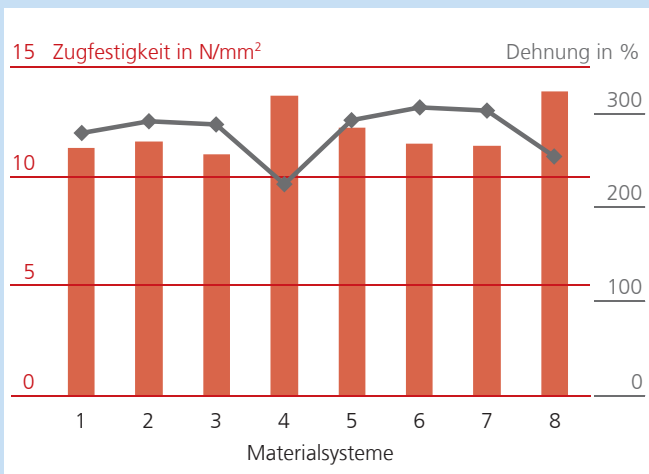
Rainer Starke



Links: Ergebnis des Spiraltests eines Elastomers.
Rechts: Granulat von Haftvermittler.



1 Verteilung von Fluorkautschuk-Pulver FKM in der Fluorpolymermatrix, mikroskopische Aufnahme an einem Dünnschliff.



2 Kennwertvergleich von Referenzsystemen (1-4) und Thermoplastische Elastomere (TPE) auf Basis Fluorpolymer mit 50 Prozent Fluorkautschuk-Pulver (FKM) (5-8).

MESOSTRUKTUR-EIGENSCHAFTSKORRELATION BEI POLYMERHARTSCHAUMSTOFFEN

Sandwichstrukturen besitzen eine hohe gewichtsspezifische Biegesteifigkeit und -festigkeit. Sie eignen sich deshalb für den Einsatz in beulgefährdeten Schalenstrukturen zum Beispiel im kommerziellen Flugzeugbau. Gegenüber Wabenkernen zeigen Sandwichkerne aus geschlossenzelligem Hartschaum Vorteile, beispielsweise ein besseres thermisches und akustisches Isolationsverhalten. Mit Hilfe der Vakuuminfusionstechnologie lassen sich Sandwichstrukturen aus einem Hartschaumkern und faserverstärkten Decklagen kostengünstig in einem Prozessschritt herstellen.

Die Hauptaufgabe des Sandwichkerns ist die Stabilisierung der Last tragenden Deckschichten. Dabei muss der Schaumkern auch sekundäre Belastungen wie Temperatureigenspannungen oder Schlagschäden ertragen. Seine mechanischen Eigenschaften werden von den charakteristischen Merkmalen der zellularen Struktur bestimmt. Die Analyse der Zellstruktur und deren Einfluss auf das Verformungs- und Versagensverhalten ist daher aktueller Untersuchungsgegenstand am Fraunhofer IWM.

Vorgehensweise

Die Zellstruktur des Hartschaumstoffs wird mittels hochauflösender Röntgen-Computertomografie erfasst. Mit Hilfe von 3-D-Bildanalysemethoden werden morphologische Parameter, beispielsweise die Zellgröße, extrahiert (Abbildung 1).

Für die Untersuchung der strukturabhängigen Verformungsmechanismen werden zunächst stochastische Geometriemodelle erzeugt, welche die typischen Merkmale der realen Schaumstruktur abbilden (Abbildung 2, rechts).

Die Eigenschaften des Werkstoffs können anschließend mit Hilfe von Finite-Elemente-Analysen in repräsentativen Materialausschnitten systematisch untersucht und für typische Einsatzbelastungen exakt vorhergesagt werden.

Ergebnisse

Als Ergebnis der Mesostrukturcharakterisierung stehen die mittlere Zellgröße, die Zellgrößenverteilung und die relative Dichte der untersuchten Polymerhartschaumstoffe für die werkstoffmechanische Modellierung zur Verfügung. Im Gegensatz zu lichtmikroskopischen Verfahren werden bei der Analyse mittels Röntgen-CT die dreidimensionalen Strukturinformationen der ungeschädigten Struktur vollständig erfasst.

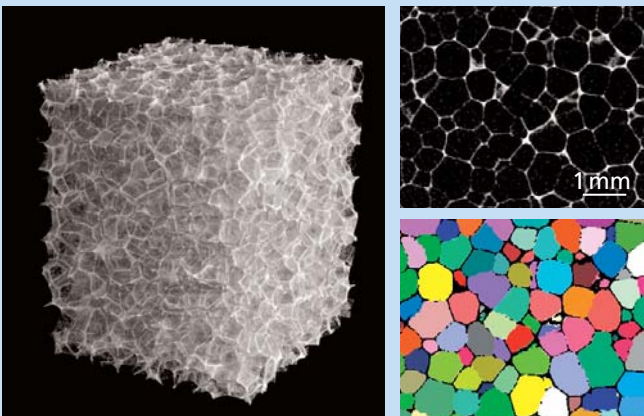
Die Wechselwirkungen der Zellstrukturelemente und deren Einfluss auf das Verformungsverhalten kann mit Hilfe der entwickelten Mesostrukturmodelle besser verstanden und vorhergesagt werden. Durch Variation der Modellparameter lassen sich gezielt Werkstoffeigenschaften einstellen (Abbildung 2, links) und Strukturen für maßgeschneiderte Schaumstoffe ableiten.

In zukünftigen Arbeiten sollen die Versagensmechanismen geschlossenzelliger Schaumstoffe untersucht werden.

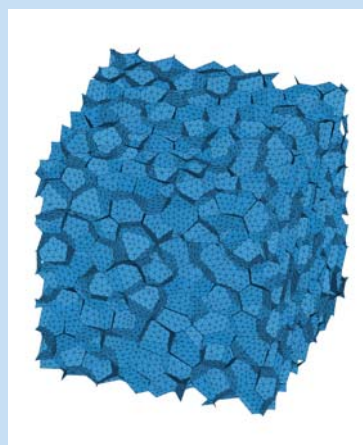
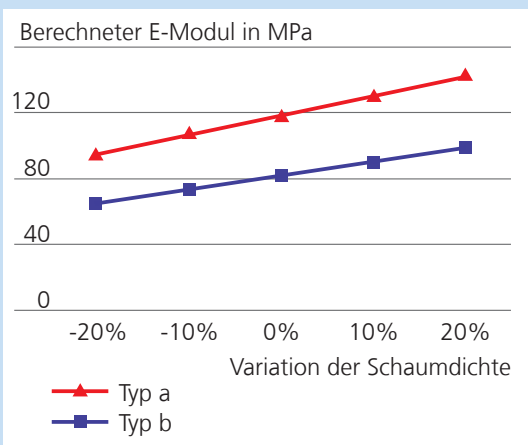
Ralf Schlimper



Polymerhartschaum einer Sandwich-Struktur.



1 CT-Aufnahme eines Polymerhartschaumstoffs und bildanalytische Zellgrößenbestimmung.



2 Links: Mittels Simulation berechnete Änderung des Elastizitätsmoduls bei Variation der Schaumdichte. Rechts: FE-Modell eines repräsentativen Volumenelements der Schaum-Mesostruktur.

BIOLOGISCHE UND MAKROMOLEKULARE MATERIALIEN

Für Anwendungen in der Kunststoffverarbeitung, Medizintechnik und Biotechnologie erarbeiten wir im Auftrag unserer Kunden Lösungen zu innovativen Veredlungsverfahren von Polymerfolien, entwickeln und bewerten Oberflächenmodifizierungs- und Beschichtungsverfahren für biologische und biokompatible Materialien und verwenden Nanotechnologien zur Materialfunktionalisierung. Projektschwerpunkte sind die Entwicklung und Einsatzqualifizierung von Fügeverfahren für Polymerfolien und die Erzeugung von funktionalen Oberflächen auf Kunststoffen durch Plasmaverfahren und Nassbeschichtungen. Es werden Struktur-Eigenschaftsbeziehungen und die Oberflächenfunktionalität von biologischen (Zahn, Knochen, Knorpel) und biokompatiblen (Implantate, Scaffolds, Proteinschichten) Materialien ermittelt und gezielt beeinflusst.

Bemerkenswertes aus 2009

Für Dach- und Fassadenkonstruktionen werden heute oft Membrankonstruktionen aus beschichteten Geweben oder Hochleistungspolymerfolien eingesetzt. Für die Auslegung der ein- oder mehrlagigen Membrankonstruktionen bedarf es fundierter Kenntnisse über die mechanischen Eigenschaften der eingesetzten Folien. Im Einsatz sind diese Materialien, zum Beispiel Folien aus dem Copolymer Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE), permanent belastet und komplexen Spannungszuständen ausgesetzt, die sich nicht durch einfache uniaxiale Versuche abbilden lassen. Um einsatznahe Prüfbedingungen zur Kalibrierung geeigneter Materialmodelle zu realisieren, wurde am Fraunhofer IWM ein biaxialer Kreuz-Zugversuch entwickelt. Vier servohydraulische Prüfzylinder wurden auf einem Spannungsfeld in zwei orthogonalen Achsen angeordnet. Prüfkörperform und Lage des Messbereichs wurden mit

Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen optimiert. Die Deformation der Folie im Messbereich wird mit Hilfe eines 3-D-Verformungsmesssystems in Echtzeit bestimmt und die Verfahrensgeschwindigkeit der beiden Achsen entsprechend geregelt, um eine konstante Deformationsgeschwindigkeit zu erreichen. Wird in mehreren Versuchen eine konstante Vergleichsdehnrate gewählt, können Lastszenarien-Ergebnisse miteinander verglichen und werkstoffmechanische Modelle für verschiedene Belastungsmodi kalibriert werden.

Ein weiteres Highlight 2009 war die Gründung der SmartMembranes GmbH. Zwei Wissenschaftlerinnen des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM in Halle und der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg entwickelten die Geschäftsidee bereits bei der Nano-Entrepreneurship-Academy 2007 (NEA). Dort belegten die Gründerinnen Petra Göring und Monika Lelonek mit ihrer Idee den ersten Platz. Danach wurden sie durch das FFE-Programm (Fraunhofer fördert Existenzgründungen) unterstützt, um ein Geschäftskonzept zu entwerfen und einen Businessplan zu verfassen. Die Unternehmensgründung selbst wurde durch Fraunhofer Venture unterstützt. Das SmartMembranes Team entwickelt und vertreibt hochgeordnete poröse Membranmaterialien vorrangig für Filtrationsprozesse in der Biotechnologie (www.smartmembranes.de).

Leistungsbereich

Polymerfolien und Polymergrenzflächen

Für Anwendungen vorrangig in der Kunststoff verarbeitenden Industrie werden Verfahren zur Beschichtung und Oberflächenmodifizierung sowie zum Fügen von Polymerfolien entwickelt und optimiert. Basierend auf der mechanischen und morphologischen Charakterisierung und den gefundenen Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen werden die Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften der Polymerfolien optimiert sowie Verfahren zur inline-Diagnostik von Beschichtungs- und Oberflächenbehandlungsprozessen entwickelt.

Prof. Dr. Andreas Heilmann
andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Biologische und biokompatible Materialien

Die morphologischen und mechanischen Eigenschaften von biologischen Materialien und biokompatiblen Oberflächen werden untersucht. Spezielle Präparationstechniken, Untersuchungsmethoden und Bewertungsverfahren werden gezielt für die Materialien angepasst und weiterentwickelt. Die Struktur-Eigenschaftsbeziehungen und die Oberflächenfunktionalität von biologischen (Zahn, Knochen, Knorpel) und biokompatiblen (Implantate, Scaffolds, Proteinschichten) Materialien werden ermittelt. Durch Beschichtungen und Oberflächenmodifizierungen wird die Biofunktionalität gesteuert (beispielsweise Antifoulingsschichten und -ausrüstungen).

Dr. Andreas Kiesow
andreas.kiesow@iwmh.fraunhofer.de

*Prof. Dr. Andreas Heilmann
Geschäftsfeldleiter*



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

POLYMERFOLIEN UND POLYMERGRENZFLÄCHEN

Prof. Dr. Andreas Heilmann

andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de

NANOPORÖSE MEMBRANEN FÜR DIE FUNKTIONELLE NASSBESCHICHTUNG

Die funktionelle Nassbeschichtung von Materialien ermöglicht die gezielte Einstellung von Grenz- und Oberflächeneigenschaften mit spezifischen Funktionen. Es werden gezielt ultradünne und gleichmäßige Schichten aufgebracht, die zum Beispiel haftvermittelnd oder biozid wirken. Die Realisierung gleichmäßiger Beschichtungen auf mehrdimensional gekrümmten Formkörpern stellt eine große Herausforderung dar und erfordert die Entwicklung von neuen Technologien wie den Kapillarbeguss. Dabei wird das Beschichtungsfluid durch eine Kapillarmembran dosiert auf die Oberfläche aufgetragen. Die Entwicklung von derartigen Kapillarmembranen auf der Basis von nanoporösem Aluminiumoxid ist die Zielstellung eines Teilprojekts im Innovativen Regionalen Wachstumskern ReactiveWetCoating II.

Vorgehensweise

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Kapillarmembranen wird ein durch Fließpressen und thermomechanische Prägung erzeugtes Aluminiumformteil verwendet. Durch anodische Oxidation der Aluminiumformteile in polyprotischen Säuren entsteht eine nanoporöse Oxidschicht, die sich durch vertikal zur Oberfläche geordnete, parallele Nanoporen auszeichnet. Die Porengröße kann durch die Parameter Anodisierungsspannung und Elektrolytkonzentration eingestellt werden. Die Schichtdicke wiederum wird durch die Elektrolytkonzentration und die Anodisierungszeit bestimmt. Die Porenöffnung erfolgt durch selektives Entfernen des Aluminiums und durch weitere nasschemische Ätzschritte. Für die Einsatzqualifizierung der Kapillarmembranen beim Industriepartner wurden die strukturellen Eigenschaften und die Durchflussrate mit unterschiedlichen Fluiden bestimmt.

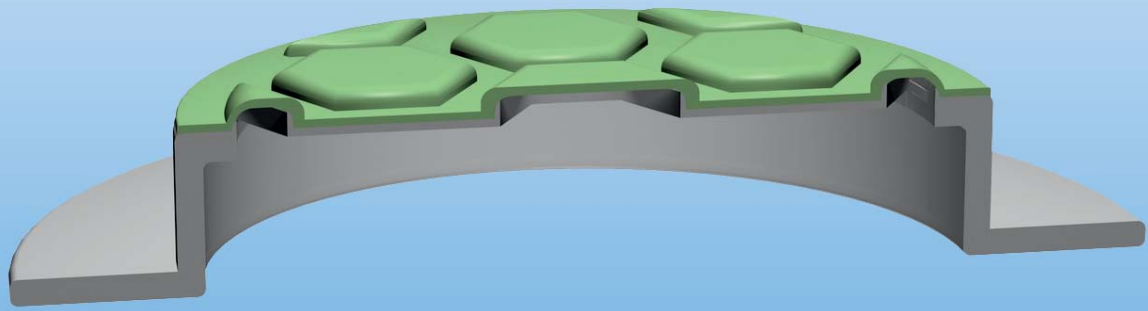
Ergebnisse

Es konnten erstmals mechanisch stabilisierte nanoporöse Aluminiumoxid-Membranen mit Schichtdicken von wenigen Mikrometern hergestellt und getestet werden. Es wurden verschiedene Kapillarmembranen mit mittleren Porendurchmessern von 20 bis 450 nm (Porengrößenverteilung von < 10 Prozent) und einer hohen offenen Porosität von 35 bis 50 Prozent erzeugt (Abbildung 1). Die unter applikationsnahen Bedingungen ermittelten spezifischen Durchflussraten der entwickelten Kapillarmembranen sind in Abbildung 2 für Ethanol dargestellt. Durch Variation von Porendurchmesser, Membrandicke und Porosität können spezifische Durchflussraten über einen Bereich von zwei Größenordnungen gezielt eingestellt werden.

Die entwickelten Kapillarmembranen zur ultradünne, funktionellen Nassbeschichtung von Formkörpern werden in die Beschichtungsanlagen der Projektpartner integriert. Anhand der Ergebnisse der Beschichtungsversuche werden Porendurchmesser und Durchflussraten weiter optimiert.

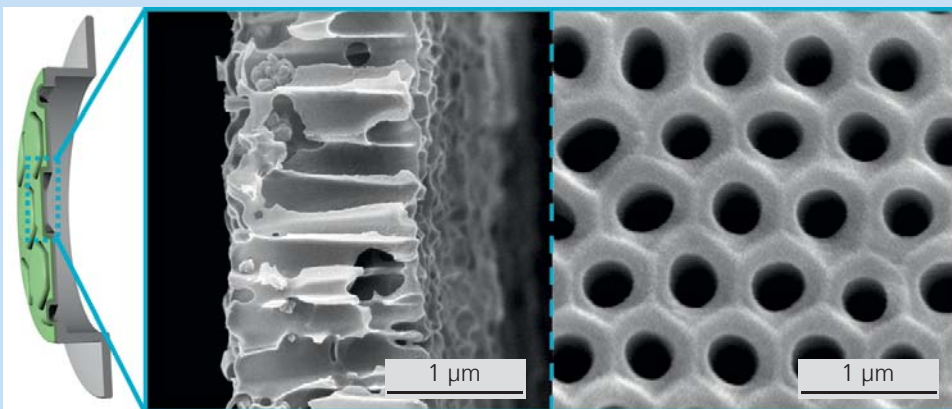
2009 wurde die Firma SmartMembranes zur Vermarktung der porösen Templates aus dem Fraunhofer IWM ausgegründet.

Annika Thormann

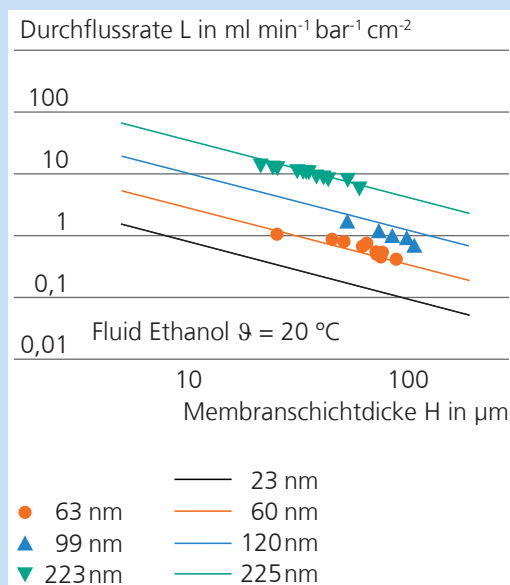


1 mm

Schemazeichnung einer Kapillarmembran zur ultradünnen, funktionellen Nassbeschichtung von Formkörpern.



1 REM-Abbildung der Vorderansicht und des Querschnitts einer Kapillarmembran anodisiert bei 150 V in 1 Prozent vlv Phosphorsäure bei 3 °C für 60 min.



