

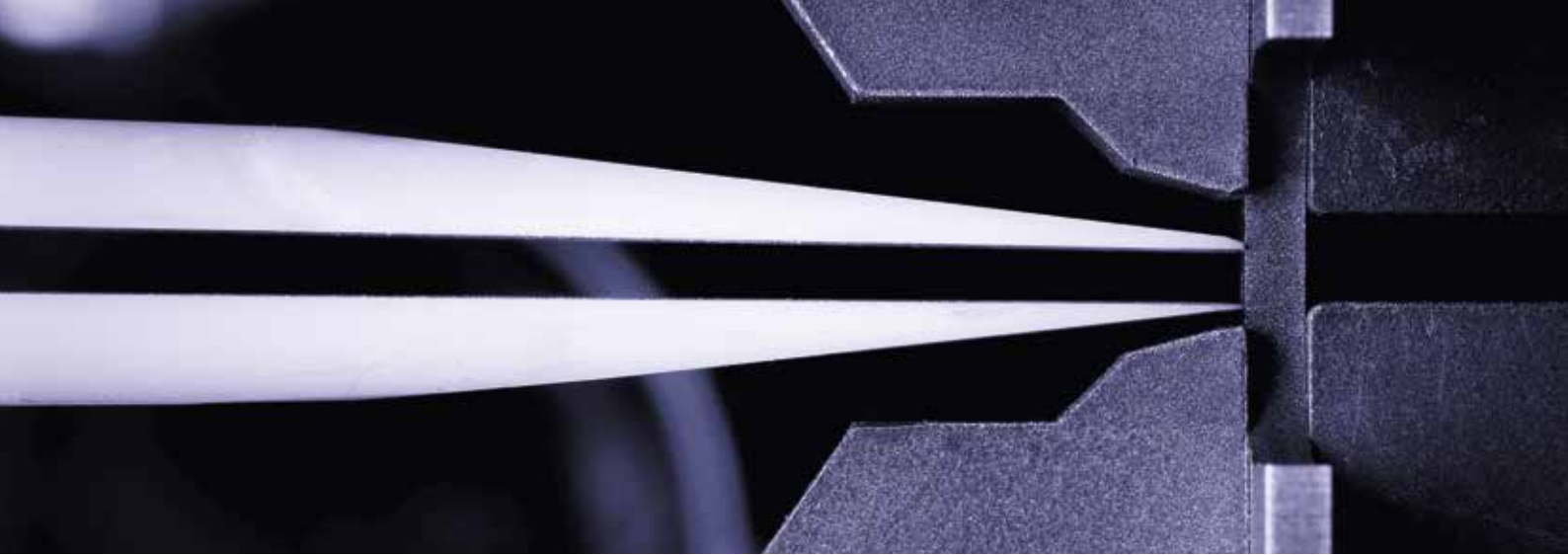


Fraunhofer

IWM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM

JAHRESBERICHT
2012



Zug-Druckprüfung dünner Bleche.

DIE FRAUNHOFER-GESSELLSCHAFT

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 60 Institute.

Mehr als 20 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,8 Milliarden Euro. Davon fallen 1,5 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen erarbeiten können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Niederlassungen sorgen für Kontakt zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus.

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 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. Studierenden eröffnen sich an Fraunhofer-Instituten wegen der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Der Name

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

JAHRESBERICHT 2012

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM

Institutsteil Freiburg
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg
Telefon +49 761 5142-0
Fax +49 761 5142-510

Institutsteil Halle
Walter-Hülse-Straße 1
06120 Halle
Telefon +49 345 5589-0
Fax +49 345 5589-101

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



Das Fraunhofer IWM arbeitet nach einem Qualitätsmanagementsystem, das nach ISO 9001 zertifiziert ist. (Zertifikatsnummer DE07/3361)

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

Energie- und Materialkosten sind nach Jahren der systematischen Reduktion der Lohnstückkosten in der verarbeitenden Industrie inzwischen zu den meistbeachteten Kostenpositionen geworden. Effiziente Lösungen sind der Schlüssel, um den Produktionsstandort Deutschland und Europa wettbewerbsfähig zu halten. Der optimale Werkstoffeinsatz und das dafür notwendige Verständnis der Werkstoffe und ihres Verhaltens bis auf die Mikrostrukturebene sind sowohl im Prozess als auch im Bauteil erfolgskritisch.

Unsere Simulations- und Charakterisierungsmethoden nutzen wir zum Einstellen der Funktionen und Leistungsgrenzen von Werkstoffen und Bauteilen und zur Entwicklung von innovativen Fertigungsschritten für die deutsche und europäische Industrie. Häufig werden hierbei nicht nur einzelne Prozessschritte, sondern integral ganze Prozessketten betrachtet.

Zum Tragen kommt unser Ansatz besonders dort, wo Material- und Energieeffizienz, hohe Ausbeute in der Fertigung oder maximale Zuverlässigkeit gefragt sind.

Erfolgreich ist unsere Forschung aus Sicht unserer Kunden, weil wir durch die problemspezifische Kombination von Experiment und Simulation sowie den neuesten Erkenntnissen aus Materialwissenschaft und Werkstofftechnik den stets besten Weg zum Projektergebnis realisieren. Um das Institut weiterzuentwickeln und unsere methodische Kompetenz auszubauen, haben wir im vergangenen Geschäftsjahr wieder eine Reihe strategischer Maßnahmen eingeleitet. So wurde in Halle das Center für angewandte Mikrostruktur-Diagnostik CAM gegründet und dort unter anderem eines der modernsten Transmissionselektronenmikroskope für Fragestellungen der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik in Betrieb genommen.

Welche Rolle Werkstoffmechanik an der Schnittstelle zwischen belebter und unbelebter Materie spielt, konnten wir mit der Entwicklung und Bewertung von Nanokompositen für eine Antifoulingbeschichtung in der Schifffahrt demonstrieren. In Freiburg hat eine neue Gruppe zur Entwicklung von neuen mikromechanischen Prüfverfahren von Werkstoffen und Bauteilen ihre Arbeit aufgenommen. Zudem haben wir strategisch entschieden, in den nächsten Jahren unsere Korrosionskompetenz signifikant auszubauen.

Dass das Fraunhofer IWM wirtschaftlich und wissenschaftlich auf einem guten Weg ist, beweisen die mittlerweile mehr als 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und ein Haushaltsvolumen von mehr als 30 Millionen Euro.

Um unseren Kurs fortzusetzen, bauen wir auf unsere Geschäftspartner, denen wir an dieser Stelle für die fruchtbare Zusammenarbeit danken. Denn Potenziale gibt es viele. Erschließen können wir sie nur gemeinsam.



Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn



Prof. Dr. Peter Gumbsch



Die Institutsleitung des Fraunhofer IWM: (von links) Dr. Rainer Kübler (Stellvertretender Institutsleiter, Freiburg), Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn (Sprecher der Institutsleitung, Institutsleiter), Prof. Dr. Matthias Petzold (Stellvertretender Institutsleiter, Halle) und Prof. Dr. Peter Gumbsch (Institutsleiter).

■ **Institutsprofil**

Das Fraunhofer IWM im Profil	6
Kernkompetenzen	8
Nachruf Prof. Dr. Roland Weidisch	10
Attract-Gruppen am Fraunhofer IWM	11
Erweiterung unseres Portfolios	12
Kuratorium und Werkstoffmechanikpreis 2012	14
Das Institut in Zahlen	15
Organisation und Ansprechpartner	16

■ **Ausgewählte Forschungsergebnisse**

Tribologie	18
Keramikgerechte Auslegung von Antriebszahnradern und Gewinden	20
Komposite aus funktionalisierten Kohlenstoff-Nanoröhren und Diamant	22
Dem Verschleiß von amorphen Kohlenstoffschichten auf der Spur	24
Materialminimierte ästhetische Produkte mittels biomimetischer Strukturen	25
Fertigungstechnologie	26
Prädiktive und effiziente physikalische Modelle für Hartstoffe	28
Neuer Glasbiegeprozess für energie- und zeiteffiziente Produktion	30

Schnelles Heißprägeverfahren für hochwertige Optikkomponenten	31
Bewertung von Korrosionsschutzschichten in Erdölförderanlagen	32
Simulation des Entbinderns keramischer Grünkörper	33
Bauteilsicherheit	34
Lebensdauerbewertung von Schweißverbindungen ..	36
Weiche Zonen in ultrahochfesten Stählen beherrschen	38
Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für stoßbelastete Bauteile	40
Rissverhalten unter anisothermen Beanspruchungsbedingungen	41
Prozess- und Werkstoffbewertung	42
Material- und Schutzkonzepte für Solarkraftwerke..	44
Verformungs- und Versagensverhalten: Bewertung von Hybridverbunden	45
Modellierung langfaserverstärkter Thermoplaste (LFT)	46
Simulation Intermetallischer Schichten in Bondverbindungen	48
Mikromechanische Analyse und Bewertung kleiner Probenvolumen	49
Polymeranwendungen	50
Neuartige Testmethode zur Bewertung geklebter CFK-Strukturen	52

Langfaserverstärkte Thermoplaste im Spritzgießcompoundierprozess	54	Vermeidung des PID-Effekts durch innovative Polymersysteme	76
Echtzeit-Charakterisierung von Holzpartikeln für Holz-Polymer-Werkstoffe	56	Spurenanalyse bei der Waferreinigung	77
Struktur-Eigenschafts-Beziehungen in Blockcopolymer-Nanokompositen	57	Mechanische Eigenschaften von diamantdrahtgesägten Wafern	78
Biologische und makromolekulare Materialien	58	Bewertung der Oberflächen von gesägten Silizium-Wafern	79
Nanoporöse Membranmaterialien für die Anwendung als 3D-Biochip-Array.....	60	■ Vernetzung des Fraunhofer IWM	
Elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Rissbildung im Knochen	62	Verbünde, Allianzen, Projektgruppen	80
In vitro-Biofilmbildung an Membranoberflächen	63	Fraunhofer-Gemeinschaftsforschung	82
Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik	64	Innovationscluster	83
Keimbildung und Kristallwachstum in Nanoglaskeramiken	66	■ Anhang	
Fehleranalyse 3D-integrierter mikroelektronischer Bauteile	68	Geräteausstattung	84
Fehleranalytik von Kupfer-Drahtbondverbindungen	70	Personen, Ausbildung, Ereignisse	87
Mikro-Chevron-Tests für innovative Waferbondtechniken	71	Veröffentlichungen	90
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP	72	Impressum	97
Potenzialinduzierte Degradation an verschiedenen PV-Modulen	74		
Mikrostrukturelle Beschreibung des PID-Effekts	75		



Belastungstest an Solarzellen-Verbindungen mit Mikrotester.

Das Fraunhofer IWM ist Ansprechpartner für die Industrie und für öffentliche Auftraggeber im Bereich der Zuverlässigkeit, Sicherheit, Lebensdauer und Funktionalität von Bauteilen und Systemen. Der werkstoffmechanische Ansatz des Fraunhofer IWM zielt darauf ab, Schwachstellen und Fehler in Werkstoffen und Bauteilen zu identifizieren, deren Ursachen aufzuklären und darauf aufbauend Lösungen für die Einsatzsicherung von belasteten Bauteilen, für die Materialentwicklung und für Fertigungsprozesse anzubieten.

Die Methoden des Fraunhofer IWM erlauben es einerseits, den Beanspruchungszustand mit relevanten Materialeigenschaften und der Mikrostruktur zu verknüpfen, das Bauteilverhalten zu verstehen und vorherzusagen und andererseits die Eigenschaften von Werkstoffen und Bauteilen für die im Einsatz auftretenden Belastungen bereits in der Fertigung optimal einzustellen und die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe auszuschöpfen.

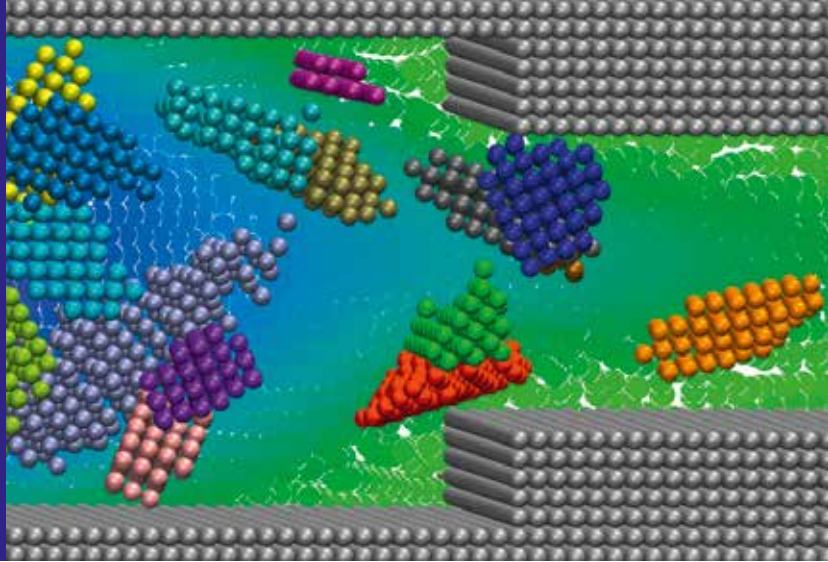
Das Fraunhofer IWM nutzt und entwickelt anspruchsvolle Testverfahren, Prüf- und Diagnosetechniken, Modellierungskonzepte und Simulationswerkzeuge. Es modelliert Werkstoffeigenschaften und leitet diese gegebenenfalls aus Multiskalensimulationen ab. Es simuliert Eigenschaftsveränderungen im Werkstoff während der Fertigung und im Betrieb und erarbeitet Vorschläge für eine verbesserte Prozessführung. Es untersucht, wie sich die Miniaturisierung von Bauteilen auf Funktionalität und Herstellbarkeit auswirkt. In experimentellen und virtuellen Prüflabors sagt das Fraunhofer IWM das Einsatzverhalten hergestellter Bauteile vorher und bestimmt, ausgehend vom Einsatzverhalten, ein optimiertes Werkstoff- und Bauteildesign und schlägt gegebenenfalls eine geeignete Folge von Prozessschritten vor. Je nach Aufgabenstellung werden fachübergreifende Projektteams gebildet.

Mit seinem werkstoffmechanischen Ansatz betreibt das Fraunhofer IWM projektbasierte industrienaher Forschung und Entwicklung für produzierende Unternehmen, für die öffentliche Hand sowie für Forschungsvereinigungen. Der für das Fraunhofer IWM typische Zugang über den Werkstoff kommt bei Mikrobauteilen genauso zum Einsatz wie bei technischen Großanlagen. Dadurch können verschiedenste Industriebereiche adressiert werden. Die industriellen Auftraggeber des Instituts kommen unter anderem aus dem Maschinen- und Anlagenbau, der Energietechnik, dem Automobilbau, dem Schienenfahrzeugbau, dem Flugzeugbau, der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik, der Photovoltaik, der Medizintechnik oder aus den Bereichen Werkstoffherstellung, Geräteentwicklung, Prüftechnik und Analytik.

Leistungsspektrum

- Aufklärung und Beherrschung von Defekten, Rissbildung, Verformung, Versagen, Verschleiß, Fehlverhalten, Ermüdung
- Werkstoffcharakterisierung, Bauteilprüfung, Schadensanalysen, Fehlerdiagnostik, Mikrostrukturanalyse
- Werkstoffmodellierung, Prozess- sowie Bauteilsimulation und -auslegung
- Randschichtbewertung, Beschichtungen, Tribologie, Funktionalisierungen, Bio- und Grenzflächenanalytik
- Prozess-, Verfahrens- und Geräteentwicklungen

**MEHR EFFIZIENZ,
BESSERE FUNKTIONALITÄT,
HÖHERE ZUVERLÄSSIGKEIT**



Simulation des Strömungsschleifens einer Stufe durch abrasive Körner.

Material- und Energieeffizienz verbessern

Aus dem im Fraunhofer IWM etablierten Zusammenspiel von Experiment und Simulation ergibt sich eine hervorragende Lösungskompetenz für alle werkstofftechnischen Fragen, insbesondere wenn Material- oder Energieeinsparung bei der Fertigung und im Einsatz gefragt ist.

Beispiele in diesem Jahresbericht:

- Materialminimierte ästhetische Produkte mittels biomimetischer Strukturen (Seite 25)
- Neuer Glasbiegeprozess für energie- und zeiteffiziente Produktion (Seite 30)
- Schnelles Heißprägeverfahren für hochwertige Optikkomponenten (Seite 31)

Lebensdauer und Zuverlässigkeit erhöhen, Leistungsgrenzen verschieben

Das Fraunhofer IWM nutzt sein Verständnis des Werkstoffverhaltens zur Bewertung von Werkstoffen und Bauteilen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen und Belastungen. Damit kann die Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Bauteilen, Systemen und ganzen Anlagen erhöht werden.

Beispiele in diesem Jahresbericht:

- Keramikgerechte Auslegung von Antriebszahnradern und Gewinden (Seite 20)
- Material- und Schutzkonzepte für Solarkraftwerke (Seite 44)
- Neuartige Testmethode zur Bewertung geklebter CFK-Strukturen (Seite 52)
- Fehleranalyse 3D-integrierter mikroelektronischer Bauteile (Seite 68)

Neue Funktionalitäten und virtuelle Werkstoffentwicklungen

Das Fraunhofer IWM nutzt neueste Erkenntnisse aus Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, um neue Funktionalitäten zu realisieren. Bei der virtuellen Werkstoff- und Bauteilentwicklung arbeitet das Fraunhofer IWM multiskalig und modelliert und simuliert Mechanismen auf der Nano-, Mikro- und Makroskala.

Beispiele in diesem Jahresbericht:

- Komposite aus funktionalisierten Kohlenstoff-Nanoröhren und Diamant (Seite 22)
- Prädiktive und effiziente physikalische Modelle für Hartstoffe (Seite 28)
- Nanoporöse Membranmaterialien für die Anwendung als 3D-Biochip-Array (Seite 60)

Integrale Betrachtung von Werkstoff und Fertigung

Das Institut beherrscht die durchgängige Modellierung und Simulation von Werkstoffen, Bauteilen und Fertigungsprozessen. Durch die Verkettung unterschiedlicher Fertigungsschritte kann die Entwicklung und Veränderung der Werkstoffeigenschaften entlang gesamter Prozessketten vorhergesagt und die Ausbeute beherrscht werden.

Beispiele in diesem Jahresbericht:

- Simulation des Entbinderns keramischer Grünkörper (Seite 33)
- Langfaserverstärkte Thermoplaste im Spritzgießcompoundierprozess (Seite 54)
- Mechanische Eigenschaften von diamantdrahtgesägten Wafern (Seite 78)



Durchbiegung eines multikristallinen Silizium-Wafers während des 4-Punkt-Biege-Versuchs.

Die Kernkompetenzen bilden das wissenschaftlich-technologische Fundament des Fraunhofer IWM. Sie sind das »Handwerkszeug«, das die Geschäftsfelder bei der Bearbeitung werkstoffmechanischer Fragestellungen nutzen.

Sie finden fachgebietsübergreifend Verwendung und werden für die unterschiedlichen Werkstoffe eingesetzt um

- Schwachstellen und Fehler in Bauteilen aufzufinden, ihre Ursache aufzuklären, sie zu vermeiden beziehungsweise in ihren Auswirkungen zu beherrschen,
- die dafür benötigten Testverfahren, Prüf- und Diagnosetechniken, Modellierungskonzepte und Simulationswerkzeuge zu entwickeln,
- Bauteile und Fertigungsprozesse zu bewerten, zu simulieren und zu verbessern,
- die Eigenschaften der Werkstoffe und Bauteile für die im Einsatz auftretenden Belastungen optimal einzustellen und die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe möglichst vollständig auszuschöpfen.

Die Weiterentwicklung der drei Kernkompetenzen erfolgt den Bedürfnissen des Marktes entsprechend in den Geschäftsfeldern.

Kernkompetenz

Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung

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

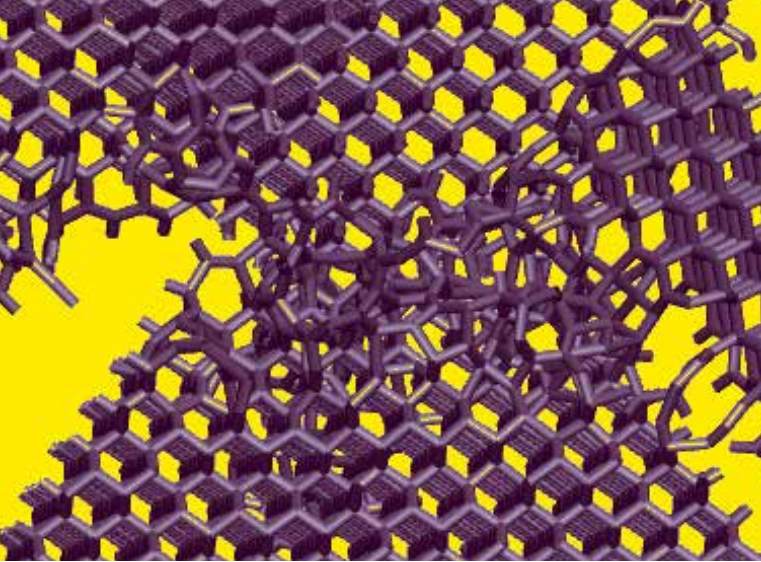
Zur Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung untersuchen wir die Reaktion von Werkstoffen und Bauteilen auf mechanische, thermomechanische und elektromechanische Belastungen und klären Verformungs- und Versagensmechanismen auf. Wir ermitteln die Grenzen der Beanspruchbarkeit von Werkstoffen und Bauteilen 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.

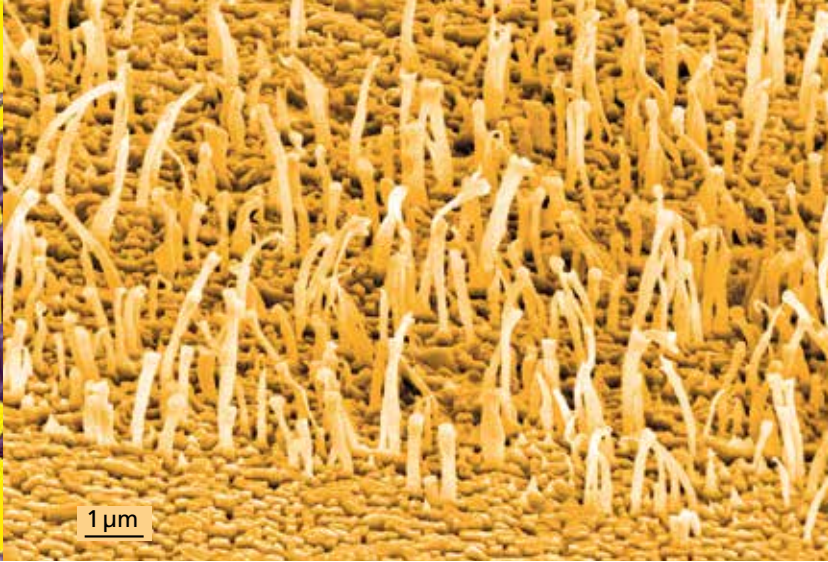
Ansprechpartner:

Dr. Michael Luke
michael.luke@iwm.fraunhofer.de

Andreas Krombholz
andreas.krombholz@iwmm.fraunhofer.de



Simulation der Kollision zweier Diamantasperiten.



Nanostrukturiertes Polypropylen.

Kernkompetenz

Werkstoffmodellierung und Simulation

- Entwicklung und Anpassung von Werkstoffmodellen
- Multiskalen- und Prozesskettensimulation
- Simulation von Bauteilen und Fertigungsprozessen

Mithilfe von im Rechner abgebildeten Belastungsszenarien und Prozessen für reale sowie noch zu entwickelnde Werkstoffe und Bauteile können diese wirtschaftlich entwickelt und Prozesse verbessert werden. Wir beschreiben das Verformungs-, Schädigungs- und Bruchverhalten von Werkstoffen unter verschiedenen Belastungen und sagen ihr Einsatzverhalten voraus. Die Bauteilsimulation liefert Aussagen zu Sicherheit und Lebensdauer. Die Ergebnisse der Prozesssimulation fließen in die Auslegung von Werkzeugen und in die Prozessführung ein.

Wir messen modellspezifische Eigenschaften der Werkstoffe und modellieren Werkstoffe über verschiedene Skalen hinweg mit unterschiedlichen Simulationsmethoden. Unsere aufwändigen numerischen Simulationen berechnen das Verhalten von Werkstoffen bei gegebener Mikrostruktur und bekannten Eigenschaften der enthaltenen Komponenten. Mit weiteren Simulationen sagen wir Eigenschaften von Werkstoffen auf der Basis von physikalischen Modellen vorher und liefern so wichtige Beiträge zur Optimierung und Entwicklung bestehender oder neuer Materialien.

Ansprechpartner:

Dr. Dirk Helm
dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

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

Kernkompetenz

Grenzflächen- und Oberflächentechnologie

- Beschichtung und morphologische Oberflächengestaltung
- Physikalische und chemische Oberflächen- und Grenzflächenanalytik
- Tribometrie und Oberflächenfunktionalisierung

Wir entwickeln moderne Beschichtungstechnologien und Oberflächenmodifizierungsverfahren. Wir bewerten die funktionalen Oberflächeneigenschaften von Materialien und Komponenten wie Benetzung, Adhäsion und Biokompatibilität. Wir zeigen Verbesserungspotenziale auf, beispielsweise bei der chemischen und biologischen Korrosionsbeständigkeit. Mit modernsten oberflächenanalytischen Verfahren untersuchen wir die morphologischen, mechanischen und chemischen Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften.

Zudem nutzen wir in situ-Technologien für die Bewertung von tribologischen Vorgängen und zur Analyse von Beschichtungsprozessen. Wir verbinden Theorie und Experiment, beispielsweise bei der Erforschung von Schichtwachstumsvorgängen oder Tribokontakten und Adhäsionsphänomenen. Unterstützt durch atomistische Simulationsrechnungen entwickeln wir nanostrukturierte Oberflächen und inerte, antiadhäsive Werkzeugbeschichtungen, die beispielsweise für Formgebungsprozesse wichtig sind.

Ansprechpartner:

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

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

NACHRUF PROF. DR. ROLAND WEIDISCH

Prof. Dr. Roland Weidisch ist am 4. November 2012 im Alter von 47 Jahren nach schwerer Krankheit verstorben. Die Institutsleitung und die Belegschaft des Fraunhofer IWM betrauern den allzu frühen Tod eines geschätzten Kollegen.

Roland Weidisch war seit dem 1. April 2010 Leiter des Geschäftsfelds Polymeranwendungen am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Halle. Der zu dieser Zeit 44-jährige Wissenschaftler übernahm die Leitung des Geschäftsfelds Polymeranwendungen, das bis dato von Prof. Dr. Ralf Wehrspohn, Institutsleiter des Fraunhofer IWM, geführt wurde. Die Kompetenzen von Roland Weidisch bedeuteten für das Fraunhofer IWM eine Stärkung und Erweiterung der Forschungsaktivitäten im Polymerbereich, wovon Kolleginnen und Kollegen sowie Partner und Kunden aus Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie gleichermaßen profitierten. Seine Arbeitsschwerpunkte waren unter anderem das Deformationsverhalten und die Bruchmechanik von Blockcopolymeren mit komplexer Architektur, die Mechanik von Polymer-Keramik Hybrid-Materialien und Nanokompositen, die Entwicklung von mechanischen Prüfmethoden für Polymermaterialien sowie die Morphologie und Rheologie von Blockcopolymeren. Darüber hinaus war mit der Tätigkeit von Roland Weidisch als Professor die Basis für eine enge Zusammenarbeit zwischen der Martin-Luther-Universität und der Fraunhofer-Gesellschaft geschaffen: Er hat die anwendungsorientierte Forschung mit der Lehre verbunden und den aktuellen Wissenstransfer befördert.

Roland Weidisch begann seine wissenschaftliche Laufbahn an der Technischen Hochschule Merseburg, promovierte 1997 am Institut für Werkstoffwissenschaft der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und wechselte anschließend an das Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Nach Forschungsaufenthalten an der University of Massachusetts sowie der Cornell-University habilitierte er 2002 an der Martin-Luther-Universität im Fachbereich Ingenieurwissenschaften. Anschließend erhielt er ein Heisenberg-Stipendium



Das Fraunhofer IWM trauert um Prof. Dr. Roland Weidisch. Der Geschäftsfeldleiter starb am 4. November 2012 im Alter von 47 Jahren.

und ging an das Leibniz-Institut für Polymerforschung IPF in Dresden. Seit 2005 war Roland Weidisch als Professor für Mechanik der funktionellen Materialien am Institut für Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie der Universität Jena tätig.

Prof. Dr. Weidisch wurde unter anderem mit dem Wissenschaftsverbundpreis des Netzwerks Mitteldeutsche Kunststofftechnik für seine Innovation »Neuartige thermoplastische Elastomere« sowie mit dem Innovationspreis »Superelastische Materialien« des Leibniz-Instituts IPF in Dresden ausgezeichnet.

Das Förderprogramm »Fraunhofer Attract« bietet hervorragenden externen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern die Möglichkeit, ihre Ideen innerhalb eines Fraunhofer-Instituts marktnah in Richtung Anwendung voranzutreiben. Am Fraunhofer IWM konnten wir zwei neue Attract-Gruppen einrichten.

**Gruppe Nanomaterialien und Nanoanalytik:
Nanoskalige Bewertung innovativer Fügeverbindungen
für die Mikrosystemtechnik**

Die Mikrosystemtechnik ist eine der Schlüsseltechnologien des High-Tech-Standorts Deutschland. Unter anderem bestehen im medizinischen Bereich oder bei »Ambient Assisted Living«-Systemen extrem hohe Anforderungen an ihre Sicherheit und Lebensdauer, die wesentlich von der Zuverlässigkeit der Mikroverbindungstechniken bestimmt werden. Der hier entstehende Markt für leistungsfähige Nanostrukturdiagnostik und Modellierungen des Einsatzverhaltens soll gezielt evaluiert und erschlossen werden.

Das Projekt NanoAssess der Attract-Gruppe Nanomaterialien und Nanoanalytik unter der Leitung von Prof. Dr. Thomas Höche soll neue Werkstoffthemen im Umfeld von nanostrukturierten Materialien beispielsweise keramischen und glaskeramischen Werkstoffen erschließen. Das Projekt untersucht Fügeverfahren der Mikrosystemtechnik wie das Tieftemperatur-Waferbonden, die ultraschallunterstützte Verbindung von Metallen und Glas sowie das Fügen mittels Laserkristallisation von Glasloten. Mithilfe der nanostrukturellen Diagnostik soll die Grenzflächenstruktur bis in den Bereich der atomaren Auflösung analysiert werden. Durch den Einsatz dieser Analysetechniken werden neue Modelle zum Zusammenhang von technologischen Prozessschritten, atomarer Struktur der Grenzflächen sowie davon abhängigem Einsatzverhalten und Zuverlässigkeitseigenschaften abgeleitet.

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Thomas Höche
thomas.hoeche@iwmh.fraunhofer.de

**Gruppe Mikromechanische Beanspruchungsanalyse:
Mechanische Materialeigenschaften in kleinen Dimensionen**

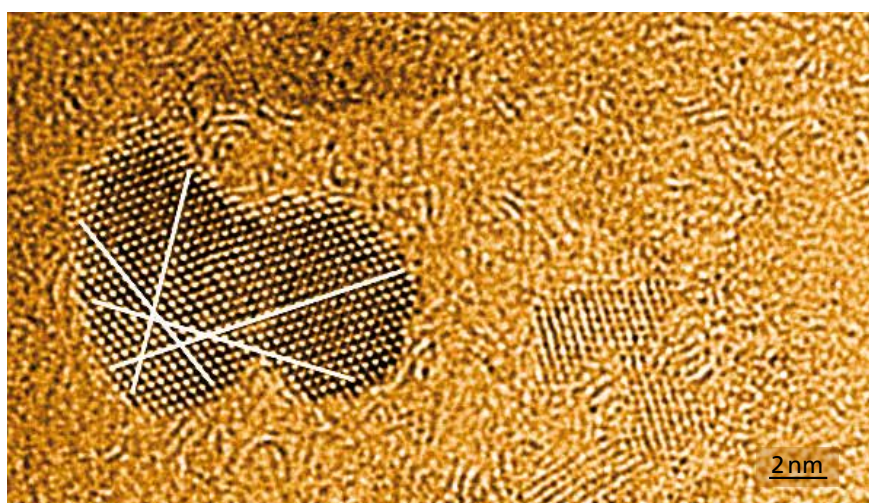
Aufgrund zunehmender Rohstoffknappheit und beständigem Innovationsdruck werden in sicherheitsrelevanten Anwendungen zunehmend Mikrobauteile oder Beschichtungen eingesetzt. Die dabei genutzten Materialsysteme haben zunehmend heterogene und anisotrope Eigenschaften und limitieren mit ihrer Lebensdauer die Zuverlässigkeit der Systeme.

Für Materialproben mit weniger als 1 mm bis hin zu sub- μ m-Dimensionen existieren kaum etablierte Messmethoden, die mit den Methoden der Makroskala vergleichbar sind. Darum hat sich die Attract-Gruppe »Mikromechanische Beanspruchungsanalyse« unter der Leitung von Dr. Chris Eberl zum Ziel gesetzt, die mechanischen Eigenschaften kleiner Materialvolumina experimentell messbar und numerisch bewertbar zu machen. Auf Material- sowie Systemebene sollen neuartige experimentelle mit leistungsfähigen numerischen Methoden kombiniert werden. Moderne Messapparaturen sollen die Untersuchung elastischer und plastischer Eigenschaften unter statischer und dynamischer Last sowie bei variabler Temperatur und Atmosphäre ermöglichen. Damit entsteht am Fraunhofer IWM eine enge Verbindung zwischen neuen mikrosystemischen Methoden und der vorhandenen Expertise für numerische Simulationen. Das entsprechende Know-how, von der Probenherstellung über das Probenhandling bis hin zur Durchführung der Experimente und der Interpretation der Ergebnisse, steht den Kunden als Dienstleistung zur Verfügung.

Ansprechpartner:

Dr. Chris Eberl
chris.eberl@iwm.fraunhofer.de

Modernste Mikrostrukturdiagnostik und Fehleranalytik im neuen Fraunhofer CAM



LaF₃-Nanokristall ausgeschieden aus einem SiO₂-Al₂O₃-K₂O-LaF₃ Glas.

Das im März 2012 im Beisein von Vertretern des Wirtschaftsministeriums Sachsen-Anhalt und der Oberbürgermeisterin der Stadt Halle als Abteilung des Fraunhofer IWM gegründete Fraunhofer-Center für angewandte Mikrostruktur-Diagnostik CAM in Halle bietet seinen Kunden eine noch leistungsfähigere Fehlerdiagnostikkette von der Defektlokalisierung über die Präparation bis zur Materialanalytik. Damit kann schneller auf die komplexen Anforderungen der Industriepartner vor allem aus den Bereichen Mikroelektronik, Leistungselektronik, Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie eingegangen werden. Hierin beheimatet ist der Fraunhofer IWM-Forschungsbereich »Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik«, der bereits auf 20 Jahre erfolgreiche Zusammenarbeit mit zahlreichen Industriepartnern zurückblicken kann.

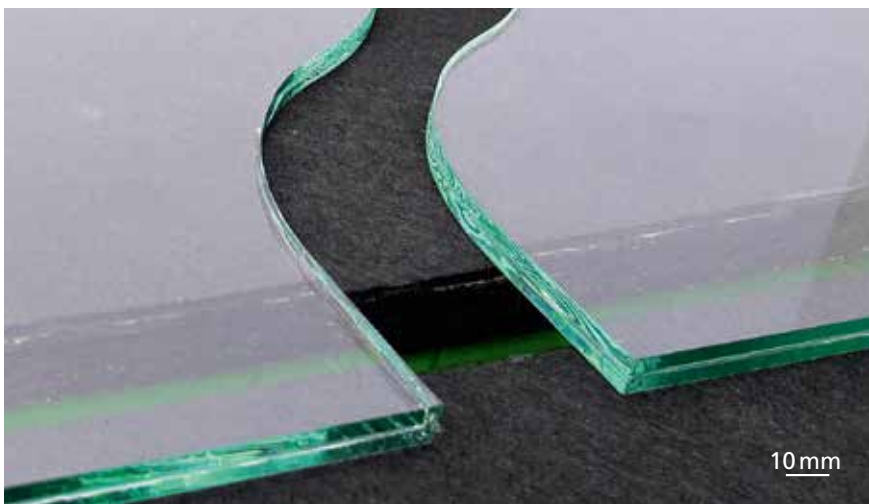
Die Leistungsfähigkeit des neuen Fraunhofer CAM wird durch die gleichzeitige Inbetriebnahme eines Transmissionselektronenmikroskops Titan³ G2 der FEI Company weiter ausgebaut.

Durch seine zusätzliche Ausstattung mit Aberrationskorrektur und neu entwickelten, leistungsfähigeren Detektoren können chemische und strukturelle Untersuchungen im Nanobereich unter anderem an Grenzflächen mit bisher unerreichter Auflösung und Empfindlichkeit durchgeführt werden. Unterstützt werden diese analytischen Möglichkeiten durch hochleistungsfähige Zielpräparationen wie Plasma-Focused Ion Beam-Technik (Plasma FIB) oder die Laser FIB-Technik. Im Fraunhofer CAM stehen diese neuen oder bisher ausschließlich in der akademischen Grundlagenforschung eingesetzten Analysetechniken zukünftig auch für gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Industriepartnern zur Verfügung.

Ansprechpartner:

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

Den spröden Werkstoff Glas beherrschen



Ein neues Verfahren ermöglicht es, Sicherheitsglas in beliebigen Formen zu trennen.

Flachglas ist ein hochattraktiver, günstig herzustellender Werkstoff für Anwendungen im Bauwesen, in der Architektur, im Verkehrswesen und einem großen, noch zu erschließenden Anwendungspotenzial. Der Schlüssel dafür liegt in der Be- und Verarbeitung des spröden Werkstoffs. Hier baut das Fraunhofer IWM auf seine 40-jährige kontinuierliche Forschungserfahrung an spröden Werkstoffen, die stets die Beherrschung des Zusammenspiels von Spannungen, Schädigung, Rissentstehung und -ausbreitung sowie Formgebung im Fokus hat. Aktuelles Highlight aus der Forschungsroadmap Glas des Fraunhofer IWM ist ein Trennverfahren für Verbund-sicherheitsglas, mit dem konturgenaue gekrümmte Schnitte möglich sind. Auf der Düsseldorfer Glasstec im Oktober 2012 hat dies für große Aufmerksamkeit gesorgt.

Das FuE-Portfolio umfasst heute Verfahrensentwicklungen zur Formgebung von Linsen sowie zum Prägen von Präzisionsoptiken, spannungsarmen Trennen von Flachglas, vakuumdichten

Fügen von Isolierglas oder Biegen von Flachglas mit flexibler Biegeform. Gemeinsam ist all den Themen das fundierte Verständnis des Werkstoffes Glas unter mechanischen und thermischen Belastungen und die resultierenden Auswirkungen: je nach Anwendungsfall erwünscht, wie bei der Nutzung eines Risses als Werkzeug, oder unerwünscht, wie bei Schadensfällen. Grundlage dafür ist die Entwicklung geeigneter Materialmodelle und numerische Simulation in Verbindung mit prozessnahen Experimenten. Das enge Netzwerk zu Glasherstellern, Verarbeitern und Veredlern sowie zum Glasmaschinenbau versorgt das Fraunhofer IWM kontinuierlich mit neuen Herausforderungen. Das Fraunhofer IWM wird so auch in den nächsten Jahren mit vielen innovativen Highlights für die Glasbranche aufwarten.

Ansprechpartner:

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

KURATORIUM UND WERKSTOFFMECHANIKPREIS 2012

Von links: MR Dr. Joachim Wekerle, Hans-Jürgen Straub, Dr. Robert Ruprecht, MD Hans-Joachim Hennings, Dr. Lorenz Sigl, Dr. Florian Holzapfel, Peter Putsch, Prof. Dr. Ingrid Mertig, Jens Wemhöner, Dr. Markus Baur, Dr. Roland Langfeld, Dr. Christoph Mühlhaus, Prof. Dr. Ulrich Buller, Dr. Matthias Müller, Prof. Dr. Peter Gumbsch, Prof. Dr. Rudolf Stauber, Dr. Alexander Sagel, Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn.



Das Kuratorium des Fraunhofer IWM 2012

Dem Kuratorium gehören Persönlichkeiten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft an, die dem Fraunhofer IWM fachlich nahe stehen. 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. Mitte 2012 ging der Vorsitz von Prof. Dr. Rudolf Stauber an Dr. Alexander Sagel von der Kolbenschmidt GmbH.

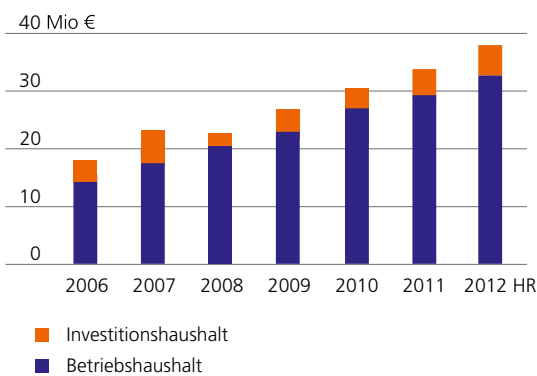
- Prof. Dr. Rudolf Stauber (Vorsitzender bis 30.6.12), Zentralinstitut für Neue Materialien und Prozesstechnik ZMP, Fürth
- Dr. Alexander Sagel (Vorsitzender seit 1.7.12), KS Kolbenschmidt GmbH, Neckarsulm
- Dr. Markus Baur, BMW Group, München
- Dr. Karlheinz Bourdon, KraussMaffei Technologies GmbH, München
- Siegfried Glaser, Glaser FMB GmbH & Co. KG, Beverungen
- MD Hans-Joachim Hennings, Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg
- Dr. Florian Holzapfel, Calyxo GmbH, Bitterfeld-Wolfen
- Dr. Roland Langfeld, Schott AG, Mainz
- Prof. Dr. Detlef Löhe, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Prof. Dr. Ingrid Mertig, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Dr. Christoph Mühlhaus, Sprecher des Clusters Chemie/Kunststoffe Mitteldeutschland, Halle, Saale
- Prof. Dr. Rolf Mühlhaupt, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Dr. Matthias Müller, Robert Bosch GmbH, Gerlingen
- Peter Putsch, Putsch Plastics GmbH & Co. KG, Nürnberg
- Dr. Robert Ruprecht, Projektträger Karlsruhe Produktion und Fertigungstechnologien PTKA-PFT, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Dr. Lorenz Sigl, Plansee Group Reutte, Österreich
- Hans-Jürgen Straub, X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt
- Staatssekretär Marco Tullner, Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg
- MR Dr. Joachim Wekerle, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart
- Jens Wemhöner, Cerobear GmbH, Herzogenrath

Werkstoffmechanikpreis 2012, gestiftet von der Plansee Group Reutte

Bei der Kuratoriumssitzung 2012 hat Julien Courseau mit seiner Diplomarbeit das Kuratorium überzeugt: Er gewann den mit 1 500 Euro dotierten Werkstoffmechanikpreis 2012, der hervorragende wissenschaftliche Leistungen im Rahmen von Diplomarbeiten und Dissertationen auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik prämiiert. Die zwei zudem Nominierten waren: Dr. Ronny Gerbach mit seiner Promotion »Zerstörungsfreie Charakterisierung mikro-mechanischer Strukturen für produktionsbegleitende Anwendungen« sowie Dr. Matous Mrovec mit seiner Veröffentlichung »Magnetic Bond-Order Potential for Iron«.