2 Links: Logo ReactiveWetCoating II. Rechts: Spezifische Durchflussrate durch eine nanoporöse Membran in Abhängigkeit der Schichtdicke und des Porendurchmessers (simuliert und gemessen).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

BIOLOGISCHE UND BIOKOMPATIBLE MATERIALIEN

Dr. Andreas Kiesow

andreas.kiesow@iwmh.fraunhofer.de

NANOSTRUKTURIERTE UND FUNKTIONALISIERTE OBERFLÄCHEN AN SPRITZGUSSTEILEN

In der Biotechnologie, Pharmazie und Medizintechnik werden in zunehmendem Maße Materialien mit strukturierten und funktionalisierten Oberflächen benötigt. Verschiedene Herangehensweisen zur Erzeugung von Oberflächen mit funktionellen Eigenschaften durch Abformtechniken sind möglich, häufig können diese jedoch nur schwer technisch umgesetzt und nicht universell angewendet werden. Oftmals sind Abform- und Replikationstechniken auf 2-D-Teile beschränkt. Mangels nicht vorhandener nanostrukturierter 3-D-Formteile werden für entsprechende Anwendungen oft flache Substrate (beispielsweise mikroporöse Membranen) verwendet.

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen war die Entwicklung und Einsatzprüfung nanostrukturierter und oberflächenfunktionalisierter 3-D-Kunststoffformteile (Flüssigkeitsgefäße oder -röhrchen) auf der Basis des Spritzgussverfahrens.

Vorgehensweise

Der innovative Ansatz ist die Verwendung von Abformwerkzeugen mit einer nanoporösen Oberfläche, die mittels anodischer Oxidation von Aluminium erzeugt wurde. Durch die Einstellbarkeit von Porendurchmesser und Porosität am Abformwerkzeug lassen sich definierte Nanostrukturen auf der Formteiloberfläche erzeugen und deren Geometrien variieren.

Im ersten Schritt wurden 2-D-Formteile (Platten) abgeformt, wobei Abformwerkzeuge mit Porendurchmessern im Bereich von 100 bis 400 nm verwendet wurden. Als alternativer Ansatz wurden auch Abformwerkzeuge mit nanostrukturierten Hartstoffbeschichtungen getestet (siehe auch: Beitrag des Geschäftsfelds Fertigungstechnologie). Für die Herstellung

von Gefäßen (3-D-Formteile ähnlich Eppendorf-Röhrchen, Abbildung 2, links oben) wurden entsprechend strukturierte Abformwerkzeuge (Abbildung 1) verwendet. Zum Spritzgießen kam als Material Polypropylen (PP) zum Einsatz.

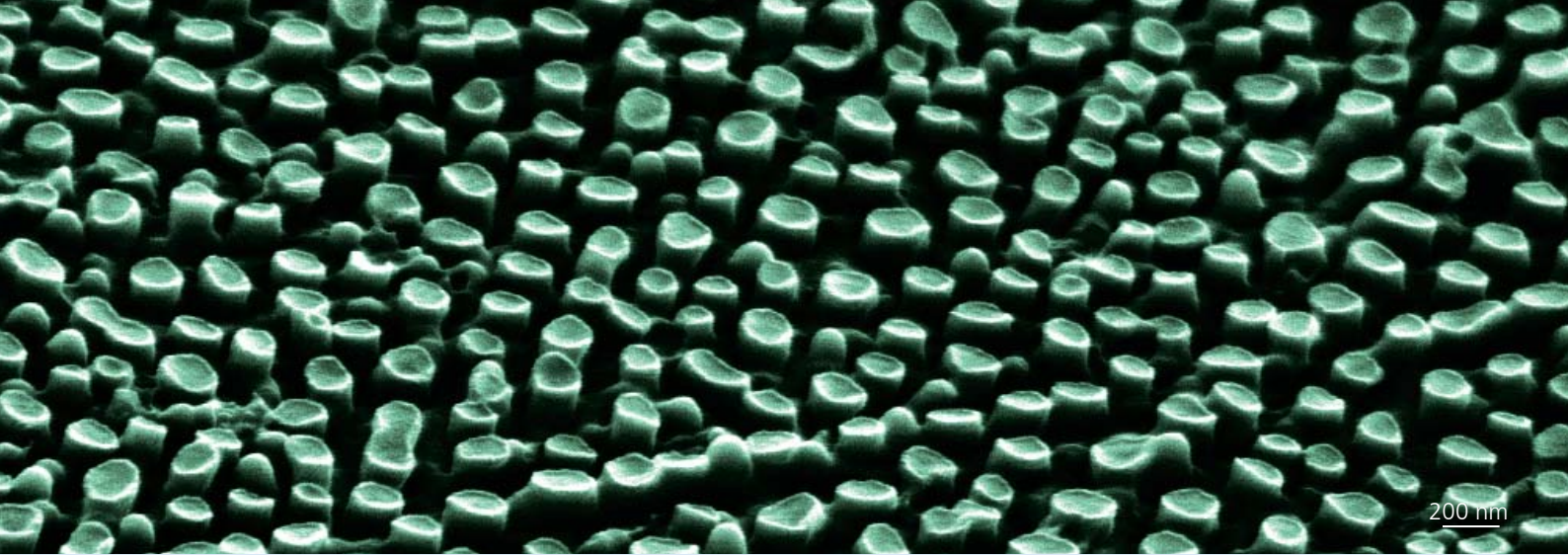
Die Spritzgussversuche wurden in Zusammenarbeit mit dem Kunststoffzentrum Leipzig, die Untersuchungen zur Oberflächenfunktionalisierung und biochemische Anwendungstests am Fraunhofer IAP Potsdam durchgeführt.

Ergebnisse

Es gelang, verschiedene PP-Formteile mit einer nanostrukturierten Oberfläche herzustellen. Die zum Abformwerkzeug inversen Polymeroberflächenstrukturen variierten entsprechend den verwendeten Prozessparametern beziehungsweise Porendurchmessern in Form und Größe. Typischerweise wurden noppenartige Strukturen erzeugt (Abbildung 2). Die Reproduzierbarkeit wurde für bis zu 1 000 Schuss pro Abformwerkzeug überprüft. Die Funktionalisierung der Abformteile erfolgte mit Aminogruppen, wobei eine Vergrößerung der Konzentration von 0,5 nmol/cm² bis auf das Zehnfache gemessen werden konnte.

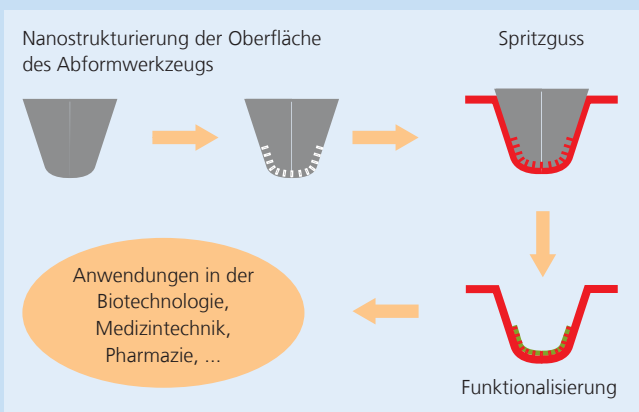
Durch die enorme Vergrößerung der spezifischen Oberfläche sowie der Veränderung der Oberflächentopografie und der Oberflächenchemie der Formteiloberfläche sind neuartige Funktionen realisierbar, die beispielsweise Oberflächensynthesen mit großen Stoffmengen von DNA und Proteinen möglich machen oder das Zellwachstum fördern.

Dr. Andreas Kiesow

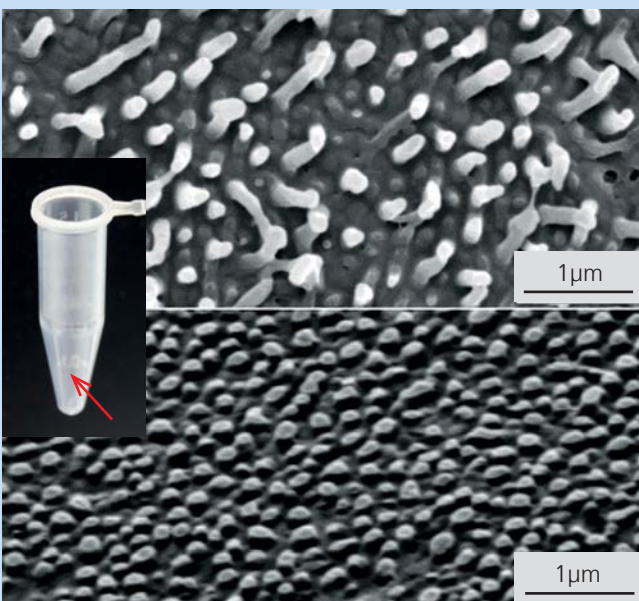


200 nm

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer nanostrukturierten Polypropylen-Oberfläche.



1 Schematische Darstellung der Vorgehensweise: Das Spritzguss-Abformwerkzeug wird durch einen Oberflächenbearbeitungsschritt nanostrukturiert. Die vergrößerte Oberfläche des abgeformten Bauteils steht für entsprechende Funktionalisierungen zur Verfügung.



2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen zweier Formteile aus Polypropylen. Links oben: Beispiel eines Gefäßes, hergestellt durch Spritzguss. Der Pfeil zeigt den Ort der Nanostrukturierung im Gefäßinneren.

KOMPONENTEN DER MIKROELEKTRONIK UND MIKROSYSTEMTECHNIK

Für Bauelemente und Werkstoffe der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik charakterisieren wir Struktur-, Material- und Bauteileigenschaften, analysieren Fehler und Schwachstellen, bewerten die mechanischen Eigenschaften und das Einsatzverhalten von Mikrobauteilen und entwickeln Diagnostik- und Prüfverfahren für Mikrodimensionen weiter. In enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern tragen wir dadurch zur Optimierung von Technologieschritten bei der Herstellung mikroelektronischer Systeme sowie zur Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit bei.

Bemerkenswertes aus 2009

In 2009 konnte das europäische Verbundvorhaben »FULL CONTROL« erfolgreich abgeschlossen werden. In dem vom Fraunhofer IWM mitinitiierten Projekt wurden gemeinsam mit französischen und deutschen Forschungsinstituten, Geräteherstellern und Industrieanwendern neue Fehleranalysemethoden für moderne Systeme in Package-Komponenten entwickelt. Eines der herausragenden Ergebnisse war die Entwicklung eines speziellen Lock-in-Thermographie-Systems für die Defektlokalisierung, das inzwischen international in der Mikroelektronik-Industrie für die Qualitätssicherung eingesetzt wird.

Leistungsbereich

Bewertung mikroelektronische Systemintegration

Wir bewerten die für den Aufbau mikroelektronischer Bauelemente und Systeme eingesetzten Werkstoffe, um Fehlermechanismen zu erkennen und ein zuverlässiges Einsatzverhalten abzusichern.

Prof. Dr. Matthias Petzold
matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Charakterisierung Mikrosysteme

Wir analysieren Festigkeit und Einsatzverhalten von Si-Mikrosystemen und Waferbond-Technologien mittels mechanischer Prüftechnik, Simulation und mikrostruktureller Analytik.

Prof. Dr. Matthias Petzold
matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

Leistungsbereich

Diagnostik Halbleitertechnologien

Wir betreiben Ursachenforschung von Materialwechselwirkungen und nanoskaligen Defekten in integrierten Schaltkreisen mittels hochauflösender Analysetechniken mit dem Ziel, die Herstellungstechnologien zu verbessern.

Frank Altmann
frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de

*Prof. Dr. Matthias Petzold
Geschäftsfeldleiter*



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

BEWERTUNG MIKROELEKTRONISCHE SYSTEMINTEGRATION

Prof. Dr. Matthias Petzold

matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

ULTRASCHALL-DRAHTBONDEN MIT ALUMINIUM-BESCHICHTETEN KUPFERDRÄHTEN

Miniaturisierung, höhere Performance und niedrigere Kosten treiben die Entwicklung neuer Drahtbondmaterialien in der Mikroelektronik voran. Als kosteneffizientes Material wird dabei zunehmend Kupferdraht angestrebt. Dieser weist jedoch durch Oxidbildung unter anderem eine schlechte Lagerfähigkeit und problematische Bondbarkeit auf. Deshalb wurden im BMBF-Vorhaben »WIRE COAT« mit Drahtherstellern und Mikroelektronik-Anwendern neue Al-beschichtete Kupferdrähte mit Schichtdicken im Nanometerbereich entwickelt, mit denen eine zuverlässige Prozessierbarkeit und hohe Lebensdauer der Bondkontakte realisiert werden kann. Aufgabe des Fraunhofer IWM war die mikrostrukturelle Diagnostik von Draht und Kontaktierung.

Vorgehensweise

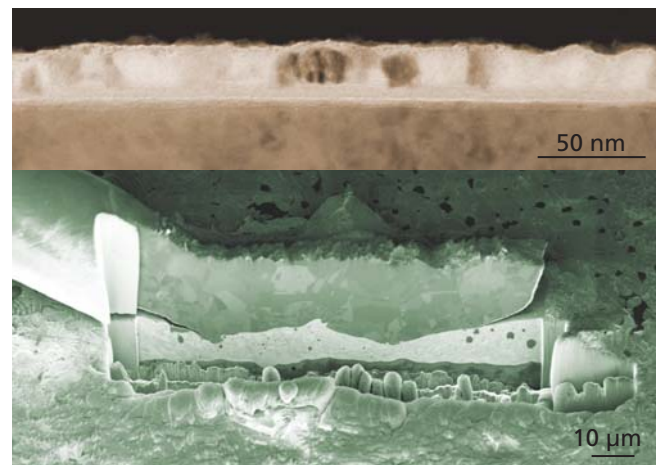
Die Mikrostruktur des Ausgangsdrahtes (\varnothing 25 μm), der Beschichtungen und der Kontakte auf Dickschichtmetallisierungen wurde mit Ionenstrahltechniken sowie Raster- (SEM) und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) analysiert.

Ergebnisse

Für den Ausgangsdraht konnte nach der Optimierung der Beschichtung (Fa. Heraeus Konzernbereich Edelmetalle; IHM TU Dresden) eine homogene und nahezu defektfreie Anbindung der Al-Schicht an den Kupferdraht nachgewiesen werden (Abbildung 1). Sehr gut lässt sich die kristalline Struktur der metallischen Al-Schicht bei nur minimaler Oxidation der Oberfläche erkennen. Die mechanische Stabilität der Drahtbond-Kontaktierungen auf verschiedenen Dickschicht-Metallisierungen (Micro Systems Engineering GmbH) wurde mit Pulltests bewertet. Dabei zeigte sich sowohl direkt nach

dem Bondprozess als auch nach Temperaturbelastung eine stabile und normgerechte Verbindungsbildung. Die sehr guten Ergebnisse der technologischen Tests konnten durch die mikrostrukturellen Analysen am Fraunhofer IWM interpretiert und abgesichert werden. Für alle untersuchten Materialkombinationen und Belastungszustände wurde eine weitgehend defektfreie Verbindungsbildung zwischen dem Al-beschichteten Kupferdraht und der Metallisierung gezeigt. Diese Resultate lassen ein zukünftiges Potenzial, vor allem für die Kontaktierung temperaturempfindlicher Sensorkomponenten, erwarten.

Robert Klengel



1 Oben: TEM-Detailabbildung der Cu-Drahtmanteloberfläche mit einer circa 20 nm dicken Al-Beschichtung (Proben: IHM der TU Dresden). Unten: SEM-Abbildung eines Drahtbondkontaktes mit Al-beschichtetem Cu-Draht auf einer Goldmetallisierung im Längsschnitt (Probe: Fa. Micro Systems Engineering GmbH).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

DIAGNOSTIK HALBLEITERTECHNOLOGIEN

Frank Altmann

frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de

MIKROSTRUKTURANALYSE VON GATEOXID-DURCHBRÜCHEN IN MOSFET-TRANSISTOREN

In mikroelektronischen Schaltkreisen werden nanometerdünne Oxidschichten für die Isolation der Gate-Elektrode von MOS-FET-Transistoren verwendet. Eine häufige Ausfallursache sind elektrische Durchbrüche des Gateoxids. Dabei ist eine wichtige Fragestellung, ob prozessbedingt eingebrachte Schwachstellen oder überhöhte elektrische Belastungen dafür verantwortlich sind. Für die Fehlerermittlung stellt der meist nur wenige zehn Nanometer große Defektbereich höchste Anforderungen an die Zielgenauigkeit der mikrostrukturellen Analyse.

Vorgehensweise

Gateoxid-Durchbrüche können mittels Emissionsmikroskopie auf etwa 1 μm Genauigkeit zugeordnet werden. Anschließend ist der Defekt noch innerhalb der Gatestruktur zu lokalisieren.

Dafür wurde eine spezielle Technik entwickelt, bei der die Gatestruktur von einer Seite beginnend im Querschnitt mittels fokussierender Ionenstrahltechnik durchmustert und zeitgleich mittels hochauflösender Rasterelektronenmikroskopie analysiert wird. Somit kann die Präparation nanometergenau an der Defektposition gestoppt werden. Anschließend wird eine elektronentransparente Lamelle hergestellt und im Transmissionsmikroskop untersucht.

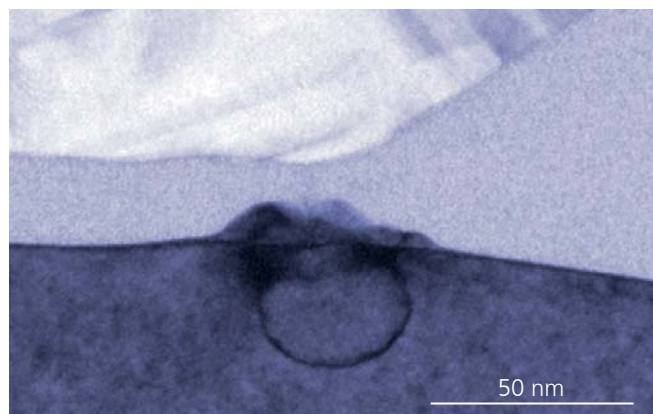
Ergebnisse

Durch die Untersuchungen konnten mehrere Ursachenbilder ermittelt werden. Typische prozessbedingte Fehler sind lokal verringerte Gateoxiddicken, die während der Nassoxidation im Randbereich der Gatestrukturen entstehen. Dadurch reduziert sich die elektrische Spannungsfestigkeit. Ähnlich wirken Schäden im Siliziumsubstrat, wie Topographieschwankungen und

Kristallfehler, die die Ausbildung des Gateoxides beeinflussen. Einsatzbedingte Gateoxidschäden entstehen entweder durch kurzzeitige elektrische Entladungsvorgänge (ESD) oder durch Degradation der Oxidschicht bei dauerhafter Schaltbelastung. ESD-Schäden lassen sich durch sehr kleine Defektbereiche in Form von Einschlagkratern erkennen. Bei elektrischer Dauerlast entstehen dagegen meist größere, zum Teil rekristallisierte Defektbereiche.

Die ermittelten Schadensursachen liefern einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Herstellungsprozesse und Auslegung integrierter Schaltkreise.