Auslegung von generativ gefertigten Blutgefäßsystemen

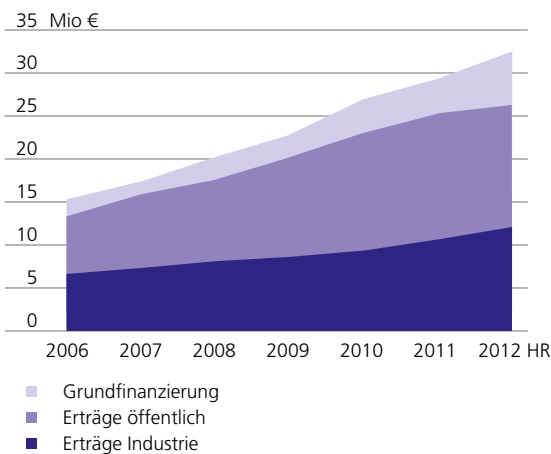
Bisher fehlen der Medizin optimal ausgelegte künstliche Adersysteme, die problemlos im Körper funktionieren oder als Grundgerüst für gezüchtete, dreidimensionale Organe fungieren könnten. Julien Courseau hat ein rheologisches Modell derart erweitert, dass es die komplexen Phänomene des Blutflusses und der Aderbeschaffenheit berücksichtigt. So konnte er generativ gefertigte Adersysteme so erfolgreich auslegen, dass Blut mit idealem Druck und Geschwindigkeit fließen kann, Thrombosen vermieden werden sowie Arterien, Venen und Kapillaren automatisch korrekt platziert sind.



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

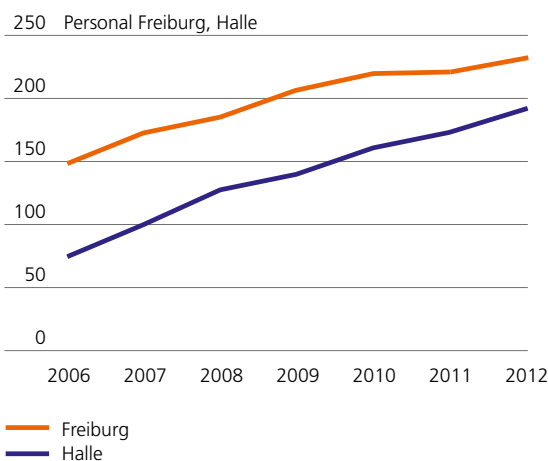
Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist weiter gewachsen und beläuft sich auf 32,6 Millionen Euro (Hochrechnung 2012). Davon entfallen 17,1 Millionen Euro auf den Institutsteil Freiburg und 15,5 Millionen Euro auf den Institutsteil Halle.

Der Investitionshaushalt 2012 beträgt 5,5 Millionen Euro.



Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Er bildet daher das starke personelle Wachstum der letzten Jahre direkt ab. Der Betriebshaushalt wird finanziert durch externe Erträge und institutionelle Förderung (Grundfinanzierung).

Der Anteil der Industrieerträge am Betriebshaushalt liegt bei 37,5 Prozent.



Ende 2012 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 424 Personen als Stammpersonal beschäftigt, davon 232 in Freiburg und 192 in Halle. Die Beschäftigtenzahl setzt sich zusammen aus 205 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, 119 technischen Beschäftigten, 84 Angestellten in der Infrastruktur und 16 Auszubildenden. Inclusive der 85 wissenschaftlichen Hilfskräfte, Diplomandinnen und Diplomanden sowie Praktikantinnen und Praktikanten sind Ende 2012 insgesamt 509 Personen am Fraunhofer IWM beschäftigt.

Stand: November 2012

ORGANISATION

Sprecher der Institutsleitung und
Institutsleiter
Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn
+49 345 5589-100
ralf.wehrspohn@iwmh.fraunhofer.de

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

Stellvertretender Institutsleiter, Halle
Prof. Dr. Matthias Petzold
+49 345 5589-130
matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

Stellvertretender Institutsleiter, Freiburg
Dr. Rainer Kübler
+49 761 5142-213
rainer.kuebler@iwmh.fraunhofer.de

INSTITUTSTEIL FREIBURG

GRUPPEN GESCHÄFTSFELDER

Tribologie Prof. Dr. Matthias Scherge +49 761 5142-206 +49 721 4640-750	Fertigungstechnologie Dr. Günter Kleer +49 761 5142-138	Bauteilsicherheit Dr. Dieter Siegele +49 761 5142-116	Prozess- und Werkstoff- bewertung Dr. Wulf Pfeiffer +49 761 5142-166
Verschleißschutz, Technische Keramik Dr. Andreas Kailer +49 761 5142-247	Bearbeitungs- und Trennverfahren Dr. Rainer Kübler +49 761 5142-213	Anlagensicherheit, Bruchmechanik Dr. Dieter Siegele +49 761 5142-116	Mikrostruktur- und Schadensanalyse Dr. Wulf Pfeiffer (komm.) +49 761 5142-166
Biomedizinische Materialien und Implantate Dr. Raimund Jaeger +49 761 5142-284	Heißformgebung Glas Dr. Peter Manns +49 761 5142-135	Crashsicherheit, Schädigungsmechanik Dr. Dong-Zhi Sun +49 761 5142-193	Ermüdungsverhalten, Eigenspannungen Dr. Michael Luke +49 761 5142-338
Tribologische Schichtsysteme Dr. Sven Meier +49 761 5142-233	Funktionale Schichtsysteme Dr. Frank Burmeister +49 761 5142-244	Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik Dr. Dieter Siegele (komm.) +49 761 5142-116	Verbundwerkstoffe Dr. Jörg Hohe +49 761 5142-340
Mikrotribologie Prof. Dr. Matthias Scherge +49 761 5142-206 +49 721 4640-750	Pulvertechnologie Dr. Torsten Kraft +49 761 5142-248		Formgebungs- und Umformprozesse Dr. Dirk Helm +49 761 5142-158
Multiskalenmodellierung und Tribosimulation Prof. Dr. Michael Moseler +49 761 5142-332	Physikalische Werkstoff- modellierung Prof. Dr. Christian Elsaesser +49 761 5142-286		Mikromechanische Beanspruchungsanalyse Dr. Chris Eberl +49 761 5142-495

Kontakt per Mail: vorname.nachname@iwmh.fraunhofer.de
z.B.: christian.elsaesser@iwmh.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 5142-124
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

INSTITUTSTEIL HALLE

<p>Polymeranwendungen</p> <p>Prof. Dr. Mario Beiner (komm.) +49 345 5589-247</p>	<p>Biologische und makro-molekulare Materialien</p> <p>Prof. Dr. Andreas Heilmann +49 345 5589-180</p>	<p>Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik</p> <p>Prof. Dr. Matthias Petzold +49 345 5589-130</p>
<p>Naturstoffkomposite</p> <p>André Rapphel +49 345 5589-436</p>	<p>Polymerfolien und Membranen</p> <p>Prof. Dr. Andreas Heilmann +49 345 5589-180</p>	<p>Bewertung mikroelektronischer Systemintegration</p> <p>Prof. Dr. Matthias Petzold +49 345 5589-130</p>
<p>Polymerbasierte Hochleistungsverbundwerkstoffe</p> <p>Dr. Ralf Schäuble +49 345 5589-151</p>	<p>Biofunktionale Oberflächen</p> <p>Dr. Andreas Kiesow +49 345 5589-118</p>	<p>Charakterisierung Mikrosysteme</p> <p>Prof. Dr. Matthias Petzold +49 345 5589-130</p>
<p>Polymerbasiertes Materialdesign</p> <p>Prof. Dr. Mario Beiner (komm.) +49 345 5589-247</p>		<p>Nanomaterialien und Nanoanalytik</p> <p>Prof. Dr. Thomas Höche +49 345 5589-197</p>
<p>Exist-Transfer Biobasierte Schaumstoffe</p> <p>Martin Fritz +49 345 5589-434</p>		<p>Diagnostik Halbleitertechnologien</p> <p>Frank Altmann +49 345 5589-139</p>

Kontakt per Mail: vorname.nachname@iwmh.fraunhofer.de
z.B.: ralf.schaeuble@iwmh.fraunhofer.de

GEMEINSAM MIT ANDEREN FRAUNHOFER-INSTITUTEN BETRIEBENE FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

<p>Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP</p> <p>Prof. Dr. Jörg Bagdahn +49 345 5589-129 Dr. Peter Dold* +49 345 5589-428</p>	<p>Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ</p> <p>Prof. Dr. Michael Bartke** +49 3461 2598-120</p>
<p>Abteilung Zuverlässigkeit und Technologien für die Netzparität</p> <p>Prof. Dr. Jörg Bagdahn +49 345 5589-129</p>	<p>Polymerverarbeitung</p> <p>Ivonne Jahn (komm.) +49 345 5589-474</p>
<p>Diagnostik Solarzellen</p> <p>Dr. Christian Hagendorf +49 345 5589-179</p>	<p>Polymersynthese</p> <p>Dr. Ulrich Wendler** +49 3461 2598-210</p>
<p>Modulzuverlässigkeit</p> <p>Dr. Matthias Ebert +49 345 5589-117</p>	
<p>Siliziumwafer</p> <p>Dr. Hartmut Schwabe +49 345 5589-466</p>	
<p>Optische Materialien und Spektroskopie</p> <p>Prof. Dr. Stefan Schweizer +49 345 5589-128</p>	
<p>Modultechnologie</p> <p>Dr. Jens Schneider +49 345 5589-402</p>	
<p>Abteilung Labor für Kristallisationstechnologien</p> <p>Dr. Peter Dold* +49 345 5589-428</p>	

* Fraunhofer ISE
** Fraunhofer IAP

Geschäftsfeld

TRIBOLOGIE

Fokus

Wir optimieren tribologische Systeme und erarbeiten Lösungen, mit denen Reibung und Verschleiß gezielt eingestellt werden können. Zudem entwickeln wir Verschleißschutzlösungen durch technische Keramik, neuartige Schmierstoffe, tribologische Schichtsysteme sowie fertigungstechnisch konditionierte Tribowerkstoffe. Ebenso klären wir Reibungsphänomene sowie Einlauf- und Verschleißmechanismen von Wälz- und Gleitlagern, Schneid- und Umformwerkzeugen sowie Motor- und Getriebeelementen auf. Dazu nutzen wir sowohl experimentelle Untersuchungen und Mikrostrukturanalysen als auch Multiskalenmodellierung und numerische Simulation.

Leistungsspektrum

- Aufklärung von Einlauf-, Reibungs- und Verschleißmechanismen in Antrieben und Werkzeugen
- Multiskalenmodellierung und numerische Simulation («Tribosimulation») zur Beschreibung tribologischer Prozesse
- Herstellung von maßgeschneiderten Verschleißschutzschichten aus diamantähnlichem Kohlenstoff (DLC)
- Werkstofflösungen mit Hochleistungskeramik
- Tribologische Werkstoff- und Bauteilprüfung für Motorenbau, Lagertechnik und Schmierungstechnik
- Tribologische Konditionierung durch energetisch gesteuerte Endbearbeitung

Gruppen

Verschleißschutz, Technische Keramik

Verbesserung des Einsatzverhaltens und Erhöhung der Lebensdauer durch angepasste Hochleistungswerkstoffe, Systemintegration keramischer Werkstoffe.

Dr. Andreas Kailer

andreas.kailer@iwm.fraunhofer.de

Biomedizinische Materialien und Implantate

Entwicklung von praxisnahen Testmethoden und Materialmodellen zur Polymertribologie.

Dr. Raimund Jaeger

raimund.jaeger@iwm.fraunhofer.de

Tribologische Schichtsysteme

Herstellung, Charakterisierung und Optimierung von tribologischen Schichten.

Dr. Sven Meier

sven.meier@iwm.fraunhofer.de

Mikrotribologie

Untersuchung tribologischer Systeme auf der Mikro- und Nanoskala.

Prof. Dr. Matthias Scherge

matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de

Multiskalenmodellierung und Tribosimulation

Simulation des Einlaufverhaltens von tribologischen Werkstoffen mit und ohne Schmierstoff.

Prof. Dr. Michael Moseler

michael.moseler@iwm.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Das Geschäftsfeld Tribologie ist ein Teil des MikroTribologie Centrums μ TC. Das μ TC hat derzeit rund 80 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, von denen 25 promovieren und 7 als Postdoktorand oder -doktorandin arbeiten. Mit dieser enormen Forschungskraft haben wir substantielle Beiträge zur Simulation von eisenbasierten Werkstoffen durch neuartige molekulardynamische Potenziale, zu Diamantschichten auf Hartmetallen, zu alternativen Schmierstoffen auf der Basis von Flüssigkristallen, zum Übertrag bei ölgeschmierten Polymer-Stahlkontakten oder zur Einlaufvorwegnahme durch energetisch gesteuerte Endbearbeitung geleistet. Das Fraunhofer-interne Projekt »Triboman« zum Thema Fertigungsintegrierte Reduzierung von Reibung und Verschleiß in Verbrennungsmotoren endete 2012. Hierzu findet im Februar 2013 eine Fachkonferenz statt, auf der über neuartige untereutektische AlSi-Legierungen, einfachere Gussverfahren sowie den Ersatz des Honens der Zylinderbuchsen durch Präzisionsendbearbeitung berichtet wird.

Im Rahmen der Vorlaufforschung haben wir neue Diamantbeschichtungen patentiert, die Wasserstoffversprödung von Stählen eingehend untersucht und die generative Fertigung von Polymeren so weit entwickelt, dass jetzt tribologische Anwendungen adressiert werden können. Neben unseren Aktivitäten in vielen Industrieprojekten war das Jahr 2012 von zahlreichen Konferenzteilnahmen gekennzeichnet. Hervorzuheben ist der eingeladene Vortrag von Prof. Dr. Moseler auf der Gordon Conference for Tribology. Auf der diesjährigen Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie erhielt Bashir Fakih den Förderpreis für seine experimentellen Arbeiten auf dem Gebiet des Kohlebürsten-Kommutator Kontakts.

Prof. Dr. Matthias Scherge

Geschäftsfeldleiter

Telefon +49 761 5142-206

matthias.scherge@iwf.fraunhofer.de



✓ *Materialeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

KERAMIKGERECHTE AUSLEGUNG VON ANTRIEBSZAHNRÄDERN UND GEWINDEN

Durch die neuen Entwicklungen in Werkstoff- und Bauteilsimulationen ist es inzwischen möglich, Keramik als Werkstoff auch für hoch komplexe Bauteile zu testen. Bisher konnten hierbei die Risiken nur sehr schwer kalkuliert werden. Denkbar ist der Keramikeinsatz für strukturierte tribologisch beanspruchte Komponenten wie Fräser, Zahnräder, Extrusionsmundstücke und keramische Verschraubungen (Abbildung 1). Hier können neue Anwendungsbereiche für Hochleistungskeramiken erschlossen werden.

Als notwendige Vorarbeit dazu sind die analytischen Methoden für die Charakterisierung der lokalen Spannungen und Tragfähigkeiten so verfeinert worden, dass mit ihnen bei einer Auflösung von 5 µm Eigen- und Lastspannungen sowie Phasenteile bestimmt werden können. Diese Verfahren ermöglichen zusammen mit der Kopplung einer kontinuierlichen Detektion der Verschleißvolumenrate im Laborversuch eine neuartige Bewertung des tribologischen Verhaltens von Keramiken.

Keramische Antriebszahnräder

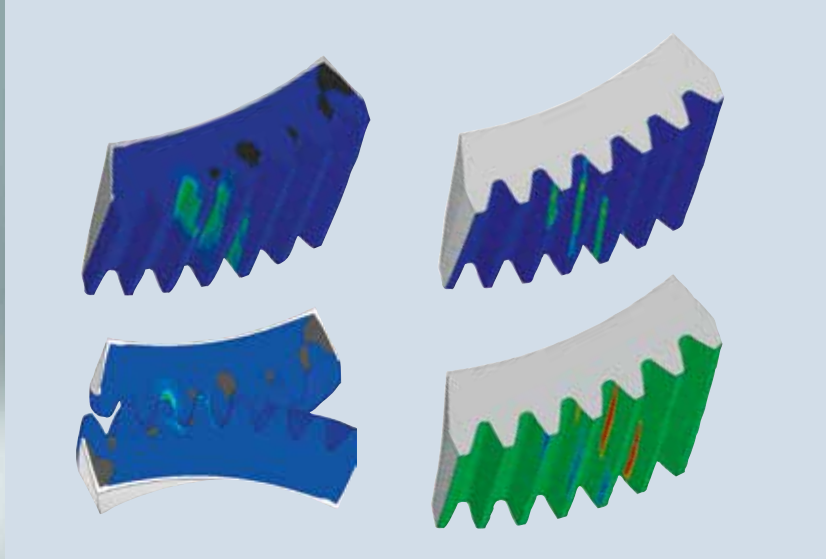
Für keramische Antriebszahnäder muss eine ideale Momentenübertragung durch das möglichst flüssig ablaufende Eingreifen der Zähne ineinander gelingen. Neben der Biegebelastung an den Zähnen ist auch der Verschleiß gering zu halten. Eine Verschleißzunahme entsteht bei den meisten Keramiken in erster Näherung bei einer Erhöhung des Produktes aus Kontaktpressung und Gleitweg an den Zahnflanken, die man in Modellversuchen wie Wälzen (Abbildung 2) bestimmen kann. Gemeinsam mit der FCT Hartbearbeitungs GmbH, der Westsächsischen Hochschule Zwickau und gefördert durch das BMWi für zentrale Innovationen des Mittelstandes wurden die zuvor über Finite-

Elemente Simulation iterativ optimierten Geometrien hergestellt und bewertet. Für eine gesinterte SiC-Keramik wurde die für eine Drehmomentübertragung von Zahnrädern notwendige hohe Zahnfußfestigkeit nach der Endbearbeitung erreicht. Wegen der hohen Korrosionsbeständigkeit von SiC bei Meerwasserschmierung, bekannt aus einem anderen Fraunhofer IWM-Projekt, wurde aus diesem Werkstoff ein Zahnrad für eine Mehrphasenpumpe der Bornemann Pumps GmbH hergestellt und wird zurzeit dort erprobt.

Keramische Verschraubung

Die keramische Verschraubung stellt besonders hohe Anforderungen an die Auslegung. Die ungünstige Kerbwirkung des Gewindes und die hohen Reibwerte sind für die spröde Keramik die dominanten Veränderungen im Vergleich zur Stahlverschraubung. Die hohen Reibwerte erzeugen ähnlich hohe Belastungsanteile über Torsions- wie über Zugbelastung. Anders als für Stahl erreicht ein Grobgewinde im Vergleich mit einem Feingewinde bei gleichem Anzugsmoment die höhere Vorspannung.

Die Wechselwirkung von Dehnungsbehinderung und Torsion wird mit der Finite-Elemente Simulation über eine Verschraubungssimulation berechnet. Für die Gestaltung des Gewindegrundes der höher belasteten Schraube hat sich nicht die Ausformung des Kerbradius sondern die Verkürzung dieser Kerbe in einer spezifischen Trapezform als vorteilhaft herausgestellt. Um auch die Aspekte der Herstellung und Bearbeitung abzudecken, wird dieses Projekt in Kooperation mit dem Fraunhofer IKTS und dem Fraunhofer IWF der TU Berlin über eine Förderung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschung durchgeführt.

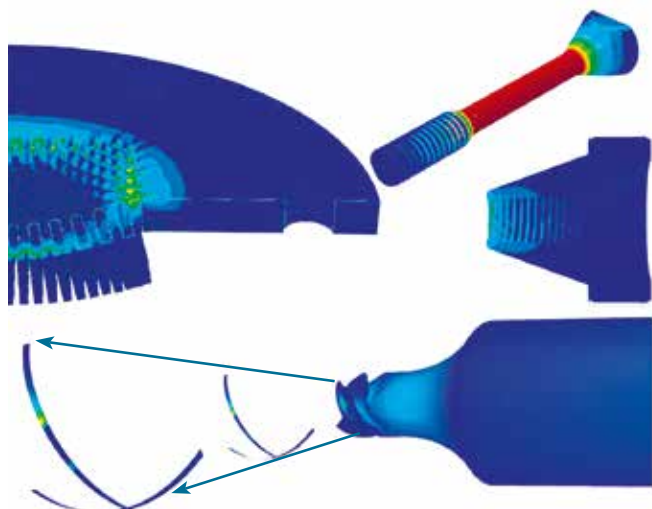


Antriebszahnäder einer Mehrphasenpumpe (Öl-Wasser-Sand-Gas) aus SSiC für den Einsatz offshore und subsea (links) und FEM-Berechnung der Hauptspannung (mittig) sowie rechts der Pressung (oben) und des Gleitwegs (unten).

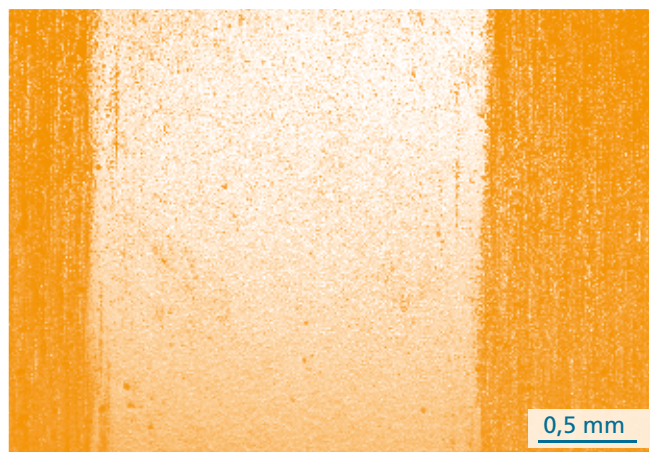
Keramische Vollschaftfräser

Moderne Vielschneider-, Umfangs- und Schruppfräser aus SiAlON-Keramik wurden in einem Forschungsprojekt des INNONET mit Industriepartnern und in Kooperation des Fraunhofer IPK, des Fraunhofer IWF der TU Berlin sowie des IfWW der TU Dresden für die Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstückwerkstoffen entwickelt. Sie ermöglichen ein im Vergleich zu Hartmetallfräsern 8-faches Zeitspanvolumen. Schwerpunkte des Fraunhofer IWM waren hierbei die Bewertung der Eingriffsbelastung über Finite-Elemente Simulationen und die Reduktion der Zerspanungsdegradation der Schneidkante. Die geeignete Geometrie ermöglicht eine homogene Lastübergabe von Schneide zu Schneide über möglichst viele Schneiden sowie unter anderem angepasste Drallwinkel und Nuttiefen.

Dr. Christof Koplin, Dr. Andreas Kailer



1 Belastungssimulation keramischer Bauteile mit der Finite-Elemente Methode: Extrusionsmundstück (links oben), Dehnschraube und Mutter (rechts oben), Vielschneider-Umfangsfäser (unten).



2 Eingeläutete Verschleißspur eines Wälzkontakts mit wassergeschmierter SSiC-Selbstpaarung.

✓ *Materialeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

KOMPOSITE AUS FUNKTIONALISIERTEN KOHLENSTOFF-NANORÖHREN UND DIAMANT

Aufgrund ihrer einmaligen physikalischen Eigenschaften gelten Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon nanotubes, CNTs) als eines der wichtigsten Materialien des 21. Jahrhunderts, die in besonderem Maße durch ihre mechanischen Qualitäten auffallen und sie interessant für die Entwicklung neuer Materialien machen. So kann beispielsweise ihre Zugfestigkeit mehr als das 400-fache von Stahl erreichen.

Die weitaus bekanntere Modifikation des Kohlenstoffs, der Diamant, besticht ebenfalls durch seine herausragenden Eigenschaften, insbesondere wenn es um seine bisher unübertroffene Härte geht (> 80 GPa), die ihn schon seit längerem als Dünnschicht für den Verschleißschutz interessant macht. So werden am Fraunhofer IWM Hartmetallbauteile mit Diamantschichten versehen, um den hohen Anforderungen beim Stanzen, Umformen und Trennen gerecht zu werden. Als problematisch erweist sich jedoch die relativ geringe Bruchzähigkeit des Diamanten ($K_{IC} \sim 5 \text{ MPa (m)}^{1/2}$).

Sägedrähte auf Kohlenstoffbasis

Das nun am Fraunhofer IWM entwickelte Verfahren zur Herstellung von Kompositstrukturen aus Kohlenstoff-Nanoröhren und kristallinem Diamant verspricht gleich eine ganze Reihe von Anwendungsmöglichkeiten mit dem Anliegen, den sonst sehr spröden Diamanten zäher zu gestalten. Auch die Übertragung auf Kohlefasern ist problemlos möglich. Ein Sägedraht auf Kohlenstoffbasis ist nur ein Beispiel von vielen, dessen Potenzial für das Trennen von Siliziumwafern derzeit in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer CSP untersucht wird. Genauso besteht Potenzial für die Verwendung als idealer Feldemitter, Nano-Bonddraht in mikroelektronischen Systemen oder für flexible Diamantschichten.

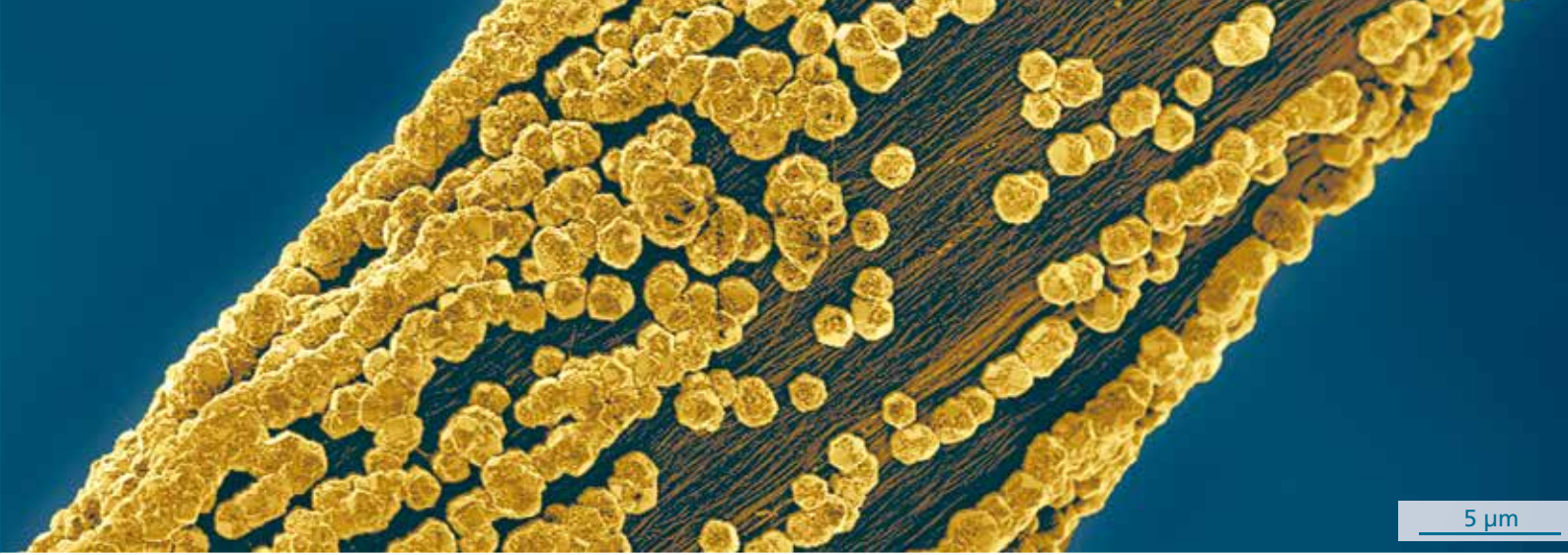
Extreme Bedingungen bei der Diamantsynthese

Dass die kontrollierte Zusammenführung derartiger Strukturen noch immer mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist, liegt vor allem an den extremen Bedingungen während der Synthese des Diamanten. Dieser wird üblicherweise mittels chemischer Gasphasenabscheidung (CVD) in einem stark wasserstoffangereicherten Plasma (99% H₂, 1% CH₄) bei Temperaturen von mehr als 700 °C abgeschieden. Dabei wirkt der Wasserstoff wie ein Katalysator, indem er die Bildung von diamanttypisch sp³-gebundenem Kohlenstoff fördert und sp²-gebundene C-C-Bindungen, wie sie unter anderem auch in CNTs vorliegen, bevorzugt ätzt.

Durch eine erhebliche Erhöhung der Kohlenstoffkonzentration im Reaktivgas kann dieser Ätzprozess gedrosselt werden. Dies beeinflusst jedoch den Diamantprozess derart stark, dass im besten Fall nur noch feinkristalliner Diamant mit einem hohen Anteil an amorphem Kohlenstoff innerhalb der Korngrenzen entsteht. Er entwickelt sich im Gegensatz zum mikrokristallinen Diamanten überwiegend durch Sekundärnukleation und ist schon allein aufgrund der begrenzten Korngröße nicht in der Lage, die CNTs vollständig zu umwachsen.

Patentiertes Verfahren in Zusammenarbeit mit CSIRO

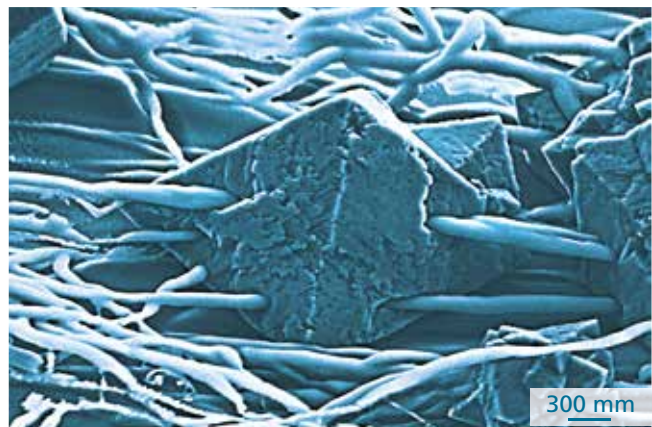
Mit dem am Fraunhofer IWM entwickelten und patentierten Beschichtungsprozess ist es im Rahmen einer BMBF-Förderung erstmals gelungen, Kompositstrukturen aus CNTs und Diamant kompromisslos zu synthetisieren (Abbildung 1). Das Projekt fand in Zusammenarbeit mit der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation CSIRO, dem australischen Pendant zur Fraunhofer Gesellschaft, statt.



Diamantbeschichtetes Garn aus miteinander versponnenen Kohlenstoff-Nanoröhren.

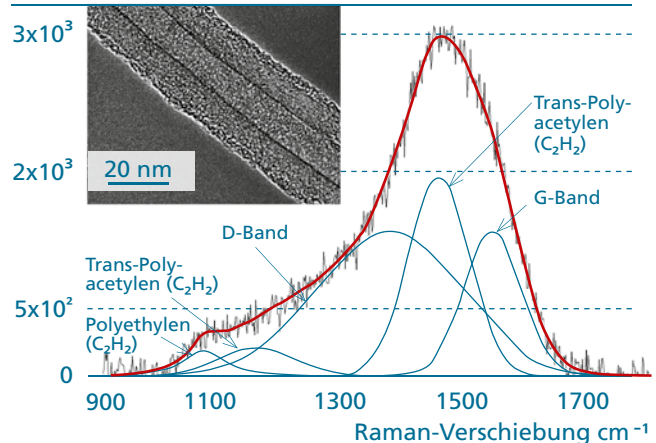
Anstatt wie bisher die Prozessbedingungen während der Diamantsynthese anzupassen, war es unser Anliegen, die mikrokristalline Struktur des Diamanten zu bewahren. Gezeigt hat sich, dass der Umweg über eine siliziumbasierte Schutzschicht vielversprechend ist. Siliziumdioxid ist beispielsweise resistent gegenüber den benötigten Prozessbedingungen, erweist sich jedoch als zu spröde. Der Übergang zu Siliziumoxycarbid, einem Vertreter der so genannten low-k-Materialien, erfüllt hingegen die Anforderungen in idealer Weise, besonders vor dem Hintergrund einer möglichen Verwendung der CNTs in Form von Nanodrähten. Dabei wurden die von CSIRO bereitgestellten mehrwandigen CNTs mit einer nur wenige Nanometer dicken, amorphen und Wasserstoff dotierten Siliziumoxycarbid-Schicht ($a\text{-SiOC:H}$) versehen (Abbildung 2).

Manuel Mee



1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Kompositstruktur aus Siliziumoxycarbid-beschichteten CNTs und Diamant.

Intensität in relativen Einheiten



2 Analyse der Schichtbeschaffenheit mittels Transmissionselektronenmikroskopie an einem beschichteten CNT sowie Ramanspektrum der $a\text{-SiOC:H}$ -Schicht.

✓ *Materialeffizienz* ✓ *höhere Lebensdauer*

DEM VERSCHLEISS VON AMORPHEN KOHLENSTOFFSCHICHTEN AUF DER SPUR

Amorphe Kohlenstoffschichten überzeugen durch eine sehr hohe Härte und niedrige Reibwerte. Daher werden sie zum Verschleißschutz an stark tribologisch beanspruchten Bauteilen, beispielsweise Kolbenringen, eingesetzt. Am Fraunhofer IWM werden solche Schichten hergestellt und systematisch untersucht. Dabei ist der Verschleiß der amorphen Kohlenstoffschichten auf mikrostruktureller Ebene noch nicht verstanden.

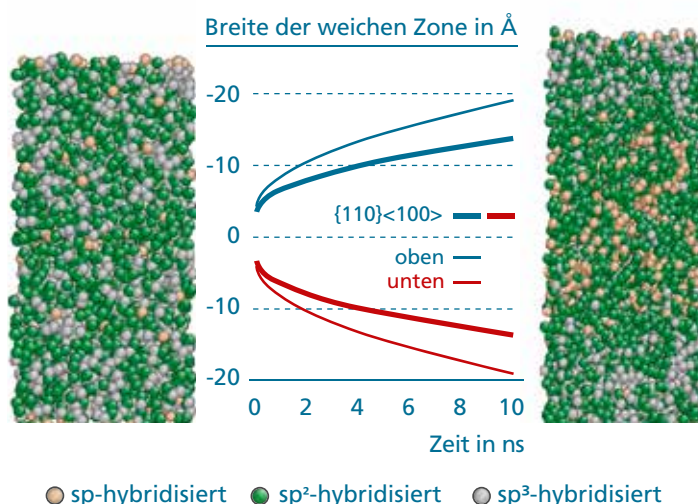
Verschleiß atomistisch simulieren

Amorphe Kohlenstoffschichten bestehen aus Kohlen- und Wasserstoffatomen. Im Gegensatz zu kristallinen Kohlenstoffformen wie Diamant oder Graphit gibt es dort allerdings keine Fernordnung der Atome. Charakterisiert werden die amorphen Kohlenstoffschichten durch den Wasserstoffgehalt sowie durch den Anteil an sp^3 - und sp^2 -hybridisierten, also vier- und dreifach gebundenen Atomen. Besonders verschleißfeste amorphe Kohlenstoffschichten haben einen sp^3 -Anteil von etwa 80 Prozent und sind damit kristallinem Diamant ähnlich.

Um den Verschleiß besser zu verstehen, wurden atomistische Simulationen vorgenommen, mit denen am Fraunhofer IWM auch schon die Verschleißmechanismen von Diamant aufgeklärt werden konnten. Sie zeigen, dass beim Aufeinandergleiten zweier amorpher Kohlenstoffschichten der sp^3 -Anteil im Kontaktbereich abnimmt. In Abbildung 1 ist links die Startkonfiguration, in der die sp^3 -hybridisierten Atome dominieren, zu erkennen. Bereits nach 10 Nanosekunden sind die meisten Atome sp^2 -hybridisiert (Abbildung 1 rechts). Die Grafik in der Mitte der Abbildung zeigt das Wachsen der sp^3 -armen Schicht (dicke Linien) im Vergleich mit dem Verschleiß der weichsten Diamantkristallrichtung (dünne Linien). Die sp^3 -arme amorphe

Kohlenstoffschicht wächst schneller als das beim Diamant der Fall ist, da durch die amorphe Struktur leichter einzelne Atome aus ihrer bestehenden Umgebung entfernt werden können. Die atomistischen Simulationen zeigen, dass Schichten mit einem geringeren sp^3 -Anteil leichter abzuscheren sind und leichter bei Kontakt mit Sauerstoff oxidieren. Sie verschleifen darum schneller. Daher ist das Wachsen der sp^3 -armen Zone ein Indikator für den Verschleiß von amorphen Kohlenstoffschichten.

Julian von Lautz, Dr. Lars Pastewka



● sp -hybridisiert ● sp^2 -hybridisiert ● sp^3 -hybridisiert

1 Startkonfiguration vor dem Scheren (links), Wachstum der stark sp^2 -haltigen Zone im Vergleich mit Diamant (Mitte), Endkonfiguration nach 10 Nanosekunden (rechts).

Gruppe

BIOMEDIZINISCHE MATERIALIEN UND IMPLANTATE

Dr. Raimund Jaeger | Telefon +49 761 5142-284 | raimund.jaeger@iwm.fraunhofer.de

✓ *Materialeffizienz*

MATERIALMINIMIERTE ÄSTHETISCHE PRODUKTE MITTELS BIOMIMETISCHER STRUKTUREN

Für eine kosteneffiziente generative Fertigung ist es wichtig, die mechanischen Eigenschaften von Produkten bewerten zu können, ohne zusätzliche Exemplare für mechanische Tests herstellen zu müssen. Am Fraunhofer IWM wurde für Leichtbaukonstruktionen ein numerisches Werkzeug zur Auslegung, Bewertung und Optimierung generativ gefertigter Produkte entwickelt. Es füllt vorgegebene äußere Formen mit einer Zellstruktur aus, die auf einer Trabekelzelle basiert, die von der Spongiosa des Knochens inspiriert wurde. Wegen der Regelmäßigkeit der Zellenstruktur erlaubt dieser Ansatz die vorherige Berechnung von mechanischen Eigenschaften wie Tragfähigkeit oder Steifigkeit. Als Eingangsparameter für Finite-Elemente Modelle werden lediglich Experimentaldaten von einigen repräsentativen Proben benötigt, um das Material und den Prozess zu charakterisieren. Das Verfahren lässt sich auf jeden Prozess der generativen Fertigung und beliebige Materialien anwenden.

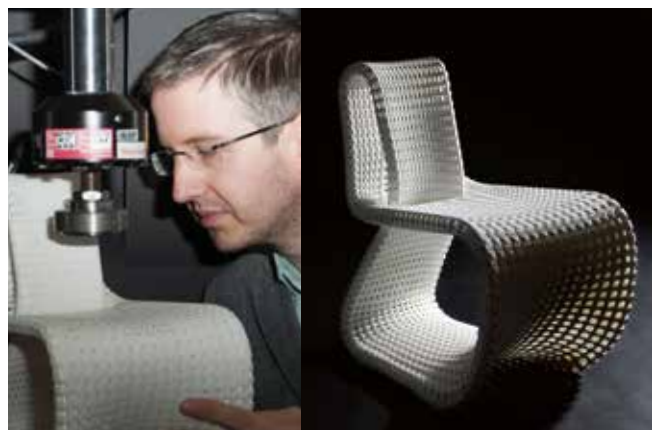
Berechenbare Strukturen

Um die mechanischen Eigenschaften des Bauteils zu optimieren, kann die Mikrostruktur der Trabekelzellen an eine vorgegebene Belastung angepasst werden. Diese Anpassung erfolgt durch eine lokale, anisotrope Erhöhung des Durchmessers der Trabekelarme. So kann durch einen minimalen Einsatz an Material und Produktionszeit die Tragfähigkeit des Bauteils deutlich gesteigert werden. Das vorgestellte Werkzeug ist auf eine große Zahl von Bauteilen anwendbar und ermöglicht, ihre mechanischen Eigenschaften zu berechnen und zu verbessern. Die biomimetische Zellstruktur führt darüber hinaus zu ästhetisch ansprechenden Produkten.

»Bionic Chair« als Demonstrator

Als Demonstrator wurde ein »bionischer Freischwinger« von der Gruppe um Professor Anke Bernotat an der Folkwang Hochschule der Künste entwickelt. Die Belastungen, die der Stuhl durch eine sitzende Person erfährt, wurden am Fraunhofer IWM berechnet. Anschließend wurde die Mikrostruktur an diese Belastung angepasst und die Geometrie in darstellbare Segmente geteilt. Der Stuhl wurde anschließend von unseren Partnern bei rpm-factories generativ gefertigt. Er erfüllte die erwartete Tragfähigkeit und wird auch ästhetisch höchsten Ansprüchen gerecht.

Dr. Tobias Ziegler, Dr. Raimund Jaeger



1 Links: Prüfung eines 1:2,5 Modells des Stuhls auf seine mechanischen Eigenschaften. Rechts: Der »bionische Freischwinger« mit einer Höhe von ca. 80 cm. Die zelluläre Struktur führt zu ansprechenden optischen Eigenschaften.

Fokus

Wir entwickeln innovative Fertigungsschritte und realisieren neue Funktionalitäten für Werkstoffe und Komponenten. Bei den Werkstoffen richtet sich das Hauptinteresse auf sprödbrechende Materialien, insbesondere Gläser, Halbleiter, Hartstoffe und Funktionskeramiken. Im Vordergrund der Verfahrensentwicklungen stehen Materialbearbeitung, Formgebung und Strukturierung. Unser Geschäftsfeld verfügt über besondere Kompetenzen in der numerischen Simulation von Materialien und Prozessen, in der Beschichtungstechnologie sowie bei Prozessen der Heißformgebung.

Unser Leistungsangebot richtet sich an Kunden und Entwicklungspartner aus den Bereichen Glas- und Keramikindustrie, Optik, Werkzeugbau und Automobilzuliefererindustrie. Es beinhaltet experimentelle Untersuchungen und technologische Entwicklungen sowie Analysen und Optimierungen durch physikalische Werkstoffmodellierung und Multiskalensimulation.

Leistungsspektrum

- Entwicklung und Bewertung von Verfahren zum schadungsarmen Bearbeiten und Trennen für Glas, Optik, Halbleitertechnik und Photovoltaik
- Antiadhäsive, hochtemperatur- und verschleißbeständige Werkzeugbeschichtungen für die Formgebung
- Entwicklung von schnellen und kostengünstigen Heißformtechniken für Gläser und Kunststoffe
- Simulation pulvertechnologischer Prozessschritte und Prozessketten
- Werkstoffmodellierung auf atomarer Skala zur Funktionsoptimierung (Struktur, Grenzflächen, Versetzungen)

Gruppen

Bearbeitungs- und Trennverfahren

Entwicklung innovativer Fertigungsverfahren für Industrieanwendungen, Bewertung und Verbesserung von bestehenden Prozessen und Materialien.

Dr. Rainer Kübler

rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de

Heißformgebung Glas

Hochwertige Komponenten aus Glas für Optik, Sensortechnik und Mikrosystemtechnik.

Dr. Peter Manns

peter.manns@iwm.fraunhofer.de

Funktionale Schichtsysteme

Funktionale Oberflächen für Optik, Formgebung, Mikrosystemtechnik.

Dr. Frank Burmeister

frank.burmeister@iwm.fraunhofer.de

Pulvertechnologie

Fertigung formgenauer und rissfreier Bauteile.

Dr. Torsten Kraft

torsten.kraft@iwm.fraunhofer.de

Physikalische Werkstoffmodellierung

Optimierung von Eigenschaften und Entwicklung neuer Werkstoffe im Computerlabor.

Prof. Dr. Christian Elsaesser

christian.elsaesser@iwm.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Zunehmend werden von unseren Partnern Leistungen zu Material- und Prozessentwicklungen unter Anwendung der am Fraunhofer IWM entwickelten Methoden der physikalisch-atomistischen Modellierung nachgefragt. So stellen wir direkt nutzbare Lösungen für die Entwicklung neuer transparenter, elektrisch leitender Materialien oder spezieller optischer Multilagenschichten bereit. Auch neue Hartstoffmaterialien für Bearbeitungstechnologien beschreiben wir mit diesen Methoden. Bei weiteren industriellen Anwendungen steht die Substitution strategisch kritischer oder umweltbelastender Materialien wie Blei, Indium oder Arsen im Vordergrund.

Unsere Methoden der Partikelsimulation haben wir für fluidbasierte Systeme weiterentwickelt und neue Schritte in der Pulveraufbereitung, insbesondere bei Trocknungs- und Entbindeprozessen sowie bei der Pressformgebung erschlossen. Wir erhalten dabei durch eine direkte Kopplung von Partikelbewegungen mit dem umgebenden Fluid wesentlich genauere Daten und eine höhere Aussageschärfe als herkömmliche Programme. Neue Ansätze verfolgen wir mit diesen Modellen auch bei der Reinigung von Oberflächen. Beispielsweise kommt es bei der Ultraschallreinigung darauf an, die Prozesse so zu beherrschen, dass unerwünschte Einflüsse wie lokale überschüssige Erwärmung oder Schädigungen vermieden werden. Darüber hinaus haben wir die Entwicklungen bei Glasprodukten sowie bei Beschichtungen für Füge- und Löttechniken konsequent weiter verfolgt und ein besonderes Entwicklungsergebnis beim Formatschneiden von Verbundglas erreicht. So erhalten wir im Gegensatz zu herkömmlichen Trenntechniken Scheiben mit saubereren Rändern und können Scheibenformate mit fast beliebigen Randkonturen, beispielsweise Kreise, schneiden.

*Dr. Günter Kleer
Geschäftsfeldleiter*

*Telefon +49 761 5142-138
guenter.kleer@iwm.fraunhofer.de*



✓ *Materialeffizienz* ✓ *Energieeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

PRÄDIKTIVE UND EFFIZIENTE PHYSIKALISCHE MODELLE FÜR HARTSTOFFE

Anorganische Hartstoffverbindungen von Metallelementen mit Kohlenstoff und Stickstoff sind häufige Bestandteile von metallischen Hochleistungswerkstoffen. Damit lassen sich viele mechanische, physikalische und chemische Werkstoffeigenschaften variieren: Ausscheidungen von Übergangsmetallkarbiden und -nitriden in Eisengefügen bestimmen durch ihre Wechselwirkungen mit Versetzungen die Verformbarkeit, Härte oder Bruchzähigkeit von Stählen. Oberflächenbeschichtungen aus diesen Hartstoffen auf stark belasteten, schnell bewegten Komponenten, zum Beispiel in Gleitlagern von Verbrennungs- und Elektromotoren oder auf Metallbohr- und -schneidewerkzeugen, schützen diese gegen mechanische, thermische und korrosive Schädigungen und erhöhen so deren Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

Berechnung von Werkstoffeigenschaften

Übergangsmetallkarbide und -nitride zeigen als massive Werkstoffe eine große Vielfalt von strukturellen und mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von ihrer chemischen Zusammensetzung. Viele der Eigenschaften lassen sich mit First-Principles-Methoden der Dichtefunktionaltheorie sehr genau berechnen und zuverlässig vorhersagen. In Abbildung 1 sind die berechnete Atomstruktur und die Elektronenverteilung in einem amorphem Kohlenstoff, a-C:H, dargestellt.

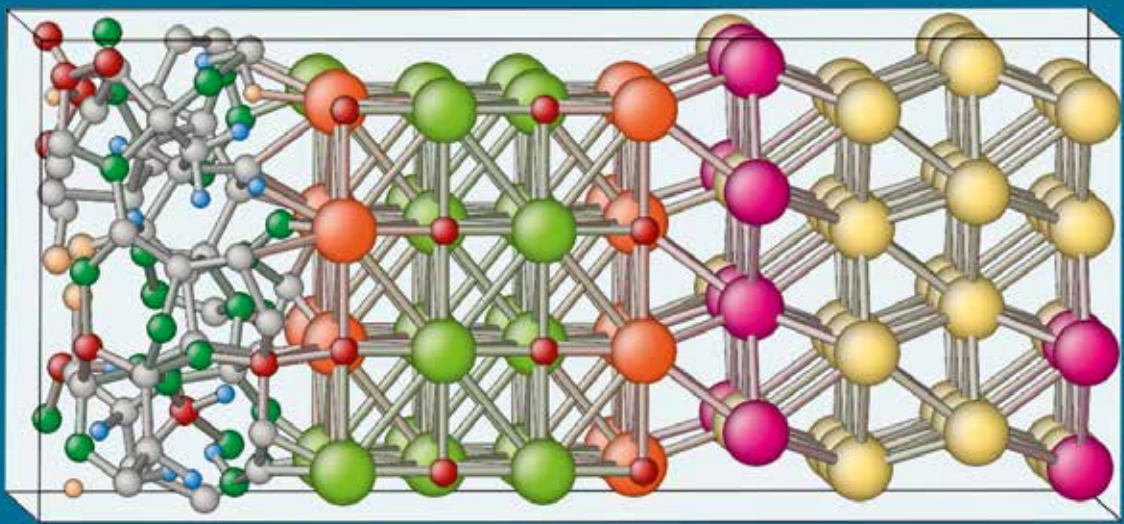
Bedeutung von Grenzflächen in harten Gefügen und Schichten

Bei mikroskopisch kleinen Ausscheidungen beziehungsweise dünnen Beschichtungen spielen zusätzlich die Kohäsion an Korngrenzen und die Adhäsion an Grenzflächen zum Grundwerkstoff eine ebenso wichtige Rolle für das Verhalten des makroskopischen Bauteils. Da es experimentell schwierig ist, Grenz-

flächeneigenschaften mit ausreichender Ortsauflösung zu bestimmen, ist hierfür die Vorhersagekraft von theoretischen First-Principles-Methoden besonders wertvoll. Im Kopf der folgenden Seite ist ein atomistisches Grenzflächenstrukturmodell für einen Schichtenstapel aus kristallinem Titan, Titankarbid und amorphem Kohlenstoff (a-C:H/TiC/Ti) dargestellt.

Beschreibung von chemischen Bindungen in Hartstoffsystemen

Ein Schlüssel zum Verständnis von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen harter Stoffe ist eine physikalisch korrekte Beschreibung der chemischen Bindungen zwischen elektronischen sd-Orbitalen der Metallatome (Ti, Nb, W, Fe ...) und sp-Orbitalen der Metall-oxidatome (C, N). Mit Kooperationspartnern an den Universitäten in Erlangen, Oxford und Bochum wird am Fraunhofer IWM dafür ein Projektionsverfahren entwickelt. Damit werden aus Quantenzuständen von Elektronen in kristallinen Festkörpern, die mit First-Principles-Methoden der Dichtefunktionaltheorie (DFT) berechnet werden, Tight-Binding-Modelle (TB) konstruiert, die zwar physikalisch etwas approximativer, aber simulatorisch viel effizienter als die DFT sind. Aus solchen Modellen lassen sich Bond-Order-Potenziale (BOP) für die Wechselwirkungen zwischen den Atomen konstruieren, bei denen chemische Bindungen nur noch implizit, aber dennoch so korrekt wie mit TB berücksichtigt werden. Mit BOP lassen sich, da der Simulationsaufwand nur proportional zur Atomanzahl steigt, sehr große atomistische Materialmodelle simulieren. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der mit DFT-, TB- und BOP-Methoden berechneten Zustandsgleichungen (Bindungsenergie pro Formeleinheit als Funktion von Bindungsabstand zu nächsten Nachbarn) für sechs verschiedene kristalline Phasen von Titankarbid.

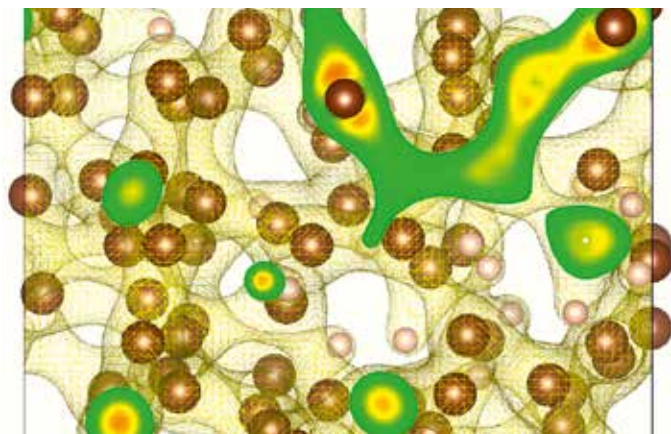


Atomistisches Schichtmodell für TiC (Mitte) zwischen Ti (rechts) und a-C:H (links);
Koordinationszahlen der Atome sind durch Farben markiert.

Computersimulation von Hartstoffgefügen

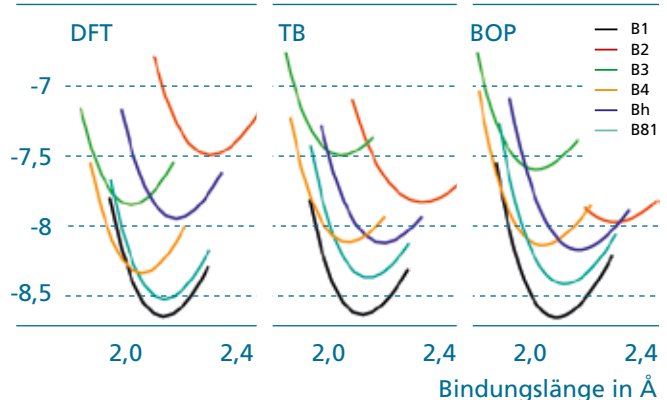
Die Genauigkeit der DFT, die an Kristalleigenschaften gut erprobt ist, lässt sich durch das Projektionsverfahren zuverlässig mit der Schnelligkeit der BOP, mit der Gefügeeigenschaften simulierbar sind, kombinieren. Erste Resultate für Ti-C und Ti-N (Urban et al., Phys. Rev. B 84 (2011) 155119 und E. R. Margine et al., Phys. Rev. B 84 (2011) 155120) zeigen schon, dass dieses Projektionsverfahren neue Perspektiven der physikalischen Modellierung für die simulatorische Vorhersage und Optimierung mechanischer Eigenschaften von harten Werkstoffgefügen und -beschichtungen mit Korn- und Phasengrenzen bietet.

Dr. Matous Mrovec, Prof. Dr. Christian Elsässer



1 Verteilung von Atomen (goldene Kugeln) und Elektronen (braunes Netz) sowie die Fläche konstanter Dichte (grün-gelb-rote Flächen: ebener Dichte-Schnitt) in a-C:H.

Bindungsenergie in eV



2 Bindungsenergien für kristalline TiC-Phasen: First-Principles- (links), Tight-Binding- (Mitte) und Bond-Order-Potential- (rechts) Simulationen. Die Legende bezeichnet die Kristallstrukturen mit Strukturbericht-Symbolen.

✓Materialeffizienz ✓Energieeffizienz

NEUER GLASBIEGEPROZESS FÜR ENERGIE- UND ZEITEFFIZIENTE PRODUKTION

Die Herstellung von gebogenen Glasscheiben hoher Qualität ist bis heute sehr aufwändig und zeitintensiv. Der Grund: Es gibt keinen standardisierten Industrieprozess mit entsprechend automatisierter Anlagentechnik für die vielfältige Produktion von gebogenen Gläsern. In einem BMBF-geförderten Verbundprojekt, das im Konzept »Forschung für die Produktion von morgen« von Karlsruhe (PTKA) betreut ist, wurde gemeinsam mit dem Fraunhofer ISC, den Firmen Elinio Industrie-Ofenbau und Eckelmann (Industrieautomation) ein neues Verfahren zum Glasbiegen mitsamt der dazugehörigen Industrieanlagentechnik entwickelt. Glasverarbeiter, Architekten und Ingenieure sowie Verbraucher können dadurch in naher Zukunft von einer kostengünstigeren, effizienteren Produktion und einer gesteigerten Verfügbarkeit gebogener Gläser profitieren.

Automatisiertes Verfahren mit innovativen Prozessmerkmalen

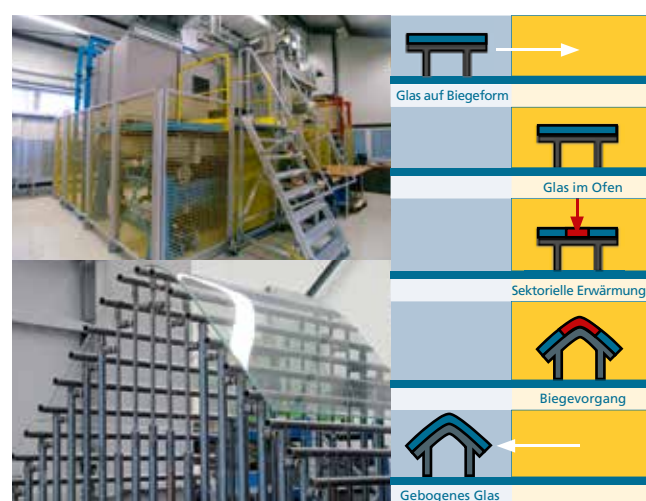
Neu am entwickelten Biegeprozess ist, dass das Glas in die warme Ofenkammer ein- und ausgefahren werden kann. Zudem lässt sich das Glas im Ofen sektoriell erwärmen. Die Biegeform ist verstellbar, sodass sie erst im Ofen von einer flachen auf die gewünschte Endkontur verstellt wird. Allein durch den maschinellen Transfer der Glasscheibe in und aus dem Ofen hinaus wird die Prozesszeit für eine Glasbiegung drastisch reduziert: von mehreren Stunden zu weniger als einer Stunde. Der Biegeprozess selbst läuft in wenigen Minuten ab. Neben den dadurch erhöhten Taktzeiten wird auch Energie eingespart, da der Ofen nicht zyklusweise aufgeheizt und abgekühlt werden muss. Mithilfe der sektoriellen Erwärmung ist es möglich – insbesondere bei Geometrien mit geraden Teilstücken –, gezielter, schneller und präziser zu biegen. Die Scheibe

wird zudem kontinuierlich an zahlreichen Auflagepunkten unterstützt, wodurch die Neigung zu Kontaktabdrücken an der Oberfläche abnimmt (Abbildung 1).

Der Weg in die Industrie

Im Verbundprojekt wurden die wesentlichen prozesstechnischen Grundlagen für das neue Biegeverfahren erarbeitet, eine industrienahe Versuchsanlage aufgebaut und Demonstrationsversuche erfolgreich durchgeführt. Das Fraunhofer IWM unterstützt weiterhin Firmen beim Transfer der Forschungsergebnisse in die Industrieumgebung.

Tobias Rist, Dr. Rainer Kübler



1 Prototyp des Glasbiegeofens am Fraunhofer IWM (links oben) und auf die Endform verstellte Biegeform (links unten); Prinzipskizze des neu entwickelten Biegeprozesses (rechts).

✓Materialeffizienz ✓verbesserte Funktionalität

SCHNELLES HEISSPRÄGEVERFAHREN FÜR HOCHWERTIGE OPTIKKOMPONENTEN

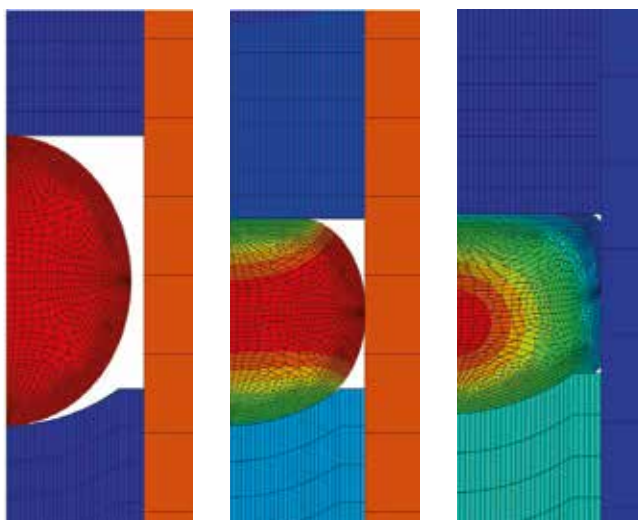
Für die Produktion von hochwertigen optischen Komponenten aus Glas hat das Fraunhofer IWM wissenschaftliche Grundlagen einer neuen Prozess- und Anlagentechnik erarbeitet. Das neue Verfahren ermöglicht die wirtschaftliche Produktion von beidseitig gepressten Optikkomponenten mit komplexen optischen Wirkflächen (asphärische Linsen). Dieses replizierende Heißformgebungsverfahren produziert die Optikkomponenten in hoher Konturgenauigkeit und Oberflächenqualität bei kurzen Prozesszeiten und zu geringen Stückkosten. Die Prozesszeiten bei diesem neuen Verfahren betragen rund 1,5 Minuten und somit weniger als ein Fünftel der bisher nach dem Stand der Technik erforderlichen Prozesszeiten. Sie werden erreicht, indem die Glasrohlinge heiß in die Pressform eingebracht werden und die Formgebung unter nicht-isothermen Bedingungen erfolgt, bei denen das Glas heißer ist als das Formwerkzeug. Hohe Konturgenauigkeiten werden durch genaue Prozessführung und Formwerkzeuge mit vorausberechneten Konturen erreicht, mit denen die Schrumpfung des Glases vorgehalten wird. Diese werden aus der numerischen Simulation des temperaturabhängigen Materialverhaltens der jeweils eingesetzten Glassorten berechnet (Abbildung 1).

Durchgängige Prozesskette entwickelt

In Zusammenarbeit mit Unternehmen der Optikbranche, der Präzisionsbearbeitung, des Maschinenbaus und der Automatisierungstechnik wurden die Grundlagen für die maschinentechnische Umsetzung des neuen Heißformgebungsprozesses und alle erforderlichen Schritte einer durchgängigen Prozesskette für eine industrielle Serienproduktion erarbeitet: Präzisionsbearbeitung von Formwerkzeugen aus Hartmetall, Herstellung von Formenbeschichtungen, Konditionierung und Handling des heißen Glases.

Im Testbetrieb der Versuchsanlage wurden Demonstrator-Komponenten von 6 bis 14 mm Durchmesser aus verschiedenen optischen Glasarten (low T_g -Gläser und RoHS-konforme Gläser) hergestellt. Die Qualität der gepressten Linsen sowie die Reproduzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wurden experimentell demonstriert. Anwendungsbereiche der so hergestellten Optikkomponenten sind beispielsweise die optische Sensortechnik, Laserstrahlformung, Informationstechnik und Bildübertragung. Weitere Informationen erhalten Sie unter www.fastmold.de.

Dr. Peter Manns



1 Numerische Simulation des Pressprozesses zur Berechnung des erforderlichen Verhaltens der Kontur der Formwerkzeuge: rot = hohe Temperatur, blau = niedrige Temperatur.

✓ *Materialeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

BEWERTUNG VON KORROSIONSSCHUTZSCHICHTEN IN ERDÖLFÖRDERANLAGEN

Bei der Erdölaufbereitung stellen die geförderten Medien aufgrund ihres korrosiven und abrasiven Charakters höchste Ansprüche an die Korrosionsbeständigkeit von Förderanlagen. Der korrosive Stress wird zusätzlich verstärkt durch hohe Temperatur- und Druckgradienten. Der Schutz vor Korrosion, der dafür in Tanks, Separatoren und Pipelines verbauten Stähle ist zudem von hoher ökonomischer und ökologischer Bedeutung. Die nach dem Stand der Technik eingesetzten polymerbasierten Beschichtungssysteme gewährleisten nur temporären Schutz und müssen regelmäßig erneuert werden. Für die Anwender fehlten bislang jedoch umfassende Untersuchungen, die die Vielzahl der auf dem Markt befindlichen Produkte vergleichend bewerten und zuverlässige Aussagen zu deren Lebensdauer unter den anspruchsvollen Einsatzbedingungen liefern.

Beständigkeitsprüfung polymerbasierter Schutzschichten

Im Rahmen eines von der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle (DGMK) geförderten Projekts wurde am Fraunhofer IWM ein Testprogramm zur Beständigkeitsprüfung unter Simulation unterschiedlicher Belastungsszenarien erarbeitet. Dieses beinhaltet sowohl die Untersuchung der Abrasionsbeständigkeit als auch die Schichtauslagerung in so genannten Atlas-Zellen (Abbildung 1).

In den Atlas-Zellen wird eine Beschichtung nicht nur korrosiven Medien unter hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt, sondern zudem einem Temperaturgradienten zwischen der Substratrückseite und der Kammerinnenseite. Dieser wirkt aufgrund thermischer Spannungen zusätzlich korrosionsfördernd. Durch diese Versuchsanordnung wird, im Gegen-

satz zu üblicherweise eingesetzten Autoklavenversuchen, eine typische Belastungssituation praxisnah abgebildet.

Die Beständigkeitsprüfungen werden von einer Analytik-Routine ergänzt, die neben der optischen Auswertung auch Untersuchungen der Quellung, der Porosität sowie der mechanischen und elektrischen Schichteigenschaften umfasst. So erhalten Anwender eine fundierte Basis für eine den Bedingungen im Feld angepasste Schichtauswahl und Schichtentwickler das für eine gezielte Weiterentwicklung notwendige Mechanismenverständnis.

Dr. Matthias Gurr



1 Prüfstand zur Bewertung von Korrosionsschutzbeschichtungen unter Berücksichtigung des »Cold Wall«-Effekts (links). Schichtversagen nach Auslagerung (rechts).

SIMULATION DES ENTBINDERNS KERAMISCHER GRÜNKÖRPER

Bei der pulvertechnologischen Herstellung von Keramikbauteilen werden organische Beimischungen verwendet, die die Formgebung erleichtern und dem gepressten Grünkörper eine gewisse Festigkeit verleihen. Vor dem Sintern müssen sie aus dem Grünkörper entfernt werden. Die im Verlauf dieser thermischen Entbinderung entstehenden gasförmigen Reaktionsprodukte können bei großen Bauteilen oder schnellen Heizraten unter Umständen nicht schnell genug abgeführt werden. Es entsteht ein Überdruck in den Poren, der das Bauteil zerstören kann. Mittels Simulation können Prozessparameter optimiert werden, um ein möglichst schnelles und sicheres Entbindern zu gewährleisten.

Modell und Experimente

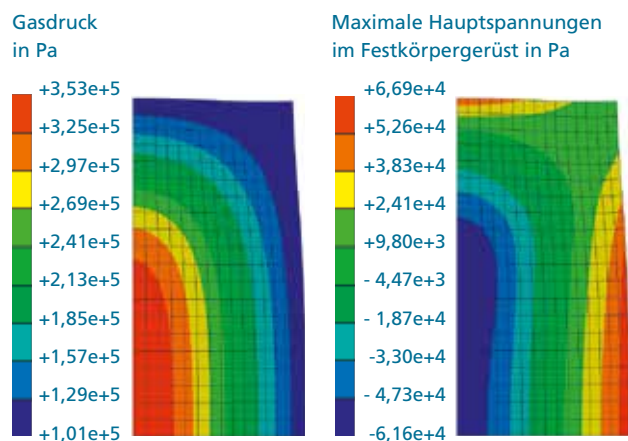
Mithilfe von DSC- und massenspektroskopischen Untersuchungen werden Annahmen zu den Zersetzungsprodukten für das Modell festgelegt und die Parameter der Reaktionskinetik angepasst. Daraufhin werden die Massenanteile bilanziert, um den in den Poren entstehenden Überdruck zu berechnen. Dabei werden die Transportmechanismen Diffusion und druckgetriebene Sickerströmung berücksichtigt. Die Permeabilitäten können aus einem eigens am Fraunhofer IWM entwickelten Experiment auch für hohe Füllgrade bestimmt werden. Auch die geringe Wärmeleitfähigkeit des porösen Grünkörpers sowie die Reaktionswärme der verschiedenen Zersetzungsprozesse werden berücksichtigt. Aus dem Gasdruck in den Poren resultiert eine Belastung des Festkörpergerüsts, die eine kritische Größe nicht überschreiten darf.

Simulationsergebnisse

Die numerische Auswertung des Modells erfolgt per Finite-Elemente Methode (FEM) und verwendet die USER-Element

Schnittstelle des kommerziellen FE-Pakets ABAQUS®. Dies erlaubt die Betrachtung einer beliebigen Bauteilgeometrie und einer vorgebbaren Anzahl diffundierender Gasspezies, was der kommerzielle Code nicht leistet. Eine nachgeschaltete Rechnung bestimmt die aus dem Gasdruck resultierenden Spannungen im Festkörpergerüst. Zudem wurde ein eigenständiges Programm für einfache Auslegungsrechnungen erarbeitet. Abbildung 1 zeigt die Verteilung von Gasdruck und maximalen Hauptspannungen für ein fiktives zylindrisches Bauteil. Die Spannungen werden an der Oberfläche des Bauteils am größten und können dort zum Abplatzen flächiger Teile führen.

Dr. Ingo Schmidt



1 Gasdruck (links) und maximale Hauptspannungen (rechts) im Festkörpergerüst beim Entbindern eines porösen Grünkörpers.

Fokus

Der Kern unseres Geschäftsfelds ist die Bewertung der Sicherheit und Lebensdauer von Komponenten von Kraftwerken und Automobilen sowie des Anlagen- und Maschinenbaus unter betriebsrelevanten Beanspruchungen. Die Beanspruchungen reichen von schnellen Crashbelastungen bis hin zu thermozyklischen Dauerbeanspruchungen. Um Bauteile zu bewerten, bestimmen wir experimentell die Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von Temperatur, Beanspruchungsart und Beanspruchungsgeschwindigkeit (statisch, dynamisch und zyklisch). Als Basis für die Bauteilbewertung nutzen wir numerische Simulationen und angepasste Werkstoff- und Schädigungsmodelle.

Leistungsspektrum

- Bruchmechanische Sicherheitsanalysen, Bewertungskonzepte für Kraftwerkskomponenten und Maschinenbauteile
- Lebensdauermodelle für thermomechanische Ermüdung in der Fahrzeug- und Kraftwerksindustrie
- Numerische Analyse von Schweißprozessen im Hinblick auf Verzug und Eigenspannungen
- Crashsimulation mit maßgeschneiderten Werkstoffmodellen und Ersatzmodellierung von Fügeverbindungen
- Charakterisierung von Werkstoffen und Bauteilen unter statischer, thermomechanischer bis zu schlagartiger, dynamischer Belastung

Gruppen

Anlagensicherheit, Bruchmechanik

Bruchmechanische Bewertung von Komponenten des Anlagen- und Maschinenbaus.

Dr. Dieter Siegele

dieter.siegele@iwm.fraunhofer.de

Crashsicherheit, Schädigungsmechanik

Verbesserung der Prognosefähigkeit von Bauteilsimulationen.

Dr. Dong-Zhi Sun

dong-zhi.sun@iwm.fraunhofer.de

Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik

Reduktion von Entwicklungskosten durch bessere Berechnungsverfahren.

Dr. Dieter Siegele (kommissarisch)

dieter.siegele@iwm.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Infolge der unterschiedlichen Arten der Energieerzeugung mit erneuerbaren und fossilen Energieträgern ist heute eine flexible Fahrweise konventioneller Kraftwerke erforderlich, wodurch die eingesetzten Werkstoffe nicht nur einer Dauerbelastung bei hohen Temperaturen, sondern auch einer Temperatur-Wechselbeanspruchung durch häufiges An- und Abfahren ausgesetzt sind. Überlagerungen von nieder- und hochfrequenten thermomechanischen Belastungen treten beispielsweise auch im Abgasstrang von Automobilen auf. Um im Labor solche komplexen thermischen Wechselbeanspruchungen zu simulieren und um das entsprechende Werkstoff- und Lebensdauerverhalten untersuchen zu können, haben wir am Fraunhofer IWM spezielle Versuchseinrichtungen entwickelt. Diese experimentellen Ergebnisse nutzen wir als Basis für unsere verbesserten Werkstoff- und Lebensdauermodelle.

Zur Charakterisierung des Werkstoff- und Bauteilverhaltens unter dynamischen und mehrachsigen Belastungen konnten wir 2012 eine neuartige servohydraulische Prüfmaschine mit Nakazima-Prüfeinrichtung für schnelle mehrachsige Umformversuche in Betrieb nehmen. Die Maschine nutzt ein Hochgeschwindigkeits-3D-Messsystem und eine Infrarotkamera. Die Versuche können bei Kräften bis 500 kN und Geschwindigkeiten bis 10 m/s durchgeführt werden. Wir qualifizieren damit insbesondere neue, hochfeste Stähle im Hinblick auf ihr Verformungs- und Schädigungsverhalten unter crashartigen Belastungen und leiten entsprechende Werkstoffmodelle für die Crashsimulation unter Berücksichtigung der mehrachsigen Beanspruchung ab.

Dr. Dieter Siegele

Geschäftsfeldleiter

Telefon +49 761 5142-116

dieter.siegele@iwm.fraunhofer.de



✓ *Materialeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

LEBENSDAUERBEWERTUNG VON SCHWEISSVERBINDUNGEN

Bedingt durch den Wärmeeintrag im Schweißprozess und die damit verbundenen Aufheiz- und Abkühlvorgänge sowie lokalen Umwandlungen des Werkstoffs entstehen in Schweißverbindungen Eigenspannungen, deren Höhe und Verteilung von zahlreichen Faktoren wie der Blechdicke, der Einspannung sowie dem Schweißprozess abhängen. Diesen Eigenspannungen sind im Betrieb Lastspannungen überlagert, deren Höhe die Umlagerung von Schweißereigenspannungen und somit die Bauteillebensdauer maßgebend beeinflusst.

Bei den in verschiedenen Regelwerken beschriebenen Vorgehensweisen zur Behandlung von Eigenspannungen bei der Auslegung und Bewertung von Schweißverbindungen bleiben zwei wesentliche Effekte unberücksichtigt: Zum einen können sich infolge der Überlagerung mit Betriebslasten und der sich daraus resultierenden lokalen Überschreitung der Streckgrenze die Eigenspannungen umlagern, sodass diese nicht in gleichem Maße wie eine durch äußere Kräfte induzierte Mittelspannung wirksam sind. Zum anderen liegt in einem geschweißten Bauteil grundsätzlich ein mehrachsiger Spannungszustand vor, der bei einer Schwingfestigkeitsbewertung besondere Betrachtung erfordert.

Werkstoffversuche und Modellierung

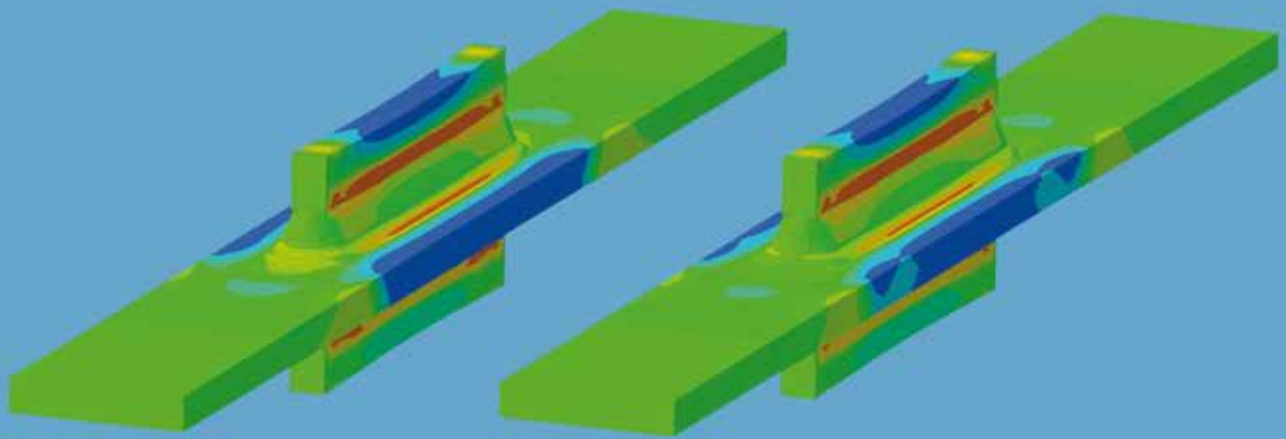
In einem durch die AiF geförderten Forschungsvorhaben wurde der Einfluss der Eigenspannungen auf die Schwingfestigkeit systematisch experimentell und rechnerisch mit werkstoffmechanisch begründeten Modellen untersucht und bewertet. Dabei standen insbesondere die Quantifizierung des Einflusses eines möglichen Eigenspannungsabbaus durch plastische Wechselverformungen auf die Bauteilfestigkeit und die

Absicherung der Ergebnisse durch Versuche an geschweißten sowie ungeschweißten Proben mit gezielt eingebrachtem Eigenspannungsfeld im Vordergrund. Als gängiger und für industrielle Anwendungen relevanter Werkstoff wurde der Feinkornbaustahl S460NL ausgewählt, deren Grundcharakterisierung und werkstoffmechanische Modellierung mithilfe geeigneter Kleinprobenversuche (Zug-, LCF- sowie Wöhlerversuche) erfolgten. Numerische Schweißprozesssimulationen sowie anschließende rechnerische und experimentelle Untersuchungen zum Eigenspannungsabbau unter mechanischer Wechselbeanspruchung wurden am Beispiel von Längssteifen durchgeführt, für die eine Reihe von Schwingfestigkeitsversuchen im geschweißten sowie im spannungsarmgeglühten Zustand vorliegen.

Simulationen zum Abbau von Eigenspannungen

Die numerische Simulation des Schweißprozesses ergibt für das bauteilrelevante Beispiel einer Längssteife lokale Schweißereigenspannungen am Nahtübergang in Höhe der Streckgrenze (Abbildung 1). Die Ergebnisse der Berechnungen wurden durch röntgenografische Eigenspannungsmessungen bestätigt. Bei anschließender äußerer Wechselbelastung treten am Nahtübergang plastische Verformungen auf, die zu einem von der Beanspruchungshöhe abhängigen Abbau der Eigenspannungen und deren Umlagerung führen (Abbildung 2).

Numerische sowie experimentelle Untersuchungen zeigten, dass sich der Eigenspannungsabbau im Wesentlichen in den ersten Belastungszyklen vollzieht und mit der Größe der plastischen Verformung im relevanten Werkstoffvolumen beziehungsweise der Höhe der äußeren Spannung korreliert.



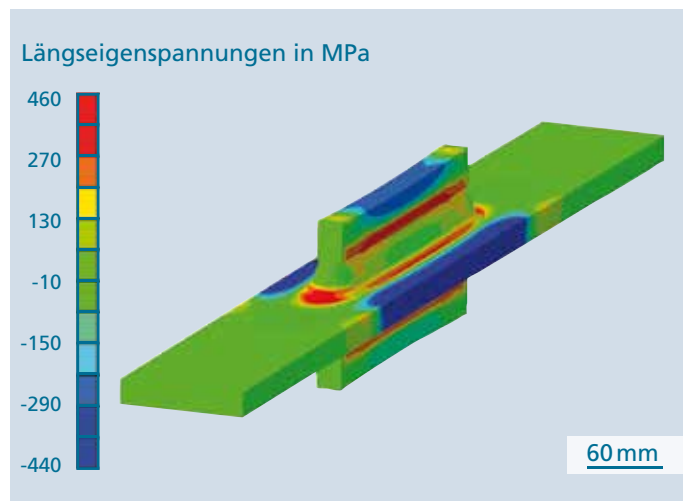
Längseigenspannungen in der Längssteife im stabilisierten Zustand infolge zyklischer Wechsel- ($R = -1$, links) bzw. Schwellbeanspruchung ($R = 0$, rechts) mit einer Nennspannungsschwingbreite von 300 MPa.

Der Eigenspannungsabbau und der sich daraus ergebende stabilisierte Eigenspannungszustand konnten rechnerisch mit einem an Kleinprobenversuchen angepassten Wechselplastizitätsmodell gut beschrieben werden.

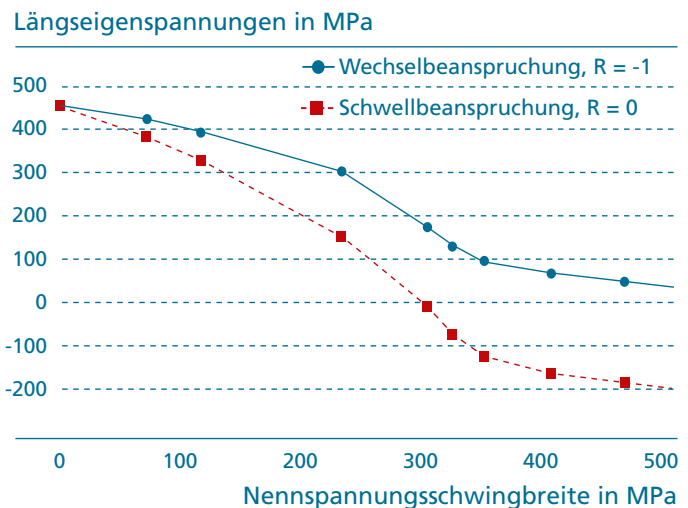
Lebensdauerbewertung

Die Lebensdauerbewertung bis zur Anrissbildung erfolgte für die untersuchten Kleinproben mit gezielt eingebrachten Eigenspannungen sowie für die Schweißverbindungen mit lokalen Schädigungsparametern. Dabei ergaben sich die Parameter nach Smith-Watson-Topper und insbesondere nach Fatemi-Socie als geeignete Größen für eine konsistente Übertragung von in einachsigen Probenversuchen ermittelten Kennwerten auf das Bauteilverhalten. Für die Anwendung ist jedoch zu beachten, dass Bewertungsergebnisse abhängig vom Detaillierungsgrad der Modellierung und insbesondere bezüglich der Abbildung der Kerbgeometrie sowie des Gefüges sind.

Dr. Igor Varfolomeev, Marcus Brand



1 Längseigenspannungen (in MPa) in einer geschweißten Längssteife.



2 Stabilisierte Eigenspannungen in Abhängigkeit der äußeren Belastung.

WEICHE ZONEN IN ULTRAHOCHFESTEN STÄHLEN BEHERRSCHEN

Die Entwicklung neuer höchst- und ultrahochfester Stähle für den Einsatz im Automobilbau schafft Leichtbaupotenziale, die dünne Wandstärken und geringes Gewicht mit hoher Festigkeit, Steifigkeit und passiver Sicherheit verbinden. Beim Schweißen von pressgehärteten, borlegierten Stählen (22MnB5) bilden sich so genannte Erweichungszonen, die gegenüber dem umgebenden Material deutlich reduzierte Festigkeiten aufweisen. Im Rahmen eines öffentlichen Forschungsvorhabens wurde der Einfluss solcher Erweichungszonen auf das Verformungs- und Versagensverhalten widerstandspunktgeschweißter, pressgehärteter Bauteile experimentell und numerisch untersucht sowie hinsichtlich der Auswirkungen auf das Bauteilverhalten bewertet. Fachlich begleitet und finanziell gefördert wurde das Projekt durch FOSTA e.V. und AVIF e.V. aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung.

Ermittlung lokaler Materialdaten

Eine zuverlässige Beschreibung von Schweißverbindungen in der Simulation setzt die Kenntnis lokaler Materialeigenschaften voraus. Aufgrund der kleinen geometrischen Maße von Punktschweißverbindungen wurden deren unterschiedliche Gefüge-zonen durch Wärmebehandlung des Grundmaterials hergestellt und in glatten und gekerbten Zugproben sowie in Scherversuchen geprüft.