Michèl Simon



1 TEM-Untersuchung eines zielpräparierten Gateoxiddurchbruchs. Die typische Defektform weist auf einen Schaden durch kurzzeitige elektrische Entladungsvorgänge (ESD) hin.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Leistungsbereich

CHARAKTERISIERUNG MIKROSYSTEME

Prof. Dr. Matthias Petzold

matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

REAKTIVES BONDEN FÜR SPANNUNGSARMES FÜGEN IN DER MIKROSYSTEMTECHNIK

Das Reaktive Bonden stellt eine neue Fügetechnologie dar, bei der die für den Verbindungsprozess benötigte Wärmeenergie direkt im Fügespalt erzeugt wird. Die Energie entsteht dabei durch selbständig ablaufende exotherme Festkörperreaktionen in einem reaktiven Multilagen-Nanoschichtsystem. Für die Kontaktierung sorgt eine dabei aufschmelzende zusätzliche Lotschicht. Abbildung 2 zeigt schematisch den Prozessablauf beim reaktiven Bonden. Der entscheidende Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die Temperaturerhöhung auf den Bereich der Fügeverbindung begrenzt bleibt und keine gleichmäßige Erwärmung der zu fügenden Objekte notwendig ist. Es wird auf diese Weise möglich, Materialien mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten (wie Metalle, Keramik, Polymere) und Komponenten mit temperaturempfindlichen Materialien zu verbinden. Daher werden zukünftige Anwendungsfelder besonders auch in der Mikrosystemtechnik gesehen.

Vorgehensweise

Durch sequentielles Magnetronspütern wurden auf Glas- und Siliziumwafer Schichtsysteme aus Aluminium und Titan mit definierten Schichtdicken im Nanometerbereich abgeschieden sowie freitragende Folien mit bis zu 300 Wechselschichten hergestellt. Die mikrostrukturelle Charakterisierung der Wechselschichten erfolgte mittels Rastertransmissions- (STEM) beziehungsweise Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und durch die Sekundärionen-Massenspektrometrie (ToF-SIMS). Für die Initiierung der Reaktion konnte ein elektrischer Stromimpuls genutzt werden. Der Reaktionsverlauf wurde in situ mit Hilfe thermographischer Methoden analysiert.

Ergebnisse

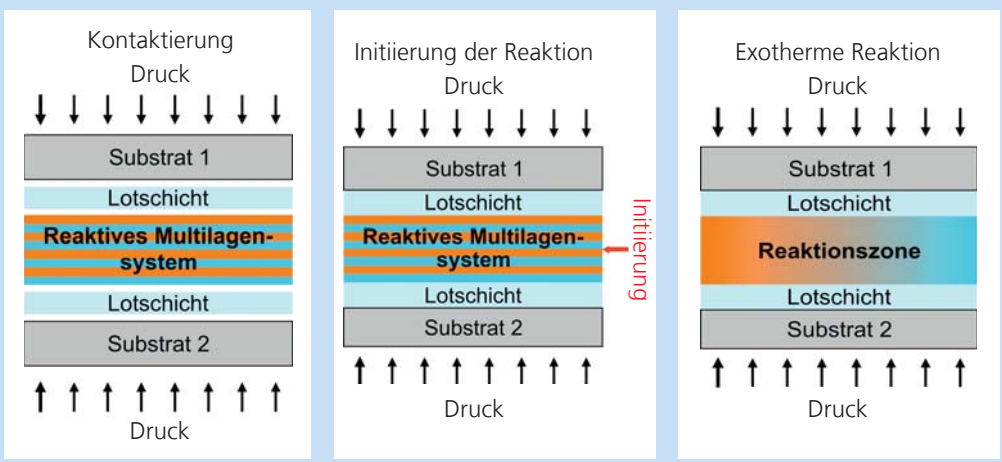
Eine Technologie zur Erzeugung von definierten Al/Ti-Multilagensystemen auf Basis des Magnetronspüterns konnte erfolgreich entwickelt werden. In Abbildung 1 ist beispielhaft die STEM-Aufnahme einer Probe bestehend aus jeweils zehn Aluminium- und Titanschichten mit einer Dicke von je 60 nm beziehungsweise 20 nm dargestellt. Mit Hilfe von ToF-SIMS-Analysen wurde eine geringe Interdiffusion der Schichtkomponenten bereits bei der Abscheidung nachgewiesen. Dieser Effekt ist bei zukünftigen Weiterentwicklungen zu berücksichtigen.

Für die hergestellten Proben breitete sich die Reaktionsfront nach Initiierung selbständig ohne zusätzliche Energiezufuhr aus. Abbildung 3 zeigt die in-situ-Thermographieaufnahmen der Reaktion für eine Probe mit 200 Al/Ti-Wechselschichten, wobei dabei eine Temperatur von etwa 1 200 °C sowie eine Reaktionsdauer von etwa 180 ms für die wenige Zentimeter große Probe abgeschätzt werden konnten.

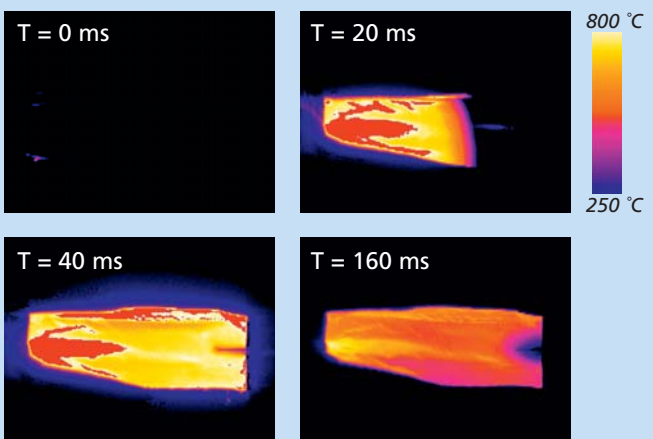
Im Folgenden sind zusätzliche Fügeexperimente zur Herstellung mechanischer Teststrukturen geplant, mit denen anschließend Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften und zum Einsatzverhalten reaktiver Fügeverbindungen unter Belastung erfolgen sollen.

Bianca Böttge

1 Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme (STEM) einer Mehrlagenfolie mit 20 Wechselschichten (Dunkel: Titan. Hell: Aluminium).



2 Prinzipskizze zum Prozessablauf beim Reaktiven Bonden.



3 Thermographieaufnahmen einer Probe mit 200 Aluminium/Titan-Wechselschichten während der Ausbreitung der Reaktionsfront.

Fraunhofer-Forschungszentrum

FRAUNHOFER-CENTER FÜR SILIZIUM-PHOTOVOLTAIK CSP

Das 2007 gegründete Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP ist eine gemeinsame Einrichtung des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM und Solare Energiesysteme ISE in Freiburg. Das Fraunhofer CSP ist in Halle lokalisiert und unterhält ein Modultechnologiezentrum in Schkopau. Die Forschungsstrategie konzentriert sich derzeit auf die Entwicklung von kostengünstigen Siliziumwafern und neuen Modultechnologien. Hierzu werden entsprechende Technologien für die Silizium-Kristallisation optimiert und Verfahren zur Fertigung von Solarmodulen entwickelt. Die Technologieentwicklungen werden durch hochqualifizierte Mikrostrukturdiagnostik, mechanische Charakterisierung und elektrische Bewertung unterstützt. Das Know-how in der Material- und Bauteilcharakterisierung wird zur Optimierung von Fertigungsprozessen bei Industriepartnern intensiv eingesetzt.

Bemerkenswertes aus 2009

Der vom Fraunhofer CSP koordinierte Spitzenclusterantrag »Solarvalley Mitteldeutschland«, ein Verbund aus etwa 40 Partnern aus Industrie, Forschung und Bildung, gehörte zu den fünf Gewinnern in einem vom BMBF ausgeschriebenen deutschlandweiten Wettbewerb. In den nächsten fünf Jahren soll mit dem Ziel der Netzparität 2015 gemeinsam geforscht werden. Dazu steht ein Gesamtbudget von mehr als 80 Millionen Euro zur Verfügung. Daneben soll eine regionale Ausbildungsstruktur für die Photovoltaik geschaffen werden.

Fachgruppe

Mechanik

Die Fachgruppe beschäftigt sich mit mechanischen Fragestellungen bei der Fertigung und dem Einsatz von Solarzellen und PV-Modulen mit kristallinen Zellen sowie mit Dünnschichttechnologie. Sie entwickelt Simulationen der Kristallisation zur Ermittlung von Eigenspannungszuständen. Für die Wafer werden Analyse- und Prüfmethode entwickelt, um die Herstellungsprozesse und die Belastungen durch das Handling mechanisch zu charakterisieren und zu verbessern. Zudem werden neue Technologien für Lötkontakte und Metallisierungen entwickelt. Wir untersuchen und optimieren die mechanischen Eigenschaften von kristallinen Modulen und Dünnschichtmodulen bis 6 m² Fläche. Die Forschung beinhaltet die Polymeranalytik der Verkapselungsmaterialien und die Optimierung von Laminierungsprozessen, die Entwicklung und Optimierung von Tragstrukturen für die Module und deren statische und dynamische Prüfung. Mit Simulationen wird die gesamte Produktlebensdauer untersucht.

Dr. Matthias Ebert
matthias.ebert@csp.fraunhofer.de

Fachgruppe

Diagnostik

Die Fachgruppe Diagnostik analysiert prozess- und materialinduzierte Eigenschaften von Solarzellen und -modulen aus der kristallinen Silizium- und Dünnschicht-Photovoltaik. Die Arbeitsfelder reichen von der Defektdiagnostik über Spurenanalytik und optische Charakterisierung bis zur Entwicklung optischer Materialien.

Sowohl in der Dünnschicht-Photovoltaik als auch in der kristallinen Si-Technologie spielen elektrisch-optische, chemische und mikrostrukturelle Materialeigenschaften eine zentrale Rolle. In Kooperation mit Partnern aus der PV-Industrie werden Strategien zur Defektanalyse erarbeitet. Die Ursachenaufklärung in atomaren und spurenanalytischen Dimensionen ergibt konkrete Vorschläge zur Prozesskontrolle und -optimierung in der Produktion. Forschungsarbeiten an Gläsern und Glaskeramiken für das »Photonenmanagement« schlagen eine Brücke zu neuen Konzepten für zukünftige Solarzell-Generationen.

Dr. Christian Hagendorf
christian.hagendorf@csp.fraunhofer.de

*Prof. Dr. Jörg Bagdahn
Leiter Fraunhofer CSP*



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Fachgruppe
MECHANIK

Dr. Matthias Ebert
matthias.ebert@csp.fraunhofer.de

VERSAGENSVERHALTEN VON SOLAR- ZELLENVERBINDERN IN KRISTALLINEN PHOTOVOLTAIKMODULEN

Solarzellen in kristallinen Photovoltaikmodulen werden durch Flachbänder aus Kupfer, so genannten Solarzellenverbindern, sowohl elektrisch als auch mechanisch miteinander verbunden. Daher werden lokal auftretende mechanische Beanspruchungen von den sie umgebenden Zellen auf die Solarzellenverbinder übertragen.

Solche Beanspruchungen können aus mechanischen Belastungen des Moduls, zum Beispiel durch Wind- oder Schneelast, resultieren. Häufiger sind jedoch thermisch induzierte mechanische Beanspruchungen, da jede Temperaturänderung, bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der einzelnen Modulkomponenten (Solarzellen, Frontglas, Rückseitenfolie, Verkapselungsmaterial), eine mechanische Verspannung des gesamten Moduls zur Folge hat. Langfristig führen diese mechanischen Beanspruchungen zum Ermüden des Lotbändchens und damit zum Ausfall des Solarmoduls (Abbildung 1).

Vorgehensweise

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, über bauteilnahe Messungen das Ermüdungsverhalten der Solarzellenverbinder während ihrer Herstellung und im Betrieb nachzustellen und sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen darüber treffen zu können, welche werkstoffphysikalischen Eigenschaften der Solarzellenverbinder und welche Fertigungsparameter bei der Modulherstellung verändert werden müssen, um eine ausreichende Lebensdauer der Solarzellenverbinder bei geringen Produktionskosten gewährleisten

zu können. Um das Belastungsprofil des Versuchs den tatsächlichen Einsatzbedingungen anzugleichen, erfolgte eine genaue Nachbildung der Probenform an die Lotbändchengemetrie, wie sie im Photovoltaikmodul vorliegt.

Ergebnisse

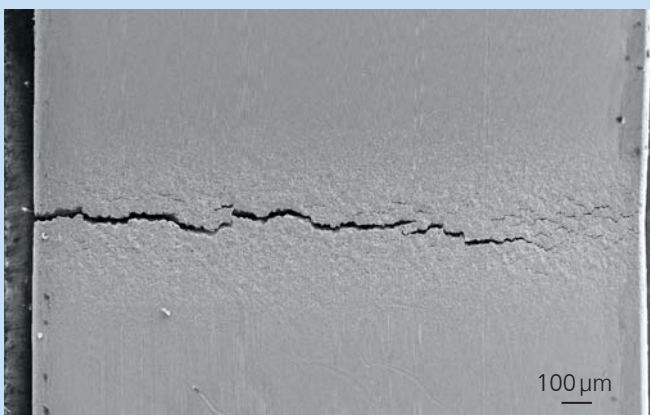
Die Probe wurde einer zyklischen mechanischen Belastung bis zum Versagen ausgesetzt. Durch Variation der Belastungsamplituden lässt sich ein bauteilnahe Ausfallverhalten aufnehmen (Abbildung 2). Dabei wurde auch der Einfluss verschiedener Faktoren (beispielsweise die Abmessungen der Lotbänder, die werkstoffphysikalischen Eigenschaften des Kupfermaterials oder die Crimpgeometrie) ermittelt. Im Ergebnis dieser Versuche soll langfristig ein für FEM-Berechnungen mit ANSYS verwendbares Verformungs- und Schädigungsmodell erarbeitet werden, um so die Langzeitzuverlässigkeit von Zellenverbindern in Photovoltaikmodulen gezielt bewerten zu können.

Die Arbeiten werden im Rahmen eines internen FhG-Förderprogramms (Fördernummer: Attract 692131) durchgeführt.

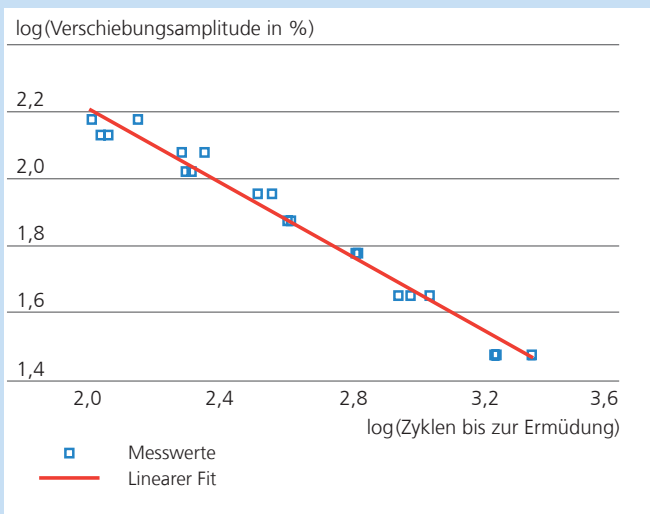
Rico Meier, Dr. Steffen Wiese



Serienverschaltete kristalline Si-Solarzellen.



1 Ermüdungsriß durch einen Solarzellenverbinder nach 1813 Zyklen bei einer maximalen Verschiebung von 30 μm (entspricht 1 Prozent des Spannbackenabstands).



2 Oben: Bauteilnahes Lebensdauermodell für Solarzellenverbinder. Unten: Fit-Gleichung für die oben dargestellten Ergebnisse: Δx kennzeichnet die Amplitude der Verschiebung, L ist der Spannbackenabstand, N die Zyklenzahl bis zum Ausfall, a und c sind Modellparameter zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens der Zellenverbinder.

$$\frac{\Delta x}{2L} = aN^c$$

MIKROKONTAKTE: STRUKTUR UND ELEKTRISCHE CHARAKTERISIERUNG

Lokale Mikrokontakte finden sich sowohl auf CSG-Dünnschicht-Solarzellen (kristallines Silizium auf Glas) als auch in Form von Laser-gefeuerten Kontakten (laser-fired contacts, LFCs) als Rückseitenkontaktierung waferbasierter Solarzellen. Eine Optimierung der zugrunde liegenden Prozessschritte erfordert ein fundamentales Verständnis von mikrostrukturellen Defektursachen und Stromleitungsmechanismen. Die geringen Abmessungen der Kontaktstrukturen setzen Zielpräparationsverfahren und analytische Methoden voraus, die für mikroskopische Dimensionen geeignet sind.

Vorgehensweise

Die zu untersuchenden Proben weisen oftmals eine großflächige Anordnung vieler gleichartiger Kontakte auf. Zunächst werden defektbehaftete Kontakte anhand der unterschiedlichen Emission von Wärmestrahlung bei elektrischer Anregung mittels Lock-in-Thermographie (LIT) identifiziert. Durch hochauflösende LIT mit Hilfe einer Solid Immersion Lens (SIL) lassen sich Defekte mikrometergenau lokalisieren. Eine Bewertung der lokalen elektrischen Kennwerte (Widerstand, Strom-Spannungskennlinie) der defekten Strukturen kann durch spezielle Mikro-Probing-Verfahren in einer Vierleiter-Messanordnung erfolgen. Die hierfür erforderliche elektrische Isolation geschieht mittels fokussierter Ionenstrahlen oder mechanisch durch Drahtsägen.

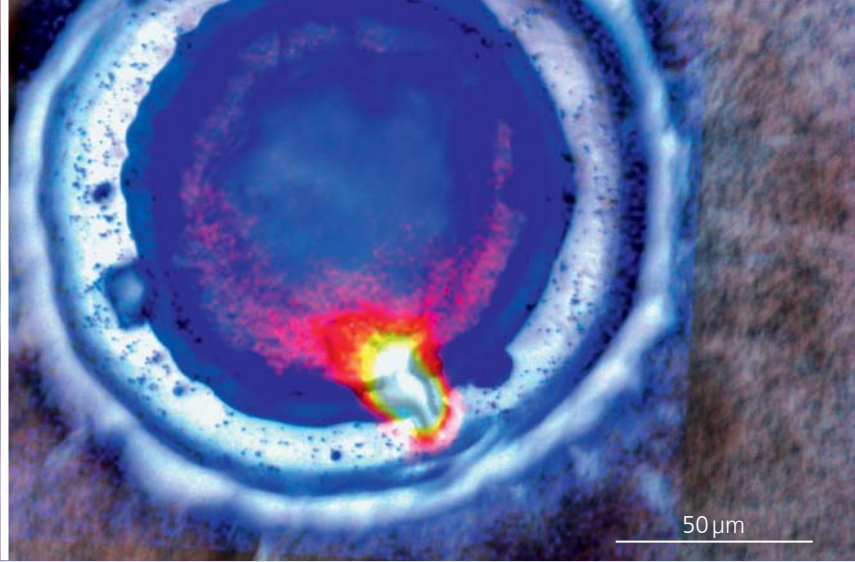
Neben der analytischen Elektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) und elektronenstrahlinduzierter Strommessung (EBIC) ermöglichen weiterführende

Verfahren zur lokalen Elementanalyse mittels ToF-SIMS-Tiefenprofilierung und Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) eine mikrostrukturbasierte Aufklärung der prozess- und materialinduzierten Defektursachen.