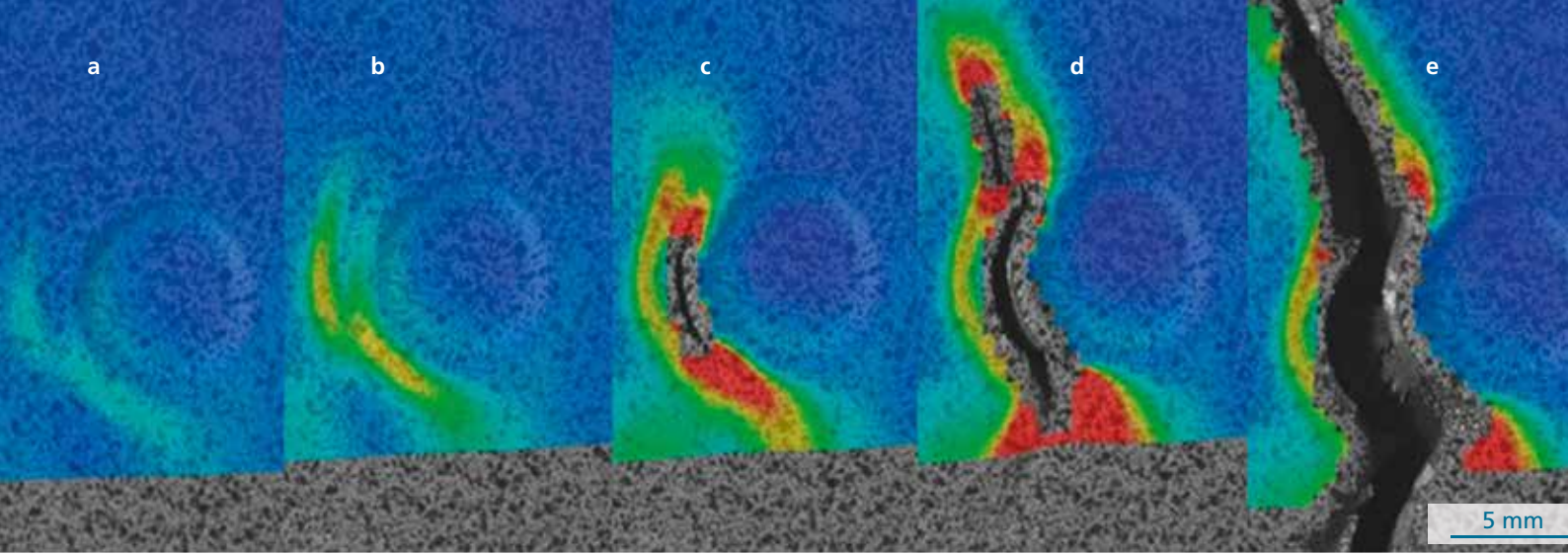
Phänomenologische Versagensmodellierung

Für die Beschreibung des Versagensverhaltens der Schweißverbindungen in der Simulation wurde ein Materialmodell verwendet, das die Materialschädigung anhand einer spannungszustandsabhängigen kritischen plastischen Dehnung beschreibt. Das Materialversagen kann mit diesem Modell sowohl unter Zug- als auch

unter Scherbeanspruchung wiedergegeben werden. Durch die Simulation der durchgeführten Zug- und Scherversuche wurden die Parameter des Versagensmodells für die einzelnen Gefüge-zonen der Schweißverbindungen ermittelt.

Entwicklung und Prüfung von Demonstratorbauteilen

Mithilfe der ermittelten Materialdaten wurden auf Basis von Finite-Elemente Simulationen mögliche Geometrien eines Demonstratorbauteils hinsichtlich ihrer Eignung für eine experimentelle Untersuchung der Einflüsse und der Auswirkungen von Erweichungszonen in pressgehärteten Bauteilen bewertet. Auf Basis der Berechnungen wurde ein Bauteil in Form eines punktgeschweißten Hutprofils ausgewählt. Dieses wurde in den Versuchen unter 3-Punkt-Biegebelastung bei quasistatischer Beanspruchung bis zum Versagen der Struktur geprüft (Abbildung 1). Neben dem Kraft-Verschiebungsverlauf wurden in den Versuchen mit Videokameras die lokalen Verformungen an den versagenskritischen Schweißpunkten aufgezeichnet und die lokalen Dehnungsfelder mit ARAMIS® ausgewertet. Während der Beanspruchung kommt es lokal in der Umgebung der höchstbelasteten Punktschweißverbindungen zu einer Rissbildung. Die gemessenen lokalen Dehnungen liegen hier bei etwa 12 Prozent. Ausgehend von diesem Anriss wächst der Riss bei weiterer Verformung und führt zum vollständigen Tragfähigkeitsverlust der Struktur. Maßgebend für das Versagen zeigte sich die Erweichungszone der Verbindungen, die durch den Fügeprozess in das pressgehärtete Material eingebracht wurde. Aufgrund des Festigkeitsmismatch mit bis zu 40 Prozent reduzierter Festigkeit im Bereich der Erweichungszone kommt es dort zu einer Dehnungslokalisierung und Rissbildung, die das vollständige Versagen der Gesamtstruktur einleitet.



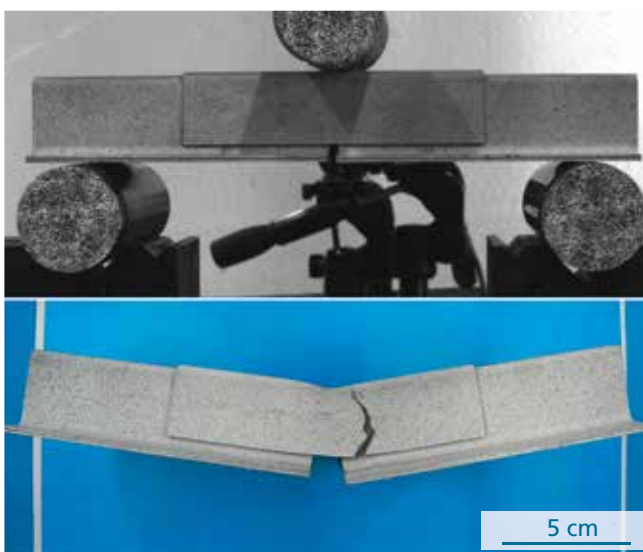
Sequenz der mit ARAMIS® gemessenen Dehnungsfelder und Rissbildung am höchstbelasteten Schweißpunkt des Demonstratorbauteils.

Pressgehärtete Bauteile sicher auslegen

Der Vergleich der Ergebnisse aus Experimenten und Simulationen mit den ermittelten Materialparametern für die einzelnen Gefügezonen zeigt sehr gute Übereinstimmungen der gemessenen und berechneten globalen Kraft-Verschiebungsverläufe sowie des lokalen Versagens und der Rissausbreitung ausgehend von den Erweichungszonen der Fügeverbindungen (Abbildung 2).

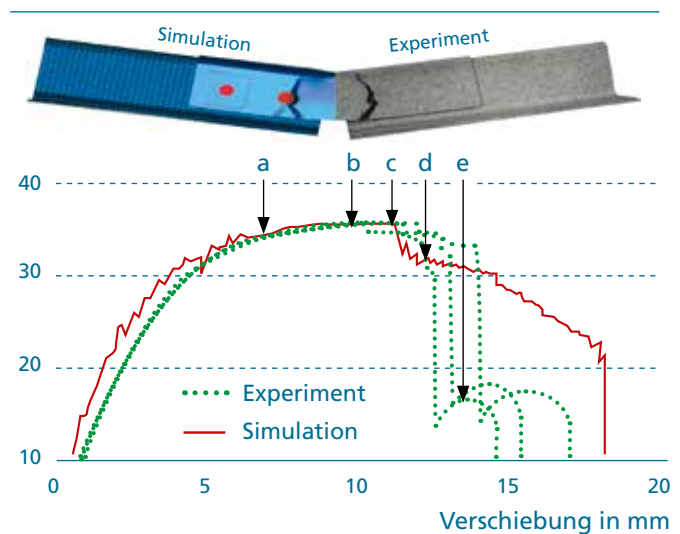
Mithilfe zonenspezifischer Verformungs- und Versagensmodelle für Schweißverbindungen lassen sich die Auswirkungen weicher Zonen vorhersagen. Bereits während der Auslegungsphase kann damit die Crashesicherheit pressgehärteter Bauteile bewertet und optimiert werden, um das Risiko eines Strukturversagens zu minimieren und die Insassensicherheit im Crashfall zu gewährleisten.

Sebastian Burget, Dr. Silke Sommer



1 Versuchsaufbau der Bauteilversuche und gebrochenes Bauteil nach einer 3-Punkt-Biegebeanspruchung.

Kraft in kN



2 Kraft-Verschiebungsverläufe aus Experiment und Simulation. Die Punkte a bis e zeigen die Aufnahmezeitpunkte aus der Sequenz gemessener Dehnungsfelder entsprechend der Bildsequenz oben auf dieser Seite.

✓ verbesserte Funktionalität

BRUCHMECHANISCHER FESTIGKEITSNACHWEIS FÜR STOSSBELASTETE BAUTEILE

Beim Betrieb technischer Anlagen können kurzzeitige, stoßartige Sonderbelastungen wie das Anschlagen beweglicher oder rotierender Teile oder schnelles Abschalten bei einem Kurzschluss auftreten. Eine Sicherheitsbewertung erfolgte bisher meist in Anlehnung an die Vorgehensweise bei statischer Belastung mit zusätzlicher Verwendung pauschaler Sicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung dynamischer Effekte und möglicher Werkstoffversprödung bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten. Im Rahmen eines von der AiF geförderten Vorhabens wurden für derartige Belastungssituationen Hochgeschwindigkeits-Prüfverfahren zur Kennwertbestimmung entwickelt sowie bruchmechanische Bewertungsmethoden erprobt, um so eine verbesserte Sicherheitsbewertung zu ermöglichen.

Hochgeschwindigkeits-Untersuchungen

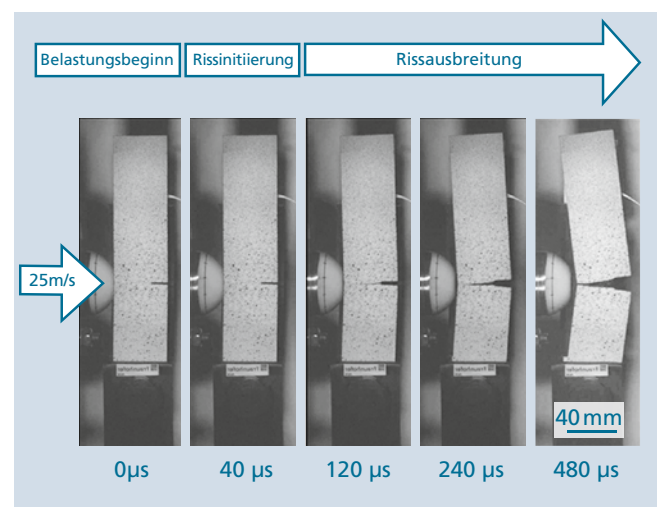
Die Untersuchungen wurden mit Dreipunktbiegeproben mit Ermüdungsanrissen in einer Schnellerreißmaschine und einer Druckgasbeschleunigungsanlage bei einer Belastungsgeschwindigkeit von bis zu 25 m/s durchgeführt. Zur optischen Rissöffnungsmessung wurden neueste Hochgeschwindigkeits-Videokameras (bis 1 Million Bilder pro Sekunde) in Verbindung mit der Grauwertkorrelationsanalyse ARAMIS® eingesetzt (Abbildung 1). Damit konnten die teilweise in Bruchteilen einer Millisekunde erreichten kritischen Rissöffnungen bei Rissinitiierung und die entsprechenden Bruchzähigkeitskennwerte bestimmt werden.

Für stoßbelastete Proben und Bauteile wurde die Rissbeanspruchung mit numerischen Finite-Elemente Analysen berechnet. Zur Verifikation wurden bauteilähnliche Versuche mit rissbehafteten Achswellen in einem Fallwerk geprüft.

Zuverlässige Sicherheitsbewertung

Für zwei ferritische Maschinenbaustähle konnte die mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit zunehmende Versprödung quantifiziert werden. Durch Vergleich der mit Finite-Elemente Analyse berechneten Bauteilbeanspruchung mit den Kennwerten ist eine zuverlässige Sicherheitsbewertung möglich, die mit Fallgewichtsversuchen auch nachgewiesen werden konnte. Unter Verwendung dynamischer Bruchzähigkeitskennwerte und der aufgezeigten Vorgehensweise zur Sicherheitsbewertung können stoßbelastete Bauteile künftig sicherer und ökonomischer ausgelegt werden.

Dr. Wolfgang Böhme, Dr. Thomas Reichert



1 Hochgeschwindigkeits-Video-Aufnahmen einer mit 25 m/s belasteten Bruchmechanik-Biegeprobe. Die ermittelte Rissöffnung bei Initiierung liefert den dynamischen Bruchzähigkeitskennwert.

✓ *Materialeffizienz* ✓ *Energieeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

RISSVERHALTEN UNTER ANISOTHERMEN BEANSPRUCHUNGSBEDINGUNGEN

Gasturbinenkomponenten aus Nickelbasislegierungen unterliegen starken Temperaturwechseln und sind deshalb thermomechanisch hoch beanspruchte Bauteile. Hierdurch können relativ früh kurze Risse entstehen, deren Wachstum die Lebensdauer der Komponenten bestimmen. Zur Festlegung von Inspektionsintervallen beziehungsweise zur Bewertung von Schadensfällen werden Rissfortschrittsdaten benötigt, um eine Aussage hinsichtlich der zu erwartenden Restlebensdauer machen zu können. Deshalb wurden im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens »TMF-Rissverhalten« iso- und anisotherme Rissfortschrittsversuche an zwei Nickelbasisgusslegierungen durchgeführt.

Risswachstumsmessung mit dem Potenzialsondenverfahren

Zur Messung des Risswachstums unter isothermen und anisothermen Bedingungen im Temperaturbereich zwischen 300 °C und 1050 °C wurde das Potenzialsondenverfahren eingesetzt. Hierzu wird ein Wechselstrom durch eine Probe geleitet und der Potenzialabfall über dem wachsenden Riss gemessen. Je länger der Riss ist, desto größer ist der Widerstand der Probe. Risswachstumsmessungen unter anisothermen Beanspruchungsbedingungen stellen nach wie vor nicht den industriellen Standard dar.

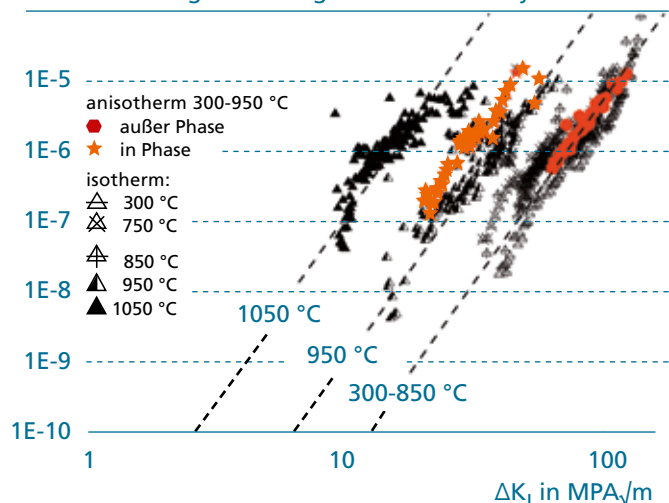
Einfluss der Phasenbeziehung zwischen mechanischer Belastung und Temperatur

Abbildung 1 zeigt die Risswachstumskurven der isothermen und anisothermen Versuche im Temperaturbereich zwischen 300 °C und 1050 °C. Die isothermen Risswachstumskurven zeigen ein stark temperaturabhängiges Verhalten.

Höhere Temperaturen führen generell zu einem beschleunigten Risswachstum. Unter anisothermen Bedingungen hat die Phasenbeziehung zwischen Temperatur und mechanischer Belastung einen großen Einfluss. Geht die Temperatur in Phase mit der mechanischen Belastung, ordnen sich die Risswachstumskurven sogar oberhalb der Maximaltemperatur des Versuchs ein (hier 950 °C). Eine niedrige Temperatur bei hoher mechanischer Belastung (außer Phase) führt zu deutlich geringeren Risswachstumsgeschwindigkeiten, die im Bereich der minimalen Temperatur des Zyklus liegen.

Christoph Schweizer, Michael Schlesinger

Risswachstumsgeschwindigkeit da/dN in m/Zyklus



1 Ergebnisse isothermer und anisothermer Risswachstumsversuche am Werkstoff MAR-M247 CC (HIP) bei einem Lastverhältnis von $R_q = -1$ im Temperaturbereich zwischen 300 und 1050 °C.

Fokus

Wir bewerten und optimieren Fertigungsschritte. Zudem charakterisieren wir das Festigkeits- und Einsatzverhalten von Werkstoffen, Werkstoffverbunden und Bauteilen. Dazu entwickeln wir geeignete experimentelle und numerische Methoden. Wir erarbeiten Lösungen zur Auswahl und Substitution metallischer Werkstoffe sowie Verbundwerkstoffe. Im Mittelpunkt stehen dabei die Simulation und die experimentelle Aufklärung der Mikrostruktur von Werkstoffen. Wir untersuchen die Änderungen der Mikrostruktur bei Betriebsbeanspruchungen sowie ihren Einfluss auf die Herstellungsprozesse und ihre Veränderungen beispielsweise durch formgebende Verfahren oder thermisches Fügen. Unsere Kunden kommen aus dem Maschinen- und Automobilbau, sind Hersteller und Betreiber von Schienenfahrzeugen oder Zulieferer.

Leistungsspektrum

- Bewertung des Einflusses von Wasserstoff auf die Eigenschaften hochfester Werkstoffe und Schweißverbindungen
- Untersuchungen zur Spannungsrisskorrosion
- Entwicklung bruchmechanischer Methoden zur Festlegung von Inspektionsintervallen ermüdungsgefährdeter Bauteile
- Entwicklung von Prüfkonzepten und Schädigungsmodellen für Verbundwerkstoffe und hybride Werkstoffverbunde
- Numerische Optimierung von Prozessparametern und Werkzeugen in der Kalt- und Warmverformung
- Schadensfallbewertung, Sachverständigengutachten
- Mikromechanische Bewertung lokaler Bauteileigenschaften

Gruppen

Mikrostruktur- und Schadensanalyse

Aufklärung von Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen.

Dr. Wulf Pfeiffer

wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de

Ermüdungsverhalten, Eigenspannungen

Verbessertes Einsatzverhalten von Komponenten und Leichtbaustrukturen.

Dr. Michael Luke

michael.luke@iwf.fraunhofer.de

Verbundwerkstoffe

Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Verbundwerkstoffen.

Dr. Jörg Hohe

joerg.hohe@iwf.fraunhofer.de

Formgebungs- und Umformprozesse

Ermittlung von günstigen Prozessparametern durch Simulation.

Dr. Dirk Helm

dirk.helm@iwf.fraunhofer.de

Mikromechanische Beanspruchungsanalyse

Untersuchung mechanischer Eigenschaften und Zuverlässigkeit von kleinvolumigen Proben sowie Weiterentwicklung der experimentellen Mechanik zur Untersuchung mechanischer Materialeigenschaften in kleinen Dimensionen.

Dr. Chris Eberl

chris.eberl@iwf.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Im Rahmen des Fraunhofer Attract-Programms startete die Gruppe »Mikromechanische Beanspruchungsanalyse«, aufgebaut unter der Leitung von Dr. Chris Eberl. Sie zielt darauf ab, am Fraunhofer IWM die experimentelle Mechanik zur Untersuchung von mechanischen Materialeigenschaften in sehr kleinen Dimensionen zu etablieren und weiterzuentwickeln. Damit bieten wir in Zukunft eine durchgehende multiskalige mechanische Bewertung mittels Simulation und Experiment an.

Im Rahmen des strategischen Projekts SUPERGRID bauen wir Kompetenzen und Versuchseinrichtungen zur Bewertung von Werkstoffen in Speichern und Wärmetauschern thermischer Solaranlagen auf. Die aktuellen Wärmeträger- und Speichermedien sind geschmolzene Salze, die während des Tag- und Nachtzyklus wechselnde Temperaturen zwischen 200 °C und 550 °C aufweisen. Zudem schlossen wir statische Korrosionstests erfolgreich ab und bauten die Prüfeinrichtungen zur Qualifizierung metallischer Werkstoffe bei überlagerter mechanisch-korrosiver Belastung auf. Erste Auftraggeber aus der Industrie profitieren bereits von unserer neuen Expertise.

Im Rahmen des MAVO-Projekts »Entwicklung technologischer Grundlagen für die Titanumformung« haben wir Werkstoffmodelle für Titan und Titanlegierungen zur besseren Beschreibung des Kalt- und Warmumformverhaltens entwickelt. Auf der Basis der Umsetzung des Werkstoffmodells in ein Finite-Elemente Programm konnten wir unter anderem den Umformprozess zur Herstellung einer Wärmetauscherplatte erfolgreich simulieren, sodass nun neue Möglichkeiten zur Optimierung derartiger Herstellungsprozesse bestehen.

*Dr. Wulf Pfeiffer
Geschäftsfeldleiter*

*Telefon +49 761 5142-166
wulf.pfeiffer@iwm.fraunhofer.de*



✓ *Materialeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

MATERIAL- UND SCHUTZKONZEPTE FÜR SOLARKRAFTWERKE

Speicher und Wärmetauscher von thermischen Solarkraftwerken werden durch variierende Einsatztemperaturen von mehr als 500 °C, Temperaturgradienten und variierende Betriebsspannungen stark beansprucht. Zudem korrodiert und kontaminiert das als Wärmeträger genutzte Medium »Solar-Salz« die Bauteile.

Sichere Bewertung und Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit

Im Rahmen des Fraunhofer Zukunftsprojekts »Supergrid« entwickelt das Fraunhofer IWM experimentelle und numerische Verfahren zur Qualifizierung von Werkstoffen für den Einsatz in heißen Salzschnmelzen. Die Arbeiten umfassen Untersuchungen zur chemischen Stabilität von Salzschnmelzen bei hohen Temperaturen sowie statische Korrosionstests zur Bestimmung der Korrosionsraten und Identifikation der Korrosionsmechanismen. Zudem werden Spannungsrissskorrosionsversuche (CERT), Ermüdungsversuche mit überlagerter korrosiver Beanspruchung, zyklische thermo-korrosive Beanspruchungsversuche und umfangreiche Mikrostruktur- und Oberflächenanalysen durchgeführt sowie Schutzschichten entwickelt und erprobt. Aus den Ergebnissen werden Mechanismen-basierte Lebensdauermodelle abgeleitet.

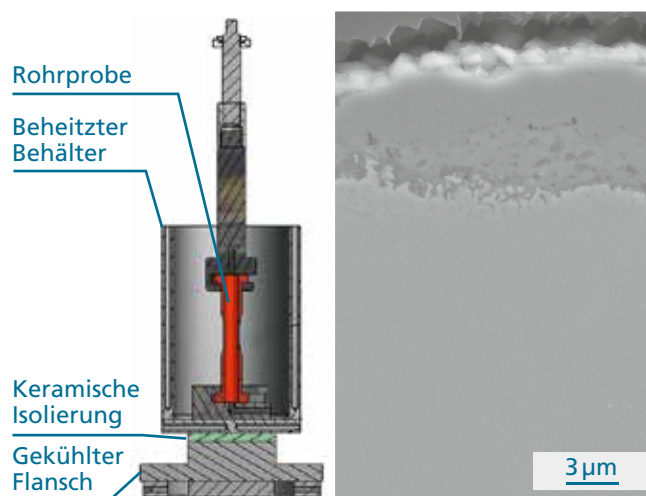
Korrosion hochwertiger Stähle in Salzschnmelzen

Zunächst wurden statische Korrosionstests in Solar-Salz (60 Gew.% NaNO₃, 40 Gew.% KNO₃) an den hochwertigen Legierungen SS347 (Niob stabilisierter, austenitischer Stahl) und Sanicro 25 bei 565 °C bis 2000 Stunden durchgeführt. Beide Materialien bildeten stabile Mischoxidschichten aus Fe, Cr und Ni (Abbildung 1), die bei rein statischer Beanspruchung als Schutzschichten wirken können.

Prüfung auf Spannungsrissskorrosion

Im nächsten Schritt wird das Korrosionsverhalten bei zusätzlicher statischer und zyklischer mechanischer Beanspruchung untersucht. Bleibt die Oxidschicht stabil und erfüllt ihre Funktion als Diffusionssperre, können diese Stähle bereits als Erfolg versprechende Kandidaten für den Einsatz in Solarkraftwerken angesehen werden. Zielsetzung der nachfolgenden Untersuchungen wird die Bewertung preiswerterer Stähle sein. Damit sollen den Anlagenbauern und Betreibern Richtlinien für eine sichere und ökonomische Auswahl von beanspruchungsge rechten Werkstoffen an die Hand gegeben werden.

Dr. Elsa Piedra, Dr. Wulf Pfeiffer



1 Prüfzelle für die mechanische Prüfung in Salzschnmelzen (links). Oxidschicht an der Oberfläche des Nb stabilisierten Stahls (SS347) nach 2000 Stunden in Solar-Salz bei 565 °C (rechts).

✓ verbesserte Funktionalität

VERFORMUNGS- UND VERSAGENSVERHALTEN: BEWERTUNG VON HYBRIDVERBUNDEN

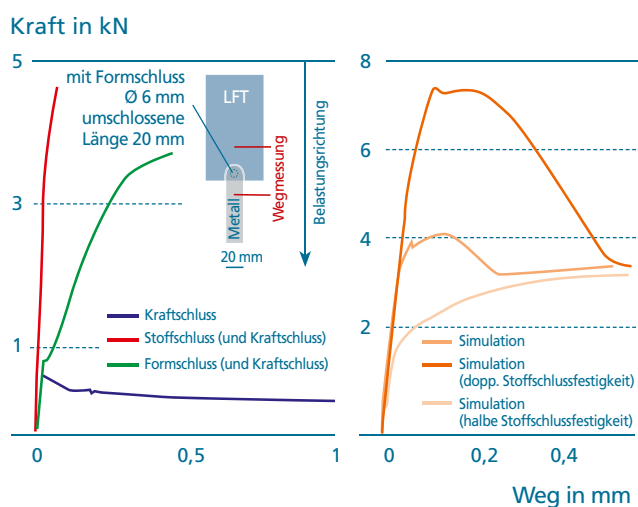
Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen bestehen oft aus dünnwandigen hochfesten Stahlstrukturen, die mit einem Kunststoff angespritzt werden. Um ihr Einsatzspektrum, beispielsweise im Automobilbau, zu erweitern, werden derzeit Kombinationen anderer Werkstoffe entwickelt: Anstelle von Stahl wird Aluminium oder ein endlosfaserverstärkter Thermoplast eingesetzt oder die Kunststoffkomponente wird durch leistungsfähigere Kunststoffe, andere Prozesse oder Langfaserverstärkung in ihren mechanischen Eigenschaften deutlich verbessert. Um ihr Leichtbaupotenzial voll ausschöpfen zu können, müssen geeignete Bewertungsmethoden vorhanden sein.

Experiment und Simulation

Im Karlsruher Innovationscluster KITE hyLITE werden daher neben Verfahrens- und Produktionsmethoden Bewertungsmethoden für Hybridstrukturen entwickelt. Die hier dargestellten Arbeiten befassen sich mit Verbunden aus langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) in Kombination mit Stahl, die am Fraunhofer ICT im Fließpressverfahren integrativ gefertigt wurden. Das Verformungs- und Versagensverhalten verschiedener Verbindungen, basierend auf Kraft-, Stoff- und Formschluss, wurde anhand von Auszugproben experimentell ermittelt (Abbildung 1, links). Die kraftschlüssige Verbindung basiert auf den durch das Schwindungsverhalten des LFT im Prozess entstehenden Eigenspannungen. Als Stoffschluss wird hier die direkte Adhäsion bezeichnet. Die formschlüssige Verbindung kann über Durchbrüche im Metall, durch die das LFT während der Herstellung fließt, realisiert werden. Basierend auf den experimentellen Untersuchungen wurden Simulationsmodelle der einzelnen Mechanismen aufgebaut.

Unter anderem sollen die Simulationen das Potenzial der einzelnen Verbindungen und der Kombination verschiedener Mechanismen aufzeigen. Eine veränderte Vorbehandlung des metallischen Einlegers beeinflusst die Festigkeit der Verbindung wesentlich. In Abbildung 1, rechts, wird anhand einer numerischen Studie mit halbiertes und verdoppelter Festigkeit der stoffschlüssigen Verbindung gezeigt, wie sich das Verformungs- und Versagensverhalten der Verbindung verändert. Bei der Kombination von Stoff- und Formschluss sollte das Verhältnis so abgestimmt werden, dass beide Komponenten einen Teil zur Kraftübertragung beitragen können.

Hanna Paul



1 Exemplarische Kraft-Weg-Kurven von Auszugproben mit verschiedenen Verbindungen (links), Simulationsstudie zur Kombination der Verbindungen (rechts).

✓ *Materialeffizienz* ✓ *Energieeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

MODELLIERUNG LANGFASERVERSTÄRKTER THERMOPLASTE (LFT)

Langfaserverstärkte Thermoplaste gewinnen in der technischen Anwendung gerade in jüngerer Zeit zunehmend an Bedeutung. Zur rechnerischen Vorhersage ihres makroskopischen Materialverhaltens und damit zur Einsparung experimentellen Charakterisierungsaufwands wurden am Fraunhofer IWM verschiedene Verfahren entwickelt und zur Einsatzreife gebracht.

Material

Langfaserverstärkte Thermoplaste sind leistungsfähige neue Materialien, die für Großserienanwendungen wie dem Automobilbau geeignet sind. Im Vergleich zu kurzfaserverstärkten Kunststoffen bieten sie den Vorteil einer größeren Faserlänge und damit einer höheren Festigkeit. Im Gegensatz zu endlosfaserverstärkten Kunststoffen können sie jedoch mit Standardverfahren der Kunststofftechnik wie dem Fließpressen oder im Spritzguss bei kurzen Taktzeiten mit etablierter Prozesstechnik verarbeitet werden. Dem steht jedoch das Problem einer ungeordneten Mikrostruktur mit prozessbedingter, im Bauteil variierender Faserorientierung gegenüber, was bisher einen hohen Aufwand in der Materialcharakterisierung bedingt.

Experimentelle Charakterisierung

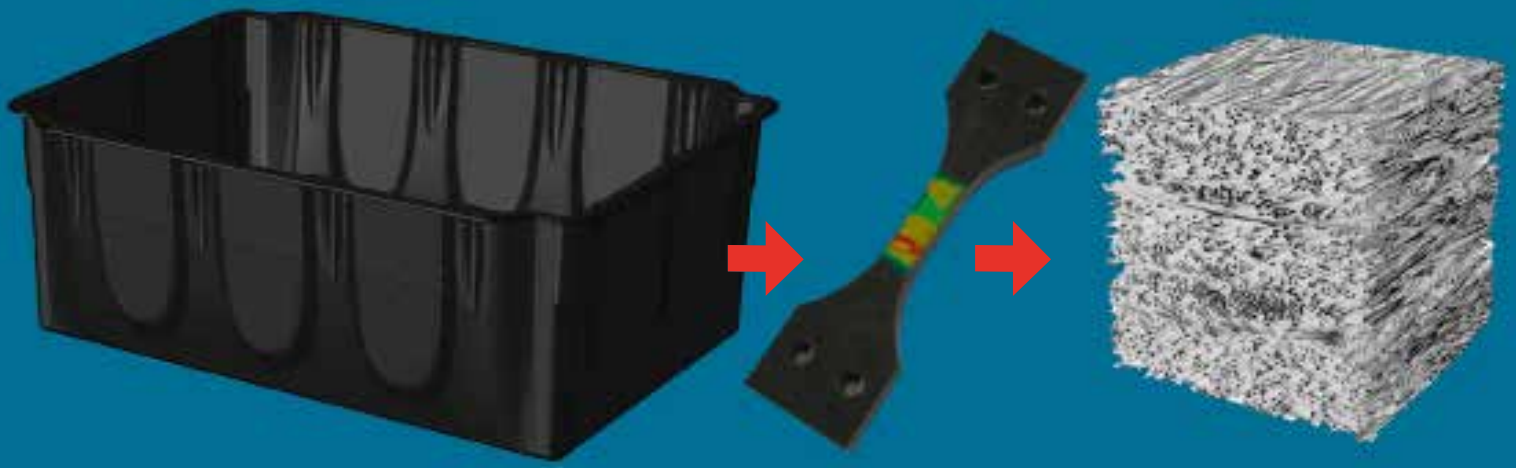
Als Modellwerkstoff zur Methodenentwicklung wurde ein im Fließpressprozess verarbeiteter glasfaserverstärkter Werkstoff mit Polyamid- und Polypropylen-Matrix verwendet. Der Werkstoff wurde in Zugversuchen richtungs- und orts aufgelöst im Einlegebereich und im Fließbereich charakterisiert. Mithilfe des Grauwertkorrelationssystems ARAMIS® wurde die lokale Verteilung der Dehnungen auf der Probenoberfläche und damit die Streuung des Materialverhaltens bestimmt. Die Mikrostruktur wurde mithilfe der Röntgencomputertomografie CT analysiert.

Mikrostrukturaufgelöste Modellierung

In einem ersten Ansatz wurde eine mikrostrukturaufgelöste Modellierung des Materials durchgeführt. Dazu wurde auf Basis der in der experimentellen Mikrostrukturanalyse bestimmten Faserorientierungs-, Faserlängen- und Dichteverteilung automatisiert ein repräsentatives Volumenelement RVE für die Mikrostruktur generiert (Abbildung 1). Mit Hilfe einer Homogenisierung unter Verwendung der Methode der Finiten Elemente FEM lassen sich hiermit die elastischen und plastischen, aber auch die thermischen oder die Kriecheigenschaften des Materials als Funktion der Mikrostruktur vorhersagen. Dabei werden alle mikromechanischen Effekte wie die Faser-Matrix- und Faser-Faser-Interaktion inhärent korrekt erfasst. Damit wird eine Vorhersage der lokalen Materialeigenschaften von Bauteilen auf der Basis der lokalen Mikrostruktur möglich.

Probabilistische makroskopische Modellierung

In Ergänzung zur mikrostrukturaufgelösten Modellierung wurde ein makroskopisch orientiertes Materialmodell entwickelt, das insbesondere die Streuung des Materialverhaltens aufgrund seiner ungeordneten Mikrostruktur berücksichtigt. Es basiert auf einer Mischungsregel in Verbindung mit einem stochastischen Ansatz. Das Modell erlaubt die Vorhersage der Wahrscheinlichkeitsverteilung der makroskopischen Materialkonstanten auf der Basis der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Faserorientierung und des lokalen Faservolumengehalts. Sind diese Größen aus der Mikrostrukturcharakterisierung bekannt oder können sie aus der Kenntnis oder Simulation des Herstellungsprozesses abgeschätzt werden, so lässt sich auf dieser Basis nicht nur der Mittelwert, sondern auch die Streuung des Materialverhaltens vorhersagen (Abbildung 2).

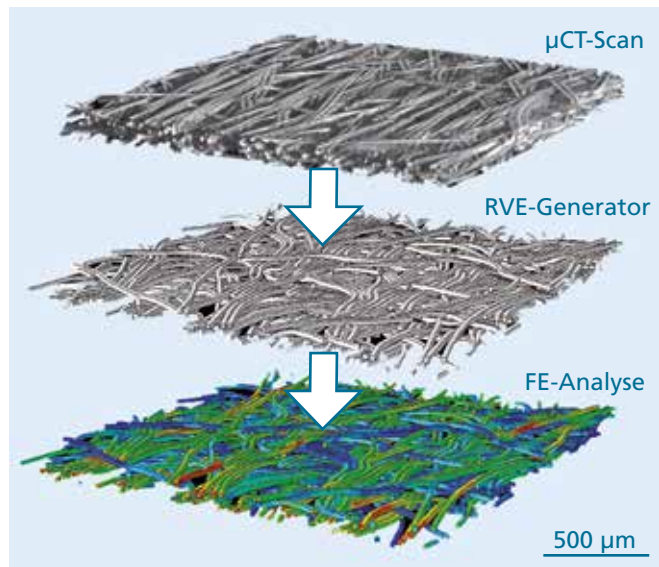


Mehrskalige Bauteil- und Werkstoffbewertung von LFT-Komponenten.

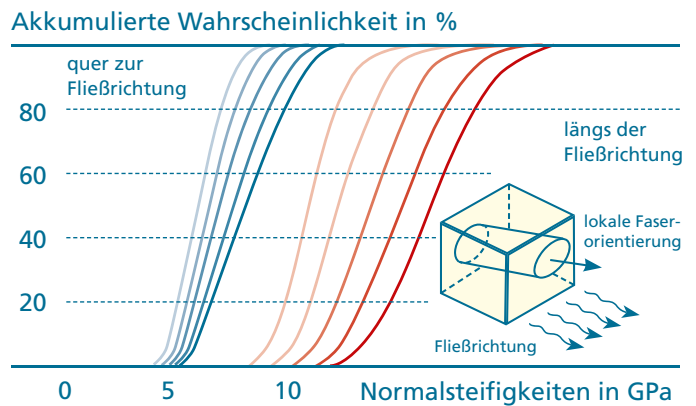
Chancen für die Material- und Bauteilentwicklung

Die entwickelten Werkzeuge zur Vorhersage des Materialverhaltens langfaserverstärkter Werkstoffe stellen ein wichtiges Glied in der Simulation der Prozesskette von der Materialherstellung zum Bauteil dar. Sie erlauben eine effiziente Vorhersage des anisotropen Materialverhaltens in den einzelnen Bauteilbereichen und der zu erwartenden Streuung. Damit ist nicht nur eine Verringerung des experimentellen Aufwands für die Materialcharakterisierung, sondern auch eine effiziente Materialgestaltung und -optimierung im Hinblick auf geforderte Eigenschaften des Bauteils möglich.

Dr. Jörg Hohe, Sascha Fliegner



1 Von der CT-Aufnahme zur mikrostrukturaufgelösten Struktursimulation.



2 Vorhersage der makroskopischen Steifigkeitsverteilung für verschiedene Faservolumenanteile (hell: 16 %, dunkel: 28 %).

✓ verbesserte Funktionalität

SIMULATION INTERMETALLISCHER SCHICHTEN IN BONDVERBINDUNGEN

Bei direktem Kontakt tendieren viele technisch interessante Materialsysteme (beispielsweise Cu-Sn, Al-Au, Al-Cu) dazu, über Diffusionsmechanismen im festen Zustand miteinander zu reagieren und intermetallische Phasen auszubilden. Die resultierende harte und spröde Grenzschicht ist ein wichtiger Bestandteil bei robusten elektrischen Verbindungen in Mikrochips, so genannten Bondkontakten.

Bei der Alterung von Bondkontakten spielt die Diffusion eine wichtige Rolle: Sie bewirkt besonders bei erhöhter Temperatur ein weiteres Wachstum oder die Bildung zusätzlicher intermetallischer Phasen. Die physikalischen Eigenschaften einer neu gebildeten Phase können für Bondverbindungen so ungünstig sein, dass diese versagen und den Ausfall von Bauteilen verursachen können. Daher ist es für die praktische Anwendung sehr wichtig zu wissen, unter welchen Umständen und nach welcher Einsatzdauer kritische intermetallische Phasen zu erwarten sind und wie ihre Entstehung minimiert werden kann.

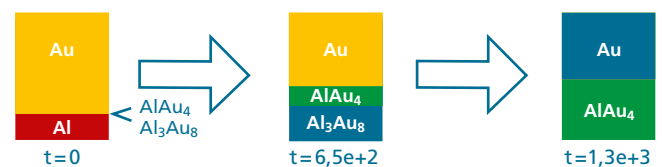
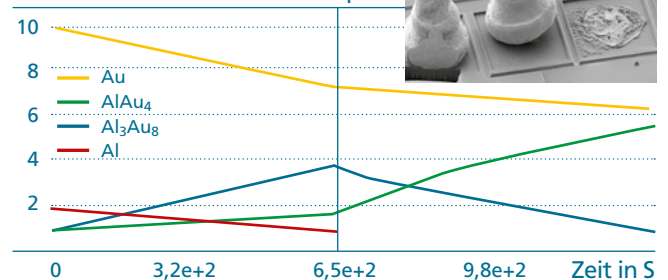
Modellierung der Phasenkinetik

Basierend auf einem thermodynamischen Extremalprinzip wurde ein effizientes Simulationsmodell entwickelt, mit dem die Bewegung von Grenzschichten zwischen zwei intermetallischen Phasen beschrieben werden kann. Zudem beschreibt das Modell die Neubildung von Phasen in Abhängigkeit von der Zeit. Eine Herausforderung besteht darin, dass die zur Simulation der Diffusionsprozesse erforderlichen Materialparameter experimentell nicht bestimmbar sind. Mithilfe von zusätzlichen Berechnungen auf atomarer Skala ist es jedoch möglich, die fehlenden Größen zu bestimmen.

Die so errechneten Werte gehen in das Modell zur Beschreibung der Phasenkinetik ein. Es reproduziert die zeitliche Abfolge des Phasenwachstums (Abbildung 1) und ermöglicht über die Analyse der Leerstellenflüsse Aussagen zu Gitterverschiebungen und Porenbildung. Die an dem Legierungssystem Aluminium-Gold erarbeitete Vorgehensweise kann auch auf weitere Fragestellungen übertragen werden, um damit beispielsweise Lötverbindungen, metallische Beschichtungen oder reaktive Bonden detailliert zu untersuchen.

Christian Markus Ulrich, Dr. Alexander Butz

Schichtdichte d der Phasen in μm



1 Errechnete Kinetik der Phasen Al_3Au_8 und AlAu_4 im Zentrum eines Ballbonds bei 175°C , darunter Schichtdickenschema bei Reaktions-Schlüsselstadien einer Al-Au-Kontaktfläche; delaminierter Al-Au-Ballbond (rechts oben).

MIKROMECHANISCHE ANALYSE UND BEWERTUNG KLEINER PROBENVOLUMEN

Die zunehmende Rohstoffknappheit und der beständige Druck zu Innovationen führen dazu, dass die Eigenschaften technischer Werkstoffe durch lokale Materialoptimierungen immer weiter verbessert werden müssen. Thermische oder mechanische Schutzschichten und eine zunehmende Integration von Funktionseinheiten haben zur Folge, dass die Materialien immer mehr heterogene und anisotrope Eigenschaften aufweisen.

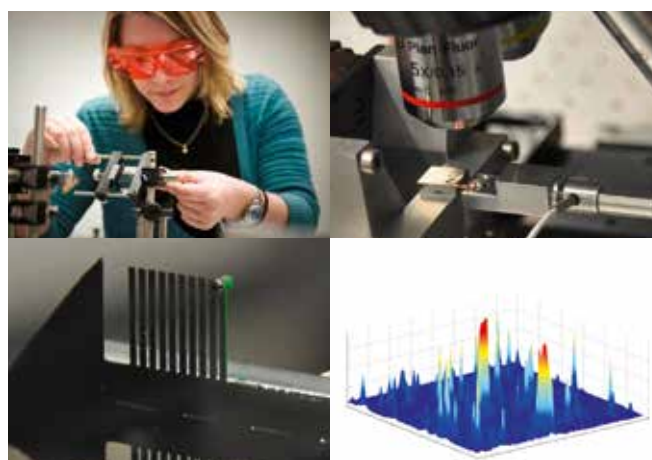
Neuartige Mikromessapparaturen

Um diesem Trend Rechnung zu tragen, sollen neuartige Mikromessapparaturen die Untersuchung elastischer und plastischer Eigenschaften unter statischer und dynamischer Last sowie bei variabler Temperatur und Atmosphäre ermöglichen. Weiterhin sollen vorhandene experimentelle Messmethoden erweitert, die mechanischen Aufbauten miniaturisiert sowie neue Konzepte entwickelt werden, um individuelle Lösungen für kundenspezifische Fragestellungen beantworten und apparative oder numerische Lösungen anbieten zu können. Das dazu nötige Know-how, von der Probenherstellung über das Probenhandling bis hin zur Durchführung der Experimente und der Interpretation der Ergebnisse, wird aufbereitet und als Forschungsdienstleistung zugänglich gemacht (Abbildung 1).