Ergebnisse

Bei der Herstellung von CSG-Solarzellen begünstigen veränderte Materialeigenschaften, hervorgerufen durch einen neuartigen Si-Abscheidungsprozess, die Ausbildung von lokalen elektrischen Kurzschlüssen (Shunts). LIT-Untersuchen zeigen beispielsweise Shunts, die in Kontakten zu der p+-dotierten Si-Schicht auftreten. Der hell leuchtende Bereich in der hochaufgelösten LIT-Aufnahme (Abbildung 2, links) deutet auf einen Kurzschluss mit einer Ausdehnung von wenigen Mikrometern hin. An der Stelle des Shunts wird mittels fokussierter Ionenstrahltechnik ein Querschnitt durch den Schichtaufbau präpariert. Die elektronenmikroskopische Untersuchung (Abbildung 2, rechts) zeigt deutlich die Ursache: Der Shunt wird durch ein Loch in der Si-Schicht verursacht. Die aufgedampfte Aluminiumschicht hat zu einem Kurzschluss zwischen der n+- und p+-Schicht im Silizium geführt. Für diesen Ausfall sind Ätzschritte bei der Kontakterzeugung verantwortlich, die zur Bildung der Löcher aufgrund von abscheidungsbedingten Materialinhomogenitäten führen.

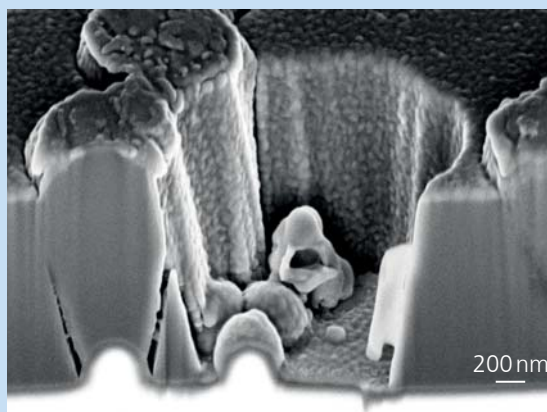
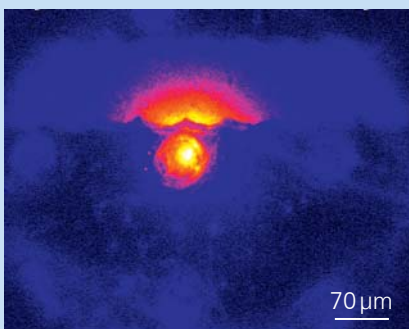
LFC-Arrays, die zur Rückseitenkontaktierung von kristallinen Si-Solarzellen eingesetzt werden, weisen Variationen in der Leitfähigkeit einzelner LFCs auf. Dies wird anhand von LIT-Aufnahmen deutlich, da gut leitende LFCs (mit kleinem Kontakt-



1 Hochauflösende Lock-in-Thermographieaufnahme (LIT) an einem Laser-gefeuerten Kontakt (LFC) mit widerstandsbehafteter Si-Brücke über die hervorgetretene Oxidschicht.

widerstand) gegenüber denen mit verringerter Leitfähigkeit eine deutlich erhöhte Wärmestrahlung abgeben. Die Ursachen für die unterschiedlichen Widerstandswerte konnten in lichtmikroskopischen Aufnahmen und mittels hochauflösender LIT (Abbildung 1) bestimmt werden. Durch eine quantitative Analyse der Widerstände und der IV-Kennlinien einzelner LFCs konnte ein elektrisches Ersatzschaltbild entwickelt werden, welches ein modellhaftes Verständnis der dominierenden Stromtransportmechanismen erlaubt. Durch die Korrelation mit den Laserparametern bei der LFC-Erzeugung lassen sich definierte Vorgaben für eine optimierte Laserprozessierung ableiten.

Volker Naumann, Dr. Martina Werner, Dr. Christian Hagendorf, Christian Schmidt



2 Links: Lock-in-Thermographieaufnahme eines Kontakts mit Shunt in einer Si-Dünnschichtsolarelle. Rechts: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Probenquerschnitts an der Shunt-Position im Kontakt.

Fraunhofer-Forschungszentrum

FRAUNHOFER-PILOTANLAGEN- ZENTRUM FÜR POLYMERSYNTHESE UND -VERARBEITUNG PAZ

Das 2005 eröffnete Pilotanlagenzentrum in Schkopau wird gemeinsam vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP in Potsdam-Golm und vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Halle betrieben. Das Zentrum liefert maßgeschneiderte Lösungen vom Syntheserohstoff bis hin zum geprüften Hochleistungsbauteil.

Die Polymersyntheseverfahren werden in Lösung, Masse, Emulsion und Suspension durchgeführt. Verschiedene innovative Verarbeitungsverfahren wie Extrusion, Spritzguss und IMC sind auf den gleichen Durchsatz abgestimmt. Die Anlagen verfügen über Online-Monitoring und sind mit einem modernen Prozessleitsystem (Feldbus-Technik) zur Prozesssteuerung ausgestattet.

Zudem werden anwendungsspezifische Thermoplast-Compounds und prototypische Bauteile entwickelt, wobei der Verarbeitungseinfluss auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften besonders berücksichtigt wird. Der Injection Moulding Compounder (IMC) realisiert die Verbindung von Extrudierungstechnik und Spritzgussverfahren »im Kleinen«. Das Pilotanlagenzentrum steht allen Kundinnen und Kunden für gemeinsame Entwicklungen im Pilotmaßstab zur Verfügung.

Bemerkenswertes aus 2009

In diesem Jahr konnte die physikalische Direkt-Verschäumung bei spritzgegossenen Bauteilen für Leichtbauanwendungen erfolgreich maschinentechnisch umgesetzt werden. Außerdem werden neben Extrusion, Spritzguss und IMC die reaktive Polyurethan installiert und in Betrieb genommen.

Fachgruppe

Verarbeitung

Die Gruppe widmet sich in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWM der Entwicklung anwendungsspezifischer Thermoplast-Compounds und prototypischer Bauteile unter besonderer Berücksichtigung der Verarbeitungseinflüsse auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften.

Dr. Michael Busch

michael.busch@iwmh.fraunhofer.de



Dr. Michael Busch

Koordinator Polymerverarbeitung Fraunhofer PAZ

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Fachgruppe

VERARBEITUNG

Dr. Michael Busch

michael.busch@iwmh.fraunhofer.de

MISCHELEMENTE ZUR OPTIMIERUNG DER DISPERGIERWIRKUNG IM COMPOUNDIERPROZESS

Im Direktverarbeitungsprozess hergestellte, faserverstärkte Bauteile können unter der Voraussetzung einer möglichst homogenen Verteilung der eingebrachten Fasern sehr gut an die jeweilige Anforderung angepasst werden. Beispielsweise können Celluloseregeneratfasern (CRF) im Bauteil zur Gewichtsreduzierung und Schlagzähigkeitserhöhung, etwa für Bauteile im Transportwesen, eingesetzt werden. Nachteil dieser Faserart im Compoundierprozess mit Polymeren mittels Doppelschneckenextrudern (DSE) ist die hohe Reißdehnung und der weiche Charakter der Fasern. Sie neigen sehr stark zur Bildung von Agglomeraten im späteren Bauteil, wodurch bei schlagartiger Beanspruchung Risse initiiert werden können. Durch den Einsatz herkömmlicher Mischelemente im Compoundierprozess auf DSE ist mit optimierter Extruderkonfiguration im Labormaßstab eine agglomeratfreie Verarbeitung der Einzelkomponenten möglich (ZE25-UTX, KraussMaffei Berstorff), beim Scale-up in den industriellen Maßstab (ZE40A-UTX, KraussMaffei Berstorff) ist eine ausreichende Dispergierung der Fasern in der Schmelze nicht mehr realisierbar, was unter anderem auf unterschiedliche Volumenverhältnisse im Extruder zurückzuführen ist.

Vorgehensweise

Somit wurden aufbauend auf der Geometrie von Standard-Mischelementen neue Schneckenelemente entwickelt. In Abbildung 1 und 2 sind die entsprechenden Elemente gegenübergestellt. Ein Standard-Zahnblockelement für einen DSE ZE40A-UTX besitzt 3 Zahnreihen mit je 10 Zähnen sowie eine

definierte Gangtiefe. Das modifizierte Zahnblockelement wurde bezüglich Scherintensität und Volumenverhältnissen angepasst. Es besitzt bei identischer Länge 5 Zahnreihen mit je 12 Zähnen und verringertem freiem Volumen im Extruder. An einer ZE40A-UTX mit einem Schneckendurchmesser von 44 mm wurden aufbauend auf den Scale-up-Versuchen systematische Untersuchungen zum Vergleich der Mischelemente durchgeführt. Es wurde der Einfluss der Schneckenkonfiguration (Mischzone mit jeweils gleicher Anzahl an Zahnblockreihen) auf die Dispergierwirkung sowie die mechanischen Eigenschaften eines PP/CRF-Compounds mit 10 Prozent CRF-Schnittfasern untersucht.

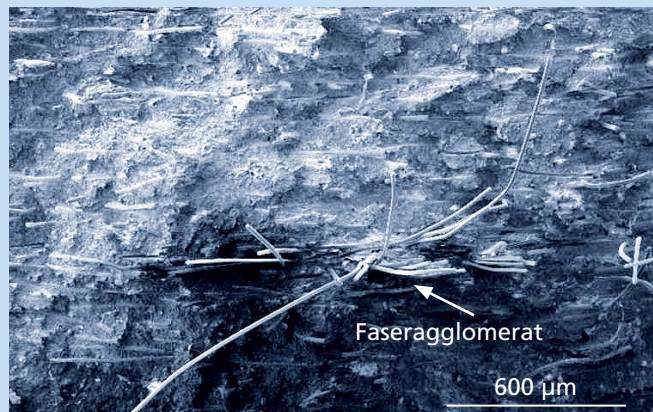
Ergebnisse

Bei der Verwendung der modifizierten Zahnblockelemente tritt durch die Erhöhung der Anzahl der Schereinheiten und durch ein geringeres freies Volumen im Extruder eine erhöhte dispersive Mischwirkung ein, wodurch beim Einsatz einer geeigneten Schneckenkonfiguration und geeigneten Prozessparametern eine sehr gute Faserclusterauflösung im industriellen Maßstab erreicht wird. Analog dazu konnten bessere mechanische Kennwerte erzielt werden. Erste Untersuchungen zeigten Erhöhungen des Zugmoduls um circa 33 Prozent und der Zugfestigkeit um circa 17 Prozent bei vergleichbarer Kerbschlagzähigkeit der Materialien. Weiterführende Untersuchungen schließen sich derzeit an.

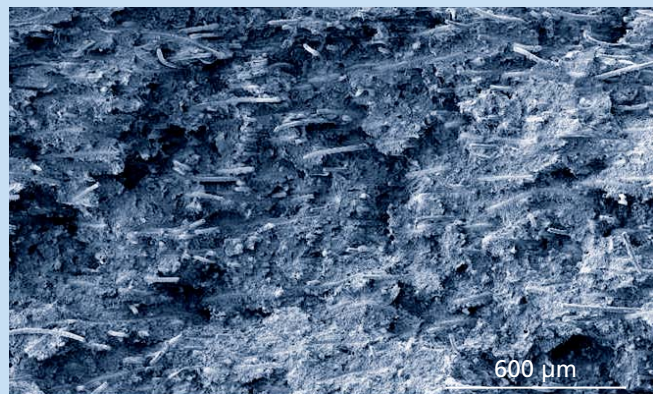
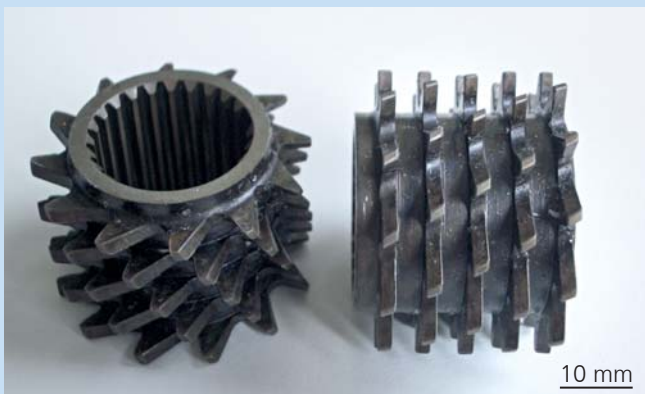
Ivonne Jahn



Cellulose regenerat-Stapelfaser.



1 Extrudermischelement Standard-Zahnblock und Compound mit Faseragglomeraten.



2 Extrudermischelement Modifizierter Zahnblock und Compound mit homogener Faserverteilung.

ALLIANZEN UND ZENTREN

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile

Fraunhofer-Materialforschung umfasst die gesamte Kette von der Entwicklung und Verbesserung von Materialien über die Herstelltechnologie und Charakterisierung der Eigenschaften bis zur Bewertung des Einsatzverhaltens. Entsprechendes gilt für die aus den Materialien hergestellten Bauteile und deren Verhalten in Systemen. Neben den experimentellen Untersuchungen werden die Verfahren der numerischen Simulation und Modellierung gleichrangig eingesetzt.

Vorsitzender: Prof. Dr. Holger Hanselka

Kontakt: www.vwb.fraunhofer.de

Dr. Ursula Eul

ursula.eul@lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

Mehr als zwanzig Fraunhofer-Institute beschäftigen sich mit Nanotechnologie und betrachten dabei Eigenschaften von Werkstoffen, Bauteilen und Systemen in Nano-Größenordnung (< 100 nm). Der Themenverbund fokussiert seine Aktivitäten auf multifunktionelle Schichten für den Automobilbereich und das Design spezieller Nanopartikel als Trägersubstanzen für Biotechnik und Medizin.

Prof. Dr. Michael Moseler, Prof. Dr. Andreas Heilmann

www.nano.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Numerische Simulation von Produkten, Prozessen

Der Verbund bearbeitet institutsübergreifende Aufgaben zur Entwicklung und Verbesserung von Simulationsverfahren. Er bündelt zudem Kompetenzen aus dem IuK-Bereich, das Werkstoff- und Bauteil-Know-how sowie die Oberflächen- und Produktionstechnik.

Dr. Dirk Helm

www.nusim.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz und Demonstrationszentrum Hochleistungskeramik

Das Spektrum reicht von der Modellierung und Simulation über die anwendungsorientierte Entwicklung von Werkstoffen, Fertigungsprozessen und Bearbeitungstechnologien bis hin zur Bauteilcharakterisierung, Bewertung und zerstörungsfreier Prüfung unter Einsatzbedingungen.

Dr. Andreas Kailer

www.advancer.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Energie

Zehn Fraunhofer-Institute bieten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aus einer Hand an. Die Schwerpunkte liegen bei Effizienztechnologien, erneuerbaren Energien, Gebäuden und Komponenten, Planung und Betriebsführung integrierter Energiesysteme sowie Speicher- und Mikroenergietechnik.

Dr. Jörg Bagdahn

www.energie.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Adaptronik

Adaptronik integriert aktuatorische, sensorische und regelungstechnische Funktionen in Strukturen. Ihr Einsatzpotenzial besteht in der Fahrzeugtechnik, dem Werkzeugmaschinen- und Anlagenbau, der Medizin-, Luft- und Raumfahrttechnik sowie der Optik und Wehrtechnik.

Dr. Bärbel Thielicke

www.adaptronik.fraunhofer.de

crashMAT, Freiburger-Zentrum für crashrelevante Material- und Bauteilcharakterisierung

Die Fraunhofer-Institute IWM und EMI entwickeln und standardisieren Lösungen auf Basis experimenteller und numerischer Bewertungsmethoden zur Vorhersage des Versagens von Strukturkomponenten und der Crashesicherheit von Fahrzeugkomponenten.

Dr. Dieter Siegele

www.crashmat.de



Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung

Generative Fertigungstechniken sind konventionellen Techniken bei der Herstellung von maßgeschneiderten, komplexen Bauteilen und Kleinserien in Flexibilität, Arbeits- und Materialaufwand überlegen. Die Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung widmet sich der Entwicklung, Anwendung und Umsetzung generativer Fertigungsverfahren und Prozesse.

Dr. Raimund Jaeger

www.generativ.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Bau

Die Allianz bearbeitet alle wissenschaftlichen und forschungsrelevanten Fragen zum Thema Bau aus einer Hand innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. Das umfangreiche Portfolio richtet sich gleichermaßen an kleine und große Akteure in der Bauwirtschaft mit neuen und innovativen Technologien rund um Behaglichkeit, Energieeffizienz, Leistungsunterstützung und Nachhaltigkeit. Die Experten unterstützen Bauunternehmen von der Auswahl der richtigen Planungssoftware bis hin zum Baustoff-Recycling.

Prof. Dr. Andreas Heilmann

www.bau.fraunhofer.de

FRAUNHOFER-INNOVATIONSCUSTER

Innovationscluster fördern die Vernetzung zwischen Wirtschaft, Hochschulen und FuE-Einrichtungen in Technologiefeldern mit hohem Innovationspotenzial.

Polymertechnologie, Halle

Großunternehmen der Polymersynthese, mittelständische Unternehmen der Polymerverarbeitung sowie Forschungseinrichtungen entwickeln neue Technologien für Polymersynthese und -verarbeitung. Das mikrostrukturbasierte Materialdesign beinhaltet die Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen und die Steuerung der Strukturbildungsprozesse während der Verarbeitung. Zudem werden anwenderspezifische Polymere entwickelt. Schwerpunktmäßig bearbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Polymer-Nanopartikel-Blends, neue Kautschuktypen sowie Biopolymere und Naturfaserkomposite.

Dr. Michael Busch

Technologien für den hybriden Leichtbau KITE hyLITE, Karlsruhe

Die Fraunhofer-Institute ICT, IWM und LBF (das Center of Automotive Research and Technology (CART) der Universität Karlsruhe und Unternehmen der Automobil- und Zulieferindustrie entwickeln einen ganzheitlichen Ansatz für den hybriden Leichtbau mit Verbundwerkstoffen. Schwerpunkte sind die Entwicklung von Werkstoffen, Produktionstechnologien und Methoden zur Realisierung funktionsintegrierter Leichtbaulösungen und deren Umsetzung in einer ökonomisch realisierbaren Serienfertigung im Bereich der Fahrzeugindustrie.

Dr. Thomas Hollstein

Die Gemeinschaftsforschung von Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft: Wirtschaftsorientierte Strategische Allianzen (WiSA) arbeiten an der Umsetzung neuer Technologien in die industrielle Praxis. Die marktorientierte strategische Vorlauftforschung (MaVo) ermöglicht anspruchsvolle Forschung an Zukunftsthemen.