Konkret bedeutet dies, dass die Gruppe »Mikromechanische Beanspruchungsanalyse« am Fraunhofer IWM die messtechnische Lücke zwischen den makroskopischen mechanischen Untersuchungsmethoden (Meter- bis Millimeterbereich) und den Mikrosystemen (Mikro- bis Nanometerbereich) schließt. Auf dieser Größenskala (Mikro- bis Millimeterbereich) werden Zug-, Druck- und Biegeversuche unter statischer oder dynamischer Last angeboten. Damit können relevante me-

chanische Eigenschaften wie E-Modul, Poissonzahl, Spannungs-Dehnungsverhalten, Verfestigungskoeffizient, thermischer Ausdehnungskoeffizient, Bruchzähigkeit, Ermüdungsverhalten und Lebensdauer unter zyklischer Belastung, Spannungsrelaxation und Kriechverhalten experimentell bestimmt werden. Diese Messungen können im kommenden Jahr bei Temperaturen zwischen rund -40 bis 1 000 °C und beispielsweise unter Schutzgas angeboten werden. Damit wird es möglich, auch komplexe Materialsysteme zu bewerten, indem die tatsächlichen Materialeigenschaften als Eingangsgrößen in Simulationen verwendet werden können.

Tobias Kennerknecht, Dr. Chris Eberl



1 Der modulare Aufbau der Apparaturen und selbstentwickelte Steuerungsprogramme erlauben eine kundenspezifische Anpassung an die zu messenden Materialeigenschaften.

Fokus

Wir untersuchen innovative Polymermaterialien, Polymer-Nanopartikel-Komposite und Faserverbundwerkstoffe mit dem Ziel, diese zu bewerten, Struktur-Eigenschafts-Beziehungen aufzudecken, deren Einsatzverhalten vorherzusagen und Bauteile auszulegen. Wir entwickeln werkstoffgerechte Prüfkonzepte und spezielle Werkstoff- und Schädigungsmodelle, welche die konkrete Materialstruktur und die realen Beanspruchungsbedingungen berücksichtigen. Zusammen mit dem Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ in Schkopau decken wir die gesamte Kette von der Optimierung der Mikrostruktur des Werkstoffs bis zur Herstellung prototypischer Bauteile nach Maß ab. Unsere Kunden sind Polymerhersteller und -verarbeiter, Unternehmen aus den Bereichen Bau und Maschinenbau, Luftfahrt und Automotive.

Leistungsspektrum

- Mechanische und mikrostrukturelle Bewertung von Polymerwerkstoffen und -bauteilen
- Auslegung von Bauteilen aus polymerbasierten Materialsystemen
- Entwicklung von mikrostrukturbasierten Simulationsmethoden und Prüfkonzepten für höchstbelastete Faserverbund-Leichtbaustrukturen
- Technologie- und Rezepturenentwicklung für neuartige naturstoffbasierte Materialien und Bauteile
- Optimierung von Kompositmaterialien und nanostrukturierten Polymeren für spezielle Anwendungen
- Herstellung prototypischer Bauteile mittels Spritzguss, Spritzgieß-Compoundierung, Profilextrusion, Folienextrusion und reaktiver Polyurethan-Technologie

Gruppen

Naturstoffkomposite

Rezeptur- und Technologieentwicklung zur Herstellung neuartiger und maßgeschneiderter Naturstoffkomposite und deren Bewertung sowie Bauteilauslegung.

Dr. André Rapthel

andre.rapthel@iwmh.fraunhofer.de

Polymerbasierte Hochleistungsverbundwerkstoffe

Einsatzverhalten und Schadenstoleranz von hoch beanspruchten Faserverbundbauteilen.

Dr. Ralf Schäuble

ralf.schaeuble@iwmh.fraunhofer.de

Polymerbasiertes Materialdesign

Entwicklung und Optimierung innovativer Polymer- und Kompositmaterialien.

Prof. Dr. Mario Beiner (kommissarisch)

mario.beiner@iwmh.fraunhofer.de

Exist-Transfer Biobasierte Schaumstoffe

Entwicklung von Technologien zur Herstellung biobasierter Schaumstoffe.

Martin Fritz

martin.fritz@iwmh.fraunhofer.de

Polymerverarbeitung

im Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ

Entwicklung anwendungsspezifischer Thermoplast-Compounds und prototypischer Bauteile.

Ivonne Jahn

ivonne.jahn@iwmh.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Wir bedauern sehr den Tod von Prof. Dr. Roland Weidisch, der das Geschäftsfeld seit 2010 geführt hat. Sein bisheriger Stellvertreter, Prof. Dr. Mario Beiner, übernimmt die Leitung kommissarisch.

Im Januar setzte sich der Antrag »BioÖkonomie« im Spitzencluster-Wettbewerb des BMBF erfolgreich durch. Unsere Gruppe Naturstoffkomposite koordiniert das Themengebiet »Polymere, Materialien und Bauteile aus Biomasse« und ist zudem Initiator und Koordinator der Verbundprojekte »Ligninbasierte Phenolharzsysteme zur Herstellung von Sandwichelementen für das Bauwesen – LignoSandwich« und »Entwicklung eines Werkstoffverbundes aus Buchenholzfaser und biobasierten polymeren Matrices – BioWPC«. Das Gründungsvorhaben »Biobasierte Schaumstoffe« startete im März. Für eine nachhaltige und energieeffiziente Ressourcenverwertung entwickeln wir eine Technologie zum Verschäumen von pflanzenölbasierten Duroplasten für die Markteinführung systematisch weiter.

Im Oktober startete das Fraunhofer-Innovationscluster »Kunststoffe und Kunststofftechnologie für die Solarindustrie« - kurz »SolarKunststoffe«. Im Rahmen eines Gastaufenthaltes am Langley-Forschungszentrum der NASA in Hampton, USA, arbeitet ein Mitarbeiter der Gruppe Polymerbasierte Hochleistungsverbundwerkstoffe an der Weiterentwicklung, internationalen Standardisierung und Normung von Berechnungs- und Testmethoden zur Bewertung der Schadenstoleranz von Sandwichstrukturen, die in langjähriger Kooperation mit Luftfahrtunternehmen erarbeitet wurden.

*Prof. Dr. Mario Beiner
Geschäftsfeldleiter (kommissarisch)
Telefon +49 345 5589-247
mario.beiner@iwmh.fraunhofer.de*



NEUARTIGE TESTMETHODE ZUR BEWERTUNG GEKLEBTER CFK-STRUKTUREN

Die Klebetechnologie ist aufgrund der schädigungsfreien Vorbehandlung der zu fügenden Komponenten und der flächigen Lastverteilung sehr gut für das Fügen von Teilen aus faserverstärkten Kunststoffen geeignet. Klebeverbindungen zwischen Faserverbundbauteilen werden bereits in vielen Bereichen genutzt, so zum Beispiel in der Fertigung von Rotorblättern für Windkraftanlagen, im Schiffbau oder in der Automobilindustrie. Aufgrund der stetig steigenden Zahl von Anwendungen von Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff-(CFK-) Bauteilen in der zivilen Luftfahrtindustrie werden Klebeverbindungen und deren Auslegung und Bewertung immer wichtiger.

In Zusammenarbeit mit der CTC GmbH, einer Tochtergesellschaft der Airbus Operations GmbH, wurde eine Detailstruktur eines Seitenleitwerks der nächsten Generation untersucht. Die Außenhaut des Leitwerks besteht aus einer auf der Außenseite gewölbten und auf der Innenseite geraden CFK-Schaum-Sandwich-Struktur, die mit einem CFK-Rahmen im Inneren verbunden wird (Abbildung 1). Eine der möglichen Verbindungstechnologien stellt hier das Kleben dar. Finite-Elemente Untersuchungen FEM haben gezeigt, dass der aerodynamische Druck auf der Sandwichoberfläche zu einer Schälbelastung der Verbindung von Schale und Rippe führt.

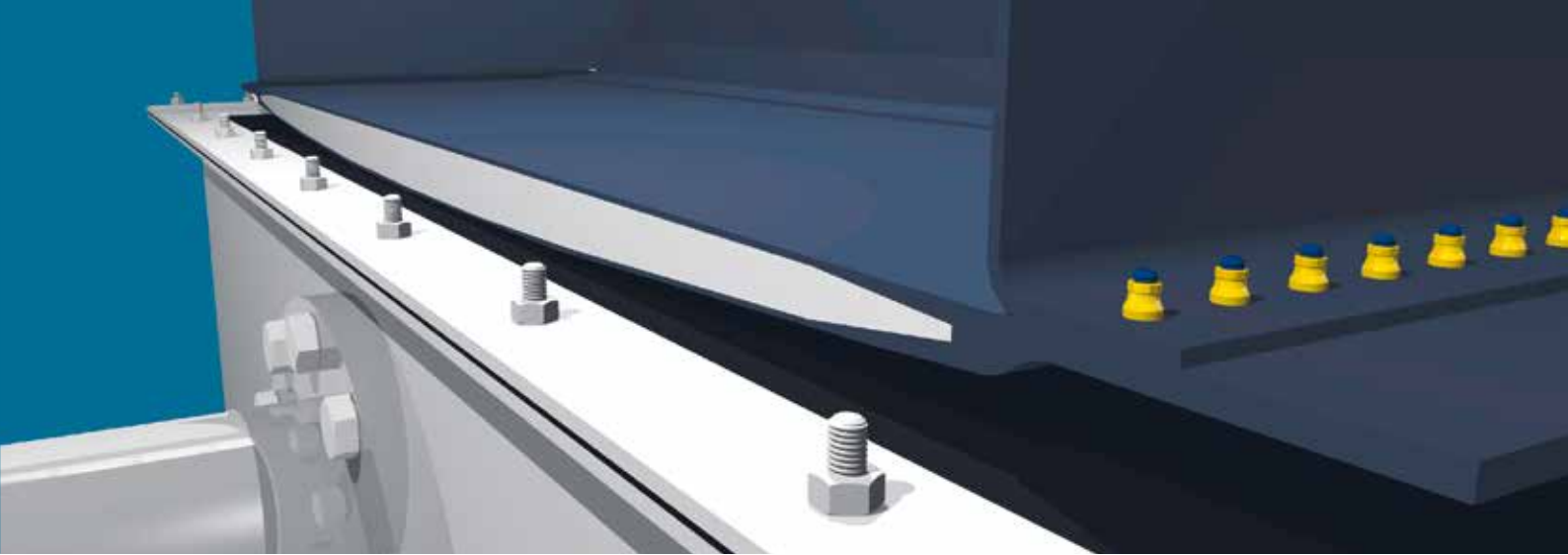
Aus diesen Rahmenbedingungen wurde ein neuartiger Test zur Bewertung des Ermüdungsverhaltens einer geklebten Verbindung zwischen einer CFK-Rippe und einer CFK-Schaum-Sandwich-Struktur entwickelt, der eine statische oder zyklische Lasteinleitung einer homogenen Flächenlast in eine gekrümmte Oberfläche ermöglicht.

Testaufbau – Design und Dimensionierung

Um eine gleichmäßig verteilte Flächenlast auf die Probe aufbringen zu können, wurde eine Elastomermembran über einen wassergefüllten Stahltank gespannt, der über einen Zylinder kontrolliert mit Druck beaufschlagt werden kann. Die Probe wird über diesem Aufbau fixiert und während des Versuchs nicht bewegt (Abbildung 2). Um ein gutes Anlegeverhalten der Membran zu erreichen, wurde mithilfe der FEM die optimale Membrandicke und Elastizität der Membran ermittelt. Dazu wurde die Membran mit ihrer Einspannung sowie die darüber liegende Probe in ANSYS® modelliert und die entsprechenden Flächen mit Kontaktelementen versehen. Die Konfiguration mit einer Membranstärke von 3 mm und einem Randabstand von 25 mm zeigte das beste Anlegeverhalten. Ein weiteres Ergebnis der Berechnung ist das benötigte Volumen, um die Probe zu deformieren. Bei einem Druck von 0,05 MPa wird demnach ein Volumen von 10 Liter benötigt. Um dieses Volumen nachführen zu können, wurde ein Hydraulikzylinder konstruiert, der mit einem Prüfzylinder eines Servohydraulik-Systems verbunden und an den Tank angeflanscht ist.

Messtechnik und Ergebnisse

Das Deformationsverhalten der Probe wurde mithilfe eines Grauwertkorrelationssystems der Firma GOM mbH aufgezeichnet. Zusätzlich wurden die Dehnungen der Rippe erfasst und der Druck im Tank aufgezeichnet. Die Überwachung der Klebschicht wurde mit einem neuartigen Structural-Health-Monitoring-System durchgeführt, das von der Firma Assystem GmbH entwickelt und bereitgestellt wurde. Dieses System überwacht mittels kleinster Bohrungen und einem angelegten Vakuum den Zustand der Klebeverbindung.

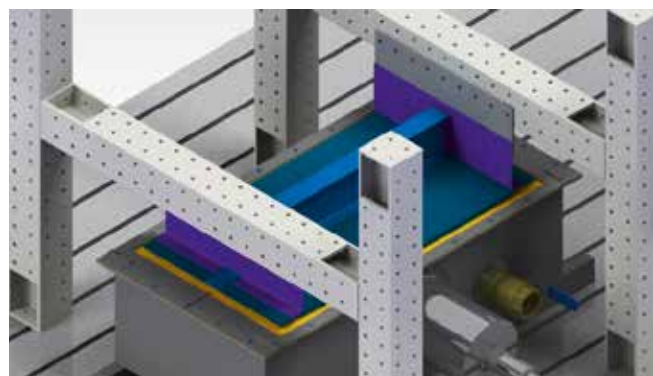
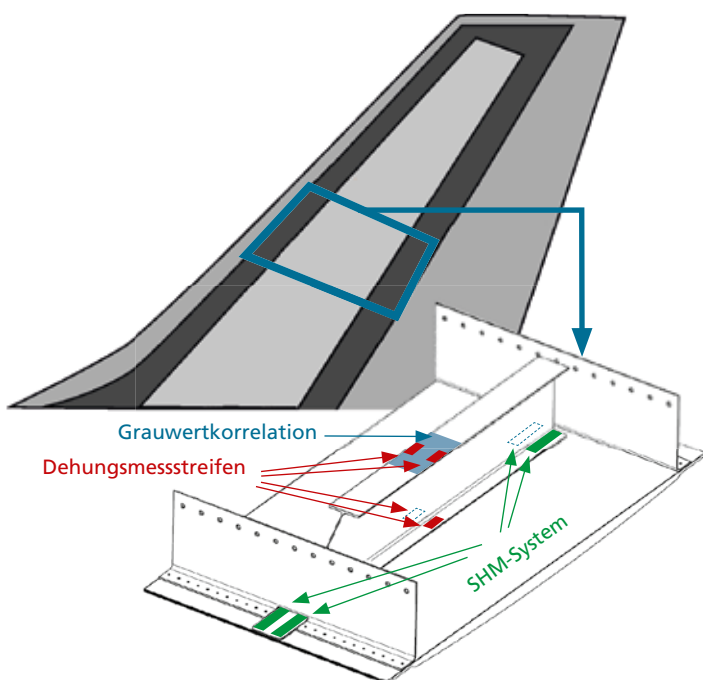


Versuchsaufbau mit eingespannter Probe.

In einer Reihe quasistatischer und zyklischer Versuche wurde gezeigt, dass das gewählte Konzept ein gutes Anlegeverhalten der Membran und somit eine gleichmäßige Lasteinleitung ermöglicht. Mithilfe des neuartigen Structural-Health-Monitoring-Systems konnte die Initialisierung sowie der Fortschritt des Risses in der Klebnaht verfolgt und dokumentiert werden. Begleitende Puls-Phasen-Thermografie sowie Lock-in-Thermografie konnten diese Ergebnisse bestätigen.

Begleitend wurde die Belastung der Probe im statischen Fall mittels FEM untersucht. Mithilfe einer Kohäsivzonenmodellierung konnte die Stelle ermittelt werden, an der die Verbindung zuerst versagen wird. Die Ergebnisse der Simulation konnten im Versuch bestätigt werden.

Stefan Ladisch



1 Seitenleitwerk mit markiertem Probenausschnitt (links); Probe mit geklebter Rippe, genieteten Holmen zur Fixierung und Messsystemen (rechts).

2 Versuchsaufbau mit Wassertank, eingespannter Probe und Lastrahmen zur Probenfixierung.

✓ *Materialeffizienz* ✓ *Energieeffizienz*

LANGFASERVERSTÄRKTE THERMOPLASTE IM SPRITZGIESSCOMPOUNDIERPROZESS

Das Fraunhofer Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ ist eine gemeinsame Initiative der beiden Fraunhofer-Institute für Werkstoffmechanik IWM und für Angewandte Polymerforschung IAP. Durch die Verbindung von Synthese- und Verarbeitungs Kompetenzen dieser beiden Einrichtungen ist es möglich, maßgeschneiderte Lösungen vom Syntheserohstoff über das Polymer bis hin zum Hochleistungsbauteil zu realisieren.

Spritzgießcompoundierung – zwei Verarbeitungsschritte in einer Maschine

Einen äußerst innovativen und effizienten Verarbeitungsprozess thermoplastischer Kunststoffe im Bereich der Formteilherstellung bietet die Möglichkeit der Spritzgießcompoundierung. Hierbei handelt es sich um die Kombination zweier Verarbeitungsverfahren in einer Maschine. Der Spritzgießcompounder besteht aus einem modular aufgebauten Doppelschneckenextruder, der die eigentlichen Aufgaben des Compoundeurs (Compoundherstellung aus mehreren Ausgangsrohstoffen) übernimmt. Der zweite Teil, die Spritzgießeinheit, spritzt die plastifizierte Compoundschmelze im gleichen Verarbeitungsschritt in die Spritzgießform ein und generiert so das fertige Bauteil. Neben einem zeit- und energieeffizienten Arbeiten ist es möglich, langfaserverstärkte Spritzgussbauteile mit mittleren Faserlängen bis in den Zentimeter-Bereich herzustellen, die im Vergleich zu kurzfaserverstärkten Thermoplastbauteilen deutliche Eigenschaftsvorteile wie bessere Schlagzähigkeiten und mechanische Festigkeiten aufweisen können (Abbildung 1). Hieraus resultiert wiederum die Möglichkeit von Materialeinsparungen oder konstruktiven Optimierungen an den Bauteilen.

Verarbeitung im Industriemaßstab

Um zusammen mit Kunden aus der Kunststoffverarbeitenden Industrie Aufgabenstellungen wie Materialentwicklungen und Verfahrensoptimierungen bis in einen Maßstab durchführen zu können, der direkt auf die Maschinengrößen der Industriepartner übertragbar ist, hat sich das Fraunhofer PAZ hinsichtlich seines Maschinenparks auf derartige »Scale up«-Prozesse von kleineren Maschinen in den Industriemaßstab spezialisiert.

So wurde ein Injection Molding Compounder KM3200-24500 MX IMC mit einer maximalen Schließkraft von 32 000 kN und einem maximalen Schussgewicht von etwa 20 kg in Betrieb genommen. Neben der bereits existierenden Anlage KM1300-14000 IMC kann nun sehr flexibel auf verschiedenste Kundenwünsche eingegangen und hochgefüllte oder faserverstärkte Bauteile mit Schussgewichten von unter 500 g bis 20 kg hergestellt werden. Weiterhin steht der Bereich Polymerverarbeitung für Erstbemusterungen von Spritzgieß-Werkzeugen und so genannten Nullserien zur Verfügung.

Langfaserverstärkung im Spritzgussbauteil

Üblicherweise werden im Spritzgießcompoundierprozess für eine Langfaserverstärkung Endlosfasern in Form so genannter Faserrovings verwendet, die dem Extruder direkt zugeführt, dort eingekürzt und in die Polymerschmelze eingearbeitet werden. Die dann im spritzgegossenen Bauteil vorliegenden Faserlängen hängen von verschiedensten Faktoren wie der ausgewählten Fasertypen, dem Maschinenaufbau sowie den eingestellten Prozessparametern ab. Ebenso stellen sich durch die Anguss- und Werkzeug-Geometrie unterschiedliche mittlere Faserlängen ein, da die eingespritzte Compoundschmelze

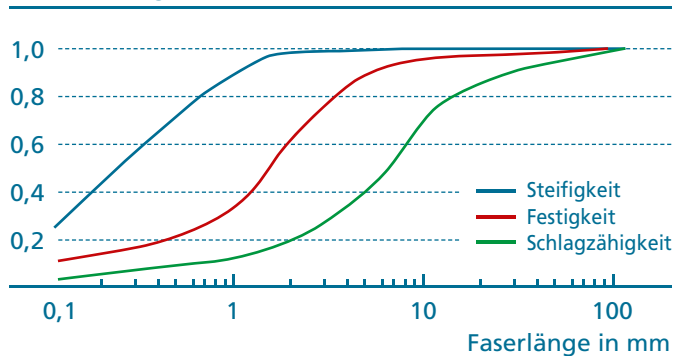


Injection Molding Compounder KM3200-24500 MX IMC.

teilweise scherintensive Strukturen in der Werkzeugform überwinden muss. Dort werden die Fasern mechanisch besonders beansprucht und dadurch eingekürzt. Abbildung 2 zeigt zwei Faserlängenverteilungen von Carbonfasern an unterschiedlichen Stellen im Bauteil, die als Endlosfasern eingearbeitet wurden. Während angussnah etwa 60 Prozent der gemessenen Fasern (500 Fasern pro Faserlängenverteilung) eine Länge zwischen 2 bis 4 mm besitzen, werden für rund 80 Prozent der gemessenen Fasern angussfern Faserlängen unter 2 mm ermittelt. Wie Untersuchungen an glasfaserverstärkten Bauteilen zeigen, kann durch eine Optimierung der Compoundierbedingungen, des Angussystems und der Werkzeug-Geometrie eine signifikante Steigerung der im Bauteil vorliegenden Faserlängen erfolgen und damit das Eigenschaftsprofil des Bauteils deutlich verbessert werden.

Ivonne Jahn

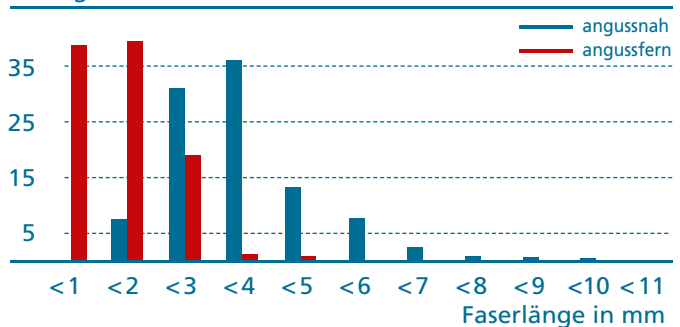
normierte Eigenschaften



1 Verläufe von Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit als Funktion der Faserlänge bei glasfaserverstärkten Kunststoffen (Faserdurchmesser ca. 10 µm).



Häufigkeit in %



2 Carbonfaserverstärkter PKW-Frontend-Träger (oben). Angussnah und Angussfern wurden Proben entnommen und die Faserlängenverteilung an extrahierten Fasern ermittelt (unten).

✓ verbesserte Funktionalität

ECHTZEIT-CHARAKTERISIERUNG VON HOLZ-PARTIKELN FÜR HOLZ-POLYMER-WERKSTOFFE

Holz-Polymer-Werkstoffe sind Verbundwerkstoffe, die typischerweise aus Holzpartikeln und Kunststoffen wie Polypropylen oder Polyethylen bestehen. Die derzeit eingesetzten Holzpartikel sind vor allem kubisch (Holzmehle), üblicherweise mit gleichen Abmessungen von 300 bis 400 µm in Länge, Breite und Dicke. Daneben gibt es Bestrebungen, Holzfasern einzusetzen, die über ihr höheres Verhältnis von Länge zu Durchmesser bessere Produkteigenschaften generieren können. Mit der steigenden Komplexität der Holzpartikelmorphologie erhöhen sich die Anforderungen an die Charakterisierungsmethoden, die eine gleichbleibende und verlässliche Produktqualität gewährleisten.

Prozessoptimierung und Qualitätssicherung

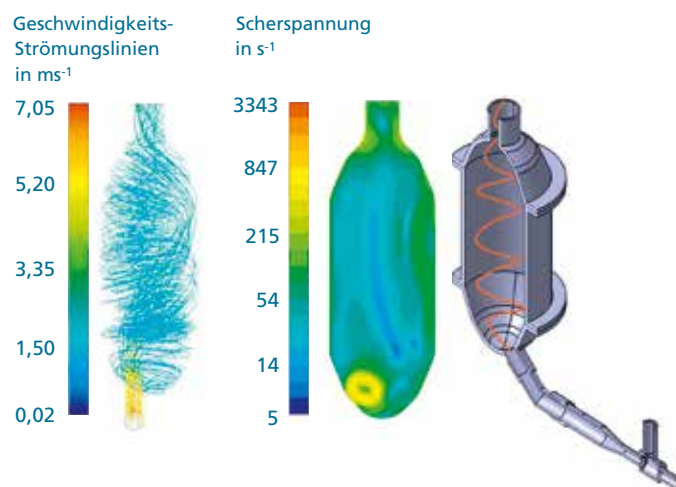
Neue Anforderungen für die Charakterisierung liegen in der Echtzeit-Charakterisierung von Holzpartikeln mit hohem Größen- und Formunterschied. Um diese Charakterisierung zu realisieren, wird in einem Verbundprojekt mit der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik und dem Institut für Holztechnologie in Dresden an einem neuen Konzept geforscht, das erlaubt, Holzpartikel in Echtzeit über einen großen Skalenbereich von wenigen Mikrometern bis hin zu mehreren Zentimetern zu deagglomerieren, zu erfassen und anschließend morphologisch auszuwerten. Die neue Charakterisierungsmöglichkeit soll sowohl bei Holzpartikelherstellern als auch bei den Holzpartikelverwertern zu einer Prozessoptimierung mit höherer Qualitätssicherheit führen.

Vereinzelung der Holzpartikel

Am Fraunhofer IWM wurden für die Vereinzelung der Holzpartikelagglomerate verschiedene hydraulische und pneumatische Vereinzelungskonzepte untersucht und bewertet. Die herange-

zogenen hydraulischen Verfahrensweisen führten zu einer sehr zügigen Vereinzelung der Holzpartikel. Nachteilig wirkt sich die Quellung der Holzpartikel aus, vor allem mit dem Medium Wasser. Ein solcher Einfluss kann für die pneumatische Verfahrensweise ausgeschlossen werden. Mittels numerischer Strömungsberechnungen konnte der Prozess für die pneumatische Vereinzelung optimiert werden (Abbildung 1). In Laborversuchen konnten unterschiedliche Holzpartikelagglomerate für die weitere Charakterisierung sehr gut vereinzelt werden.

Dr. André Rapphel, Torsten Theumer



1 Numerische Strömungsberechnung der Geschwindigkeits- (links) und Druckverteilung (Mitte) für die pneumatische Vereinzelung in einem Zyklon; Schemazeichnung des Zyklons (rechts).

✓ *Materialeffizienz*

STRUKTUR-EIGENSCHAFTS-BEZIEHUNGEN IN BLOCKCOPOLYMER-NANOKOMPOSITEN

Die Kombination von nano-phasenseparierten Blockcopolymeren und modifizierten Nanopartikeln bietet neue Möglichkeiten zur Steuerung der Dispergierung der Füllstoffe und deren Lokalisierung in einer bevorzugten Phase des Blockcopolymer. Dies eröffnet vielfältige Chancen, um gezielt die mechanischen Eigenschaften der Polymermaterialien einzustellen.

Gute Dispergierung und Lokalisierung

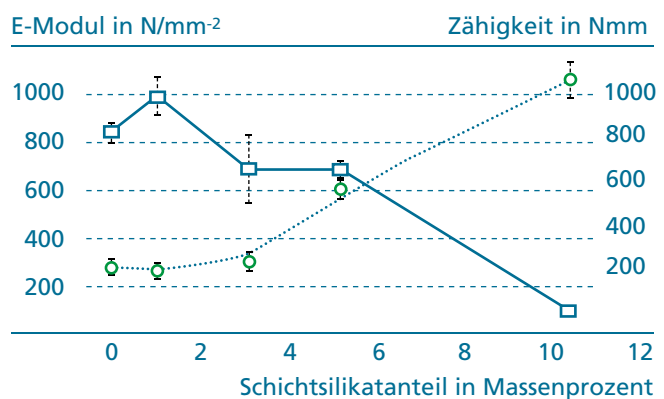
Im Rahmen eines grundlagenorientierten Projekts des Fraunhofer IWM mit dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden und der BASF SE wurde der Einfluss von mit kurzketzigem Polystyrol PS modifizierten Schichtsilikaten auf die Morphologie und das mechanische sowie bruchmechanische Verhalten eines Styrol-Butadien-Blockcopolymer untersucht. Die Morphologieuntersuchungen zeigen, dass die Schichtsilikate im Nanokomposit hoch interkaliert und partiell exfoliiert vorliegen. Die elektronenmikroskopische Aufnahme des kontrastierten Ultradünnschnitts (Abbildung 1, links oben) weist zudem darauf hin, dass die PS-modifizierten Silikatschichten vorwiegend in der PS-Mikrodomäne des Blockcopolymer lokalisiert sind.

Verbesserung der Steifigkeit bei Erhalt der Zähigkeit

Die Zugversuche an Mikroprüfkörpern machen deutlich, dass sich durch Zugabe der Schichtsilikate die Streckspannung und Steifigkeit im Vergleich zum reinen Material erhöhen. Beispielsweise verdoppelt sich bei 5 Massenprozent Füllstoffanteil der Elastizitätsmodul, wohingegen sich die Zähigkeit aber nur geringfügig verringert (Abbildung 1, unten). Bei etwa 10 Massenprozent Füllstoffanteil versagen die Prüfkörper sprödeartig. Erste bruchmechanische Untersuchungen, basierend auf dem Konzept der wahren Brucharbeit nach der Einprobenmethode, bestätigen

diesen Übergang vom zähen zum spröden Materialverhalten. Zudem wurde festgestellt, dass bei geringen Füllstoffanteilen die Bruchzähigkeit im Vergleich zum reinen Blockcopolymer höher ist, was auf die Verstärkungswirkung der Schichtsilikate, aber auch auf eine Änderung des Bruchmechanismus zurückzuführen ist. Die Entwicklung solcher eigenschaftsoptimierter Blockcopolymerer könnte neue Wege eröffnen, den Materialaufwand für bestehende Anwendungen zu reduzieren sowie ihr Einsatzspektrum zu erweitern.

Dr. Martin Ganß, Prof. Dr. Roland Weidisch



1 Elektronenmikroskopische Aufnahmen des Blockcopolymer-Nanokomposites (links oben: unkontrastiert, Mitte oben: kontrastiert) sowie mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit vom Füllstoffanteil (unten).

BIOLOGISCHE UND MAKROMOLEKULARE MATERIALIEN

Fokus

Für unsere Kunden aus den Bereichen Medizintechnik, Pharmazie, Biotechnologie und Kunststoffverarbeitung entwickeln und bewerten wir Oberflächenmodifizierungs- und Beschichtungsverfahren zur Erzeugung von biofunktionalen Oberflächen. Wir untersuchen die mechanischen und morphologischen Eigenschaften von biologischen und biomedizinischen Materialien und verwenden Nanotechnologien zur Funktionalisierung dieser Materialien. Wir gestalten und nutzen spezielle mechanische Messplätze zur Ermittlung der Strukturbiokompatibilität von Implantaten und bewerten die Veränderungen der Mikrostruktur mithilfe von elektronenmikroskopischen Präparations- und Untersuchungsmethoden. Projektschwerpunkte sind unter anderem die Etablierung neuer Antifoulingkonzepte für Filtrationsmembranen durch die kombinierte Anwendung von plasmagestützten und nasschemischen Beschichtungsverfahren, die biokompatible Strukturierung und Funktionalisierung von Polymerfolien und die Entwicklung von nanostrukturierten Sensorarraystrukturen.

Leistungsspektrum

- Entwicklung von Verfahren zur Oberflächenmodifizierung und zur Veredlung von Polymerfolien (Atmosphärendruck-Plasmaverfahren, Nassbeschichtungen, Prägeverfahren u.a.)
- Untersuchungen von biokompatiblen Materialien und Oberflächen für die Medizintechnik
- Morphologische und mechanische Bewertung von biologischen Materialien und Implantaten (z.B. Dentalmaterialien, Knorpel, Bandscheiben, Zellkulturen)
- Entwicklung und Anwendung von Antifoulingmaßnahmen für Filtrationsmembranen in Wasserwirtschaft und Klimatechnik

Gruppen

Polymerfolien und Membranen

Verbesserung der Anwendungseigenschaften insbesondere der biokompatiblen Eigenschaften von Polymerfolien und Filtrationsmembranen.

Prof. Dr. Andreas Heilmann

andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de

Biofunktionale Oberflächen

Entwicklung und Bewertung von Verfahren zur Modifizierung von Materialoberflächen für die Biotechnologie, Pharmazie und Medizintechnik.

Dr. Andreas Kiesow

andreas.kiesow@iwmh.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Bei der Verknüpfung der mechanischen Eigenschaften mit den morphologischen Eigenschaften von biologischen Materialien und Implantaten unter besonderer Berücksichtigung der physiologischen Funktion konnten wir weitere Fortschritte erreichen. So untersuchten wir die mechanische Wechselwirkung einer Unterkieferrekonstruktionsplatte mit dem verbliebenen Kieferknochen in einem Prüfstand mittels multiaxialer Belastung experimentell sowie durch Finite-Elemente Modellierungen. Zusammen mit morphologischen Untersuchungen konnten wir Schlussfolgerungen zur Verbesserung der Lastleitung ziehen. In weiteren Industrieprojekten bewerteten wir die Wechselwirkung von Zahnbürsten und Zahncremes mit der Zahnoberfläche. Gemeinsam mit den Kolleginnen und Kollegen des MikroTribologie Centrums μ TC in Karlsruhe entwickelten wir eigene praxisnahe Reib- und Verschleißtests.

Die mechanischen Eigenschaften von Nanopartikel-gefüllten mehrphasigen Polymermaterialien werden entscheidend durch die Nanopartikelverteilung bestimmt. Bei der Weiterentwicklung von Präparations- und Untersuchungsmethoden zur Bewertung der Mikrostruktur derartiger Kompositssysteme konnten wir 2012 entscheidende Fortschritte erreichen. Erstmals konnten wir an Nanopartikel-gefüllten Elastomeren anhand von Dehnversuchen im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) zeigen, dass bei optimierten Nanopartikelmischungen die Rissbildungen nicht an der Grenzfläche zwischen Nanopartikel und Polymer erfolgen, sondern das Polymer im nicht gefüllten Bereich versagt.

Prof. Dr. Andreas Heilmann

Geschäftsfeldleiter

Telefon +49 345 5589-180

andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de



NANOPORÖSE MEMBRANMATERIALIEN FÜR DIE ANWENDUNG ALS 3D-BIOCHIP-ARRAY

Die Mikroarray-Biochip-Technologie ist ein wichtiges Werkzeug für die Diagnostik in Medizin, Pharmazie, Biochemie, Genetik und Mikrobiologie. Klassische Biochips (Mikroarrays) bestehen aus einer Vielzahl von systematisch angeordneten kleinen Spots auf einem planen Träger aus Glas, Kunststoff oder Metall. Durch den Übergang von der planen 2D-Matrix zu einer porösen 3D-Matrix auf Basis von nanoporösem Aluminiumoxid erfolgt eine deutliche Vergrößerung der nutzbaren Oberfläche. Die damit mögliche Miniaturisierung der Chipgröße und die Verringerung des Probenvolumens führt durch die signifikante Erhöhung der Sondenmoleküldichte zu einer erheblichen Erhöhung der Messempfindlichkeit und -geschwindigkeit.

Membranherstellung und Charakterisierung

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung der Biochip-Arrays wird hochreines Aluminium verwendet. Die Dimensionierung der Array-Spots auf der Aluminiumoberfläche erfolgt durch eine thermomechanische Prägung oder durch Laserbearbeitung. Bei der anschließenden anodischen Oxidation von Aluminium entsteht eine nanoporöse Oxidschicht, die sich durch senkrecht zur Oberfläche angeordnete, parallele Nanoporen auszeichnet (Abbildung 1). Die Porengröße kann durch die Herstellungsparameter zwischen 20 und 450 nm eingestellt werden. Die Schichtdicke wird durch die Anodisierungszeit bestimmt. Durch weitere nasschemische Ätzschritte wird das Aluminium von der Rückseite entfernt und die Poren der erhaltenen Membran durch Entfernung der Barrierschicht geöffnet.

Die so entwickelten Biochips haben eine Gesamtgröße von 26 x 76 mm² mit optisch transparenten Spots von 300 µm

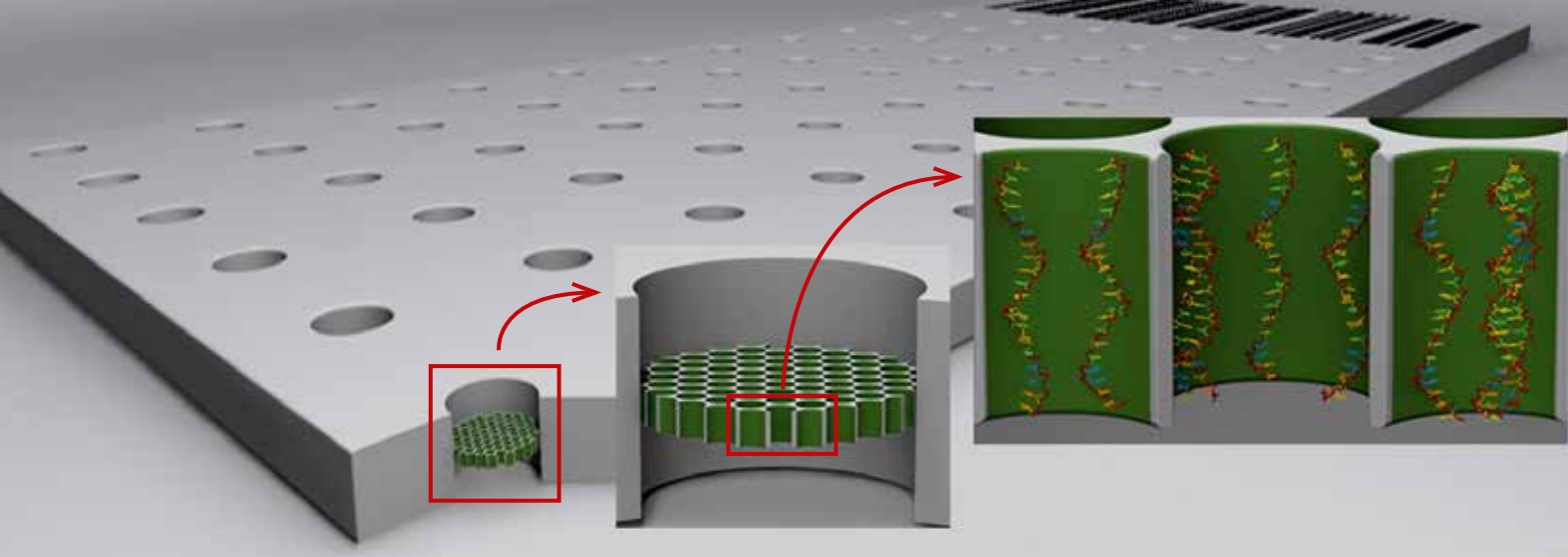
(thermomechanische Prägung) oder 30 µm (laserstrukturiert). In den Spots befindet sich die 3D-Porenmatrix mit einer Schichtdicke von 50 µm sowie einem Porendurchmesser von 225 nm bei einer Porosität von 42 Prozent.

Chemische Aktivierung

Um eine feste Kopplung von Oligonukleotiden beziehungsweise Nukleinsäuren (DNS) an die Oberfläche in den Spots zu gewährleisten, müssen die Porenninnenwände zuvor aktiviert werden. Zur Aktivierung wurde der Organosilan-Linker 3-Aminopropyltrimethoxysilan eingesetzt. Dadurch erhält die Oberfläche des Biochip-Arrays eine positive Ladung mit reaktiven primären Aminen ($-\text{NH}_3^+$). Durch die elektrostatische Wechselwirkung der positiv geladenen Aminosilan-Gruppen mit den negativ geladenen Gruppen des DNS-Phosphatrückgrads kann nun eine feste elektrostatische Bindung zwischen den Aminen ($+\text{NH}_3^+$) und der DNS in den Spots erfolgen. Der Nachweis der Silanisierung mit 3-Aminopropyltrimethoxysilan erfolgte mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX-Nanospotanalyse). Durch die Detektion von Silizium und Stickstoff konnte anhand der erhaltenen EDX-Spektren für die hergestellten Biochip-Arrays eine Aktivierung der Porenninnenwand nach Silanisierung mit 3-Aminopropyltrimethoxysilan nachgewiesen werden.

DNA-Immobilisierung

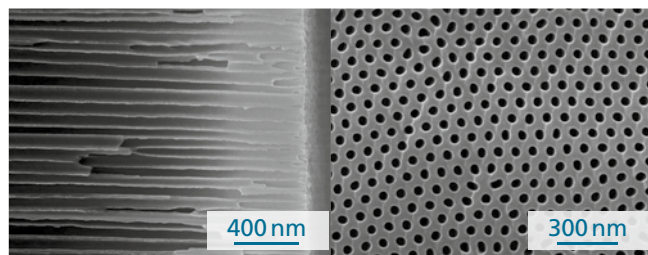
An die erfolgreiche Aktivierung schließt sich die Biofunktionalisierung mit den DNS-Sondenmolekülen an. Als Sondenmoleküle wurden hybridisierungsfähige und mit Cyanine-Farbstoffen (Cy3 und Cy5) fluoreszenzmarkierte DNS-Sequenzen mit unterschiedlichen Basenpaaren (66 BP)



Schematische Darstellung des nanoporösen 3D-Biochip-Arrays.