Multifunktionale Membrankonstruktionen – Variable Membrankonstruktionen für den Leichtbau, WiSA

Ziel der Allianz ist, die Eigenschaften und die Funktionalität von ETFE-basierten Membranen, Membrankissen und Kissen-Gesamtsystemen (in der Kombination mit anderen Nichtmembran-Systemen) zu verbessern. Es soll ein bauphysikalisch und materialtechnisch optimierter Systembaukasten entstehen, mit dem sich einfach und zielgerichtet Anforderungen an ein membranumschlossenes Gebäude realisieren lassen.

Jörg Lucas, Prof. Dr. Andreas Heilmann

Wirtschaftliche Serienproduktion maßgeschneiderter Optikkomponenten aus Glas mit hohem Marktpotenzial (Tailored Optics), WiSA

»Tailored Optics« entwickelt, optimiert und bewertet die gesamte Technologiekette zur Herstellung von hochpräzisen Heißformwerkzeugen für optische Linsen aus Glas. Neben der Werkzeugkonzeption und -konstruktion sind die Arbeitsschwerpunkte Entwicklung und Herstellung von Hartmetall-Formwerkstoffen, Verfahren zur Ultrapräzisionsbearbeitung der Funktionsflächen und Beschichtung sowie Einsatztests der Formwerkzeuge mit unterschiedlichen Heißformgebungstechniken. Letztlich sollen Formwerkzeuge zur Produktion von komplexen Optikkomponenten aus Glas zu marktfähigen Kosten bereitgestellt werden.

Dr. Frank Burmeister, Dr. Peter Manns

Entwicklung einer Technologieplattform zur Herstellung multifunktionaler Hybridschäume (HybSch), MaVo

Im Projekt werden Verfahren zur Herstellung und Charakterisierung von Werkstoffen aus mehreren geschäumten Materialien entwickelt. Deren Eigenschaften sollen den jeweiligen Monomaterialschäumen überlegen sein. Anwen-

dung finden solche Verbundwerkstoffe in der mechanischen Energieabsorption in neuartigen Leichtbau-Crashelementen, im multifunktionalen Schallschutz und in leichten, hochsteifen Konstruktionselementen. Zudem werden numerische Werkzeuge zur Vorhersage der mechanischen und nicht-mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe designed.

Dr. Jörg Hohe, Andreas Kromholz

Computer Aided Robust Design (CAROD), MaVo

»CAROD« erfasst quantitativ und qualitativ unsichere Herstellungs- und Einsatzbedingungen. Daraus leiten die Fachleute verbesserte Entwurfsprozesse ab, die Toleranzen in Materialeigenschaften und Produktionsprozessen berücksichtigen. Im Fokus steht nicht die nachträgliche Entdeckung von Fehlern, sondern das Design robuster Systeme, das unvermeidbare Schwankungen von vornherein einbezieht. Um alle Themenaspekte abzudecken, wird Material charakterisiert und Demonstratoren, zum Beispiel zum Thema Crash, entwickelt.

Dr. Dong-Zhi Sun

Machbarkeit und Evaluierung transparenter und elektrisch leitfähiger Dünnschichtsysteme mit oxidischen Halbleiterschichten (METCO), MaVo

Die Fachleute wollen grundlegendes Verständnis und Kontrolle der Defektchemie und Morphologie von transparenten, halbleitenden Oxiden gewinnen. Damit entwickeln sie bandgap-optimierte Materialsysteme sowie stabile p-dotierte transparente, halbleitende Oxide. Mit diesen Materialsystemen, die auf Glas, Kunststoff und Halbleitermaterialien appliziert werden, können deutlich kostengünstigere und effizientere Dünnschicht-Solarzellen und OLED-Displays realisiert werden. Weitere Anwendungen sind die transparente Elektronik für Displayanwendungen sowie niedrigemittierende,

beschlaghemmende und schaltbare Beschichtungen für Architektur und Fahrzeugverglasungen.

Prof. Dr. Christian Elsässer

Fertigungsintegrierte Reduzierung von Reibung und Verschleiß in Verbrennungsmotoren (TriboMan), MaVo

Die Reduzierung reibungsbedingter Verluste im Verbrennungsmotor und mittelfristig in weiteren Anwendungsbereichen leistet einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneinsparung und Reduktion von CO₂-Emissionen bei Autos. Im Rahmen von TriboMan werden Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Prozesse entwickelt, die Reibung und Verschleiß dauerhaft durch die fertigungsintegrierte Vorwegnahme des Einlaufprozesses und die gezielte Bildung nanoskaliger Randschichten während der Präzisionsbearbeitung von Motorenkomponenten reduzieren. Darüber hinaus werden Strukturierungs- und Beschichtungsverfahren zur Einstellung der Mikrostruktur von Oberflächen der Tribopartner entwickelt. Die Einsatzmöglichkeiten der Verfahren werden in einer strukturierten Wissensbasis zusammengeführt.

Prof. Dr. Matthias Scherge

Herstellung bio-inspirierter Versorgungssysteme für Transplantate mittels Rapid Prototyping über Inkjet-Druck und Multiphotonenpolymerisation (BioRap), MaVo

In »BioRap« entwickeln die Expertinnen und Experten ein Verfahren zur Herstellung bio-inspirierter Versorgungsstrukturen für Transplantate auf Basis neuartiger Rapid-Prototyping-Verfahrenstechniken. Das Projekt umfasst die Entwicklung neuartiger biokompatibler Ausgangsmaterialien für die generativen Fertigungstechniken, die Technologieentwicklung zur Fertigung eines Blutgefäßsystems sowie die Biofunktionalisierung des Gefäßsystems für dessen optimale zelluläre Besiedlung. Das Fraunhofer IWM arbeitet an der (fluid-)mechanischen Auslegung und Prüfung der Gefäßstrukturen mit einer Kombination aus Simulation und Experiment.

Dr. Raimund Jaeger

Im Rahmen des Pakts für Forschung und Innovation wird die Grundlagenforschung der Max-Planck-Gesellschaft durch die anwendungsorientierte Forschung der Fraunhofer-Gesellschaft in die wirtschaftliche Nutzung überführt.

Dem Stahl auf seinen kristallinen Grund gehen

Um genauere Simulationsmodelle für moderne Leichtmetalle (wie TRIP- und TWIP-Stähle) zu entwickeln, muss ihr Verhalten bis zu den einzelnen Kristalliten verstanden werden. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung und des Fraunhofer IWM in Freiburg entwickeln Multiskalenmodelle, mit denen sie voraussagen können, warum ein einziges metallisches Bauteil an verschiedenen Stellen völlig unterschiedliches Materialverhalten zeigt. Zudem erforschen sie, wie der Herstellungsprozess gezielt gesteuert werden kann. Der Bedarf an solchen Modellen ist groß in der Mikrosystemtechnik, dem Automobilsektor oder der Elektrotechnik.

Prof. Dr. Hermann Riedel

NanoSTRESS messbar machen

Im Projekt NanoSTRESS kooperieren das Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik und das Fraunhofer IWM, um die Wirkung von Materialverspannungen auf die Funktionalität nanostrukturierter Halbleiterkomponenten zu untersuchen. Um geeignete Messverfahren zur Deformations- und Spannungsanalyse mit hoher Ortsauflösung bereitzustellen, werden neue Möglichkeiten durch Elektronenstrahlbeugung in Kombination mit nanometergenauer Zielpräparation durch fokussierende Ionenstrahltechnik entwickelt. Die Wirkung der Nanostrukturierung auf den Spannungszustand dünner Halbleiterschichten konnte mittels Finite-Elemente-Simulation in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen modelliert werden. Dadurch kann die technische Prozessierung von lokal verspannten Halbleiterbasismaterialien mit verbesserten elektronischen Eigenschaften durch ein werkstoffmechanisches »Stress-Engineering« unterstützt werden.

Prof. Dr. Matthias Petzold

PERSONEN, EREIGNISSE, AUSBILDUNG

Preise und Ehrungen

Werkstoffmechanikpreis 2009 der Plansee Group an A. Wonisch für seine Doktorarbeit »Entwicklung und Anwendung partikelbasierter Simulationsverfahren für die Modellierung von Umordnungseffekten und Anisotropieentwicklung in pulvertchnologischen Prozessen«

Best Paper Award der Zeitschrift Steel Research für A. Prakash, T. Hochrainer, E. Reisacher und H. Riedel für den Beitrag »Twinning models in self-consistent texture simulations of TWIP steels«

Best Paper Award of Session of IMAPS beim 42ten Internationalen Symposium für Mikroelektronik in San Jose, für den Beitrag »Room temperature wedge-wedge ultrasonic bonding using aluminum coated copper wire« von M. Petzold, R. Klengel, R. Dohle, H. Schulze, F. Rudolf

Second Price for Best Poster beim 20ten Micromechanics Europe Workshop, Toulouse, für das Poster »Characterization of reactive nano scale multilayer foils for microsystem applications« von B. Boettge, N. Teuscher, J. Schischka, M. Krause, S. Richter, A. Heilmann, M. Petzold, J. Bagdahn

Gäste im Institut Freiburg

Abdel-Hady, Bothaina
National Research Center Cairo
01.07.09-17.07.09

Abdel-Nabi, Nada Ali
German University Cairo
11.05.09-15.07.09

Abdel-Razek, Tawheed Hashem
Al-Azhar German University Cairo
01.07.09-31.10.09

Canteli, Alfonso
University of Oviedo
01.03.09-30.11.09

Colombi-Ciacchi, Lucio
Universität Bremen
01.10.08-31.12.09

Dietrich, Mathias
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal
01.05.08-30.04.11

Falkinger, Georg
Voestalpine AG
01.10.07-30.09.09

Gurr, Matthias
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
01.04.06-31.03.09

Kadkhodapour, Javad
Isfahan University of Technology
15.04.09-14.10.09

Katzarov, Ivaylo
Queen's University Belfast
08.06.09-04.07.09

Mößner, Philipp
Daimler AG
01.07.09-31.12.09

Pashov, Dimitar
Queen's University Belfast
08.06.09-04.07.09

Paxton, Tony
Queen's University Belfast
01.10.08-30.09.11

Rapoport, Lev
Holon Institute of Technology
01.09.09-31.08.11

Walter, Michael
Freiburger Materialforschungszentrum
01.07.08-30.06.11

Zhang, Xianfeng
University Jinagsu
01.03.09-28.02.10

Zheng, Li
Chinese Academy of Science (CAS)
20.11.08-14.11.09

Gäste im Institut Halle

Miclea, Manuela
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
01.05.09-31.12.10

Paßlick, Christian
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
25.06.08-30.09.11

Pfau, Charlotte
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
01.08.09-31.07.11

Dissertationen

Bierwisch, Claas
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Simulation granularer Medien

Hug, Mario
Universität Karlsruhe (TH)
Experimentelle Untersuchungen und Modellierung von Heißformgebungsprozessen mit kurzen Prozesszeiten für die Herstellung von Komponenten mit optischen Oberflächen und geometrisch hoch präzise definierten Referenzflächen. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum nicht-isothermen Heißprägen optischer Komponenten aus Glas

Rodriguez Ripoll, Manel
Universität Karlsruhe (TH)
Master thesis: Low noise A/D conversion of the »VATAGP3« analog output for a compton camera. Drawing of tungsten wires: microstructure, mechanical properties and longitudinal cracks

Sommer, Silke
Universität Karlsruhe (TH)
Modellierung des Verformungs- und Versagenverhaltens von Punktschweißungen unter Crash-Belastung

Wonisch, Andreas
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Numerische Beschreibung der Dynamik granularer Medien. Entwicklung und Anwendung partikelbasierter Simulationstechniken für die Modellierung von Umordnungseffekten und Anisotropieentwicklung in pulvertchnologischen Prozessen

Zimmermann, Janina
Universität Bremen
Atomistische Untersuchungen der Oxidation einer CoCrMo-Legierung sowie deren Bioaktivität und Biokompatibilität als Implantatmaterial

Studentische Arbeiten in Freiburg Bachelor (B), Master (M), Diplom (D)

Abdelnabi, Nada Ali
German University Kairo (GUC)
Investigation of specimen bulging under thermomechanical loading (B)

Bossoni do Amaral, Vinicius
University of Florianopolis
Entwicklung und Herstellung von BN(H)-Schichten mittels Plasma-CVD (D)

Burget, Sebastian
Universität Karlsruhe (TH)
Versagensmodellierung eines höherfesten Dualphasenstahls mit Berücksichtigung der Deformationsgeschichte und Mehrachsigkeit (D)

Fromm, Alexander
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Erforschung der Grenzflächen- und Temperaturdynamik beim Haften und Lösen polymerer Schmelzen (D)

Hörner, Martin
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Verschleiß von DLC-Schichten, Gedächtnisverhalten (D)

Klemenz, Andreas
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Verstärkung von Leichtmetallen mit Kohlenstoffnanoröhren (D)

Koens, Thomas
French Institute for Advanced Mechanics (Uni)
Microstructure bades process chain simulation of dual phase steels (D)

Kurrus, Florian
Hochschule Offenburg (FH)
Charakterisierung und Verifizierung von DLC-Schichtsystemen hinsichtlich ihres Piezoresistiven Verhaltens (D)

Maas, Peter
RWTH Aachen
Materialmodelle zur Beschreibung der duktilen Schädigung beim Warmwalzen von Nickellegierungen (D)

Metzger, Mario
Universität Stuttgart
Improved implementation of an algorithm for nonlinear isotropic/kinematic hardening in pressure-dependent elastoplasticity (M)

Moser, Stefan
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Molekulardynamische Modellierung der Deposition und des tribologischen Einlaufs von trockenen und geschmierten amorphen Kohlenwasserstoffschichten (D)

Nieweg, Britta
Hochschule Offenburg (FH)
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Risswachstum unter LCF-Bedingungen mit überlagerter HCF-Belastung (D)

Rüd, Sophie
Universität Stuttgart
Modellierung des Versagens von Schweißpunkten in ultrahochfesten Stählen (D)

Studentische Arbeiten in Halle Bachelor (B), Master (M), Diplom (D)

Abdelhadi, Niel-Sliem
Hochschule Merseburg (FH)
Untersuchung der Ermüdungseigenschaften von Solarzellenverbindern (B)

von Au, Kai Alexander
Hochschule Merseburg (FH)
Evaluierung eines optimalen Probenaufbaus im Rahmen der Entwicklung eines Korrosionsschnelltests (B)

Becker, Stefanie
Hochschule Anhalt (FH)
Bewertung der Reinigungsleistung von kommerziell erhältlichen Zahnpasten an Dentalmaterialien (B)

Bertram, Steve
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Einsatz nanoporöser Aluminiumoxidmembranen zur Kultivierung adhärenter Zellen (D)

Borek, Stephan
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Hydrodynamik in Kapillarmembranen (D)

PERSONEN, EREIGNISSE, AUSBILDUNG

Bormann, Therese Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Entwicklung, Aufbau und Test eines Modellsystems zur standardisierten Bewertung des Dentin-Tubuli-Verschlusses nach Aufbürsten partikelhaltiger Zahnpflegemittel (D)	Mittag, Marcel Hochschule Merseburg (FH) Ermittlung von zeit- und temperaturabhängigen Werkstoffkennwerten aus Kurzzeitbiegekriechversuchen mit zyklischer Entlastung am Molding Compound »Sumitomo EME G710K« (D)	Willmann, Thomas Hochschule Merseburg (FH) Konstruktion einer Apparatur für die Präparation von mikroelektronischen Bauelementen für die Mikro-CT-Untersuchung (B)	Technische Mechanik III – Dynamik Prof. Dr. Thomas Seelig Universität Karlsruhe (TH)
Brandt, Diana Hochschule Anhalt (FH) Chemische und permeable Eigenschaften von freitragenden und mechanisch-stabilisierten nanoporösen Aluminiumoxidmembranen (B)	Müller, Steffen Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Struktur-Eigenschaftsbeziehungen vinylacetat- und silikonbasierter Verkapselungsmaterialien für Solarmodule (D)	Vorlesungen WS 2008/2009 Theorie der atomistischen und elektronischen Struktur von Materialgrenzflächen Prof. Dr. Christian Elsässer Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Einführung in die Kontinuumsmechanik Prof. Dr. Thomas Seelig Universität Karlsruhe (TH)
Busch, Michael Hochschule Harz Automatisierung eines Prüfstandes zum Test des Kontaktverhaltens von Probeelementen auf Halbleiter-Wafern (B)	Obier, Daniel Hochschule Merseburg (FH) Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung von Kapillarmembranen für die funktionelle Nassbeschichtung von zylindrischen Formkörpern (D)	Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen: Verformung und Bruch Prof. Dr. Peter Gumbsch Universität Karlsruhe (TH)	Rheologie Prof. Dr. Thomas Seelig Universität Karlsruhe (TH)
Dauterstedt, Sebastian Friedrich-Schiller-Universität Jena Herstellung und Charakterisierung haftoptimierter und antimikrobiell wirksamer biokeramischer Dünnschichten aus hydroxylapatit durch RF-Magnetron-Sputtern (D)	Rehfeld, Sven Hochschule Merseburg (FH) Adaptierung einer miniaturisierten Biegevorrichtung zur Bestimmung von Spannungszuständen mittels Elektronenrückstreubeugung in einem Rasterelektronenmikroskop (D)	Atomistische Simulation und Molekulardynamik Prof. Dr. Peter Gumbsch Universität Karlsruhe (TH)	Halbleitertechnologie und Siliziumchemie Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Diaz Borbón, Viviana Patricia Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Fabrication and characterization of silk based scaffolds for Tissue Engineering (M)	Rischpeter, Verena Hochschule Anhalt (FH) Bestimmung von niedermolekularen Komponenten in Zellkulturmedien (B)	Größeneffekte in mikro- und nanostrukturierten Materialien Prof. Dr. Peter Gumbsch Universität Karlsruhe (TH)	SS 2009 Theorie der Spektroskopie von Elektronen in Festkörpern Prof. Dr. Christian Elsässer Universität Freiburg
Fischer, Carola Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Mechanische und mikroanalytische Untersuchung von Sägedrähten für die Siliziumwaferfertigung (D)	Schulz, André Hochschule Merseburg (FH) Untersuchung zur Verbesserung der Verklebbarkeit von Polypropylen- und Metallteilen durch Vorbehandlung ihrer Oberfläche (B)	Sensor- und Aktortechnik Prof. Dr. Andreas Heilmann Hochschule Anhalt (FH), Köthen	Physik für Ingenieure Prof. Dr. Peter Gumbsch Universität Karlsruhe (TH)
Gorgas, Robert Hochschule Merseburg (FH) Entwicklung eines Galvanikprozesses für die metallische Verstärkung von MEMS-Mikroreifern aus Polysilizium (B)	Schwarz, Henri Hochschule Merseburg (FH) Entwicklung einer halbautomatischen Präparationsroutine zum schichtweisen Abtrag von IC-Strukturen (B)	Microsystemstechnology Prof. Dr. Andreas Heilmann Hochschule Anhalt (FH), Köthen	Werkstoffmechanik: aktuelle Themen Prof. Dr. Peter Gumbsch Universität Karlsruhe (TH)
Herold, Rolf Hochschule Merseburg (FH) Elektrische Charakterisierung von Lasergefeuerten Kontakten auf Solarzellen mittels Lock-in-Thermografie (B)	Spindler, Christian Hochschule Merseburg (FH) Konzeptionelle Auslegung einer Verformungseinrichtung für mechanische In-situ-Experimente unter Röntgenbestrahlung (B)	Prozesssimulation in der Umformtechnik Dr. Dirk Helm Universität Karlsruhe (TH)	Surface Science Prof. Dr. Andreas Heilmann Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Ladisch, Stefan Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK) Automatisierung einer bildanalytischen Risslängenbestimmung zur Auswertung bruchmechanischer Versuche (M)	Sprick, Stefan Hochschule Merseburg (FH) Untersuchung einer Java EE-basierten E-Learning-Plattform zum Ziele der Optimierung hinsichtlich Anforderungen der Mitarbeiterschulung im Qualitätsmanagement sowie prototypische Realisierung ausgewählter Verbesserungsvorschläge (B)	Mechanik der Verbundwerkstoffe Priv.-Doz. Dr. Jörg Hohe Universität Siegen	Computergestützte Materialphysik II: Multiskalensimulation Prof. Dr. Michael Moseler Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Mann, Sabrina Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Mechanische Eigenschaften und Biokompatibilität von Schichten und Membranen aus Seidenfibrinen (D)	Städte, Mario Hochschule Mittweida (FH) Mechanische Charakterisierung und Zuverlässigkeit von Passivierungsschichten der SiP-Technologie (D)	Computerassistierte Materialphysik I: Dichtefunktional-Theorie Prof. Dr. Michael Moseler Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Auslegung, Zuverlässigkeit und Diagnostik von Mikrosystemen Prof. Dr. Matthias Petzold, Frank Altmann Hochschule Merseburg (FH)
		Einführung in die Mikrosystemtechnik Prof. Dr. Matthias Petzold, Frank Altmann Fachhochschule Merseburg	Fertigungsverfahren und deren numerische Beschreibung (Ringvorlesung) Prof. Dr. Hermann Riedel, Dr. Dirk Helm, u.a. Universität Karlsruhe (TH)
		Bruchmechanismen Prof. Dr. Hermann Riedel Universität Karlsruhe (TH)	Tribologie A Prof. Dr. Matthias Scherge Universität Ilmenau (TU)
		Tribologie A Prof. Dr. Matthias Scherge, Dr. Martin Dienwiebel Universität Karlsruhe (TH)	Tribologie B Prof. Dr. Matthias Scherge Universität Karlsruhe (TH)
		Tribologie Prof. Dr. Matthias Scherge Universität Ilmenau (TU)	Ausbildungsveranstaltung »Fit für die Solarindustrie« Priv.-Doz. Dr. Stefan Schweizer, Frank Altmann IHK Bildungszentrum Halle-Dessau GmbH
		Medizinische Physik und Technik Priv.-Doz. Dr. Stefan Schweizer Hochschule Merseburg	Medizinische Physik und Technik Priv.-Doz. Dr. Stefan Schweizer Universität Paderborn

PERSONEN, EREIGNISSE, AUSBILDUNG

Vom Fraunhofer IWM organisierte Veranstaltungen

Reibungsverringerung in Antrieben
12.-13.02.09, Freiburg

Understanding Friction and Wear
Processes, Heraeus-Seminar
23.-25.03.09, Bad Honnef

Fokussierende Ionenstrahltechnik
29.-30.06.09, Halle (Saale)

Keramik für die Walztechnik
28.-29.07.09, Neuwied

Naturstoffbasierte regenerative
Materialien im Bauwesen
23.10.09, Halle (Saale)

Bio meets Nano and IT
24.11.09, Halle (Saale)

Fraunhofer-Talent-School 2009
13.-15.11.09, Halle (Saale)

Messen mit Fraunhofer IWM-Beteiligung

Z-Messe
24.-27.02.09, Leipzig

JEC Composites
24.-26.03.09, Paris

Hannover Messe Industrie
20.-24.04.09, Hannover

PVSEC
21.-25.09.09, Hamburg

Ceramitec
20.-23.10.09, München

Composites Europe
25.-31.10.09, Stuttgart

Euromold
02.-05.12.09, Frankfurt

Erteilte Patente 2009

Grosse, Ch.; Altmann, F.;
Simon, M.; Riemer, D.;
Hoffmeister, H.
Herstellung eines Mikrogreifers
mittels eines Materialabscheide-
verfahrens
Erteilung: 07.10.09
Patent-Nr. EP 2 024 141 B1

Heilmann, A.; Teuscher, N.;
Gumbsch, P.
Nanoporöse Filter- oder Träger-
membran sowie Verfahren zur
Herstellung
Erteilung: 25.02.09
Patent-Nr. DE 10 349 471 A1

Meier, S.
Vorrichtung und Verfahren zur
Plasmabehandlung von Objekten
Erteilung: 07.01.09
Patent-Nr. EP 1 935 004 B1

Zeller, R.; Veneziano, C.
Vorrichtung und Verfahren
zum Bruchtrennen von Pleueln
Erteilung: 07.01.09
Patent-Nr. EP 1 839 790 B1

Ausgründungen

SmartMembranes GmbH

MITARBEIT IN GREMIEN, AUSSCHÜSSEN, BERATERTÄTIGKEITEN

Alexander von Humboldt-Stiftung AvH

Auswahlausschuss Alexander von Humboldt-Professur: P. Gumbsch,
D. Siegele

American Society for Testing and Materials

Committee E08 on Fracture Testing of Metals: D. Siegele

Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik AWT

FA Härteprüfung: T. Seifert, M. Tandler, L. Reissig
FA Eigenspannungen: W. Pfeiffer, E. Reisacher, J. Wenzel
FA Strangpressen: L. Reissig
AK Forschung: L. Reissig
AK Leichtmetall: L. Reissig
Härterei- und Werkstoffkreis, Ortenau-Schwarzwald-Oberrhein-Elsass:
L. Reissig

Arbeitsgemeinschaft wirtschaftsnaher Forschungseinrichtungen des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg

AK Europäische Union: C. Elsässer

Arbeitskreis Innovationsrat »Mobilität und Umwelt«

P. Gumbsch

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM

Mitglied im Beirat Werkstoffe und technische Systeme: P. Gumbsch

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina

Mitglied der Sektion Technikwissenschaften

P. Gumbsch

Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, Fachkollegium 405 Werkstofftechnik

gewähltes Mitglied: P. Gumbsch

Deutsche Gesellschaft für Biomaterialien

R. Jaeger, C. Koplin, R. Schäfer, B. Thielicke, A. Heilmann

Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Techniken und Biotechnologie DECHEMA

Fachausschuss Bauteilverhalten unter mechanischer Beanspruchung:
J. Hohe, M. Busch
Molecular Modelling in der Prozesstechnik: C. Elsässer

Deutsche Gesellschaft für Elektronenmikroskopie DGE

AK Elektronenoptische Direktabbildung und Analyse von Oberflächen
(EDO): R. Zeller, M. Fütting
Dreiländer-Arbeitskreis FIB: F. Altmann

Deutsche Gesellschaft für Materialkunde DGM

FA Biomaterialien: A. Heilmann, U. Spohn, A. Kiesow
FA Magnesium: M. Luke, N. Winzer
FA Mechanische Oberflächenbehandlung: W. Pfeiffer
FA Materialkundliche Aspekte der Tribologie und der Zerspanung:
T. Hollstein, A. Kailer
FA Stangenpressen: L. Reissig
FA Texturen: T. Hochrainer
FA Computersimulation: D. Helm
AK Metal Matrix Composite: A. Neubrand

Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung

R. Jaeger

Deutsche Glastechnische Gesellschaft DGG

AA Glasforum: G. Kleer
FA I, Physik und Chemie des Glases und der Glasrohstoffe: P. Manns,
W. Döll
FA IV, Glasmaaschinenteknik und Formgebung: P. Manns

Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG)

FG Dünne Schichten: A. Heilmann
FG Oberflächen: F. Burmeister
AG Metall- und Materialphysik im AK Festkörperphysik: C. Elsässer

Deutscher Stahlbauverband, DSTV

AG Stahl und Glas: G. Kleer

Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung DVM

AK Bruchvorgänge: W. Böhme, M. Luke
AK Mikrosystemtechnik: M. Petzold, C. Dresbach
AK Verformungs- und Versagensverhalten bei komplexer thermisch-
mechanischer Beanspruchung: T. Seifert
AK Zuverlässigkeit mechatronischer und adaptiver Systeme: M. Gall

Deutscher Verband für Schweißtechnik DVS

AG Drahtbonden: M. Petzold, R. Klengel
AG Waferbonden: J. Bagdahn
FA9 Konstruktion und Berechnung: D. Siegele, M. Brand, M. Luke
FA10 Mikroverbindungstechnik: M. Petzold
FA1 Metallurgie und Werkstofftechnik: S. Oeser, W. Pfeiffer
FA12 Anwendungsnahe Schweißsimulation: M. Brand, M. Luke, W. Pfeiffer,
F. Schweizer

DIN-Ausschüsse

DIN-Normenausschuss 291 Prüfung von Hochleistungskeramik:
C. von der Wehd
DIN-Normenausschuss Dental: R. Schäfer
DIN-Normenausschuss NMP 144, Prüfverfahren mit schlagartiger Beanspru-
chung: W. Böhme

Europäische Fördergemeinschaft Dünne Schichten EFDS

W. Pfeiffer

European Fitness for Service Network FITNET

I. Varfolomeev

European Society for Artificial Organs (ESAO)

A. Heilmann

European Society for Biomaterials

R. Jaeger, C. Koplin, R. Schäfer, B. Thielicke

European Society of Biomechanics

R. Schäfer

European Structural Integrity Society ESIS

Technical Committee 4, Polymers and Composites: W. Böhme
Technical Committee 5, Dynamic Testing at intermediate Strain Rates:
W. Böhme
Technical Committee 6, Ceramic Materials: T. Hollstein
Technical Committee 8, Numerical Methods: T. Seifert
Technical Committee 24, Integrity of Railway Structures: M. Luke

Fördergemeinschaft für Polymerentwicklung und Kunststofftechnik in Mitteldeutschland (Polykum e.V.)

M. Busch

Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. FKM

AK Bauteilfestigkeit: D. Siegele, M. Luke

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. FAT

AK 27 Simulation, UA Crash & Insassensim., FV4 »Modellierung linienfö-
rmiger Verbindungen«: S. Sommer, D.-Z. Sun
AK 27 Simulation, UA Crash & Insassensim., AG »Simulation Kunststoffe«:
D.-Z. Sun

Fraunhofer-Allianz Adaptronik

B. Thielicke

Fraunhofer-Allianz Bau

R. Wehrspohn, A. Heilmann

Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

M. Moseler, A. Heilmann

Fraunhofer-Allianz Optisch-funktionale Oberflächen

P. Manns

Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung

R. Jaeger

Fraunhofer-Gesellschaft, Wissenschaftlich Technischer Rat WTR

P. Gumbsch, R. Kübler

Fraunhofer-Themenverbund Energie

J. Bagdahn

MITARBEIT IN GREMIEN, AUSSCHÜSSEN, BERATERTÄTIGKEITEN

Fraunhofer-Themenverbund Hochleistungskeramik

A. Kailer
Mitglied Lenkungskreis: P. Gumbsch

Fraunhofer-Allianz Numerische Simulation NuSim

D. Helm
Vorsitzender Lenkungskreis: P. Gumbsch

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile

P. Gumbsch, R. Wehrspohn

Freiburger Materialforschungszentrum (FMF)

Kuratorium: P. Gumbsch
Mitglied: M. Moseler, C. Elsässer

Gemeinschaftsausschüsse

Materialermüdung (DGM, DVM): T. Seifert
Plasma-Oberflächentechnologie (DVS, VDI, DGM, DGO, AWT, DAV):
S. Meier
Pulvermetallurgie (DGM, VDEh, DKG, VDI-W, FPM): T. Kraft
Verstärkung keramischer Werkstoffe (DKG, DGM): B. Thielicke

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit

Projektkomitee Komponentenverhalten: P. Gumbsch

Gesellschaft für Experimentelle Spannungsanalyse GESA

AG Experimentelle Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen:
W. Pfeiffer

Gesellschaft für Tribologie GFT

A. Kailer, M. Scherge

Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM)

FA Werkstoffe und Fertigungsverfahren in der Mikrosystemtechnik und
Nanotechnologie: R. Gerbach
FA Aufbau- und Verbindungstechnik: S. Bennemann

Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik GFal

FA Angewandte Informatik zur Fügetechnik: F. Schweizer, A. Krombolz

Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG)

FG Fehlerlokalisierung in elektronischen Bauelementen: F. Altmann
FG Fehleranalysestrategien: F. Altmann

Innovationsrat Baden-Württemberg BW 2025

Mitglied der Arbeitsgruppe I »BW 2025: Wirtschaft, Gesellschaft und
industrieller Wandel«: P. Gumbsch

Instituto Madrilenio de Estudios Avanzados, IMDEA Materiales

Board of Trustees and Scientific Board: P. Gumbsch

Interdisciplinary Centre for Advanced Materials Simulation ICAMS, Ruhr Universität Bochum

Mitglied der Gründungskommission und des Scientific and Advisory Board:
P. Gumbsch

Interdisziplinäres Zentrum für Materialwissenschaften Halle

Beirat: R. Wehrspohn

International Institute of Welding

IIW Com. X, Structural Integrity and Failure Avoidance: D. Siegele
IIW Subcommission II-A AG A 4.1 »Wasserstoffinduzierte Rissbildung«:
F. Schweizer

International Conference on the Strength of Materials ICSMA

Mitglied im internationalen wissenschaftlichen Ausschuss: P. Gumbsch

International Standard Organization ISO

TC 106/SC8/WG4 Mechanical Testing of Dental Implants: R. Schäfer

Kompetenznetzwerk Adaptionik

B. Thielicke

Kunststoff Kompetenzzentrum Merseburg

Beirat: R. Wehrspohn

Leibniz-Gemeinschaft

Stellvertretendes Mitglied im Senatausschuss Wettbewerb der Leibniz-
Gemeinschaft für die Institute der Sektion D: P. Gumbsch

Mikrosystemtechnik Baden-Württemberg e.V. – MST BW

G. Kleer

Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen NMI

Kurator: P. Gumbsch

Network for Evaluating Steel Components NESC

TG3 Structural Analysis: D. Siegele

Österreichische Akademie der Wissenschaften ÖAW – Erich-Schmid- Institut für Materialwissenschaft

Scientific Advisory Board: P. Gumbsch

Polykum e.V.

R. Wehrspohn, Vorsitzender: M. Busch

Science2public e.V. - Gesellschaft für Wissenschaftskommunikation

P. Gumbsch, Vorstand: R. Wehrspohn

Stiftung SYN – Kunst-Design-Wissenschaft

Kuratoriumsvorsitzender: R. Wehrspohn

Verein Deutscher Eisenhüttenleute VDEh e.V.

AG Prüftechnik: W. Böhme
AK Hochgeschwindigkeitsversuche: W. Böhme
W14 – Kriechriss: P. von Hartrott

VGB Power Tech e.V.

FA Werkstoffe und Qualitätssicherung: P. von Hartrott

Zentrums für Innovationskompetenz Sili-nano Halle

Sprecher: R. Wehrspohn

Zukunftsstiftung des Landes Sachsen-Anhalt

R. Wehrspohn

Zeitschriften, Editorial Boards

Advanced Engineering Materials: H. Riedel, P. Gumbsch

Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering MSME:
P. Gumbsch

International Journal of Materials Research (vormals Zeitschrift für Metall-
kunde): P. Gumbsch

Acta Materialica Sinica: P. Gumbsch

International Journal of Fracture: P. Gumbsch

Applied Physics A: R. Wehrspohn

Photonics and Nanostructures: R. Wehrspohn

Verbände

Central European Chemical Network (CeChemNet): R. Wehrspohn

Cluster Mitteldeutschland Chemie/Kunststoffe: R. Wehrspohn

Forschung und Entwicklung Kunststofftechnik (FEKM): R. Wehrspohn

Solarvalley Mitteldeutschland: R. Wehrspohn, J. Bagdahn

Solarvalley Sachsenanhalt e.V.: Vorsitzender J. Bagdahn

wvib – Wirtschaftsverband Industrieller Unternehmen Baden:
T. Hollstein; R. Jaeger; T. Götz