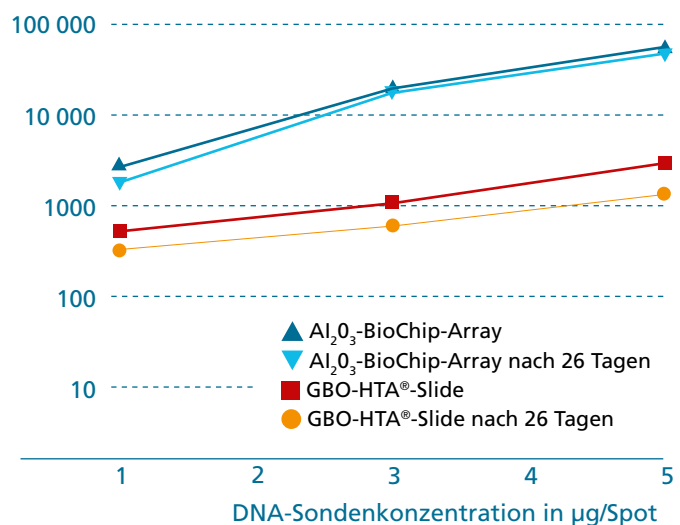
genutzt. Die Immobilisierung der in die Spots eingebrachten DNS-Sondenmoleküle erfolgte durch ein anschließendes UV-Crosslinking. Nach verschiedenen Waschschrritten wird mittels eines Plate-Readers die Fluoreszenzintensität der gebundenen DNS-Sondenmoleküle gemessen. Es zeigte sich, dass die Kopplung der DNS-Sondenmoleküle vorrangig über die Aminogruppen der Silanschicht erfolgt und eine unspezifische Bindung am reinen Substrat vernachlässigbar ist. Die Immobilisierungseffizienz und Stabilität der DNS-Sonden der neuartigen 3D-Biochip-Arrays sind im Vergleich zu herkömmlichen, kommerziell verfügbaren, mit Aminogruppen-funktionalisierten Slides in Abbildung 2 dargestellt. Die über die Fluoreszenzintensität ermittelte Konzentration der DNS-Sondenmoleküle ist 5,3 bis 19,4 Mal höher als bei herkömmlichen 2D-Biochip-Arrays.

Annika Thormann, Prof. Dr. Andreas Heilmann



1 Porenstruktur des nanoporösen Aluminiumoxids: Bruchfläche (links), Oberfläche (rechts).

Cy3-Fluoreszenzsignal in optischer Dichte



2 Vergleich der Immobilisierungseffizienz von nanostrukturierten 3D-Biochip-Arrays und herkömmlichen GBO-HTA®-Slides.

ELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR RISSBILDUNG IM KNOCHEN

Bildung, Ausbreitung und Akkumulation von mikroskopischen Rissen im menschlichen Knochen gehen dem makroskopischen Bruch voran, wobei angenommen wird, dass der grundlegende Mechanismus auf Nanometerebene ein crazeartiger Prozess ist. Die Analyse derartiger Deformationsprozesse ist eine Voraussetzung, um das Versagensverhalten des Knochens zu verstehen und Frakturrisiken abzuschätzen. Auf welche Weise pathologische Veränderungen des Knochens (wie Osteoporose oder Systemerkrankungen des Skeletts) die Mikro- und Nanostrukturen des Knochens modifizieren, mikromechanische Prozesse beeinflussen und letztlich das Frakturrisiko erhöhen, ist eine häufige, bis heute unbeantwortete Frage.

Mikro- und Nanostruktur des Knochens

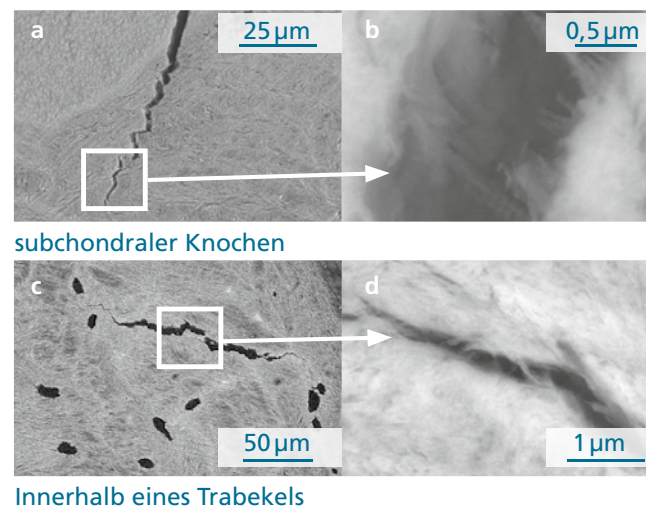
Zur Aufklärung der Mikro- und Nanostruktur des Knochens werden in einem gemeinsamen Projekt mit der Universitätsklinik Halle Bruchflächen humaner Schenkelhalse nach Fraktur und von Resektaten bei Arthrose histologisch aufgearbeitet und nach erfolgreicher Präparation elektronenmikroskopisch untersucht. Von besonderem Interesse ist die Untersuchung der Orientierung der Kollagenfibrillen und Hydroxylapatit-Kristalle innerhalb des gesunden Knochens im Vergleich zu krankhaft verändertem Gewebe. Mit den genannten analytischen Methoden sollen altersbedingte oder durch Erkrankung hervorgerufene Knochenveränderungen im Nanometerbereich beschrieben und Veränderungen in der Knochenqualität aufgezeigt werden.

Mikromechanik des Knochens

Unter physiologischen und pathologischen Belastungen treten vor dem Bruch auf Nanometerebene erste Schädigungen auf.

Derartige Schädigungszonen wurden im atmosphärischen Rasterelektronen- (ESEM) und Transmissionselektronenmikroskop (TEM) untersucht. Der Riss in Abbildung 1a verläuft vom Knorpel ausgehend in den subchondralen Knochen hinein. Ein Blick auf die Risspitze zeigt, dass der Riss durch mineralisierte Kollagenfibrillen überbrückt wird. Ähnliche Prozesse konnten bei in vivo entstanden Rissen innerhalb eines Trabekels beobachtet werden (Abbildung 1c). Höhere Vergrößerungen zeigen crazeartige Strukturen an der Risspitze. Die Rissufer werden durch gestreckte Kollagenfibrillen überbrückt. Damit ist es gelungen, die Existenz crazeartiger Zonen an der Risspitze nachzuweisen und somit mikromechanische Deformationsmechanismen des Knochens zu beschreiben.

Jessica Klehm, Dr. Sven Henning



1 ESEM-Aufnahmen verschiedener Mikrorisse im Knochen.

✓ *Materialeffizienz* ✓ *Energieeffizienz*

IN VITRO-BIOFILMBILDUNG AN MEMBRANOBERFLÄCHEN

Biofilme sind Lebensgemeinschaften von Mikroorganismen, die sich an Grenzflächen ausbilden und in einer stabilen Biopolymermatrix eingebettet sind. Die unerwünschte Biofilmbildung, als Biofouling bezeichnet, stellt ein erhebliches ökonomisches und hygienisches Problem in der Umwelt- und Medizintechnik dar. Aufgrund der hohen Komplexität der Biofouling-Mechanismen erfordern Antifouling-Oberflächenmodifizierungen eine individuelle Einstellung und Erprobung entsprechend ihres Einsatzbereiches.

Reduzierung der Foulingaffinität

In Kooperation mit der Ionenaustauscher Bitterfeld GmbH (IAB), einem 100-prozentigen Tochterunternehmen des Chemieunternehmens LANXESS, werden nass- und plasmachemische Antifouling-Modifizierungen an Umkehrosmose-Membranen zur Wasseraufbereitung durchgeführt, die deren Lebensdauer und Langzeitperformance verbessern sollen. Das Prinzip basiert auf dem Aufbau einer hydrophilen Polymerschicht, die der Proteinadsorption und Bakterienadhäsion durch chemische Inertheit und sterische Hinderung entgegenwirkt. Die Beurteilung der Wirksamkeit dieser Modifizierungen erfolgt durch Versuche zur reproduzierbar induzierten Biofilmbildung.

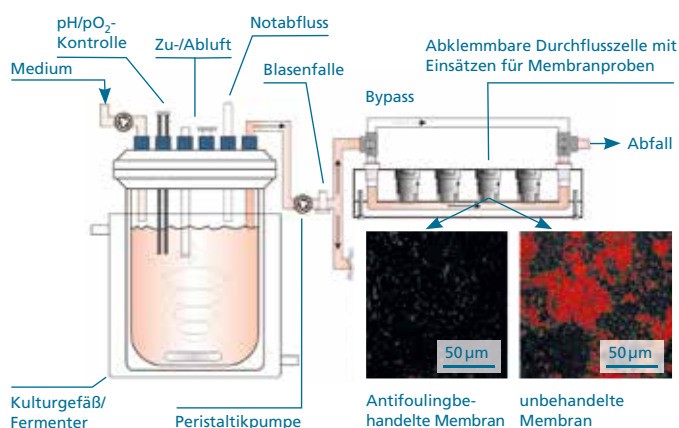
Mikrobielle Belastungsversuche

In einem als Chemostat betriebenen Bioreaktor (Abbildung 1) wird der Wasser- und Bodenorganismus *Pseudomonas fluorescens* kultiviert. Durch konstante, dem realen Vorbild nachgeahmte Milieubedingungen gelingt die reproduzierbare Einstellung einer konstanten Bakterienkonzentration und -aktivität im Fermenter. Das System wird im Durchfluss betrieben, indem der Bakterienbouillon kontinuierlich frische Nährlösung zugeführt

wird. Gleichzeitig wird die Bakterienbouillon abgeleitet und durchströmt dabei optional eine speziell für Membranproben ausgelegte Durchflusszelle. In Abhängigkeit von Zeit und Oberflächenbeschaffenheit kommt es auf den Proben zur Biofilmbildung. Nach einer Vorbehandlung mit geeigneten Fluoreszenzfarbstoffen erfolgt die Visualisierung und Quantifizierung der mikrobiellen Beläge mittels konfokaler Laser-Scanning-Mikroskopie CLSM sowie nach entsprechender Präparation mittels Rasterelektronenmikroskopie.

Die Variabilität der beteiligten Komponenten erlaubt eine materialspezifische Anpassung der Biofouling-Versuche an den jeweiligen Einsatzbereich.

Ulrike Hirsch



1 *Prinzipskizze des Bioreaktors mit Chemostat und Durchflusszelle. CLSM-Aufnahmen zeigen *Pseudomonas fluorescens*-Biofilme auf einer behandelten und einer unbehandelten Filtrationsmembran.*

KOMPONENTEN DER MIKROELEKTRONIK UND MIKROSYSTEMTECHNIK

Fokus

Für Halbleiterhersteller, Produzenten mikroelektronischer Bauelemente und Systeme sowie Partner im Bereich der Nanotechnologien untersuchen wir elektrische, elektronische und mechanische Defekte in Bauelementen der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik, in Grenzflächen sowie in nanostrukturierten Funktionsmaterialien und tragen zu deren Beherrschung bei. Im Fokus stehen dabei Herstellungsprozesse für integrierte CMOS-Schaltkreise, (O)LED- und Leistungshalbleiter, mikromechanische Sensoren und Aktuatoren (MEMS), zugehörige Aufbau- und Verbindungstechniken und Systemintegration sowie Funktions-Eigenschaftsbeziehungen nanostrukturierter Schichten und glaskeramischer Werkstoffe. Für Materialhersteller als auch für Geräteausrüster entwickeln wir Verfahren und die Gerätetechnik der nanostrukturellen Analytik, Fehlerdiagnostik und mechanischen Prüftechnik für den Einsatz bei der Entwicklung innovativer Bauelemente sowie für die Sicherung von Fertigungsqualität und Zuverlässigkeit.

Leistungsspektrum

- Physikalische Fehleranalyse für die Halbleitertechnologien
- Fehlerdiagnostik und Materialbewertung für die Aufbau- und Verbindungstechnik, Systemintegration und Leistungselektronik
- Nanoanalytik, Bewertung von Nanomaterialien und Komponenten der Nanotechnologien
- Analyse der Materialwechselwirkungen mit Prozessparametern und Einsatzbedingungen, Prozessoptimierung
- Festigkeits- und Lebensdauerbewertung in Verbindung von experimenteller Prüftechnik, Modellierung und Simulation
- Verfahrens- und Hardwareentwicklung mit Geräteherstellern zur Detektion, Zielpräparation und hochauflösenden Analytik von Defekten sowie zur mechanischen Prüftechnik

Gruppen

Bewertung mikroelektronischer Systemintegration

Sicherung des Einsatzverhaltens von Bauelementen und Baugruppen der Automobil- und Leistungselektronik.

Prof. Dr. Matthias Petzold

matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

Charakterisierung Mikrosysteme

Zuverlässigkeit von beanspruchten Mikrosystemen und spröden Halbleitermaterialien.

Prof. Dr. Matthias Petzold

matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

Nanomaterialien und Nanoanalytik

Höchstaflösende Materialdiagnostik für Nanomaterialien und Nanotechnologien.

Prof. Dr. Thomas Höche

thomas.hoeche@iwmh.fraunhofer.de

Diagnostik Halbleitertechnologien

Entwicklung und Einsatz von Fehleranalyse-Methoden zur Sicherung von Ausbeute und Zuverlässigkeit in Halbleitertechnologien.

Frank Altmann

frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Nach umfangreicher Renovierung des Gebäudes in der Heideallee konnten wir im März 2012 das neu gegründete Fraunhofer-Center für Angewandte Mikrostrukturdiagnostik CAM in Betrieb nehmen. Dieses Ereignis war verbunden mit einem überaus erfolgreichen Industrieworkshop zur Fehlerdiagnostik, an dem mehr als 160 Firmenvertreter aus zehn Ländern teilnahmen. Zeitgleich haben wir unsere neue, leistungsfähigste Gerätetechnik im Bereich Transmissionselektronenmikroskopie und Fokussierende Ionenstrahlpräparation in Betrieb genommen. Unterstützend dazu hat im Juli eine neue Gruppe »Nanomaterialien und Nanoanalytik« ihre Arbeit im Geschäftsfeld aufgenommen. Sie wird neue Materialkompetenzen aufbauen und die verbesserten Möglichkeiten in der Nanoanalytik gezielt weiter entwickeln.

In unserer wissenschaftlichen Arbeit können wir auf die Verleihung von »Best/Outstanding Paper Awards« auf den weltweit führenden Konferenzen im Bereich der mikroelektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik (Electronics Components Technology Conference ECTC) in San Diego und der Fehleranalytik der Mikroelektronik (International Symposium for Testing and Failure Analysis) in Phoenix zurückblicken.

Ein weiteres Highlight des Jahres 2012 war die Organisation des E-MRS spring meeting-Symposiums »Quantitative Microscopy of Energy Materials« mit mehr als 70 Teilnehmerinnen und Teilnehmern und einer aktuell im Entstehen begriffenen Sondernummer des Journal of Materials Science.

Prof. Dr. Matthias Petzold

Geschäftsfeldleiter

Telefon +49 345 5589-130

matthias.petzold@iwmm.fraunhofer.de



KEIMBILDUNG UND KRISTALLWACHSTUM IN NANOGLASKERAMIKEN

Um einen erweiterten Zielmarkt im Feld der Nanotechnologien zu erschließen, wurde die Gruppe Nanomaterialien und Nanoanalytik gegründet. Sie hat sich die Werkstoffcharakterisierung von Nanomaterialien sowie die Entwicklung geeigneter Präparations- und Analyseverfahren zum Ziel gesetzt.

Anders als Sinterkeramiken werden Glaskeramiken durch Wärmebehandlung von Gläsern hergestellt. Diese Materialien können – wie Gläser – bereits vor der Ausscheidung kristalliner Funktionsphasen in die gewünschte geometrische Form gebracht werden. Glaskeramiken finden Anwendung als Strukturkeramiken mit geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (Kochfelder und Spiegelsubstrate), als Dentalkeramik, für Optik und Datenübertragung sowie als Implantatmaterial. Für das Erzielen der gewünschten Funktionalität kommt neben der chemischen Zusammensetzung der Gläser einer präzisen Kontrolle der Mikrostruktur beim Keramisieren eine besondere Bedeutung zu.

Glaskeramik mit thermischem Ausdehnungskoeffizient nahe null

An einem von der Schott AG bereitgestellten Lithiumaluminosilikat LAS-Modellglas wurde der Keimbildungsprozess auf der Nanoskala untersucht. Durch Wärmebehandlung für unterschiedliche Zeiten bei 750 °C konnte die Mikrostruktur des jeweiligen Keimbildungs- und Kristallisationszustands quasi eingefroren werden.

Die Ausscheidung einer nanoskaligen Keimbildnerphase ($ZrTiO_4$) geht dabei der Bildung der LAS-Funktionsphase voraus. LAS zieht sich entlang einer kristallographischen Richtung bei Erwärmung

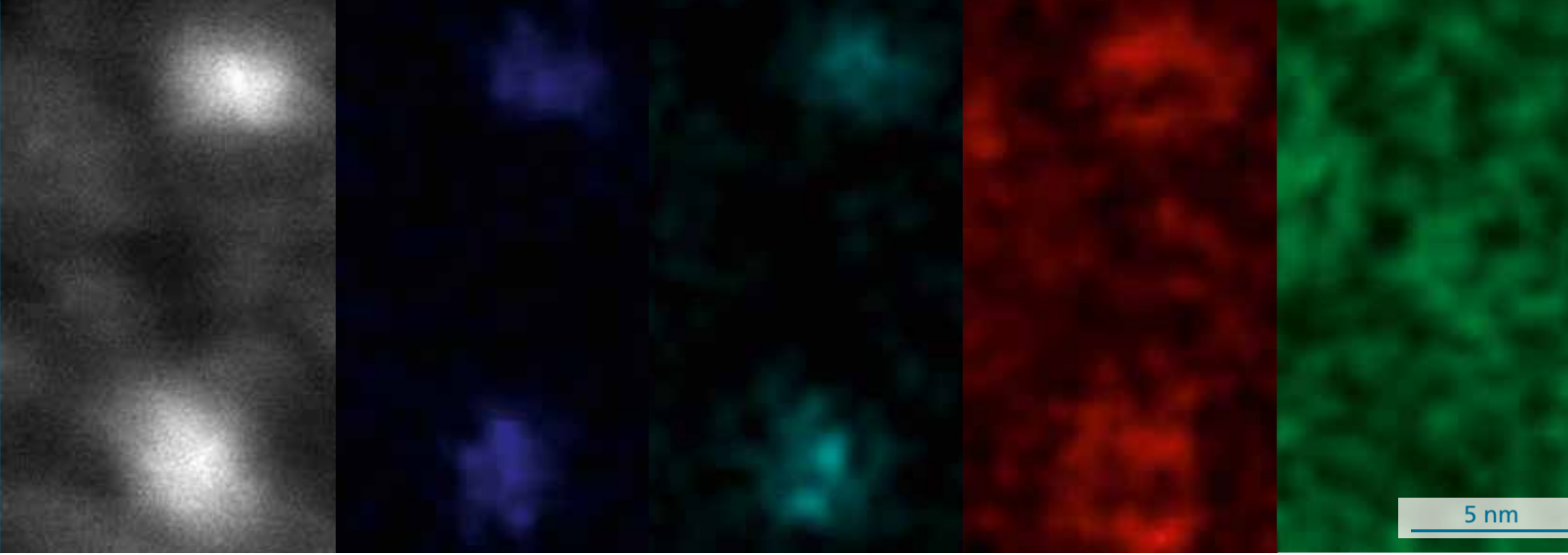
zusammen. Bei vollständig statistischer Orientierung der LAS-Kristalle im Volumen der Glaskeramik wird die Kontraktion der Funktionsphase exakt durch die Ausdehnung des Restglases kompensiert, was den gewünschten, extrem geringen, integralen Ausdehnungskoeffizienten ergibt. Dies kann jedoch nur erreicht werden, wenn der Korndurchmesser der Funktionsphase einige 10 nm nicht übersteigt und die Keimbildung im Volumen absolut homogen erfolgt. Dazu muss, sowohl auf Seiten des Keimbildners als auch für die Funktionsphase, jegliche Vergrößerung (Ostwald-Reifung) unterbunden werden.

Nanostrukturanalyse mittels aberrationskorrigierter TEM

Die Untersuchung von Glaskeramiken profitiert in ganz besonderer Weise von der Einführung aberrationskorrigierter Transmissionselektronenmikroskope TEM mit verbesserten Spektrometern. So ist es nur durch elektronenoptische Korrektoren möglich, auch bei reduzierten Beschleunigungsspannungen (80 keV) eine Auflösung von 1 Å zu erreichen.

Gerade Lithium-haltige Präparate können bei höheren Beschleunigungsspannungen, wenn überhaupt, nur unter massiver Erzeugung von Artefakten abgebildet und analysiert werden. Spektrometer mit deutlich erhöhter Empfindlichkeit, wie energiedispersive Röntgenspektrometer mit vervielfachtem Akzeptanzraumwinkel, tragen ebenfalls zur verbesserten Nanoanalytik bei.

Mit dem am Fraunhofer Center für Angewandte Mikrostrukturdiagnostik CAM installierten FEI TITAN³ G2 60-300, ausgestattet unter anderem mit einem Objektivlinsenkorrektor und einem SuperX-Röntgendetektor, können die beschriebenen Vorteile sehr nutzbringend eingesetzt werden.



Rastertransmissionselektronenmikroskopische Aufnahme zweier $ZrTiO_4$ -Nanokristalle (ganz links), Elementverteilung von: Ti (blau), Zr (türkis), Al (rot), Si (grün).

Elementverteilung auf der Nanometerskala

Basierend auf Arbeiten im EU-Projekt INTERCONY (Bhattacharyya et al., *Crystal Growth & Design* 10 (2010) 379) konnte mit dem oben genannten Gerät erstmals in Form einer Elementverteilungsaufnahme (Abbildung 1) gezeigt werden, dass die Kristallisation von $ZrTiO_4$ aus Zr-Ti-Al-O-Entmischungströpfchen von der Ausbildung einer Diffusionsbarriere aus Aluminiumoxid begleitet ist, die eine Ostwaldreifung der Nanokristalle verhindert.

Ergänzt durch Untersuchungen mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie (Höche et al., *CrystEngComm* 13 (2011) 2550) und Elektronenenergieverlustspektroskopie (Höche, et al., *Crystal Growth & Design* 12 (2012) 1556) sind, basierend auf modernsten Verfahren der Nanoanalytik, am Fraunhofer CAM optimale Voraussetzungen für die Entwicklung von Nanomaterialien mit neuen elektronischen und elektrischen, optischen, thermomechanischen oder thermoelektrischen Funktionseigenschaften gegeben.

Prof. Dr. Thomas Höche, Dr. Christian Patzig



1 *Eingehautes Transmissionselektronenmikroskop FEI TITAN³ G2 60-300.*



2 *Vom Transmissionselektronenmikroskop FEI TITAN³ G2 60-300 separiertes Bedienpult.*

FEHLERANALYSE 3D-INTEGRIERTER MIKROELEKTRONISCHER BAUTEILE

Zusätzlich zur weiteren Miniaturisierung integrierter Schaltkreise (ICs) werden in der Mikroelektronik zunehmend dreidimensionale Systemaufbauten entwickelt. Sie basieren beispielsweise auf Stapeln verschiedener Chips in einem Gehäuse und einer Kontaktierung mittels Through Silicon Vias TSV. Solche 3D-integrierten System-in-Package SIP-Bauteile zeichnen sich durch Materialvielfalt sowie hohe Komplexität im Design und Prozess aus. Daraus resultieren neue Herausforderungen an die Zuverlässigkeit und damit an die Fehleranalytik. Defekte müssen nicht mehr nur lateral, sondern auch vertikal lokalisiert werden. Weiterhin ist ein effizienter präparativer Zugang zu den in der Tiefe lokalisierten Defektstellen und eine präzise Defektdiagnostik erforderlich.

Akustische GHz-Mikroskopie

Für die Delaminationserkennung in TSV-Verdrahtungsstrukturen mit Microbump-Kontakten wurde erstmalig ein neuartiges akustisches Rastermikroskop getestet, das im Frequenzbereich bis 2 GHz arbeitet und dadurch eine laterale Auflösung von etwa 1 µm ermöglicht. An 3D chip-to-chip Grenzflächen mit insgesamt 300000 eingebetteten Einzelkontakten mit Durchmesser von weniger als 10 µm konnten lokale Schichtablösungen zwischen dem Silizium-Chip und dem Underfill lokalisiert und mittels Fokussierender Ionenstrahltechnik FIB verifiziert werden. Aufgrund der hohen Dämpfung werden bei diesen Frequenzen nur zirka 5 µm Eindringtiefe erreicht, sodass bei tiefer liegenden Strukturen eine entsprechende Vorpräparation erfolgen muss.

Lock-in-Thermographie

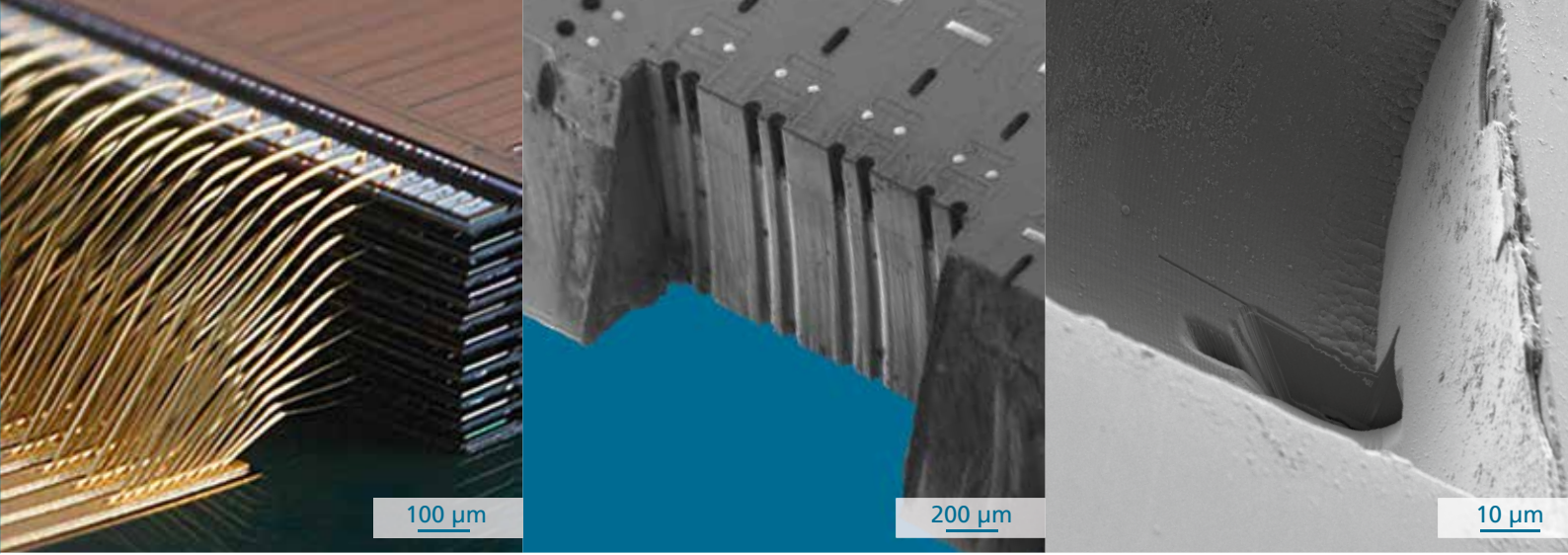
Für die zerstörungsfreie Lokalisierung von elektrischen Defekten in 3D-integrierten SIP-Bauteilen wurde das Verfahren der Lock-in-Thermographie LIT weiterentwickelt. Der Fehlerstromkreis wird

mit definierter Frequenz elektrisch angeregt und die resultierende Temperaturverteilung mittels Wärmebildkamera nach dem Lock-in-Prinzip bestimmt. Elektrisch aktive Defekte produzieren ohmsche Wärme und können somit unter Verwendung hochauflösender Optiken präzise lokalisiert werden. Für gestapelte IC-Aufbauten wurde das neue Verfahren der spektralen Phasenanalyse entwickelt, bei dem die zusätzlich für die Wärmeausbreitung von der Defektstelle bis an die Bauteiloberfläche benötigte Zeitdauer bestimmt wird. Daraus wird die Defekttiefe berechnet und der defekte IC im Schichtstapel eindeutig identifiziert.

Speziell für die Kurzschlusslokalisierung in TSV-Kontakten wurde zusätzlich eine LIT-Methode, basierend auf schrittweiser Defokussierung, kombiniert mit einer Stromabbildungstechnik EBAC, im Rasterelektronenmikroskop bereitgestellt.

Hocheffizienz-Zielpräparation

Die physikalische Fehleranalyse von Defektstellen innerhalb eines Chip-Stapels setzt Präparationstechniken voraus, mit denen ein Materialabtrag im Tiefenbereich von mehr als 100 µm mit einer Zielgenauigkeit im µm-Bereich kombiniert werden kann. Da Standard-FIB-Verfahren dafür ungeeignet sind, werden in Zusammenarbeit mit Geräteherstellern Ansätze entwickelt, bei denen dem FIB-Prozess zunächst eine hocheffiziente Laser-Vorpräparationstechnik vorgeschaltet wird. Parallel dazu werden derzeit auch neue Plasma-FIB-Techniken evaluiert, die gegenüber herkömmlichen Verfahren eine 20-fach höhere Abtragsrate ermöglichen. Beide Techniken erlauben auch die Herstellung von Proben für die Transmissionselektronenmikroskopie TEM-Analyse an 3D-integrierten Bauteilen.

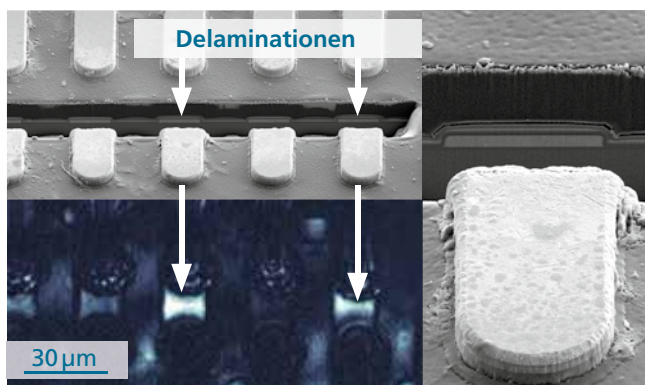
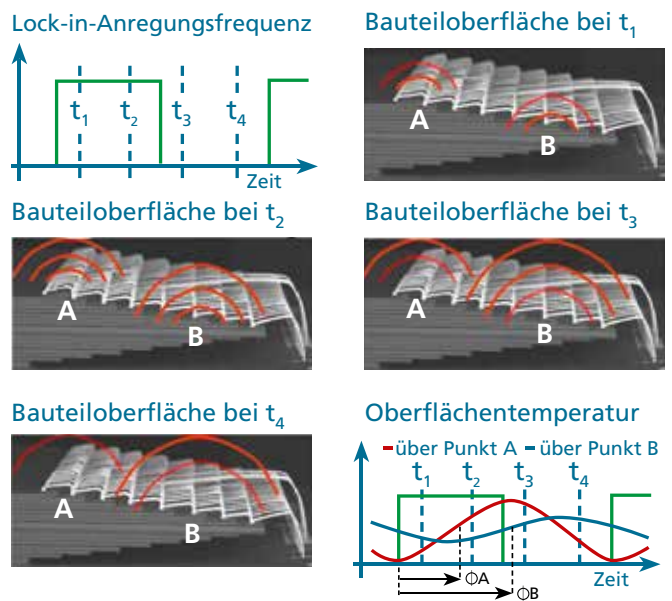


Chip-Stapel einer 3D-Speicherkarte (links) und präparativer Zugang mittels Laserablation und Hochstrom-FIB (Mitte) zur physikalischen Analyse der Defektstelle im TSV-Kontakt (rechts).

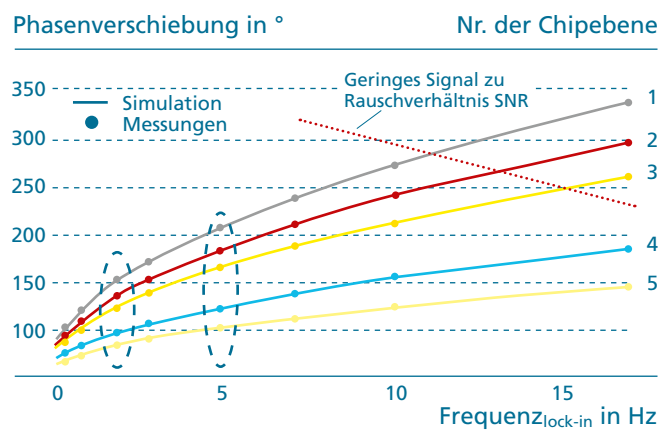
Hochauflösende Analytik

Mit der aberrationskorrigierten TEM stehen dem Institut seit 2012 die derzeit leistungsfähigsten elektronenmikroskopischen Fehlerdiagnostikverfahren zur Verfügung. Mittels TEM konnten beispielsweise durch LIT detektierte Kurzschlussphänomene in dem in Abbildung 1 dargestellten 3D-Sensor ursächlich einer metallischen Kontamination in Microbumps zugeordnet werden. Die Präsentation der gemeinsam mit Geräteherstellern entwickelten Analyseketten für 3D-Bauelemente der Mikroelektronik wurde als »best paper« auf der Electronic Components and Technology Conference ECTC 2011 ausgezeichnet.

Frank Altmann



1 Lateral hochaufgelöste Darstellung von Delaminationen in einem TSV-Umverdrahtungssystem mittels akustischer GHz-Mikroskopie (links) und am FIB-Querschnitt (rechts).



2 Spektrale Phasenanalyse mittels Lock-in-Thermographie an einem Speicherbauteil zur Defektlokalisierung im 16-fach gestapelten IC-Aufbau.

FEHLERANALYTIK VON KUPFER-DRAHTBONDVERBINDUNGEN

Die elektrische Verbindung zwischen einem Halbleiterchip und dem Substrat erfolgt in der Mehrzahl der Fälle durch Gold-Drahtbondkontakte. Der massiv ansteigende Goldpreis führte in den letzten Jahren weltweit zum verstärkten industriellen Einsatz von Kupferdrähten. Trotz der dabei wesentlich geringeren Materialkosten und vorteilhafter elektrisch-thermischer Werkstoffeigenschaften stellt das Kupfer-Drahtbonds besondere Anforderungen an die Technologieentwicklung. So erhöht die größere Härte des Kupfers die Gefahr von Chip-schädigungen beim Bondprozess. Darüber hinaus erfordert die im Vergleich zum Gold höhere Reaktionsneigung der Kupferdrähte spezielle Maßnahmen gegen die Oxidation (Schutzgas beim Thermosonic-Bonden und bei der Lagerung) sowie eine sorgfältige Analyse und Beherrschung von potenziellen Korrosionsrisiken.

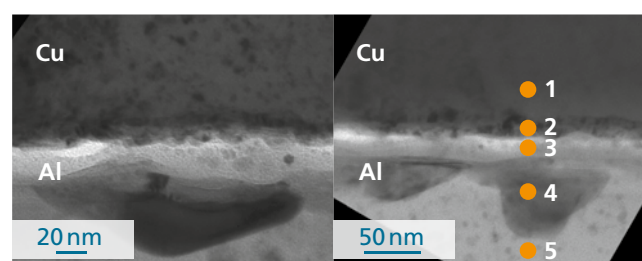
Analyse von Ausfallmechanismen

In einem Projekt mit der Firma NXP Hamburg wurde ein Kupfer-Drahtbondprozess entwickelt, der automobiltypischen Feuchte- und Temperaturbelastungen standhält. Durch Analysen des Thermosonic-Bondinterfaces mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie und Elektronenstrahlbeugung konnte gezeigt werden, dass für die Stabilität des Drahtbonds eine Kontrolle der nur wenige 100 nm dicken Cu/Al-Phasen entscheidend ist. Die kupferreichen Cu/Al-Phasen können unter dem Einfluss von Feuchte und von Kontaminationen aus der Umgebung oxidiert werden und zu Grenzflächenversagen führen (»Thick-Oxide-Fehlermode«, Abbildung 1). Als eine wesentliche Einflussgröße für diesen Korrosionsprozess wurde unter anderem die Auswahl der Pressmasse des Gehäuses identifiziert.

Etablierung der Kupferdrahtbondtechnologie

Im Rahmen der gemeinsamen Untersuchungen war es der Firma NXP möglich, einen stabilen und zuverlässigen Kupfer-Drahtbondprozess zu entwickeln. Durch die Analysen am Fraunhofer IWM Halle konnte ein Fehlermodell erstellt und damit Materialien selektiert werden, die eine sichere Beherrschung der Bondtechnologie ermöglichen. Im Ergebnis konnte die Kupfer-Drahtbondtechnologie für das Produkt qualifiziert und bei hoher Zuverlässigkeit erfolgreich in den Markt eingeführt werden.

Robert Klengel



1 Transmissionselektronenmikroskopische Hellfeld-Abbildung des Ausfallgebietes in der drahtgebondeten Grenzfläche zwischen Kupferdraht (Kugel) und Aluminium-Bondpad. Mittels nanospot-EDX-Analysen wurde eine oxidierte amorphe Grenzflächenschicht detektiert, die durch die Korrosion einer intermetallischen Kupfer-Aluminium-Phase gebildet wird und das Kontaktversagen verursacht.

MIKRO-CHEVRON-TESTS FÜR INNOVATIVE WAFERBONDTECHNIKEN

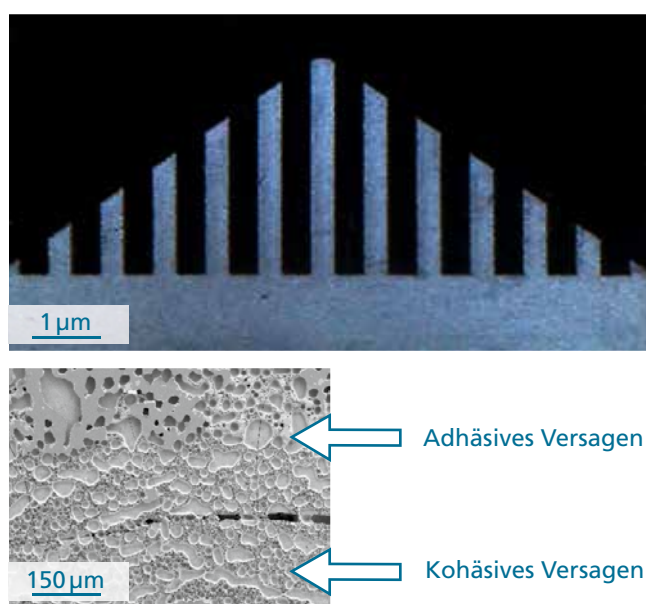
Die Verwendung von Mikrosystemen unterschiedlicher technischer Anwendungen im Bereich der Sensorik und Aktorik bestimmen maßgeblich den Innovationsgrad eines Produkts. Klassische Beispiele reichen von Applikationen im Consumer-Bereich und in der Automobilelektronik bis hin zur modernen Sicherheitstechnik. Die zur Produktion verwendeten Materialien erstrecken sich vom klassischen Silizium bis hin zur Kombination von Polymer-, Metall- und Silikatwerkstoffen. Daraus resultieren neue Anforderungen an die Verbindungstechnik, um Materialfehlpassungen zu minimieren und das Fügen temperaturempfindlicher Gruppen zu ermöglichen. Infolgedessen werden weltweit neue Verbindungstechnologien entwickelt, die als Schlüssellösung eine Minimierung der Prozesstemperatur anstreben. Gleichzeitig müssen existierende Standards an Zuverlässigkeit und Lebensdauer erfüllt werden, da die Füge-technologie entscheidend das Einsatz- und Zuverlässigkeitsverhalten des Gesamtsystems definiert.

Wissenschaftliche und technische Fragestellungen

Zur Quantifizierung der Festigkeitseigenschaften von Waferbondverbindungen hat sich der Mikro-Chevron-Test bewährt. Das Fraunhofer IWM arbeitet daher an der Adaption dieser Methodik zur Bewertung neuer Fügeverfahren wie dem reaktiven Bonden. Dabei führt eine sich selbst ausbreitende exotherme Reaktion in nanoskaligen Multischichtsystemen in Kombination mit einer Lotschicht zur Verbindungsbildung. Zur Festigkeitscharakterisierung müssen sowohl geeignete Teststrukturen definiert und die Ausbildung einer homogenen Verbindung, beispielsweise nach Abbildung 1, sichergestellt werden. Zusätzliche Fragestellungen zur bruchmechanischen Auswertung und Analyse der Versagensmechanismen treten

durch die Inhomogenität der Grenzfläche auf. Die Bruchfläche dieser reaktiv gebondeten Teststruktur zeigt sowohl adhäsives Versagen der Grenzfläche zwischen Silizium und Beschichtungssystem als auch kohäsives Versagen in der Lotschicht. Das aus den Analysen gewonnene Verständnis über potenzielle Versagensmechanismen, in Kombination mit geeigneten Testmethoden, ermöglicht eine Bewertung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer neuer Bondtechnologien.

Bianca Böttge, Falk Naumann



1 *Reaktiv gebondete Mikro-Chevron-Probe: Lichtmikroskopische Aufnahme (oben), Bruchfläche einer reaktiv gebondeten Mikro-Chevron-Probe (unten).*

FRAUNHOFER-CENTER FÜR SILIZIUM-PHOTOVOLTAIK CSP

Zuverlässigkeit und Technologien für die Netzparität ZTN

Fokus

Wir betreiben angewandte Forschung in den Themengebieten der Herstellung von Siliziumwafern und mechanischen Bewertung von Siliziumwafern und Solarzellen. Wir führen elektrische und mikrostrukturelle Charakterisierungen von Solarzellen und Materialien der Photovoltaik durch. Zudem entwickeln wir einerseits Materialien zum Lichtmanagement und der optischen Materialcharakterisierung und andererseits Verfahren zur Herstellung von Solarmodulen sowie der Zuverlässigkeits- und Ertragsanalyse von Solarmodulen.

Leistungsspektrum

- Strukturelle, chemische, elektrische und optische Analyse von Materialien der Photovoltaik und Solarzellencharakterisierung
- Entwicklung von Beschichtungs- und Dünnschichttechnologien
- Anwendung bruchmechanischer Verfahren zur Reduzierung der Bruchrate von Wafern und Zellen
- Entwicklung von Herstellverfahren für dünne Siliziumwafer
- Zuverlässigkeitscharakterisierung und -auslegung von Solarmodulen
- Entwicklung von Solarmodultechnologiekonzepten und von Materialien für Solarmodule

Gruppen

Diagnostik Solarzellen

Leistungssteigerung und Zuverlässigkeit von Solarzellen.
Dr. Christian Hagendorf
christian.hagendorf@csp.fraunhofer.de

Modulzuverlässigkeit

Erhöhung der Lebensdauer von Solarmodulen bei sinkenden Kosten.
Dr. Matthias Ebert
matthias.ebert@csp.fraunhofer.de

Siliziumwafer

Mehr Wafer zu geringeren Kosten.
Dr. Hartmut Schwabe
hartmut.schwabe@csp.fraunhofer.de

Optische Materialien und Spektroskopie

Hocheffiziente Solarzellen.
Prof. Dr. Stefan Schweizer
stefan.schweizer@csp.fraunhofer.de

Modultechnologie

Prozessoptimierung, neue Modulkonzepte.
Dr. Jens Schneider
jens.schneider@csp.fraunhofer.de

Bemerkenswertes aus 2012

Ein Schwerpunkt am Fraunhofer CSP waren die Aktivitäten zur Entwicklung von langzeitbeständigen Solarmodulen. Wir konnten das Modultechnologiezentrum MTZ in dem Solarmodule mit variierten Materialkombinationen und Prozessschritten gefertigt werden können, erfolgreich in Betrieb nehmen. Zudem haben wir neuartige Tests zur Messung der Langzeitbeständigkeit entwickelt. Beispielsweise konnten wir einen Prüfstand in Betrieb nehmen, mit dem die Degradationsanfälligkeit von Solarmodulen unter einer Hochspannungsbelastung, der so genannten potenzialinduzierten Degradation, innerhalb von zwei Tagen möglich ist. Diesen Versuchsstand nutzen wir in zahlreichen industriellen und öffentlichen Projekten zur Charakterisierung von Solarmodulen und deren Weiterentwicklung.

Neben dem Test auf Modulebene konnten wir gemeinsam mit den Kollegen vom Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle (Saale) ein physikalisches Modell entwickeln, das die potenzialinduzierten Degradation auf Zellebene erklärt. So können wir für unsere industriellen und öffentlichen Auftraggeber in kurzer Zeit die Stabilität der Solarmodule gegenüber einer potenzialinduzierten Degradation bewerten und nutzen dafür die Zuverlässigkeitscharakterisierung sowie die Möglichkeiten der Solarmodulherstellung unter Verwendung unterschiedlicher Materialien beziehungsweise Prozessschritte.

Prof. Dr. Jörg Bagdahn
Leiter Fraunhofer CSP und Abteilungsleiter
Zuverlässigkeit und Technologien für die Netzparität ZTN
Telefon +49 345 5589-129
joerg.bagdahn@csp.fraunhofer.de



Gruppe

MODULZUVERLÄSSIGKEIT

Dr. Matthias Ebert | Telefon +49 345 5589-117 | matthias.ebert@csp.fraunhofer.de

✓ verbesserte Funktionalität

POTENZIALINDUZIERTE DEGRADATION AN VERSCHIEDENEN PV-MODULEN

In den letzten Jahren sind bei Installationen mit hoher Systemspannung und traflosen Wechselrichtern vermehrt Degradationen von Solarmodulen aufgetreten, deren Zellen hohe negative Spannung gegenüber Erde aufweisen. Dieser Effekt wird als potenzialinduzierte Degradation PID bezeichnet. Die beobachtete Leistungsdegradation an PV-Kraftwerken kann dabei mehr als 30 Prozent betragen. Mit zunehmender zulässiger Systemspannung bis zu 1 500 V und der Erschließung von äquatornahen Standorten für die solare Stromgewinnung ist davon auszugehen, dass dieser Effekt an Bedeutung gewinnt.

Beschleunigter Hochspannungsbelastungstest

Mit dreizehn handelsüblichen Solarmodulen wurde ein beschleunigter Hochspannungsbelastungstest zur Prüfung auf PID-Empfindlichkeit durchgeführt. Nur knapp ein Drittel der Module haben den Test bestanden und zeigten anschließend noch mindestens 95 Prozent der Ausgangsleistung.

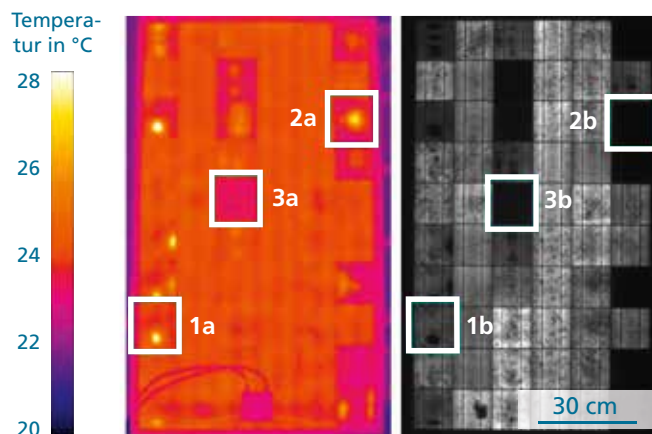
Mit modernen bildgebenden Verfahren wie Elektrolumineszenz und Thermographie lassen sich die erzeugten Defekte sichtbar machen und identifizieren. Abbildung 1 zeigt ein geschädigtes PV-Modul, an dem unterschiedlich stark degradierte Zellen hervorgehoben wurden. In der ersten Stufe zeigt sich die Schädigung in der Thermographieaufnahme durch einen Hotspot (1a), Halbleitereigenschaften sind in dieser Stufe noch vorhanden (1b). Bei fortschreitender Belastung verstärkt sich der Hotspot (2a) und wird dominant (2b). Abschließend ist die Zelle komplett geschuntet (3a, 3b) und schaltet gleichmäßig durch. Hier kann keine Sonnenenergie mehr umgesetzt werden – die Zelle wirkt als Flaschenhals.

Geeignete Prüfparameter für eine Hochspannungsbelastung

Es wurde festgestellt, dass sich die Intensität der Degradation von Zellen zufällig in dem Modul verteilt. So sind die Bedingungen bei diesem Test (50 °C, 50 % rel. Feuchte, Zellen auf -1 000 V, Aluminiumfolie an der Vorderseite, 48 Stunden Testdauer) geeignete Prüfparameter für eine Hochspannungsbelastung.

Der Test ist in der Lage, zwischen PID-resistenten Modulen und solchen, die möglicherweise degradieren, zu unterscheiden. Es ist möglich, ein Absinken der Moduleffizienz in verschiedenen Umgebungen vorauszusagen.

Dr. Matthias Ebert, Jens Fröbel



1 Die Thermographie- (links) und Elektrolumineszenzaufnahme (rechts) zeigen ein PV-Modul mit potenzialinduzierter Degradation.

Gruppe

DIAGNOSTIK SOLARZELLEN

Dr. Christian Hagendorf | Telefon +49 345 5589-179 | christian.hagendorf@csp.fraunhofer.de

✓ verbesserte Funktionalität

MIKROSTRUKTURELLE BESCHREIBUNG DES PID-EFFEKTS

Um dem Effekt der potenzialinduzierten Degradation PID effektiv und kostengünstig zu begegnen, sind umfangreiche Kenntnisse über seine physikalische Natur unabdingbar. Ausgehend von makroskopischen elektrischen Messungen werden die Materialeigenschaften bis hinab in den mikroskopischen Maßstab untersucht, die auch in theoretische Modelle, welche mit dem Max-Planck-Institut entwickelt wurden, einfließen.

Elektrisch-optische Charakterisierung von degradierten Solarzellen

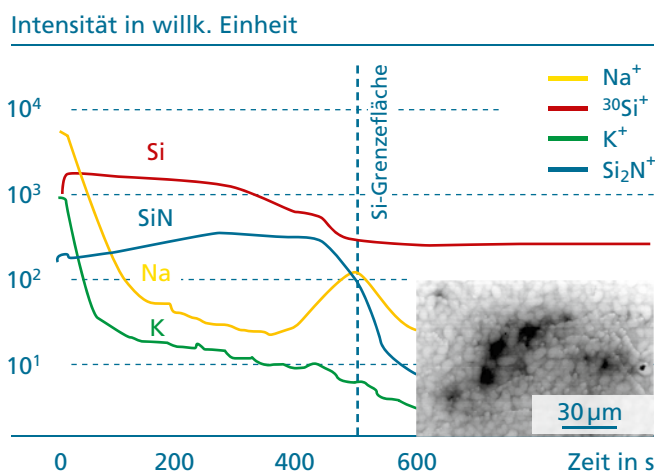
Solarzellen werden im Verbund mit Glas und Kunststoff der definierten Hochspannungsbelastung unterzogen. Der resultierende Leistungsverlust wird durch die Messung von Strom-Spannungskennlinien vor und nach dem Degradationsvorgang bestimmt. Bei fortgeschrittener Degradation, die sich unter anderem durch stark herabgesetzte Parallelwiderstände anzeigt, werden die kurzgeschlossenen Bereiche der Solarzellen durch Lock-in-Thermographie sichtbar. Bei diesem Verfahren wird ausgenutzt, dass in den Bereichen mit Kurzschlüssen zwischen den beiden Solarzellenkontakten durch erhöhten Stromfluss eine Erwärmung stattfindet, die mit einer Wärmebildkamera visualisiert wird. Damit sind sowohl die flächenmäßige Verteilung degradierter Bereiche auf einer Solarzelle als auch speziell die Positionen stark beeinflusster Zellenabschnitte bestimmbar.

Analytik der Mikrostruktur

Der Einsatz eines am Fraunhofer CSP entwickelten Verfahrens ermöglicht anschließend die vollständige Delamination der Zelle vom Kunststoff-Glas-Verbund. Von PID betroffene Solarzellenfragmente einer Größe von mehreren Quadratzentimetern lassen sich für die folgenden Analysen gezielt aus

dem Laminat herauspräparieren. Mittels Flugzeit-Sekundärionenmassenspektroskopie ToF-SIMS lässt sich an solchen Fragmenten die Verteilung der PID-verursachenden Kontaminationen wie Natrium und anderen Alkalimetallen mit hoher Orts- und Tiefenauflösung bestimmen. Es finden sich gegenüber unbelasteten Positionen signifikant erhöhte Intensitäten von Natrium innerhalb der Siliziumnitrid (SiN)-Antireflexschicht und vor allem an der Grenzfläche zu dem Silizium der Solarzelle (Abbildung 1). Im Elektronenmikroskop (EBIC-Verfahren) werden die Kurzschlüsse (Shunts) schließlich als dunkle Flecken mit einem Durchmesser von zirka 10 µm sichtbar (Inset in Abbildung 1).

Volker Naumann, Dr. Christian Hagendorf



1 Das ToF-SIMS-Tiefenprofil durch die SiN-Schicht zeigt eine erhöhte Natrium-Intensität an der Si-Grenzfläche; in der EBIC-Aufnahme (unten rechts) sind lokale Shunts sichtbar.

Gruppe

MODULZUVERLÄSSIGKEIT

Dr. Matthias Ebert | Telefon +49 345 5589-117 | matthias.ebert@csp.fraunhofer.de

✓ verbesserte Funktionalität

VERMEIDUNG DES PID-EFFEKTS DURCH INNOVATIVE POLYMERSYSTEME

Verkapselungsmaterialien für Solarzellen bestehen zumeist aus Ethylen-Vinylacetat (EVA), das in einem zeitaufwändigen Laminationsprozess vernetzt wird. Es weist mit seiner speziellen Additivierung im Vergleich zu anderen Polyolefinen eine hohe Wasseraufnahme und -permeationsrate (WVTR) auf. Da die im Solarmodul enthaltene Menge an aufgenommenem Wasser die Ausprägung des PID-Effekts auf Modulebene maßgeblich beeinflusst, müssen innovative Materialien entwickelt werden, um eine minimale Wasseraufnahme von PV-Modulen unter Luftfeuchte zu erreichen. Dieser Effekt ist bei Polyolefin basierten Verkapselungsmaterialien, die zusammen mit unserem Partner Renolit Belgien entwickelt werden, auf die geringere Menge an Additiven und geringere Polarität der molekularen Grundstruktur zurückzuführen.

Kostengünstige zuverlässige Alternativen zu EVA

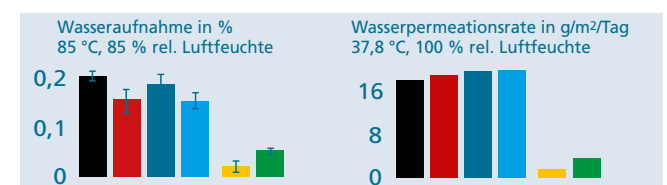
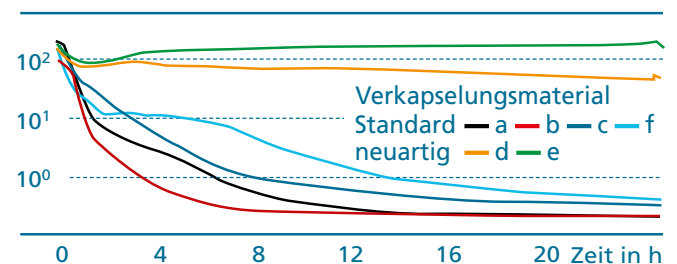
Um die Leistungsfähigkeit neuer Verkapselungsmaterialien hinsichtlich der Minimierung oder gänzlichen Vermeidung des PID-Effekts zu bewerten, fertigt das Team Polymermaterialien am Fraunhofer CSP Labor-Solarmodule, die PID-empfindliche Solarzellen enthalten. Unter erhöhter Feuchte und Temperatur ergibt sich für Module mit Standard-Verkapselungsmaterialien (a bis c, f) ein starker Abfall des Parallelwiderstandes unter angelegter Hochspannung. Die Module mit den Verkapselungsmaterialien d und e – entwickelt vom Projektpartner – zeigen hingegen keine oder kaum Veränderung des Parallelwiderstandes über den betrachteten Zeitraum. Ein weiterer entscheidender Vorteil dieser auf Polyethylen basierenden Materialien ist sein geringer Einkaufspreis und die schnellere Prozessierbarkeit dieser Materialien in der Vakuum-laminierung im Vergleich zu EVA-Copolymeren.

Wasseraufnahme und Permeationsrate entscheidet

In Abbildung 1 sind zudem die Ergebnisse der Wasseraufnahme und der WVTR für die Standardmaterialien im Vergleich zu den neuartigen Folien aufgezeigt. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Widerstandsmessungen wird deutlich, dass die Anwendung maßgeschneiderter Verkapselungsfolien einen erheblichen Beitrag zur Erhöhung der elektrischen Zuverlässigkeit von Solarmodulen leistet.

Dr. Stefan-H. Schulze, Christian Ehrich

Parallelwiderstand in Ohm



1 Parallelwiderstand über der Zeit für Module mit verschiedenen Verkapselungsmaterialien, bestimmt bei 85 % rel. Luftfeuchte, 85 °C und 300 V Systemspannung (oben) sowie deren Wasseraufnahme- und -permeationswerte (unten).

✓ *Materialeffizienz* ✓ *Energieeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

SPURENANALYSE BEI DER WAFERREINIGUNG

Wafer werden heute vorwiegend in speziellen Sägen mithilfe dünner Drähte und hochentwickelter Schneidflüssigkeiten aus Siliziumblöcken gesägt. Vor der Weiterverarbeitung zu Zellen müssen sie von Resten dieser Flüssigkeiten befreit werden. Das geschieht in zwei Stufen. Im ersten Schritt – der so genannten Vorreinigung – werden grob anhaftende Partikel und Chemikalien entfernt. Vom Erfolg dieser Prozedur hängen Aufwand und Ergebnis der im zweiten Schritt nachfolgenden Feinreinigung und damit auch das Gesamtergebnis wesentlich ab. In der Wafer-Pilotlinie des Fraunhofer CSP werden dafür neue Verfahren praktisch erprobt und bewertet. Hier kommen sowohl Inline- als auch Offline-Messverfahren zum Einsatz. Der laufenden Überwachung während der Waferfertigung dient eine industrielle Anlage am Ende des Herstellungszyklus, die optisch den Rest-Verschmutzungsgrad bei einem Waferdurchsatz bis zu 3 600 Wafern pro Stunde misst und dokumentiert. Werden wie in Abbildung 1 oben zur Optimierung unterschiedliche Vorreinigungsstrategien bei gleicher Feinreinigungsprozedur erprobt, wird das Ergebnis unmittelbar aus dem Vergleich der Daten sichtbar.

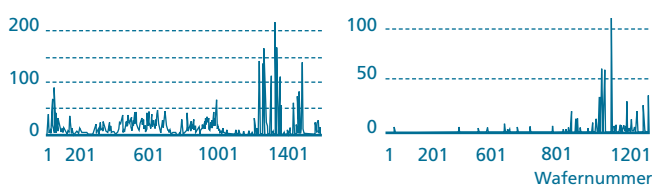
Oberflächen-ICP-Massenspektrometrie »zählt« die Metallatome auf der Waferoberfläche

Neue Ansätze in der Feinreinigung, beispielsweise der Einsatz verschiedener Schallfrequenzen und -geber, erfordern zur Bewertung einen ungleich höheren Aufwand. Die ausschließlich optische Prüfung des Verschmutzungsgrades der Waferoberfläche ist für diese Zwecke nicht ausreichend. Hier kommt eine am Fraunhofer CSP entwickelte Variante der Massenspektrometrie (MS) zur Spurenelementanalyse zum Einsatz, bei der offline durch eine spezielle Präparations-

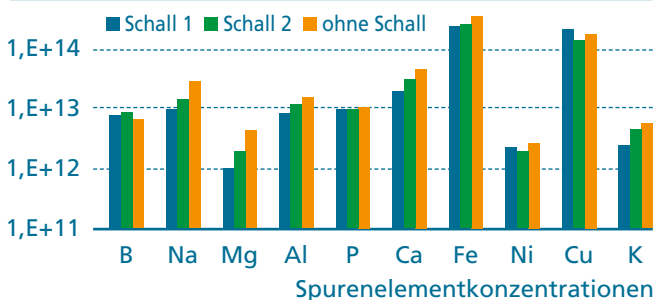
technik alle Metallatome auf der Oberfläche ausgesuchter Testwafer mit einer geeigneten Ätzlösung abgelöst werden. Anschließend wird aus der Ätzlösung mittels hochauflösender ICP-Massenspektrometrie der Gehalt an Spurenelementen quantitativ bestimmt. Die Reduktion der Anzahl von Fremd- atomen je Quadratzentimeter Oberfläche zeigt an, wie effizient ein neues Reinigungsverfahren ist (Abbildung 1 unten).

Sabine Gebhardt, Dr. Sylke Meyer

Verschmutzungsgrad bzw. rel. Verringerung des Reflexionsgrades



Atome/cm²



1 *Optisch vermessene Waferverschmutzung vor (links oben) und nach (rechts oben) Optimierung des Vorreinigungsprozesses; Spurenelementkonzentrationen auf der Oberfläche von Wafern bei Einsatz von Schallvarianten (unten).*

Gruppe

SILIZIUMWAFER

Dr. Hartmut Schwabe | Telefon +49 345 5589-466 | hartmut.schwabe@csp.fraunhofer.de

✓ *Materialeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON DIAMANTDRAHTGESÄGTEN WAFERN

In der kristallinen Silizium-Photovoltaik werden Si-Ingots mittels Multidrahtsägen in mono- und multikristalline Siliziumwafer getrennt und diese in weiteren Schritten zu Solarzellen und -modulen verarbeitet. Die Herstellungskosten bis zum Wafer nehmen derzeit rund 30 Prozent der Gesamtkosten am PV-Modul ein, die jedoch durch Materialersparnis und Verringerung der Prozesszeiten deutlich gesenkt werden können. Beim Diamantdrahtsägen soll ein mit Diamantpartikeln besetzter Stahldraht den bisher verwendeten slurrybasierten Prozess mit glattem Stahldraht und Abrasivpartikeln in der Slurry ablösen und eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeiten ermöglichen. Dabei müssen die Festigkeitseigenschaften der diamantdrahtgesägten Wafer mindestens gleichwertig zu den slurrygesägten Wafern sein. Ist dies nicht der Fall, ist eine Erhöhung der Bruchrate in der Fertigung zu erwarten. Die Festigkeitseigenschaften von diamantdrahtgesägten Wafern wurden am Fraunhofer CSP untersucht.

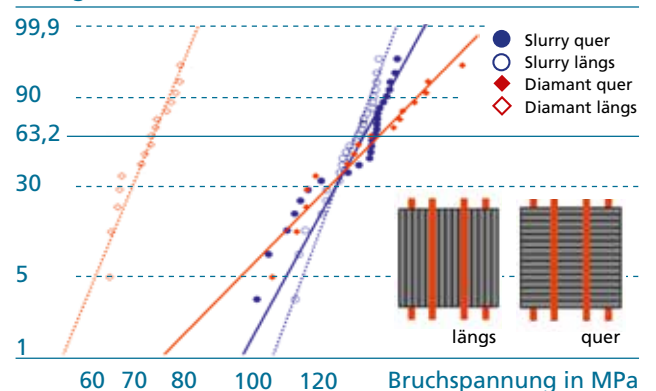
Festigkeit von diamantdrahtgesägten Wafern

Es wurden am Fraunhofer CSP multikristalline Wafer in slurry- und diamantdrahtbasierten Sägeprozessen geschnitten. Mithilfe des 4-Punkt-Biegeversuchs wurden die Bruchfestigkeiten der Wafer bestimmt und statistisch als Weibullverteilung ausgewertet. Da beide Sägeprozesse richtungsabhängige Schädigungen (Sägeriefen in Drahtlaufrichtung) auf der Waferoberfläche hinterlassen, wurden Festigkeiten quer und längs zu den Sägeriefen bestimmt. Die Ergebnisse in Abbildung 1 zeigen, dass Festigkeitsunterschiede zwischen Quer- und Längsbelastung bei slurrygesägten Wafern nachweisbar, aber gering sind. Für diamantdrahtgesägte Wafer wird beobachtet, dass diese sich durch einen extremen Unterschied in den Festigkeiten längs und quer auszeichnen. Die Festigkeit in Längsbelastung ist etwa 50 Prozent geringer als

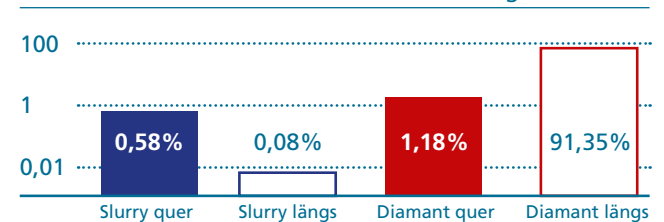
die in Querbelastung, welche mit slurrybasierten Wafern vergleichbar ist. Nimmt man in der Fertigung Belastungen an, die zum Biegetest vergleichbar sind, prognostiziert man einen deutlichen Anstieg in der Bruchrate für die Belastung in Längsausrichtung. Der Diamantdrahtsägeprozess ist daher Gegenstand grundlegender Untersuchung und Optimierung am Fraunhofer CSP.

Ringo Köpge, Dr. Stephan Schönfelder

Versagenswahrscheinlichkeit in %



Bruchwahrscheinlichkeiten für eine Belastung von 80 MPa



1 Festigkeiten slurry- und diamantdrahtgesägter Wafer im Weibulldiagramm (oben); abgeschätzte Bruchwahrscheinlichkeit durch Belastung in der Fertigung (unten).

Gruppe

OPTISCHE MATERIALIEN UND SPEKTROSKOPIE

Prof. Dr. Stefan Schweizer | Telefon +49 345 5589-128 | stefan.schweizer@csp.fraunhofer.de

✓ *Materialeffizienz* ✓ *verbesserte Funktionalität*

BEWERTUNG DER OBERFLÄCHEN VON GESÄGTEN SILIZIUM-WAFERN

Zur Optimierung des Sägeprozesses von kristallinem Silizium sowie zur Evaluierung neuer Verfahren ist es unabdingbar, die Oberflächenstruktur der gesägten Wafer zu kennen. Eine vielversprechende Möglichkeit, die gesamte Oberfläche zerstörungsfrei zu untersuchen, bietet die Raman-Spektroskopie. Im Spektrum des an der Oberfläche gestreuten Lichts werden neben der eingestrahnten Frequenz noch weitere Frequenzen beobachtet. Die Frequenzverschiebungen zum eingestrahlenen (monochromatischen) Licht entsprechen den für das Material charakteristischen Energien von Schwingungsprozessen. Monokristallines Silizium beispielsweise besitzt eine typische Schwingungsbande bei etwa 521 cm^{-1} , die sich durch strukturelle Veränderungen verschiebt: Für nanokristallines Silizium liegt die Bande bei etwa 508 cm^{-1} , für amorphes Silizium bei etwa 480 cm^{-1} und ist spektral deutlich verbreitert.

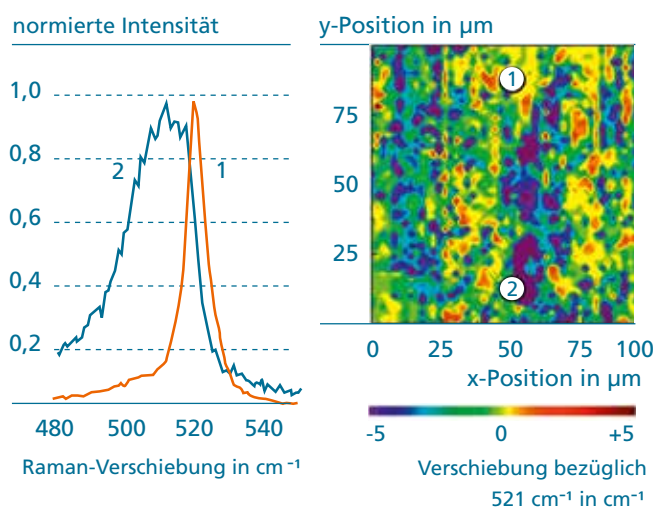
Ortsaufgelöste Raman-Spektroskopie

Bei der Mikro-Raman-Spektroskopie wird das anregende Laserlicht durch ein Mikroskop auf die Probe fokussiert, sodass Untersuchungen mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung möglich sind. Abbildung 1 zeigt normierte Raman-Spektren, die an verschiedenen Positionen auf einem Slurry-gesägten Silizium-Wafer aufgenommen wurden. Es sind deutliche Änderungen in Position und Form der Silizium-Schwingungsbande zu erkennen. Werden die Raman-Spektren nun in kleinen Schritten auf dem Wafer gemessen und die Verschiebung des Maximums gegenüber der Bande von kristallinem Silizium bei 521 cm^{-1} farblich kodiert, so entsteht ein xy-Mapping wie in Abbildung 1 rechts dargestellt.

Die Verschiebung zu deutlich kleineren Frequenzen (dunkel violette Bereiche) kann auf eine strukturelle Veränderung der Oberflä-

che zurückgeführt werden; auch Verspannungen im Silizium können zu Verschiebungen der Silizium-Schwingungsbande führen, die allerdings relativ klein sind. Zur genaueren Auswertung muss neben der Verschiebung des Maximums auch das komplette Spektrum ausgewertet werden. Das Raman xy-Mapping und die Bestimmung der Maximumverschiebung bieten ein schnelles und zerstörungsfreies Verfahren, gesägte Silizium-Wafer großflächig auf ihre Oberflächenbeschaffenheit hin zu untersuchen.

Dr. Paul-Tiberiu Miclea, Prof. Dr. Stefan Schweizer



1 Raman-Spektren (links), gemessen an verschiedenen Positionen auf einem gesägten Silizium-Wafer (Positionen vgl. Bild rechts). Farblich kodiertes xy-Mapping der Verschiebung des Maximums gegenüber der Raman-Linie von spannungsfreiem, kristallinem Silizium bei 521 cm^{-1} (rechts).

VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM

Verbünde, Allianzen, Projektgruppen

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile

Die Fraunhofer-Materialforschung umfasst die gesamte Kette von der Entwicklung und Verbesserung von Materialien über die Herstelltechnologie und Charakterisierung der Eigenschaften bis hin 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: Dr. Ursula Eul

ursula.eul@lbf.fraunhofer.de

www.vwb.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz AdvanCer

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 autoMOBILproduktion

Die Allianz will Treibstoff- und CO₂-Verbrauch reduzieren, Elektromobilität stärken sowie den Materialeinsatz senken. Dabei realisiert sie Innovationen entlang der gesamten Herstellungsprozesskette, von der Planung bis zum lackierten Fahrzeug.

Dr. Wulf Pfeiffer | www.automobil.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Batterien

Die Fraunhofer-Allianz Batterien entwickelt rund um das Thema elektrochemische Energiespeicher (Batterien, Superkondensatoren) technische und konzeptionelle Lösungen.

Die Kompetenzen der Allianz umfassen dabei die Felder Material, System, Simulation und Testung.

Dr. Leonhard Mayrhofer | www.batterien.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Bau

Ziel der Fraunhofer-Allianz Bau ist es, alle wissenschaftlichen und forschungsrelevanten Fragen zum Thema Bau vollständig und »aus einer Hand« innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft abbilden und bearbeiten zu können. Der Baubranche steht so ein zentraler Ansprechpartner für integrale Systemlösung zur Verfügung.

Prof. Dr. Andreas Heilmann | www.bau.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 Generative Fertigung

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

Dr. Raimund Jaeger | www.generativ.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Leichtbau

Die Qualität einer Leichtbaustruktur ist wesentlich bestimmt durch ihre Werkstoffeigenschaften, die konstruktive Formgebung, ihre Bauweise und den Herstellungsprozess. Daher muss die gesamte Entwicklungskette von der Werkstoff- und Produktentwicklung über Serienfertigung und Zulassung bis hin zum Produkteinsatz betrachtet werden.

Dr. Ralf Schäuble, Dr. Michael Luke

www.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/verbuende-allianzen/Leichtbau.html



Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

Von der anwendungsorientierten Forschung bis zur industriellen Umsetzung werden beispielsweise multifunktionale Schichten für optische Anwendungen, den Automobilbau und die Elektroindustrie entwickelt. Metallische und oxidische Nanopartikel, Kohlenstoff-Nanoröhren und Nanokomposite werden in Aktuatoren, strukturellen Werkstoffen und biomedizinischen Anwendungen eingesetzt. Darüber hinaus beschäftigen wir uns mit Fragen der Toxizität und dem sicheren Umgang mit Nanopartikeln.

Prof. Dr. Andreas Heilmann, Prof. Dr. Michael Moseler
www.nano.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz Numerische Simulation von Produkten, Prozessen

Die Allianz bearbeitet institutsübergreifende Aufgaben zur Entwicklung und Verbesserung von Simulationsverfahren. Sie 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 Optic Surfaces

Die Allianz erarbeitet wissenschaftlich-technische Grundlagen für die Funktionalisierung von optischen Oberflächen aus Glas, Kunststoffen und Metallen durch Submikronstrukturen. Dazu werden insbesondere Beschichtungs- und Replikationsverfahren genutzt. Anwendungen sind beispielsweise Entspiegelung, Lichtlenkung, Beugungsgitter und Wellenleiter. Die Partnerinstitute unterstützen Entwickler bei der Auswahl von Materialien und technologischen Verfahren bis hin zur Herstellung von Musterbauteilen.

Dr. Peter Manns, Dr. Frank Burmeister
www.funktionale-oberflaechen.de

Fraunhofer Projektgruppe Neue Antriebssysteme NAS

Das Fraunhofer IWM arbeitet gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologien ICT und dem Institut für Kolbenmaschinen IFKM des Karlsruher Instituts für Technologie KIT an neuen Antriebskonzepten. Die Ziele sind eine dezentrale stationäre Energieversorgung sowie nachhaltig betreibbare Verbrennungsmotoren in Kombination mit einem Elektromotor oder als alleinige Antriebsquelle. Auch alternative Kraftstoffe und Energieträger werden mit einbezogen. Die neue Fraunhofer-Projektgruppe bündelt als einzige in Deutschland die Kompetenzen in den Bereichen Verbrennungsmotor, chemische Energiespeicher, Leichtbau und Tribologie.

Prof. Dr. Matthias Scherge
www.ict.fraunhofer.de/de/komp/nas.html

VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM

Fraunhofer-Gemeinschaftsforschung

Wirtschaftsorientierte Strategische Allianzen (WiSA) setzen neue Technologien in die industrielle Praxis um. Die marktorientierte strategische Vorlaufforschung (MaVo) ermöglicht anspruchsvolle Forschung an Zukunftsthemen.

Abrasive Bearbeitung von Oberflächen und Trennen durch maßgeschneiderte Suspensionen (AbraSus), WiSA

Bei der Nachbearbeitung schwer zugänglicher Oberflächen und dem Trennen von Hochleistungsbauteilen sollen hohe Präzision, gute Abtragsleistung sowie funktionale Oberflächenqualität bei gleichzeitig energieeffizienter Prozessführung erreicht werden. Die Optimierung des Strömungsschleifens sowie des Wasserabstrahlens ist komplex aufgrund der hochdynamischen Wechselwirkung des Trägerfluids und der Abrasivkörner mit dem Werkstück.

Prof. Dr. Michael Moseler

Entwicklung technologischer Grundlagen für die Titanumformung (UfoTi), MaVo

Im Rahmen von »UfoTi« sollen die Grundlagen für die prozesstechnische Beherrschung der Umformung von Blechwerkstoffen aus Titan gelegt werden. Zu diesem Zweck werden neuartige Werkzeugbeschichtungen und verbesserte Werkzeugwerkstoffe entwickelt und mit innovativen Umformverfahren kombiniert. Parallel dazu erfolgt die Entwicklung von Simulationsmodellen, um so die Prozessführung zu optimieren.

Dr. Alexander Butz

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

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.

Prof. Dr. Matthias Scherge

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

»BioRap« entwickelt ein Verfahren zur Herstellung bio-inspirierter Versorgungsstrukturen für Transplantate mit Rapid-Prototyping-Verfahren. Das Projekt umfasst die Entwicklung neuer biokompatibler Ausgangsmaterialien für die generativen Fertigungstechniken sowie die Technologieentwicklung zur Fertigung eines Blutgefäßsystems und dessen Biofunktionalisierung zur optimalen zellulären Besiedlung.

Dr. Raimund Jaeger

Hochtemperatur-Mikrosysteme – Zuverlässige Aufbau- und Verbindungstechnik für Mikroelektronik und Mikrosysteme bis 300 °C Betriebstemperatur (HOT-300), MaVo

Da elektronische Systeme und Komponenten immer härteren Anforderungen genügen müssen, liegt das Ziel in einer deutlichen Erhöhung der zulässigen Betriebstemperaturen bis 300 °C. Dafür werden Entwicklungen in Kombination von Halbleitertechnologie, Aufbau- und Verbindungstechnik, keramischer Materialentwicklung, Werkstoffanalytik und Bereitstellung einer verlässlichen Zuverlässigkeitsmodellierung vorangetrieben.

Prof. Dr. Matthias Petzold

Low-Cost-Technologien für die Herstellung von Bauteilen aus Ceramic Matrix Composites, MaVo

Neue Verfahren zur kostengünstigen Herstellung von kurzfaserverstärkten keramischen Verbundwerkstoffen sollen entwickelt werden. Schwerpunkt ist eine für CMC-Werkstoffe völlig neue Technologieentwicklung zur Herstellung von Keramikhalbzeugen mithilfe von Gieß- und Pressverfahren, die zur Massenproduktion von Kunststoffteilen bereits etabliert sind.

Dr. Achim Neubrand, Dr. Ralf Schäuble

VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM

Innovationscluster

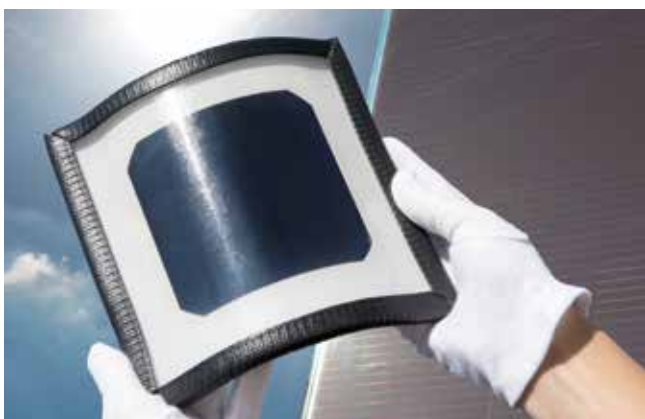
Innovationscluster fördern die Vernetzung zwischen Wirtschaft, Hochschulen und FuE-Einrichtungen in Technologiefeldern mit hohem Innovationspotenzial.

Kunststoffe und Kunststofftechnologie für die Solarindustrie, Halle

Die Fraunhofer-Institute IWM, IAP, CSP und PAZ arbeiten im Fraunhofer-Innovationscluster Kunststoffe und Kunststofftechnologien für die Solarindustrie - kurz »SolarKunststoffe« gemeinsam mit Unternehmen aus der Solar- und Kunststoffindustrie in Mitteldeutschland an der Entwicklung und Umsetzung innovativer Produkte, um sich einen entscheidenden Technologievorsprung im internationalen Wettbewerb zu verschaffen. Neuer Kunststofflösungen sind zunehmend ein Schlüsselement für wettbewerbsfähige Photovoltaiklösungen und eröffnen gleichzeitig der in Mitteldeutschland etablierten chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie neue Märkte. Die Verbindung von Polymersynthese, -verarbeitung und -charakterisierung mit der Solarmodultechnologie ist ein aussichtsreicher Ansatz für die Entwicklung neuer, anwendungsspezifischer Lösungen und ein Alleinstellungsmerkmal des Clusters.

Dr. Michael Busch

www.solarkunststoffe.de



Kunststoffbasiertes Minimodul.

Technologien für den hybriden Leichtbau KITE hyLITE, Karlsruhe

Die Fraunhofer-Institute ICT, IWM und LBF, das Center of Automotive Research and Technology CART des Karlsruher Instituts für Technologie KIT 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. Michael Luke

www.fahrzeugleichtbau.de

Innovationscluster Regional Eco Mobility 2030, Karlsruhe

Die Fraunhofer-Institute ISI, IOSB, ICT und IWM erarbeiten und bewerten ganzheitliche Konzepte für eine effiziente regionale Individualmobilität gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie KIT und zahlreichen Partnern aus der Wirtschaft Baden-Württembergs. Schwerpunkte sind unter anderem der lokal emissionsfreie Betrieb von PKW in Ballungsräumen, effiziente Antriebstechnik, Leichtbauweise, energieeffiziente Nutzung sowie energiewirtschaftliche Einbindung der Elektromobilität. Neben den technologischen Themen werden neue Mobilitätskonzepte und Geschäftsmodelle unter Berücksichtigung demografischer und soziologischer Aspekte entwickelt.