Stiftungsrat der Kunststiftung des Landes Sachsen-Anhalt

D. Katzer

- Ahrens, B.; Löper, P.; Goldschmidt, J.-C.; Glunz, S.; Henke, B.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.
Neodymium-doped fluorochlorozirconate glasses as an upconversion model system for high efficiency solar cells
Physica Status Solidi (a) 205 (2008) 2822-30; M 140/2008
- Ahrens, B.; Miclea, P. T.; Schweizer, S.
Upconverted fluorescence in Nd³⁺-doped barium chloride single crystals
Journal of Physics: Condensed Matter 21 (2009) 125501; M 78/2009
- Bäurer, M.; Weygand, D.; Gumbsch, P.; Hoffmann, M. J.
Grain growth anomaly in strontium titanate
Scripta Materialia 61 (2009) 584-587; M 81/2009
- Bakó, B.; Samaras, B.; Weygand, D.; Chen, J.; Gumbsch, P.; Hoffelner, W.
The influence of helium bubbles on the critical resolved shear stress of dispersion strengthened alloys
Journal of Nuclear Materials 386-388 (2009) 112-114; M 21/2009
- Bierwisch, C.; Kraft, T.; Riedel, H.; Moseler, M.
Three-dimensional discrete element models for the granular statics and dynamics of powders in cavity filling
Journal of the Mechanics and Physics of Solids 57 (2009) 10-31; M 147/2009
- Bierwisch, C.; Kraft, T.; Riedel, H.; Moseler, M.
Die filling optimization using three-dimensional discrete element modeling
Powder Technology 196 (2009) 169-179; M 146/2009
- Bitzek, E.; Gumbsch, P.
Atomistic simulations of dislocation – crack interaction
Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering 2 (2008) 1348-1359; M 83/2009
- Boroch, R.; Müller-Fiedler, R.; Bagdahn, J.; Gumbsch, P.
High-cycle fatigue and strengthening in polycrystalline silicon
Scripta Materialia 59 (2008) 936-940; M 82/2008
- Demiray, S.; Becker, W.; Hohe, J.
Investigation of the fatigue behavior of open cell foams by a micromechanical 3-D-model
Materials Science and Engineering A 504 (2009) 141-149; M 60/2009
- Derlet, P.M.; Gumbsch, P.; Hoagland, R.; Li, J.; McDowell, D. L.; Van Swygenhoven, H.; Wang, J.;
Atomistic simulations of dislocations in confined volumes
MRS Bulletin 34 (2009) 184-189; M 16/2009
- Dudarev, S. L.; Boutard, J.-L.; Lässer, R.; Caturla, M. J.; Derlet, P. M.; Fivel, M.; Fu, C.-C.; Lavrentiev, M. Y.; Malerba, L.; Mrovec, M.; Dguyen-Manh, D.; Nordlund, K.; Perlado, M.; Schäublin, R.; van Swygenhoven, H.; Terentyev, D.; Wallenius, J.; Weygand, D.; Willaime, F.
The EU Programme for modelling radiation effects in fusion reactor materials: An overview of recent advances and future goals
Journal of Nuclear Materials 386-388 (2009) 1-7; M 39/2009
- Eisenlohr, P.; Tjahjanto, D. D.; Hochrainer, T.; Roters, F.; Raabe, D.
Comparison of texture evolution in fcc metals predicted by various grain cluster homogenization schemes
International Journal of Materials Research 100 (2009) 500-509; M 28/2009
- Gall, M.; Thielicke, B.; Schmidt, I.
Integrity of piezoceramic patch transducers under cyclic loading at different temperatures
Smart Materials and Structures 18 (2009) 104009; M 35/2009
- Hardenacke, V.; Hohe, J.
Local stochastic analysis of the effective material response of disordered two-dimensional model foams
PAMM, Special Issue: 6th International Congress on Industrial Applied Mathematics and GAMM Annual Meeting 7 (2007) 4080001-4080002; M 57/2009
- Hardenacke, V.; Hohe, J.
Local probabilistic homogenization of two-dimensional model foams accounting for micro structural disorder
International Journal of Solids and Structures 46 (2009) 989-1006; M 59/2009
- Henke, B.; Ahrens, B.; Miclea, P.-T.; Eisenschmidt, C.; Johnson, J. A.; Schweizer, S.
Erbium- and chlorine-doped fluorozirconate-based glasses for up-converted fluorescence
Journal of Non-Crystalline Solids 355 (2009) 1916-1918; M 38/2008
- Henrich, B.; Cupelli, C.; Santer, M.; Moseler, M.
Continuum concepts in nanoscale capillary impregnation
New Journal of Physics 10 (2008) 1367-2630; M 61/2009
- Hohe, J.; Hardenacke, V.
Numerisches Design zur effizienten Entwicklung neuer Werkstoffe
Chemie Ingenieur Technik 81 (2009) 1118; M 79/2009
- Hohe, J.; Hardenacke, V.
Numerical analysis of uncertainties in the effective material behavior of disordered structural foams
PAMM Special Issue: 6th International Congress on Industrial Applied Mathematics and GAMM Annual Meeting 7 (2007) 4080013-4080014; M 58/2009
- Hormann, C.; Meier S.; Moseler M.
The importance of non-local shadowing for the topography evolution of a-C:H films grown by toluene based plasma enhanced chemical vapor deposition
European Physical Journal B 69 (2009) 187-194; M 145/2009
- Jaeger, D.; Schischka, J.; Bagdahn, J.; Jaeger, R.
Tensile testing of individual ultrathin electrospun poly (L-lactic acid) fibers
Journal of Applied Polymer Science 114 (2009) 3774-3779; M 122/2009
- Johnson, J. A.; Weber, J. K. R.; Kolesnikov, A. I.; Schweizer, S.
Crystallization in heat-treated fluorochlorozirconate glasses
Journal of Physics: Condensed Matter 21 (2009) 375103; M 85/2009
- Koplin, C.; Jaeger, R.; Hahn, P.
A material model for internal stress of dental composites caused by the curing process
Dental Materials 25 (2009) 331-338; M 5/2009
- Küster, S.; Ludwig, N.; Willers, G.; Hoffmann, J.; Deising, H. B.; Kiesow, A.
Thin PTFE-like membranes allow characterizing germination and mechanical penetration competence of pathogenic fungi
Acta Biomaterialia 4 (2008) 1809-1818; M 73/2008
- Kuzmychov, O.; Koplin, C.; Jaeger, R.; Büchner, H.; Gopp, U.
Physical aging and the creep behavior of acrylic bone cements
Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials 91B (2009) 910-917; M 151/2009
- Lee, S.-M.; Pippel, E.; Gösele, U.; Dresbach, C.; Qin, Y.; Chandran, C.V.; Bräuniger, T.; Hause, G.; Knez, M.
Greatly increased toughness of infiltrated spider silk
Science 324 (2009) 488-492; M 153/2009
- Lee, S.-M.; Grass, G.; Kim, G.-M.; Dresbach, C.; Zhang, L.; Gösele, U.; Knez, M.
Low-temperature ZnO atomic layer deposition on biotemplates: Flexible photocatalytic ZnO structures from eggshell membranes
Physical Chemistry Chemical Physics PCCP 11 (2009) 3608-3614; M 154/2009
- Motz, C.; Weygand, D.; Senger, J.; Gumbsch, P.
Initial dislocation structures in 3-D discrete dislocation dynamics and their influence on microscale plasticity
Acta Materialia 57 (2009) 1744-1754; M 17/2009
- Moutanabbir, O.; Reiche, M.; Erfurth, W.; Naumann, F.; Petzold, M.; Gösele, U.
The complex evolution of strain during nanoscale patterning of 60 nm thick strained silicon layer directly on insulator
Applied Physics Letters 94 (2009) 243113; M 104/2009
- Mrovec, M.; Albina, J.-M.; Meyer, B.; Elsässer, Ch.
Schottky barriers at transition-metal/SrTiO₃(001) interfaces
Physical Review B 79 (2009) 245121/1-18; M 56/2009
- Nguyen-Manh, D.; Mrovec, M.; Fitzgerald, Sp.
Dislocation driven problems in atomistic modelling of materials
Materials Transactions 49 (2008) 2497-2506; M 135/2008

- Pastewka, L.; Salzer, R.; Graff, A.; Altmann, F.; Moseler, M.
Surface amorphization, sputter rate, and intrinsic stresses of silicon during low energy Ga⁺ focused-ion beam milling
 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 267 (2009) 3072-3075; M 130/2009
- Pastewka, L.; Koskinen, P.; Elsässer, C.; Moseler, M.
Understanding the microscopic processes that govern the charge-induced deformation of carbon nanotubes
 Physical Review B 80 (2009) 155428/1-15; M 51/2009
- Paxton, A. T.; Todorov, T. N.; Elena, A. M.
Ring currents in azulene
 Chemical Physics Letters 483 (2009) 154-158; M 157/2009
- Prakash, A.; Lebensohn, R. A.
Simulation of micromechanical behavior of polycrystals: finite elements versus fast fourier transforms
 Materials Science and Engineering 17 (2009) 1-16; M 114/2009
- Presser, V.; Nickel, K. G.; Krummhauer, O.; Kailer, A.
A model for wet silicon carbide tribo-corrosion
 Wear 267 (2009) 168-176; M 43/2009
- Presser, V.; Krummhauer, O.; Nickel, K. G.; Kailer, A.; Berthold, C.; Raisch, C.
Tribological and hydrothermal behavior of silicon carbide under water lubrication
 Wear 266 (2009) 771-781; M 44/2009
- Schwan, S.; Menzel, M.; Fritzsche, M.; Heilmann, A.; Spohn, U.
Micromechanical measurements on P-protein aggregates (forisomes) from vicia faba plants
 Biophysical Chemistry 139 (2009) 99-105; M 75/2009
- Schwan, S.; Ferrell, N.; Hansford, D.; Spohn, U.; Heilmann, A.
Measurement of mechanical forces generated by plant P-protein aggregates (forisomes)
 European Biophysics Journal 38 (2009) 533-536; M 76/2009
- Schwanke, D.; Pohlner, J.; Wonisch, A.; Kraft, T.; Geng, J.
Enhancement of fine line print resolution due to coating of screen fabrics
 Journal of Microelectronics and Electronic Packaging 6 (2009) 13-19; M 115/2009
- Seifert, T.; Schmidt, I.
Plastic yielding in cyclically loaded porous materials
 International Journal of Plasticity 25 (2009) 2435-2453; M 149/2009
- Šiška, F.; Weygand, D.; Forest, S.; Gumbsch, P.
Comparison of mechanical behavior of thin film simulated by discrete dislocation dynamics and continuum crystal plasticity
 Computational Materials Science 45 (2009) 793-799; M 20/2009
- Sommer, S.; Andrieux, F.; Memhard, D.; Sun, D.-Z.
Versagensmodellierung von Punktschweiß- und Klebverbindungen unter Crashbelastung
 MP Materialprüfung 51 (2009) 13-21; M 50/2008
- Voigt, F.; Krohs, F.; Gerbach, R.
Flexural-torsional resonance mode of a chip cantilever system: applications to nanomachining
 Journal of Vacuum Science and Technology B 27 (2009) 958-963; M 25/2009
- Weber, M.; Autenrieth, H.; Kotschenreuther, J.; Gumbsch, P.; Schulze, V.; Löhe, D.; Fleischer, J.
Influence of friction and process parameters on the specific cutting force and surface characteristics in micro cutting
 Machining Science and Technology 12 (2008) 474-497; M 32/2008
- Walter, M.; Moseler, M.
Ligand protected gold alloy clusters: doping the superatom
 Journal of Physical Chemistry C 113 (2009) 15834-15837; M 6/2009
- Wonisch, A.; Kraft, T.; Moseler, M.; Riedel, H.
Discrete element simulations of constrained ceramic powder sintering
 cfi 85 (2009) 18-23; M 8/2009
- Wonisch, A.; Kraft, T.; Moseler, M.; Riedel, H.
Effect of different particle size distributions on solid-state sintering: a microscopic simulation approach
 Journal American Ceramic Society 92 (2009) 1428-1434; M 92/2009
- Ziegler, T.; Neubrand, A.; Roy, S.; Wanner, A.; Piat, R.
Elastic constants of metal/ceramic composites with lamellar microstructures: finite element modelling and ultrasonic experiments
 Composites Science and Technology 69 (2009) 620-626; M 4/2009

Zeitschriften

Burmeister, F.; Hagen, J.

NanoSkin: Beständige Nanostrukturen im Visier
Kunststoffberater 9 (2009) 33-36; M 137/2009

Gebeshuber, I. C.; Drack, M.; Scherge M.

Tribology in biology
Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces 4 (2008) 200-212; M 27/2009

Gonser, F.; Kiesow, A.

**Kieferorthopädische Apparaturen und Knirscherschienen
schonend reinigen**
DZW Zahntechnik, Sonderdruck 1-2 (2009) 2-5; M 70/2009

Gutwinki, M.; Schäuble, R.

CFK-Schaum-Sandwich-Strukturen
Konstruktion 5 (2009) IW11-12; M 64/2009

Jaeger, R.

**Hauptkriterium für Dentalimplantate ist die mechanische
Belastbarkeit**
MM Das IndustrieMagazin 20 (2009) 70-72; M 29/2009

Oßwald, S.; Wüstenhagen, S.; Krombholz, A.

Design mit Holz-Polymer-Werkstoffen
Holz 2 (2009) 41-42; M 72/2009

Petzold, M.

**Elektronenoptische Untersuchungen der Bildung von CaF₂-
Fluoridreservoirs auf der Zahnoberfläche**
Zahnärztliche Nachrichten 18 (2008) 25-27; M 80/2008

Pfeiffer, W.

Neue Perspektiven für hoch belastete Hartchromschichten
Konstruktion 4 (2009) IW14-15; M 129/2009

Thielicke, B.; Grigo, M.; Dreißig, J.

**LFT-Kennwerte aus Zugversuchen – Round Robin Tests
zum Einfluss der Probengeometrie**
Konstruktion 10 (2009) IW1-3; M 66/2009

Weps, M.; Wüstenhagen, S.; Krombholz, A.

Konstruieren mit Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen
Konstruktion 10 (2009) IW6-7; M 112/2009

Buchbeiträge

Autenrieth, H.; Weber, M.; Schulze, V.; Gumbsch, P.

Investigation of process-specific size effects by 3-D-FE-simulations
in High Performance Computing in Science and Engineering
Nagel, W. E.; Kroner, D. B.; Resch, M. M. (Eds.)
Springer Verlag Berlin Heidelberg (2009) 543-558; M 18/2009

Gumbsch, P.; Götz, T.

Materials simulation
in Technology Guide
Bullinger, H. J. (Hrsg.)
Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2009) 56-59; M 82/2009

Weygand, D.; Senger, J.; Motz, C.; Augustin, W.; Heuveline, V.;
Gumbsch, P.

**High performance computing and discrete dislocation dynamics:
plasticity of micrometer sized specimens**
in High Performance Computing in Science and Engineering 2008
Nagel, W. E.; Kroner, D. B.; Resch, M. M. (Eds.), Springer Verlag Berlin
Heidelberg (2009) 507-523; M 19/2009

Altmann, F.; Simon, M.; Klengel, R.

Application of He ion microscopy for material analysis
in Proc. of Silicon Saxony Day; Postek, M. T.; Newbury, D. E.; Platek, S. F.;
Joy, D. C. (Eds.), SPIE, Bellingham, WA, USA (2009) 73780C-1-73780C-6;
M 36/2009

Andrieux, F.; Memhard, D.; Sun, D.-Z.

**Development and verification of a material model for adhesives
under crash loading**
in Proc. of the 15th International Symposium on Plasticity & Its Current
Applications; Khan, A. S.; Farrokh, B. (Eds.), NEAT Press, Fulton, MD, USA
(2009) CD-ROM; M 160/2009

Baier, T.; Baumann, H.; Bindig, R.; Gall, M.; Henke, Ph.; Latta, D.; Schmitz,
H.; Schreiner, H.-J.; Thielicke, B.

**Development of a peristaltic micro pump system – Technical
realization**
in Proc. of the Adaptronic Congress 2009; Adaptronic Congress Veranstal-
tungs GbR, Göttingen (2009) 179-183; M 34/2009

Bierwisch, C.; Lang, B.; Nebelung, M.; Kraft, T.

Simulation des Fließverhaltens von Pressgranulaten
in Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis; Kolaska, H. (Ed.), Heimdall
Verlag, Witten (2008) 119-135; M 86/2009

Berlet, P.; Dienwiebel, M.; Kehrwald, M.; Scherge, M.

**Eine neue Methode zur Verringerung von Reibung und Verschleiß
durch optimierte spanende Endbearbeitung**
in Tagungsband 50. Tribologie-Fachtagung; Gesellschaft für Tribologie e.V.,
Aachen (2009) 49/1-10; M 101/2009

Blug, B.; Hörner, M.; Meier, S.

Einfluss der Rauheit auf das Verschleißverhalten von DLC-Schichten
in Tagungsband 50. Tribologie-Fachtagung; Gesellschaft für Tribologie e.V.,
Aachen (2009) 53/1-12; M 111/2009

Boettge, B.; Teuscher, N.; Schischka, J.; Krause, M.; Richter, S.; Heilmann,
A.; Petzold, M.; Bagdahn, J.

**Characterization of reactive nano scale multilayer foils for microsyst-
em applications**
in Proc. of the 20th Micromechanics Europe Workshop; LAAS-CNRS,
Toulouse, Frankreich (2009) C13; M 168/2009

Boutry, H.; Brun, J.; Nowodzinski, A.; Sillon, N.; Depoutot, F.

**Reliability characterization and process optimization of Ni-based
microinsert interconnections for flip chip die on wafer attachment**
in Proc. of the 59th Electronic Components & Technology Conference
ECTC 2009; The Printing House, Inc., Stoughton, WI, USA (2009)
CD-ROM; M 105/2009

Chen, Z.; Mrovec, M.; Weygand, D.; Gumbsch, P.

**Atomistic modeling of the interaction between dislocation and
vacancy in tungsten**
in Proc. of the 4th International Conference on Multiscale Materials Mode-
ling MMM 2008; El-Azab, A. (Ed.), Florida State University (Department of
Scientific Computing Tallahassee) FL, USA (2008) 115-118; M 141/2009

Dresbach, D.; Mittag, M.; Petzold, M.; Milke, M.; Müller, T.

**Mechanical properties and microstructure of heavy aluminum
bonding wires for power applications**
in Proc. of the 17th European Microelectronics and Packaging Conference
& Exhibition EMPC 2009; iMAPS, Washington, DC, USA (2009) CD-ROM;
M 98/2009

Dresbach, C.; Lorenz, G.; Mittag, M.; Petzold, M.; Milke, E.; Müller, T.

**Local hardening behavior of free air balls and heat affected zones
of thermosonic wire bond interconnections**
in Proc. of the 17th European Microelectronics and Packaging Conference
& Exhibition EMPC 2009; iMAPS, Washington, DC, USA (2009) CD-ROM;
M 99/2009

Droß, G.; Blöcher, U.; Manns, P.; Kleer, G.; Hug, M.; Gremmlspacher, M.

Schnelles Heißprägeverfahren für mikrooptische Komponenten
in Tagungsband Moderne Optikfertigung; Optence e.V., Wörrstadt (2008)
www.optence.de/fastmold_optence_20080508_gd-iwm-s.pdf/download;
M 55/2009

- Faber, T.; Kohn, C.; Kübler, R.; Kleer, G.
Testing of surface strength of solar wafers by application of bending tests
 in Proc. of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibiton; WIP-Renewable Energies, München (2008) 1965-1969; M 49/2009
- Friedmann, V.; Siegele, D.
Damage behavior of nickel-based transition welds under cyclic thermomechanical loading
 in Proc. of the 2nd International ECCO Conference Creep and Fracture in High Temperature Components – Design and Life Assessment Shibli, I. A.; Holdsworth, S. A. (Eds.), DEStech Publications, Inc. Lancaster, PA, USA (2009) 515-527; M 3/2009
- Gall, M.; Baier, T.; Baumann, H.; Bindig, R.; Henke, Ph.; Latta, D.; Schmitz, H.; Schreiner, H.-J.; Thielicke, B.
Development of a peristaltic micro pump system – Conceptual design and optimization by simulation
 in Proc. of the Adaptronic Congress 2009; Adaptronic Congress Veranstaltungen GbR, Göttingen (2009) 169-177; M 22/2009
- Gall, M.; Thielicke, B.
Influence of cyclic loading and temperature on integrity of piezo-ceramic patch transducers
 in Proc. of SMASIS08, ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems; American Society Mechanical Engineers, New York, NY, USA (2008) 197-208; M 56/2008
- Gerbach, R.; Ebert, M.; Petzold, M.
Ermittlung von mechanischen Defekten in Mikrosystemen anhand dynamischer Messungen für die Produktionsüberwachung
 in Proc. of MikroSystemTechnik-Kongress 2009; VDE, Berlin (2009) 69-72; M 169/2009
- Gerbach, R.; Ebert, M.; Brokmann, G.; Hein, T.; Bagdahn, J.
Identification of mechanical defects in MEMS using dynamic measurements for application in the production monitoring
 in Proc. of Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS - DTIP 2009; Bourouina, T.; Courtois, B.; Ghodssi, R.; Karam, J. M.; Soma, A.; Yang, H. (Eds.), CMP, Grenoble, Frankreich (2009) 384-389; M 26/2009
- Gutwinski, M.; Schäuble, R.
The effect of thermal cyclic loading on CFRP foam core sandwich structures
 in Proc. of the 2nd International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading, Vol. II; Sonsino, C. M.; McKeighan, P. C. (Eds.), DVM, Berlin (2009) 815-821; M 23/2009
- Gutwinski, M.; Schäuble, R.
Einfluss von Temperaturwechseln auf die Struktureigenschaften von CFK-Schaum-Sandwichstrukturen
 Krenkel, W. (Ed.), WILEY-VCH, Weinheim (2009) 413-419; M 24/2009
- Hashibon, A.; Elsässer, Ch.; Gumbsch, P.
Structure and failure of fcc/bcc heterophase boundaries in metals
 in Proc. of the 17th Plansee Seminar 2009, International conference on High Performance P/M Materials Vol 3; Sigl, L. S.; Rödhammer, P.; Wildner, H. (Eds.), Plansee Group, Reutte, Austria (2009) WS4/1-10; M 62/2009
- Hardenacke, V.; Luckow, S.; Siegele, D.; Hohe, J.
Ein erweitertes Modell zur probabilistischen Sprödburhbewertung basierend auf lokalen Feldgrößen
 in Tagungsband 41. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, DVM-Bericht 241; Klingbeil, D. (Hrsg.), DVM, Berlin (2009) 89-98; M 161/2009
- Hartrott, P.; Holmström, S.
Lebensdauermodelle für den fortschrittlichen Stahl P23
 in Tagungsband 31. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für Warmfeste Stähle und der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2009) 27-36; M 46/2009
- Heinonen, J.; Schmidt, I.
An analysis of the stress state in a green part during ejection from the die
 in Proc. of the EuroPM 2009, Vol. 3; EPMA, Shrewsbury, UK (2009) 53-58; M 150/2009
- Hildenbrand, J.; Kürzinger, A.; Peter, C.; Moretton, E.; Wöllenstein, J.; Naumann, F.; Ebert, M.; Korvink, J.
Micromachined mid-infrared emitter for fast transient temperature operation for optical gas sensing systems
 in Proc. of the 7th IEEE Conference on Sensors; IEEE, Piscataway, NY, USA (2008) 297-300; M 127/2008
- Hildenbrand, J.; Peter, C.; Lamprecht, F.; Kürzinger, A.; Naumann, F.; Ebert, M.; Wehrspohn, R.; Wöllenstein, J.
Fast transient temperature operating micromachined emitter for mid-infrared for optical gas sensing systems
 in Proc. of SPIE Smart Sensor, Actuators and MEMS, Vol. 7362; Schmid, U.; Cané, C.; Shea, H. (Eds.), SPIE, Bellingham, WA, USA (2009) 736205-1; M 102/2009
- Hoess, A.; Staudte, A.; Thormann, A.; Steinhart, M.; Heilmann, A.
Production of highly ordered nanoporous alumina and its application in cell cultivation
 in Proc. of MRS, Vol. 1093E; Chaikof, E.; Chilkoti, A.; Elisseff, J.; Lahann, J. (Eds.); Materials Research Society (MRS), Warrendale, PA, USA (2008) 1093-CC04-16 (online:www.mrs.org); M 141/2008
- Hohe, J.; Brand, M.; Varfolomeev, I.; Siegele, D.
Numerical analysis of residual stress fields in welded components
 in Proc. of ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, ASME paper PVP2009-77243; Geraets, L. H. (Ed.), American Society of Mechanical Engineers; New York, NY, USA (2009) CD-ROM; M 162/2009
- Hohe, J.; Hardenacke, V.; Luckow, S.; Siegele, D.,
An enhanced model for probabilistic cleavage fracture assessment considering local constraint effects
 in Proc. of the 12th International Conference of Fracture; Elboudjaini, M. (Ed.), National Research Council, Ottawa, Canada (2009) CD-ROM; M 13/2009
- Hohe, J.; Hardenacke, V.; Siegele, D.
Constraint corrected cleavage fracture assessment based on tests of standard and small scale cruciform specimens
 in Proc. of ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, ASME paper PVP2009-77299; Geraets, L. H. (Ed.), American Society of Mechanical Engineers; New York, NY, USA (2009) CD-ROM; M 40/2009
- Hollstein, T.
Walzen mit Keramik – Anwendungsspektrum und Projektüberblick in »Walzen mit Keramik«
 in Tagungsband Fachsymposium Keramik für die Walztechnik; Kailer, A. (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2009) 7-22; M 41/2009
- John, M.; Rinker, M.; Schäuble, R.
Bruchmechanische Kennwertermittlung an Polymethacrylimid-Hartschäumen
 in Proc. of 12. Problemseminar Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen; Grellmann, W. (Ed.), Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (2009) 88-95; M 74/2009
- Johnson, J. A.; Weber, R.; Kolesnikov, A. I.; Schweizer, S.
Glass ceramics for high-resolution imaging
 in Proc. of International Mechanical Engineering and Exposition 2008 IMECE; ASME.ORG, New York, NY, USA (2008) IMECE2008-66205 (online); M 139/2008
- Kailer, A.; Amann, T.; Konrath, G.; Janietz, D.; Sawade, H.
Ultralow friction and wear of reciprocating systems lubricated by liquid crystalline fluids
 in Proc. of Friction, Wear and Wear Protection; Fischer, A.; Bobzin, K. (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim (2009) 409-416; M 16/2008
- Kailer, A.
Keramische Hochleistungswerkstoffe – Eigenschaften und Merkmale im Hinblick auf walztechnische Anwendungen
 in Tagungsband Fachsymposium »Keramik für die Walztechnik«; Kailer, A. (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2009) 23-32; M 48/2009
- Khader, I.; Fünfschilling, S.; Kailer, A.; Oberacker, R.
The behavior of silicon nitride tools in hot rolling copper wire
 in Proc. of Friction, Wear and Wear Protection; Fischer, A.; Bobzin, K. (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim (2009) 383-392; M 62/2008

Klengel, R.; Bennemann, S.; Petzold, M.

Advanced failure analysis methods and microstructural investigations of wire bond contacts for current microelectronic system
in Proc. of 17th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition; iMAPS, Washington, DC, USA (2009) CD-ROM; M 120/2009

Körbel, S.; Elsässer, Ch.

Ab initio and atomistic simulation of copper doping in the lead-free ferroelectric perovskite potassium sodium niobate
in »Verhandlungen der DPG«, Tagungsband der Frühjahrstagung, (VI) 44, 5 (2009); DPG, Bad Honnef (2009) 138; M 14/2009

Krummhauer, O.; Presser, V.; Kailer, A.; Nickel, K. G.; Hollstein, T.

Corrosion behavior of silicon carbide in aqueous media lubricated sliding applications
in Proc. of friction, wear and wear protection; Fischer, A.; Bobzin, K. (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim (2009) 191-197; M 117/2009

Krummhauer, O.; Presser, V.; Kailer, A.; Nickel, K. G.

Korrosionsverhalten von Siliziumkarbid in Gleitbeanspruchung unter Wasserschmierung
in Fortschritte in der Metallographie; Bührig-Poaczek, A.; Kneissl, A. (Hrsg.), Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH Frankfurt (2009) 225-230; M 54/2009

Krummhauer, O.; Presser, V.; Kailer, A.; Nickel, K. G.

Korrosionsverhalten von Siliziumkarbid in Gleitbeanspruchung unter Wasserschmierung
in Tagungsband 50. Tribologie-Fachtagung; Gesellschaft für Tribologie e.V., Aachen (2009) 44/1-44/9; M 113/2009

Luke, M.; Varfolomeev, I.; Lütkepohl, K.; Esderts, A.

Fracture mechanics assessment of crack propagation in railway axle steels under fully reversed variable amplitude loading
in Proc. of the 2nd International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading; Sonsino, C. M.; McKeighan, P. C. (Eds.), DVM, Berlin (2009) 259-268; M 1/2009

Lütkepohl, K.; Esderts, A.; Varfolomeev, I.; Luke, M.

Methodik zur Festlegung von Inspektionsintervallen an Radsatzwellen aus 34CrNiMo6 und A4T
in Tagungsband 41. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge »Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethoden und Anwendungen«; DVM, Berlin (2009) 221-235; M 136/2009

Mayer, U.; Böhme, W.; Borsutzki, M.; Häcker, R.; Schneider, K.;

Düpmeier, T.; Tobisch, M.; Kudliczka, H.; Neuhaus, R.; Ruifrok, R.; Cotinaut, L.; Höfemann, M.
Ergebnisse eines VDEh-Ringversuchs zum Stahl-Eisen-Prüfblatt »Hochgeschwindigkeitszugversuche an gefügten Stählen«
in Tagungsband Werkstoffprüfung 2008. Herausforderungen neuer Werkstoffe an die Forschung und Werkstoffprüfung; DVM-Bericht 642 Frenz, H.; Grellmann, W. (Eds.), DVM, Berlin (2008) 161-166; M 118/2009

Moseler, M.; Bierwisch, C.; Kraft, T.; Riedel, H.

Three-dimensional discrete element models for the granular statics and dynamics of powders
in Proc. of the 3rd International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering; Schrefler, B.; Onate, E.; Papadarakakis, M. (Eds.), CIMNE, Barcelona, Spain (2009) CD-ROM; M 9/2009

Mrovec, M.; Elsässer, C.; Gumbsch, P.

Atomistic Simulations of Lattice Defects in Tungsten
in Proc. of 17th Plansee Seminar 2009, Vol. 3; Sigl, L. S.; Röthhammer, P.; Wildner, H. (Eds.), Plansee Group, Reutte, Austria (2009) WS2/1-9; M 142/2009

Naumann, F.; Ebert, M.; Hildenbrand, J.; Moretton, E.; Peter, C.;

Wöllenstein, J.
Thermal and mechanical design optimisation of a micro machined mid-infrared emitter for optical gas sensing systems
in Proc. of 10th EuroSimE 2009; IEEE Power Electronics Society Delft, Netherlands, 686-690; M 89/2009

Nickel, K. G.; Presser, V.; Krummhauer, O.; Kailer, A.; Wirth, R.

Hydrothermal oxidation of silicon carbide and its bearing on wet wear mechanism
in Proc. of Ceramic Engineering and Science, Salem, J.; Fuller, E. (Eds.), John Wiley & Sons Inc, Hoboken, NJ, USA (2009) 143-154; M 45/2009

Nebelung, M.; Fries, M.; Kraft, T.

Produktdesign von Pressgranulaten – Anforderungen und Realität – in Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis; Kolaska, H. (Hrsg.), Heimdall Verlag, Witten (2008) 107-118; M 87/2009

Nötzold, K.; Dresbach, C.; Graf, J.; Böttge, B.

Temperature dependent fracture toughness of glass frit bonding layers
in Proc. of Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS - DTIP 2009; EDA, CMP, Grenoble, French (2009) 378-383; M 71/2009

Nolte, P. W.; Pergande, D.; Schweizer, S. L.; Geuss, M.; Salzer, R.;

Makowski, B.; Steinhart, M.; Wehrspohn, R.; Weder, C.
Infiltration of individual pores in macroporous silicon photonic crystals
in Proc. of SPIE Optic and Photonics 2009; Cabrini, S.; Mokari, T. (Eds.), SPIE, Bellingham, WA, USA (2009) 73930S-1; M 109/2009

Petzold, M.; Klengel, R.; Dohle, R.; Schulze, H.; Rudolf, F.

Room temperature wedge-wedge ultrasonic Bonding using aluminum coated copper wire
In Proc. of 42nd International Symposium on Microelectronics; IMAPS-International Microelectronics And Packaging Society, Washington, DC, USA (2009) 380-387; M 167/2009

Presser, V.; Krummhauer, O.; Nickel, K. G.; Kailer, A.; Wirth, R.

On the P-T conditions of wet silicon carbide tribo-corrosion
in Proc. of Friction, wear and wear protection, Fischer, A.; Bobzin, K. (Eds.), Wiley-VCH, Weinheim (2009) 198-206; M 116/2009

Riedel, H.; Bierwisch, C.; Kraft, T.

Simulation der Herstellungsprozesse für Hartstoffe
in Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Kolaska, H. (Hrsg.), Heimdall Verlag, Witten (2008) 3-18; M 88/2009

Rinker, M.; Gutwinski, M.; John, M.; Schlimper, R.; Schäuble, R.

Einsatzverhalten von CFK-Schaum-Sandwichstrukturen für die Anwendung in Luftfahrzeugprimärbauanteilen unter mechanischen und thermomechanischen Belastungen
in Tagungsband Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009; Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal – Oberth e.V., Bonn (2009) CD-ROM; M 90/2009

Rinker, M.; John, M.; Schäuble, R.

Fatigue crack growth in CFRP foam-core sandwich structures
in Proc. of the 31th International Committee on Aeronautical Fatigue ICAF; National Aerospace Laboratory NLR, Rotterdam, Netherlands (2009) 45-46; M 73/2009

Salzer, R.; Graff, A.; Simon, M.; Altmann, F.

Standard free thickness determination of thin TEM samples via backscatter electron image correlation
in Proc. of Microscopy Conference 2009; Technische Universität Graz, Austria (2009) 237-240; M 106/2009

Salzer, R.; Graff, A.; Simon, M.; Altmann, F.

Standard free thickness determination of thin TEM samples via backscatter electron image correlation
in Proc. of Microscopy and Microanalysis 2009; Brewer, L. N.; Mc Kernan, S.; Shields, J. P.; Schmidt, Jr., F. E.; Woodward, J. H.; Zaluzec, N. J. (Eds.), Cambridge University Press, New York, NY, USA (2009) 340-341; M 100/2009

Schlimper, R.; Rinker, M.; Schäuble, R.

Prediction of material behavior of closed cell rigid foams via mesoscopic modelling
in Proc. of 17th International Conference on Composite Materials ICCM17 Banks, W. M.; Wisnom, M. R. (Eds.), IOM Communications Ltd. London, UK (2009) DVD; M 93/2009

Schmidt, C.; Altmann, F.; Grosse, C.; Naumann, F.; Lindner, A.

Application of lock-in-thermography for three-dimensional localisation of electrical defects inside of complex packaged devices
in Proc. of 2nd Electronics System-Integration Technology Conference; IMAPS Europe (Eds.), IEEE, New York, NY, USA (2008) 1041-1044 (CD); M 46/2008

Schmidt, C.; Naumann, F.; Altmann, F.; Martens, S.; Wilde, J.

Thermal simulation of defect localization using lock-in thermography in complex and fully packaged devices
in Proc. of EuroSimE 09; Ernst, L. J.; Zhang, C. Q.; Van Driel, W. D.; Rodgers, P.; Bailey, C.; de Saint Leger, O. (Eds.), IEEE, Piscataway, NJ, USA (2009) 736-741; M 97/2009

Schulze, S.-H.; Dietrich S.; Ebert, M.; Bagdahn, J.

Development of test procedures for polymer material characterization in view of long-term durability of PV-modules
in Proc. of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference; WIP-Renewable Energies, München (2008) 2903-2907; M 138/2008

Schweizer, S.; Miclea P.-T.; Henke, B.; Ahrens, B.

Up- and down-conversion in fluorozirconate based glass ceramics for high efficiency solar cells
in Proc. of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; WIP-Renewable Energies, München (2008) 54-57; M 69/2008

Seifert, T.; von Hartrott, Ph.; Riedel, H.; Siegele, D.

Thermomechanical fatigue life prediction of high temperature components
in Proc. of the 35th MPA-Seminar; Roos, E. (Hrsg.), MPA, Stuttgart (2009) 16.1-16.19; M 159/2009

Seifert, T.; Riedel, H.

Rechnerische Methoden zur Lebensdauervorhersage von gegossenen Hochtemperaturbauteilen
in Tagungsband 31. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle; Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2009) 67-76; M 47/2009

Seifert, T.; Riedel, H.

Fatigue life prediction of high temperature components in combustion engines and exhaust systems
in Proc. of the 4th EASC 2009, European Automotive Simulation Conference, Seibert, K. W.; Jirka, M. (Ed.), ANSYS, München (2009) 313-324; M 65/2009

Siegele, D.; von Hartrott, Ph.

Investigation of thermo-mechanical fatigue problems in power plant applications using viscoplastic material models
in Proc. of the 15th International Symposium on Plasticity & Its Current Applications; Khan, A. S.; Farokh, B. (Eds.), NEAT Press, Fulton, MD, USA (2009) CD-ROM; M 158/2009

Sommer, S.; Andrieux, F.; Greve, L.; Strating, A.; Hambrecht, T.

Versagensmodellierung von Punktschweißkleb- und Stanznietverbindungen mit PamCrash
in Tagungsband PAM-CRASH Forum 2009; ESI Group GmbH, Eschborn (2009) CD-ROM; M2/2009

Sommer, S.; Klokckers, F.; Düpmeier, T.

Charakterisierung und Ersatzmodellierung von laserstrahlgeschweißten Stahlblechen für die Crashsimulation
in Tagungsband 5. Freiburger Workshop zum Werkstoff- und Strukturverhalten bei Crashvorgängen crashMAT; Fraunhofer EMI, Freiburg (2009) CD; M 11/2009

Sommer, S.; Klokckers, F.

Modelling of the deformation and fracture behavior of laser welds for crash simulation
in Proc. of the 7th European LS-DYNA Conference, Dynamore GmbH, Stuttgart (2009) 45-46; M 12/2009

Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Feucht, M.

Damage modelling of a TRIP steel for integrated simulation from deep drawing to crash
in Proc. of the 7th European LS-DYNA Conference; Dynamore GmbH, Stuttgart (2009) B-III-04 (CD-ROM); M 152/2009

Taurorat, C.; Koester, P. J.; Held, J.; Gaspar, J.; Ruther, P.; Paul, O.;

Cismak, A.; Heilmann, A.; Gimsa, J.; Beikrich, H., Jonas L.
Intracellular potential measurements of adherently growing cells using microneedle arrays
in Proc. of Micro TAS; Locascio, L. E. (Eds.), Chemical and Biological Microsystems Society, San Diego, CA, USA (2008) 1777-1780; M 77/2009

Varfolomeev, I.; Luke, M.; Burdack, M.

Untersuchungen zum Einfluss der Probengeometrie auf das zyklische Rissfortschrittsverhalten
in Tagungsband 41. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge »Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethoden und Anwendungen«, DVM, Berlin (2009) 43-52; M 135/2009

Ziegler, T.; Neubrand, A.

Modellierung der Eigenschaften und des Versagens von Metallmatrixverbundwerkstoffen mit lamellarer Struktur
in Tagungsband 17. Symposium DGM, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde; Krenkel, W. (Hrsg.), Wiley-VCH, Weinheim (2009) 46-51; M 132/2008

IMPRESSUM

Redaktion

Katharina Hien
Thomas Götz

Gestaltung und Produktion

Erika Hellstab
Emanuela Pesché

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut
für Werkstoffmechanik IWM
Öffentlichkeitsarbeit
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg
Telefon +49 761 5142-153
Telefax +49 761 5142-110
info@iwf.fraunhofer.de
www.iwf.fraunhofer.de

Bildquellen

Seiten 3, 21, 31, 41, 47, 55, 61, 67, 73:
Bildtechnik Michael Spiegelhalter,
Merdingen
Seiten 7, 83: © Achim Käflein, Freiburg
Seite 23: Universität Duisburg-Essen
Seite 37: © Robert Bosch GmbH
Seite 43: © Daimler AG
Seite 45: © Margrit Müller, Freiburg
Seite 52: © iStockphoto
Seite 79: © Egbert Schmidt, Halle

Alle übrigen Abbildungen:
© Fraunhofer IWM

Alle Rechte vorbehalten.
Bei Abdruck ist die Einwilligung
der Redaktion erforderlich.