Dr. Michael Luke

www.rem2030.de

Mechanische Prüfung und Bewertung

- Servohydraulische, elektrodynamische und elektromechanische Prüfmaschinen für Prüfkraften von 10 mN bis 8 MN mit Prüfkammern von 80 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
- Klimatisierte Shakerprüfanlage für Vibrations- und Shocktests
- 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 100 m/s (Druckgasbeschleunigungsanlage)
- Schnellzerreißmaschinen bis 500 kN und Abzugsgeschwindigkeiten bis 20 m/s
- Durchstoß-Prüfeinrichtungen bis 500 kN und Belastungsgeschwindigkeit bis 12 m/s
- Pendelschlagwerke von 1 bis 750 J
- Fallgewichtsanlagen bis 7 000 J
- Hochgeschwindigkeitskameras mit bis zu 1 Million Bilder/s

- Motorprüfstand
- Rohrprüfstände für Langzeit- und Innendruckversuche bis 750 °C, mit Wechsellasteinrichtungen zur Überlagerung von axialem Zug und Druck
- Innendruckprüfeinrichtungen bis 650 bar und Triaxialpressen bis 7 000 bar, beide bis 1 000 K
- Multiaxiale Prüfmaschinen (Spannfelder) zur komplexen Bauteilprüfung
- Mechanischer Solarmodulprüfstand
- Scannendes Laser-Doppler-Vibrometer

- Vakuum-, Klima- und Temperaturprüfkammern
- Korrosionsprüfstände für wässrige und gasförmige Medien
- Induktive Erwärmungsanlagen
- Jominy-Versuchsstand
- Gleeble (Thermomechanische Umformanlage)

- 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
- Versuchsstände zur Festigkeits- und Lebensdauerermessung von Mikrosystemen

Material- und Oberflächencharakterisierung

- Transmissionselektronenmikroskop (TEM 200 keV) mit Röntgenanalyseesystem (Nanospot-EDX)
- TEM/STEM Transmissionselektronenmikroskop (200kV)
- EF-TEM Transmissionselektronenmikroskop (60-300 kV) mit Cs-Bildkorrektur, EDS, EELS, HAADF, STEM, NBD und in situ-Test
- Einstrahl-Fokussierende Ionenstrahlanlage (FIB) mit integriertem IR-Mikroskop
- Zweistrahl-FIB-Anlage mit in situ-Manipulator
- Zweistrahl-Laser-FIB-Anlage mit EBSD- und EDX-Analytik
- Plasma-FIB-Anlage
- Rasterelektronenmikroskope (REM) mit Röntgenanalyse (EDX, WDX) und Beugungsanalyse (EBSD)
- REM mit elektronenstrahlinduzierter Strommessung (EBIC)
- Atmosphärisches REM (ESEM) mit EDX-Analyse
- Kombinierte ESEM-FIB-Anlage mit Kryo-Transferkammer und Kryo-in situ-Präparationseinrichtungen
- Präparationstechniken: Präzisionsdrahtsägen, diverse Schleif-/Poliermaschinen und Ar-Ionenätzenanlagen, Präzisionsschleifanlagen für Zielpräparation, Plasma-Cleaner, Carbon-Bedampfung und Platin Sputter-Coating, Rotationsmikrotom, Ultramikrotom, Kryo-Ultramikrotom, Kritisch-Punkt-Trocknung, Kryofixierung

- Time-of-Flight-Sekundärionen-Massenspektroskopie (ToF-SIMS)
- Photoelektronenspektroskopie (XPS, UPS) mit Abtragsmodus, Tiefenprofil sowie Auger-Elektronenspektroskopie (AES)
- Tiefenprofil-Glimmentladungsspektrometer (GDOES)
- Kontaktwinkelmessung
- Plasmaanalytiksystem (OES, VI-Probe, SEERS)
- Dynamische Widerstandsmessung für hochohmige dünne Schichten (piezoresistive Effekte messbar)
- Automatischer Messplatz für elektrische Messungen im Picoamperebereich

- Rasterkraftmikroskope (AFM), u.a. mit Lateralkraftmessung und Flüssigkeitsmesszelle
- Weißlichtinterferometer
- Konfokal-Laserscanningmikroskope (CLSM)
- Profilometer und Rauheitsmessenrichtungen
- Interferometrische Eigenspannungsmessung
- Waferdickenbestimmung
- Interferometer mit Phasenschieber für Konturmessung von Asphären

GERÄTEAUSSTATTUNG

- Lichtmikroskope, Dunkelfeld- und DIK-Modus
- Quantitative Bildanalyseysteme
- UV/VIS/NIR-Spektrometer und Spektrellipsometer
- Elektrolumineszenz- und Photolumineszenz-Spektroskopie
- Infrarot-Mikroskopie
- FTIR-Spektroskopie und -Mikroskopie mit ATR-Messzellen
- Konfokales Ramanmikroskop und Raman-Spektrometer
- IR-Spannungsoptik-Messungen
- Verfahren zur Messung der Ladungsträgerlebensdauer (Mikrowellen-Photoconductance-Decay, quasistatische Photoleitfähigkeit)
- Farbanalysator

- 3D-Röntgen-CT-Inspektionsanlage mit in situ-Verformungseinrichtung
- Röntgendiffraktometer für Spannungsmessung, Textur- und Phasenanalyse mit Hochtemperatureinrichtung bis 2 300 K und Dünnschichtanalyseeinrichtung
- Mobile Diffraktometer für Eigenspannungsanalysen
- Mikrodiffraktometer (laterale Auflösung von 100 µm)
- Bohrlochverfahren für tiefenauflösende Eigenspannungsanalysen
- Luftgekoppelter Ultraschall (Scanfläche 1 500 x 1 000 mm²)
- Akustische Rastermikroskopie (MHz bis GHz)
- Aktive Thermographieverfahren (Puls-Phasen-Thermographie PPT, Lock-in-Thermographie, Thermoelastische Spannungsanalyse TSA)

- Dynamische Differenzkalorimetrie bis 1 600 °C
- Thermogravimetrische Analyse
- Differential-Thermoanalyse
- Dilatometer für Messungen bis 1 650 °C
- Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsmessung (Light-Flash-Methode) bis 2 000 °C
- Luftgekoppelter Ultraschall (75 kHz, 125 kHz)
- Lock-in-Thermographie mit elektrischer und optischer Anregung

- Verschleißmessanlagen für kleinste Verschleißraten (1-5 nm/h) mit Radionuklidtechnik und Plasmaspektroskopie (ICP-OES)
- Stift-Scheibe-Prüfstände
- Wälz- und Gleitverschleißprüfstände
- Kugellagerprüfstände
- Diverse Mikrotribometer (Temperatur, Umgebung, Vakuum)
- Tribokorrosionsprüfstände
- Frettingprüfstand bis 1 500 Hz
- Nanoindenter mit Temperierung
- Scratch-Tester mit Scanning-Option
- Mikro- und Makrohärteprüfer (vollautomatisch und manuell), mobile Härtemessung
- Registrierender Eindruckversuch bis 600 °C
- Rücksprunghärtemessgerät

- Massenspektroskopie mit induktions-gekoppeltem Plasma (ICP-MS) mit Laserablation, chemische Extraktion und elektrothermische Vaporisation
- Wasserstoffanalysator inkl. Auslagerungsöfen
- Stickstoff- und Sauerstoffanalysator
- Dichte- und Porositätsmessenrichtungen
- Wasserstoffpermeationsprüfstand mit Zug- und Temperatureinrichtung
- Karl-Fischer-Titrator (Feuchtemessung)
- Restgasanalysator
- Gaspermeationsmessgerät

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 für Multilagenbeschichtungen
- Anlage zur Plasmapolymerisation
- Plasmaätzenanlagen
- Nasschemische Beschichtungsanlagen (Spin-Coating, Raketbeschichtung, 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
- Anlage zum Laserschweißen von Polymerfolien
- Präzisionsdreh- und -fräsmaschinen
- Kugelstrahlanlagen zur Verfestigung und Strukturierung von Oberflächen

Polymeranalytik und -verarbeitung im Fraunhofer IWM und im Fraunhofer PAZ

- Minicompounder mit konischen Doppelschnecken
- Minispritzgießanlage
- Parallel gleichsinnig drehende Doppelschneckenextruder vom Labor- bis in den Pilotmaßstab (5-400 kg/h)
- Spritzgießcompounder (500-20 000 g)
- Einschneckenextruder
- Spritzgießmaschine, auch für Polymerrahmen (mit Fraunhofer CSP)

GERÄTEAUSSTATTUNG

- Polyurethan-Anlage für Einbettung von Solarzellen (mit Fraunhofer CSP)
- Faserschneider
- Laminat-Pressen
- Differentialkalorimetrie (DSC)
- Thermomechanische Analyse (TMA)
- Rotationsrheometer
- Hochdruckkapillarviskosimeter
- Schmelzfestigkeits- und Schmelzindexmessgeräte
- HDT-Wärmeformbeständigkeits- und Vicat-Erweichungstemperaturmessung
- Dielektrische Analyse (DEA)
- Schubstangendilatometer

Berechnungswerkzeuge

Hardware

- Linux-Serverfarm und Linux-Cluster mit 64-Bit-Prozessoren von Intel und AMD mit insgesamt mehr als 2 000 Cores

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
- »CARES/Life« zur probabilistischen Festigkeitsbewertung spröder Werkstoffe in Verbindung mit numerischen Simulationen
- 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, semi-empirische Tight-binding-Elektronenstrukturmethoden, Molekularstatik- und Molekuldynamik-Methoden mit Bond-Order-Potenzialen und mit klassischen Mehrkörper-Kraftfeldern
- »optiSLang« für multidisziplinäre Optimierung, Sensitivitätsstudien, Robustheitsbewertungen, Zuverlässigkeitsanalysen sowie Robust-Design-Optimierung

- »SimPARTIX« zur partikelbasierten Simulation auf Basis der Diskrete-Elemente Methode und der Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Methode
- Thermokinetik Software zur Berechnung physikalischer und chemischer Vorgänge

Ausstattung Photovoltaik im Fraunhofer CSP

- Mechanische Belastungsprüfplätze für Solarmodule
- Doppelring- und Vierpunktbiegetest zu Bestimmung der Glasfestigkeit
- Klimaprüfkammern teilweise mit Lichtalterungseinrichtung
- Freifeldmessplatz zur Solarmodulleistungsmessung
- Equipment für Elektrolumineszenz- und Thermographieaufnahmen
- Modulflasher für Modulleistungsmessung
- Hochspannungstest-Equipment
- Messplätze zur Ladungsträgerlebensdauerermessung (Si-Block, Wafer)
- 4-Punkt-Methode und Wirbelstrommethode zur Leitfähigkeitsmessungen
- Photolumineszenz-Messplatz zur orts aufgelösten Charakterisierung von Si-Blöcken, Wafer und Zelle
- Elektrolumineszenz-Messplatz zur Zellen-Charakterisierung
- Messplatz zur Bestimmung der internen und externen Quanteneffizienz von Zellen
- Sonnensimulator für Solarzellen
- Draht- und Bandsägen zum Squaren, Croppen
- Schleifmaschinen zur Oberflächen- und Fasenbearbeitung von Blöcken
- IR-Durchleuchtungssystem zur Identifizierung von SiC/SiN-Einschlüssen in Blöcken
- Drahtsägen für multi- und monokristalline Wafer
- Vorreinigungsanlage zum Ablösen der Wafer nach dem Sägen
- Inline-Feinreinigungsanlage zur Endreinigung der Wafer
- Inline-Messanlage mit Sortiereinheit zur Waferendkontrolle und Klassifizierung
- Glaswaschmaschine
- Variable Zellstring-Lay-up-Station
- Halbautomatische Zellverlötungsanlage
- Labor- und Großmodullaminator
- RTP-Ofen
- Siebdrucker
- Präzisionsprüfmaschinen für Verbindungs- und Lotmaterial

Preise und Ehrungen

Best Technical Poster Award beim int. Workshop NREL PV Module Reliability 2012 an Sascha Dietrich für sein Poster »Derivation of quality specifications of glass by probabilistic evaluation of mechanical module reliability«
01.03.12, Golden, CO, USA

Werkstoffmechanikpreis 2012 der Plansee Group Reutte, Österreich, an Julien Courseau für seine Diplomarbeit »Auslegung von generativ gefertigten Blutgefäßsystemen«
24.04.12, Halle (Saale)

Best Session Paper Award der »Electronic Components and Technology Conference ECTC« an Frank Altmann, Michael Krause, Matthias Petzold und Christian Schmidt für »Characterization and failure analysis of TSV interconnects: From non-destructive defect localization to material analysis with nanometer resolution«
31.05.12, San Diego, CA, USA

Karl-Hermann-Zipp-Preis der Hochschule Anhalt am Standort Köthen im Fachbereich Elektrotechnik, Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen an André Ogradowski für seine Bachelorarbeit »Konzipierung und Implementation einer Regeleinheit für eine roll-to-roll Wickelanlage zur Beschichtung von Hochleistungspolymerfolien mittels Vakuumoberflächenmodifikation«
04.06.12, Köthen

VDE-Preis 2011 an Nico Höhle für seine Bachelorarbeit »Charakterisierung und Auslegung elektrischer leitfähiger Lackschichten für das elektrotechnische Antifouling«
09.07.12, Halle (Saale)

Förderpreis des Halleschen Bezirksvereins Deutscher Ingenieure (VDI) an Jörg Jatzkowski für seine Masterarbeit »Untersuchung von Kontrastmechanismen im Rasterelektronenmikroskop zur Analyse von Dotierprofilen integrierter Schaltkreise«
21.09.12, Halle (Saale)

Förderpreis der Gesellschaft für Tribologie an Bashir Fakih für seine Diplomarbeit »Analyse von Reibungseffekten im System Kommutator-Bürste«
25.09.12, Göttingen

Student Award der EU-PVSEC an Dominik Lausch für seinen Vortrag »Classification and Investigation of Recombination Active Defects in Multicrystalline Silicon Solar-Cells«
28.09.12, Frankfurt

Best Paper an Bianca Böttge für »Failure mechanisms and mechanical characterization of reactive bonded interfaces«
10.10.12, Honolulu, HI, USA

Best Poster Award der PV Asia Pacific Conference 2012 an Volker Naumann für sein Poster »Mikrostrukturelle Ursachenanalyse von potential-induzierter Degradation (PID) an Si-Solarzellen«
25.10.12, Singapur

Outstanding Paper at 37th International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA 2011) an Frank Altmann für »Use of lock-in thermography for non-destructive 3D defect localization on system in package and stacked-die technology«
12.11.12, Phoenix, AZ, USA

Dissertationen

Marcus Christian Brand
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Weiterentwicklung von Methoden in der numerischen Schweißsimulation

Monika Gall
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Lebensdauer von flächigen piezokeramischen Sensor-/Aktor-Modulen

Ronny Gerbach
Technische Universität Ilmenau
Zerstörungsfreie Charakterisierung mikromechanischer Strukturen für produktionsbegleitende Anwendungen

Matthias Neuber
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Laserinduzierte Veränderungen der optischen Eigenschaften und der Mikrostruktur von Metall-Polymer-Kompositschichten

Kerstin Nötzold (extern)
Karlsruher Institut für Technologie KIT (Robert Bosch GmbH)
Stabilität von Glaslotbondverbindungen für mikromechanische Sensoren

Ralf Schlegel
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Deformationsverhalten von superelastischen Polymeren

Matthias Weber
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Numerische Untersuchung der Mikrozerspannung zur Analyse der Ursachen des Skalierungsverhaltens der spezifischen Schnittkraft

Matthias Weps
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Ein Beitrag zur Charakterisierung unsymmetrischer Dreischichtverbunde mit schubweicher Zwischenschicht

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

Marcus Altschner
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Herstellung und Charakterisierung von elektrochemisch aktiven Mehrschicht-Lack-Systemen für das Antifouling (D)

Amanda Anhoff
Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg
Optimierung eines Verschäumungsprozesses zur Herstellung duroplastischer Schaumstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe (M)

Özgür Aslanbas
Universität Ulm
Deposition and characterization of friction-reducing Si-Diamond-Like-Carbon (DLC) coatings by Plasma-Enhanced-Chemical-Vapor-Deposition (M)

Falk Barche
Hochschule Merseburg
Bewertung des Verarbeitungsverhaltens und elektrischer Eigenschaften von Leitlebern für die Verschaltung von Solarzellen (M)

Johannes Bergk
Technische Universität Bergakademie Freiberg
In situ Röntgen-CT Untersuchung des mechanischen Verhaltens eines Polymerhartschaumstoffes (B)

Christian Bernsdorf
Fachhochschule Nordhausen
Entwicklung eines Berechnungsmodells für die thermische Charakterisierung von gebäudeintegrierten Solarmodulen (B)

Cécile Boudot
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Tribologie von modifizierten Hydrogelen (M)

Karim Hassan El-Samman
German University Cairo, Egypt
Micromechanical Characterization of PMMA Bone Cement with Gentamicin (B)

Bashir Fakih
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Charakterisierung von Reibkontakten in Elektromotoren (D)

Sebastian Erik Friedl
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Untereutektische Aluminium-Silizium Legierung als Laufflächenmaterial im Verbrennungsmotor (D)

Sahil Sandesh Gandhi
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Blends and nanocomposites based on polyamide 6 and acrylonitrile-styrene-acrylate grafted with maleic anhydride: morphology and rheological properties (M)

Andreas Götze
Hochschule Anhalt, Köthen
Untersuchungen zur qualitativen Bewertung von biologischem Hartgewebe und Weichgewebe mittels röntgenmikroskopischer Computertomografie (B)

Samy Hammouda
Hochschule Offenburg
Modellierung und Bewertung der TMF-Lebensdauer von Stahlgusskomponenten (M)

Rolf Herold
Hochschule Merseburg
Untersuchungen der thermischen Eigenschaften dünner Materialschichten mittels Laser Flash Analyse (LFA) (M)

Klemens Konstantin Ilse
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Elektrische Charakterisierung von Verschaltungsstrukturen für Dünnschicht-Photovoltaikmodule (B)

Sebastian Jose
Hochschule Anhalt, Köthen
Systematische Messungen an einer Testanlage für Wasserfiltermembranen (B)

Jamel Khamassi
Technische Universität Darmstadt
Fluidmechanische Beschreibung künstlicher Gefäßsysteme (D)

Ramona Komoll
Hochschule Anhalt, Köthen
Plasmaoberflächenbehandlung von Kunststofffolien mit veränderter Gasphase zur Verbesserung der Haftung von Druckfarben (B)

Markus Kugler
Hochschule Mannheim
Tribologische Untersuchungen an hochtemperaturbeständigen CrVN- und TiAlN-Ag-Schichten (M)

Tobias Kürbitz
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Floureszenzmikroskopische Untersuchungen des Biofoulings auf Polymermembranen (B)

Thomas Mädler
Hochschule Merseburg
Weiterentwicklung eines Portalsystems zur hoch ortsaufgelösten Charakterisierung von Solarzellen und Solarmodulen (B)

Paul Marchwiak
Hochschule Offenburg
Crashsimulation von glasfaserverstärkten Kunststoffen (B)

Rico Meitzner
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK)
Modellierung der Wasserpermeation in Verkapselungsmaterialien für Verbundglas-Solarmodule (B)

PERSONEN, AUSBILDUNG, EREIGNISSE

Jan Pagenkopf Karlsruher Institut für Technologie KIT Algorithmische Behandlung der Kristallplastizität im Rahmen der Finite-Elemente Methode zur virtuellen Kennwertermittlung (D)	Sandy Weißflog Hochschule Mittweida Aufbau und Anwendung eines Bioreaktors zur Simulation der Biofilmbildung an Zahnschmelz und Charakterisierung abgeschiedener Biofilme (B)	Dr. Felix Göhre Universität Leipzig 01.07.11-30.04.13	Inga Rössler Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 23.01.12-31.12.12
Katrin Richter Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTW) Konstruktion und Erprobung eines Bioreaktors zur Simulation des Biofoulings an Membranen für die Wasseraufbereitung (M)	Martin Weser Hochschule Anhalt, Köthen Untersuchung von Zellwachstum und Zelladhäsion auf modifizierten Polystyroloberflächen (B)	Peter Grüninger IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 01.10.11-31.01.12	Tobias Schlarb IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 19.09.11-15.03.12
Linda Rozincsak Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg Tribochemie des geschmierten Systems Polyamid und Stahl (D)	Gäste	Dr. Pierre Hirel IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 01.02.09-31.12.12	Prof. Dr. Thomas Seifert Hochschule Offenburg 01.03.11-31.01.13
Tobias Schlarb Karlsruher Institut für Technologie KIT Einlaufverhalten untereutektischer AlSi-Scheiben (B)	Dr. Jan-Michael Albina IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 01.10.10-31.03.12	Tobias Hoppe Robert Bosch GmbH 01.02.10-31.01.12	Dr. Takahiro Shimada Kyoto University, Japan 24.07.12-19.08.12
Fabian Schippel Hochschule Merseburg Reaktives Fügen in der Aufbau- und Verbindungstechnik (B)	Adham Al-Sayyad German University, Cairo, Ägypten 01.03.12-31.08.12	Lu Hui IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 01.09.11-31.08.13	Dr. Pantcho Stoyanov IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 10.10.11-09.10.13
Christian Schröder Universität Siegen Untersuchung der mechanisch und hydrothermal induzierten Phasen- umwandlung in Zirkondioxid-Kera- miken (D)	Brent Augustine John Deere, Moline, IL USA 17.09.12-12.10.12	Denis Ivanov IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 01.10.10-30.09.13	Michael Trinkner Hochschule Mannheim 01.03.12-30.09.12
Robert Schütt Hochschule Merseburg Untersuchung der mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaf- ten von reaktiven Bondverbindun- gen (B)	André Bärthel Universität Leipzig 01.07.11-30.04.13	Dr. Iyas S. Khader Deutsch-Jordanische Universität, Jordanien 15.08.06-31.12.14	Dr. Kisaragi Yashiro Kobe University, Japan 29.07.11-29.01.12
Thomas Skala Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK) Quantifizierung von Eigenspan- nungen in CFK-Schaum-Sandwich- strukturen (B)	Nils Beckmann Robert Bosch GmbH 01.07.10-14.07.13	Markus Kugler Hochschule Mannheim 01.03.12-30.09.12	Benedikt Ziebarth IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 01.10.12-30.09.14
Sonja Stefanie Spohn Hochschule Anhalt, Köthen Untersuchung der chemischen Beständigkeit von nanoporösen Aluminiumoxidmembranen mittels ICP-Massenspektrometrie (M)	Anne Behrens Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 23.01.12-31.12.12	Dr. Ricardo Lebensohn Los Alamos National Laboratory, USA 20.06.12-06.07.12	
Onur Cagri Temiz Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden Influence of sliding velocity on running-in behavior and associated changes of medium carbon steel (M)	Christian Bentler Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 01.10.12-30.09.14	Mario Metzger IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 01.09.11-24.05.15	
Immanuel Voigt Technische Universität Bergakade- mie Freiberg Bewertung von mechanischen Prüf- methoden zur Festigkeitsmessung an Siliziumscheiben (B)	Prof. Dr. Paul Bristowe University of Cambridge, UK 18.11.09-30.04.15	Felix Mohr Daimler AG 01.08.10-29.02.12	
Florian Wallburg Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK) Charakterisierung von Faserver- bundlaminaten mittels thermischer Spannungsanalyse (B)	Dr. Gabor Csanyi Pembroke College, UK 15.01.11-31.03.12	Christian Paßlick Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 25.06.08-30.09.12	
	Karim El-Samman German University, Cairo, Ägypten 01.03.12-30.06.12	Dr. Lars Pastewka Johns Hopkins University, Balti- more, USA 01.01.11-30.04.13	
	Nicole Eversmann Universität Weimar 01.05.12-31.01.15	Prof. Dr. Tony Paxton Queen's University Belfast, UK 01.10.08-30.04.15	
	Tim Feser IAM-ZBS am Karlsruher Institut für Technologie KIT 15.05.10-31.12.12	Charlotte Pfau Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 01.08.09-31.03.12	
	Madeline Frey Colorado State University, USA 04.06.12-31.08.12	Rolf Plötze Selbstständiger Berater 23.05.11-31.08.12	
	Francesca Garesci University of Messina, Italien 01.03.12-30.06.12		

PERSONEN, AUSBILDUNG, EREIGNISSE

Vorlesungen WS 2011/2012

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Superconductivity I + II
Prof. Dr. Christian Elsässer

Burg Giebichenstein Kunsthoch- schule, Halle

Konstruktion und Werkstoffme-
chanik
Andreas Krombholz

Fachhochschule Merseburg

Polymerphysik
Prof. Dr. Mario Beiner

Photovoltaik
Dr. Christian Hagendorf

Hochschule Anhalt, Köthen

Silizium: Eigenschaften, Herstellung,
Kristallisation, Waferfertigung
Prof. Dr. Jörg Bagdahn

Microsystems Technology
Prof. Dr. Andreas Heilmann

Sensor- und Aktortechnik
Prof. Dr. Andreas Heilmann

Karlsruher Institut für Technolo- gie KIT

Atomistische Simulation und Mole-
kulardynamik
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Versagensverhalten von Konstruk-
tionswerkstoffen: Verformung und
Bruch
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Prozesssimulation in der Umform-
technik
Dr. Dirk Helm

Tribologie A
Prof. Dr. Matthias Scherge

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Experimentelle Polymerphysik
Prof. Dr. Mario Beiner

Medizinische Optik
Prof. Dr. Stefan Schweizer

Halbleitertechnologien
Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn

Vorlesungen SS 2012

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Superconductivity I + II
Prof. Dr. Christian Elsässer

Computation material science
Prof. Dr. Michael Moseler

Fachhochschule Merseburg

Auslegung, Zuverlässigkeit und
Diagnostik von Mikrosystemen
Master Mechatronik, Industrietechni-
k, Physiktechnik (MMIP)
Prof. Dr. Matthias Petzold

Hochschule Anhalt, Köthen

Advanced Photovoltaic English
Prof. Dr. Jörg Bagdahn

Karlsruher Institut für Technolo- gie KIT

Nanotribologie und -lithographie
mit Rastersondenmethoden
Dr. Martin Dienwiebel

Tribologie B
Prof. Dr. Matthias Scherge

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Experimental Methods in Polymer
Physics
Prof. Dr. Mario Beiner

Surface Science
Prof. Dr. Andreas Heilmann

Universität Siegen

Composites I – Verbundwerkstoffe
Dr. Jörg Hohe

Composites II – Werkstoffverbunde
Dr. Jörg Hohe

Vom Fraunhofer IWM organi- sierte Fachveranstaltungen

Einweihung des Centers für ange-
wandte Mikrostruktur-Diagnostik
CAM

International Workshop on failure
analysis and material characteriza-
tion
08.-09.03.12, Halle (Saale)

Maßgeschneiderte Tribologische
Schichtsysteme
Industrieworkshop
27.-28.06.12, Freiburg

LUMDETR, 8th International Confe-
rence on Luminescent Detectors and
Transformers of Ionizing Radiation
10.-14.09.12, Halle (Saale)

Element- und Oberflächenanalytik
in der Photovoltaik
Workshop
06.-07.11.12, Halle (Saale)

9. Hochschul Kupfer Symposium
HKS in Kooperation mit dem
deutschen Kupferinstitut
06.-07.11.12, Freiburg

Fraunhofer Allianz Advancer
Seminar Hochleistungskeramik
Teil III: Konstruktion, Prüfung
08.-09.11.12, Freiburg

Kontaktstudium Werkstofftechnik
Stahl (Mechanische Eigenschaften)
in Kooperation mit der Stahlakade-
mie des VDEh
13.-15.11.12, Freiburg

Weitere öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen

Richtfest Neubau des
Fraunhofer-Centers für Silizium-
Photovoltaik CSP
Fraunhofer IWM Halle (Saale)
27.03.2012

Eröffnung der Erweiterungshalle des
Fraunhofer-Pilotanlagenzentrums für
Polymersynthese und -verarbeitung
PAZ und Einweihung des Erweite-
rungsbaus des Fraunhofer CSP
03.04.12, Schkopau

Girls' Day
26.04.12, Freiburg und Halle (Saale)

Festveranstaltung 20 Jahre
Fraunhofer IWM Halle
25.04.12, Halle (Saale)

Forschung Live Erleben,
Veranstaltung anlässlich 60 Jahre
Baden-Württemberg
23.06.12, Freiburg

Lange Nacht der Wissenschaften
06.07.12, Halle (Saale)

Eröffnung der Elektroladestelle
02.07.12, Halle (Saale)

Eröffnung Fraunhofer-Innovations-
cluster »Kunststoffe und Kunst-
stofftechnologien für die Solarin-
dustrie«
25.10.12, Halle (Saale)

Messen mit Fraunhofer IWM- Beteiligung

JEC Composites
27.-29.03.2012, Paris

ECTC Electronic components and
technology conference
29.05.-01.06.12, San Diego, USA

Intersolar
13.-15.06.2012, München

ACHEMA Chemical Engineering,
Environmental Protection, Biotech-
nology
18.-22.06.2012, Frankfurt

EU PVSEC European Photovoltaic
Solar Energy Conference and
Exhibition
24.09.-28.10.12, Frankfurt

Composites Europe
09.-11.10.12, Düsseldorf

GlassTec
23.-26.10.12, Düsseldorf

EuroBlech
23.-27.10.12, Hannover

ISTFA International Symposium for
Testing and Failure Analysis
11.-15.11.12, Phoenix, AZ, USA

Erteilte Patente 2012

Schweizer, S.; Miclea, P.T.;
Wehrspohn, R.B.
Photovoltaisches Element mit einer
Schicht aus einer lumineszierenden
Glaskeramik
Patent-Nr. DE 10 2008 035 986 B4

Wehrspohn, R.B.; Schweizer S.
Photovoltaische Anordnung mit
optisch aktiver Glaskeramik
Patent-Nr. EP 2 191 216 B1

- Aabdin, Z.; Peranio, N.; Eibl, O.; Töllner, W.; Nielsch, K.; Bessas, D.; Hermann, R.P.; Winkler, M.; König, J.; Böttner, H.; Pacheco, V.; Schmidt, J.; Hashibon, A.; Elsässer, C.
Nanostructure, excitations, and thermoelectric properties of Bi₂Te₃-based nanomaterials
 Journal of Electronic Materials 41 (2012) 1792-1798; 318/2012
- Adhikari, R.; Brostow, W.; Datashvili, T.; Henning, S.; Menard, B.; Menard, K.P.; Michler, G.H.
Effect of surfactant treated boehmite nanoparticles on properties of block copolymers
 Materials Research Innovations 16 (2012) 19-24; 110/2012
- Albina, J.-M.; Elsässer, C.; Weissmüller, J.; Gumbsch, P.; Umeno, Y.
Ab initio investigation of surface stress response to charging of transition and noble metals
 Physical Review B 85 (2012) 125118 1-5; 140/2012
- Altmann, F.; Petzold, M.
Emerging techniques for 3D integrated system-in-package failure diagnostics
 Electronic Device Failure Analysis 14 (2012) 14-20; 221/2012
- Amann, T.; Dold, C.; Kailer, A.
Rheological characterization of ionic liquids and ionic liquid crystals with promising tribological performance
 Soft Matter 8 (2012) 9840-9846; 230/2012
- Bachurin, D.V.; Gumbsch, P.
Elastic and plastic anisotropy after straining of nanocrystalline palladium
 Physical Review B 85 (2012) 085407 1-9; 177/2012
- Bakowski, R.; Kesser, G.; Richter, R.; Lausch, D.; Eidner, A.; Clemens, P.; Petter, K.
Fast method to determine the structural defect density of 156 x 156 mm² Mc-Si wafers
 Energy Procedia 27 (2012) 179-184; 651/2012
- Bauer, J.; Kwapil, W.; Lausch, D.; Schubert, M.C.; Warta, W.; Bothe, K.; Breitenstein, O.
Comments on the paper »Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells«
 Solar Energy Materials and Solar Cells 99 (2012) 362-364; 107/2012
- Bauer, J.; Lausch, D.; Blumtritt, H.; Zakharov, N.; Breitenstein, O.
Avalanche breakdown in multicrystalline solar cells due to preferred phosphorous diffusion at extended defects
 Progress in Photovoltaics Research and Applications (2012) online DOI 10.1002/pip.2220; 279/2012
- Böhme, W.; Memhard, D.; Brand, M.; Siegele, D.
Failure behavior of crash-relevant welded aluminium joints
 Welding and Cutting 11 (2012) 42-48; 594/2012
- Brand, M.; Hohe, J.; Siegele, D.
Numerical investigations on the residual stress field in a cladged plate due to the cladding process
 Welding in the World 56 (2012) 107-113; 676/2012
- Brand, S.; Czurratis, P.; Hoffrogge, P.; Temple, D.; Malta, D.; Reed, J.; Petzold, M.
Extending acoustic microscopy for comprehensive failure analysis applications
 Journal of Materials Science 22/10 (2011) 1580-1593; 206/2011
- Butenuth, A.; Moras, G.; Schneider, J.; Koleini, M.; Koppen, S.; Meissner, R.; Wright, L.B.; Walsh, T.R.; Ciacchi, C.L.
Ab initio derived force-field parameters for molecular dynamics simulations of deprotonated amorphous-SiO₂/water interfaces
 Physica Status Solidi B 249 (2012) 292-305; 106/2012
- Butz, A.; Helm, D.
Simulationsbasierte Untersuchung der Eigenschaften von Bauteilen aus Kupfer am Beispiel der Fertigungskette von Solarzellenverbindern
 Metall 66 (2012) 28-31; 117/2012
- de Pablos-Martín, A.; Durán, A.; Pascual, M.J.; Soria, S.; Righini, G.C.; Ramírez, M.O.; Bausá, L.E.; Ristic, D.; Ferrari, M.; Höche, T.
Transparent glass-ceramics: crystallization mechanisms and optical properties
 SPIE Newsroom (2012) online DOI 10.1117/2.1201209.004335; 544/2012
- Dembski, S.; Milde, M.; Dyrba, M.; Schweizer, S.; Gellermann, C.; Klockenbring, T.
Effect of pH on the synthesis and properties of luminescent SiO₂/calcium phosphate: Eu³⁺ core shell nanoparticles
 Langmuir 27/23 (2011) 14025-14032; 197/2011
- Erk, C.; You, M.Y.E.; Lange, H.; Thomsen, C.; Miclea, P.; Wehrspohn, R.B.; Schlecht, S.; Steinhart, M.
Formation of gold nanoparticles in polymeric nanowires by low-temperature thermolysis of gold mesitylene
 Journal of Materials Chemistry 22 (2012) 684-690; 380/2012
- Erünal, E.; Jakes, P.; Körbel, S.; Acker, J.; Kungl, H.; Elsässer, C.; Hoffmann, M.J.; Eichel, R.-A.
CuO-doped NaNbO₃ antiferroelectrics: Impact of aliovalent doping and nonstoichiometry on the defect structure and formation of secondary phases
 Physical Review B 84 (2011) 184113 1-11; 192/2011
- Friedmann, A.; Cismak, A.; Tautorat, C.; Koester, P.J.; Baumann, W.; Held, J.; Gaspar, J.; Ruther, P.; Paul, O.; Heilmann, A.
FIB preparation and SEM investigations for three-dimensional analysis of cell cultures on microneedle arrays
 Scanning 33 (2011) 1-9; 206/2012
- Ganß, M.; Staudinger, U.; Thunga, M.; Knoll, K.; Schneider, K.; Stamm, M.; Weidisch, R.
Influence of S/B middle block composition on the morphology and the mechanical response of polystyrene-poly(styrene-co-butadiene)-polystyrene triblock copolymers
 Polymer 53 (2012) 2085-2098; 295/2012
- Gerlach, J.W.; Ivanov, T.; Neumann, L.; Höche, T.; Hirsch, D.; Rauschenbach, B.
Epitaxial GaN films by hyperthermal ion-beam nitridation of Ga droplets
 Journal of Applied Physics 111 (2012) 113521 1-10; 524/2012
- Grönhagen, N.; Järvi, T.; Miroslawski, N.; Hövel, H.; Moseler, M.
Decay kinetics of cluster-beam-deposited metal particles
 Journal of Physical Chemistry C 116 (2012) 19327-19334; 587/2012
- Groscurth, S.; Müller, B.; Schwan, S.; Menzel, M.; Diekstall, F.; Senft, M.; Kendall, A.; Kommor, B.A.; Neumann, U.; Kalischuk, M.; Kawchuk, L.M.; Krzyzaneck, V.; Heilmann, A.; Stubbs, G.; Twyman, R.M.; Pruefer, D.; Noll, G.A.
Artificial forisomes are ideal models of forisome assembly and activity that allow the development of technical devices
 Biomacromolecules 13 (2012) 3076-3086; 732/2012
- Hashibon, A.; Elsässer, C.
First-principles density functional theory study of native point defects in Bi₂Te₃
 Physical Review B 84 (2011) 144117 1-9; 175/2011
- Henning, S.; Imam Khasim, H.R.; Michler, G.H.; Brandt, J.
Hierarchically structured materials for bone regenerations: biomimetic morphology, micromechanics and properties
 Macromolecular Symposia 315 (2012) 84-97; 399/2012
- Hoess, A.; Thormann, A.; Friedmann, A.; Heilmann, A.
Self-supporting nanoporous alumina membranes as substrates for hepatic cell cultures
 Journal of Biomedical Materials Research Part A 100 (2012) 2230-2238; 355/2012
- Hohe, J.; Beckmann, C.
Probabilistic homogenization of hexagonal honeycombs with perturbed microstructure
 Mechanics of Materials 49 (2012) 13-29; 370/2012

- Hohe, J.; Hardenacke, V.
Analysis of uncertainty effects due to microstructural disorder in cellular or porous materials
International Journal of Solids and Structures 49 (2012) 1009-1021; 293/2012
- Hohe, J.; Hardenacke, V.; Fascio, V.; Girard, Y.; Baumeister, J.; Stöbener, K.; Weise, J.; Lehms, D.; Patoatto, S.; Zeng, H.; Zhao, H.; Calbucci, V.; Rustichelli, F.; Fiori, F.
Numerical and experimental design of graded cellular sandwich cores for multi-functional aerospace applications
Materials and Design 39 (2012) 20-32; 367/2012
- Höche, T.; Patzig, C.; Gemming, T.; Wurth, R.; Rüssel, C.; Avramov, I.
Temporal evolution of diffusion barriers surrounding ZrTiO₄ nuclei in lithia aluminosilicate glass-ceramics
Crystal Growth & Design 12 (2012) 1556-1563; 532/2012
- Hölzer, S.; Ganß, M.; Schneider, K.; Knoll, K.; Weidisch, R.
Deformation mechanisms in lamellar S-S/B-S triblock copolymers
European Polymer Journal (2012) online
DOI 10.1016/j.eurpolymj.2012.06.001; 720/2012
- Jatzkowski, J.; Simon-Najasek, M.; Altmann, F.
Novel techniques for dopant contrast analysis on real IC structures
Microelectronics Reliability 52 (2012) 2098-2103; 613/2012
- Järvi, T.; Nordlund, K.
Sputtering of freestanding metal nanocrystals
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 272 (2012) 66-69; 131/2012
- John, M.; Schlimper, R.; Rinker, M.; Wagner, T.; Roth, A.; Schäuble, R.
Long term durability of CFRP foam core sandwich structures
CEAS Aeronautical Journal 2/1-4 (2011) 213-221; 127/2011
- Kamjunke, N.; Spohn, U.; Fütting, M.; Wagner, G.; Scharf, E.M.; Sandrock, S.; Zippel, B.
Use of confocal laser scanning microscopy for biofilm investigation on paints under field conditions
International Biodeterioration & Biodegradation 69 (2012) 17-22; 152/2012
- Khader, I.; Kürten, D.; Kailer, A.
A study on the wear of silicon nitride in rolling-sliding contact
Wear 296 (2012) 630-637; 130/2012
- Khare, C.; Gerlach, J.W.; Höche, T.; Fuhrmann, B.; Leipner, H.S.; Rauschenbach, B.
Effects of annealing on arrays of Ge nanocolumns formed by glancing angle deposition
Applied Surface Science 258 (2012) 9762-9769; 537/2012
- Khare, C.; Gerlach, J.W.; Patzig, C.; Rauschenbach, B.
Ion beam sputter deposition of epitaxial Ag films on native oxide covered Si (100) substrates
Applied Surface Science 258 (2012) 9617-9622; 547/2012
- Kieback, B.; Noethe, M.; Grupp, R.; Banhart, J.; Rasp, T.; Kraft, T.
Analysis of particle rolling and intrinsic rotations in copper powder during sintering
Journal of Materials Science 20 (2012) 7047-7055; 747/2012
- Korres, S.; Feser, T.; Dienwiebel, M.
In situ observation of wear particle formation on lubricated sliding surfaces
Acta Materialia 60 (2012) 420-429; 271/2012
- Merkle, L.; Sonner, M.; Petzold, M.
Developing a model for the bond heel lifetime prediction of thick aluminium wire bonds
Soldering & Surface Mount Technology 24 (2012) 127-134; 543/2012
- Metzger, M.; Nieweg, B.; Schweizer, C.; Seifert, T.
Lifetime prediction of cast iron materials under combined thermomechanical fatigue and high cycle fatigue loading using a mechanism-based model
International Journal of Fatigue (2012) online
DOI 10.1016/j.ijfatigue.2012.02.007; 670/2012
- Metzger, M.; Seifert, T.
A mechanism-based model for LCF/HCF and TMF/HCF life prediction: multiaxial formulation, finite-element implementation and application to cast iron
Technische Mechanik 32 (2012) 435-445; 662/2012
- Meyer, S.; Richter, S.; Balski, M.; Hagendorf, C.
Trace element analysis in solar silicon
Photovoltaics International 2011 (2011) 34-39; 638/2012
- Michaelis, S.; Rommel, C.E.; Endell, J.; Göring, P.; Wehrspohn, R.B.; Steinem, C.; Janshoff, A.; Galla, H.; Wegener, J.
Macroporous silicon chips for laterally resolved, multi-parametric analysis of epithelial barrier function
Lab on a Chip 12 (2012) 2329-2336; 381/2012
- Moras, G.; Pastewka, L.; Walter, M.; Schnagl, J.; Gumbsch, P.; Moseler, M.
Progressive shortening of sp-hybridized carbon chains through oxygen-induced cleavage
Journal of Physical Chemistry C 115 (2011) 24653-24661; 272/2012
- Moseler, M.; Walter, M.
Oxidation of magnesia-supported Pd₃₀ nanoclusters and catalyzed CO combustion: size-selected experiments and first-principles theory
Journal of Physical Chemistry C 116 (2012) 9594-9607; 215/2012
- Moseler, M.; Walter, M.; Yoon, B.; Landman, U.; Habibpour, V.; Harding, C.; Kunz, S.; Heiz, U.
Oxidation state and symmetry of magnesia-supported Pd_{130x} nanocatalysts influence activation barriers of CO oxidation
Journal of the American Chemical Society 134 (2012) 7690-7699; 216/2012
- Mujtaba, A.; Keller, M.; Ilisch, S.; Radusch, H.-J.; Thurn-Albrecht, T.; Saalwächter, K.; Beiner, M.
Mechanical properties and cross-link density of styrene-butadiene model composites containing fillers with bimodal particle size distribution
Macromolecules 45 (2012) 6504-6515; 632/2012
- Naumann, V.; Otto, M.; Wehrspohn, R.B.; Hagendorf, C.
Chemical and structural study of electrically passivating Al₂O₃/Si interfaces prepared by atomic layer deposition
Journal of Vacuum Science 30 (2012) 6; 229/2012
- Neuber, M.; Heilmann, A.
Laser welding of polymer foils with gold nanoparticles as optical absorber
Advanced Science Letters 4 (2011) 3596-3598; 205/2012
- Olofsson, J.; Pettersson, M.; Teuscher, N.; Heilmann, A.; Larsson, K.; Grandfield, K.; Persson, C.; Jacobson, S.; Engqvist, H.
Fabrication and evaluation of SixNy coatings for total joint replacement
Journal of Materials Science-Materials in Medicine 23 (2012) 1879-1889; 397/2012
- Otto, M.; Kroll, M.; Kasebier, T.; Salzer, R.; Tünnermann, A.; Wehrspohn, R.B.
Extremely low surface recombination velocities in black silicon passivated by atomic layer deposition
Applied Physics Letters 100 (2012) 191603; 384/2012
- Paßlick, C.; Müller, O.; Lützenkirchen-Hecht, D.; Frahm, R.; Johnson, J.A.; Schweizer, S.
Structural properties of fluorozirconate-based glass ceramics doped with multivalent europium
Journal of Applied Physics 110/11 (2011) 113527; 203/2011
- Pastewka, L.; Sharp, T.A.; Robbins, M.O.
Seamless elastic boundaries for atomistic calculations
Physical Review B 86 (2012) 075459 1-12; 563/2012
- Pastewka, L.; Mrovec, M.; Moseler, M.; Gumbsch, P.
Bond order potentials for fracture, wear, and plasticity
MRS Bulletin 37 (2012) 493-503; 700/2012
- Patzig, C.; Höche, T.; Dittmer, M.; Rüssel, C.
Temporal evolution of crystallization in MgO-Al₂O₃-SiO₂-ZrO₂ glass ceramics
Crystal Growth & Design 12 (2012) 2059-2067; 531/2012

- Perlt, S.; Höche, T.; Dadda, J.; Müller, E.; Bauer Pereira, P.; Hermann, R.; Sarahan, M.; Pippel, E.; Brydson, R.
Microstructure analyses and thermoelectric properties of Ag_{1-x}Pb₁₈Sb_{1+y}Te₂₀
 Journal of Solid State Chemistry 193 (2012) 58-63; 536/2012
- Rasp, T.; Jamin, C.; Wonisch, A.; Kraft, T.; Guillon, O.
Shape distortion and delamination during constrained sintering of ceramic stripes: Discrete element simulations and experiments
 Journal of the American Ceramic Society 95 (2012) 586-592; 105/2012
- Reinfried, M.; Stephani, G.; Luthardt, F.; Adler, J.; John, M.; Krombholz, A.
Hybrid foams – a new approach for multifunctional applications
 Advanced Engineering Materials 13/11 (2011) 1031-1036; 204/2011
- Rengarajan, G.T.; Enke, D.; Steinhart, M.; Beiner, M.
Size-dependent growth of polymorphs in nanopores and Ostwald's step rule of stages
 Physical Chemistry Chemical Physics 13/48 (2011) 21367-21374; 199/2011
- Rinker, M.; Zahlen, P.C.; John, M.; Schäuble, R.
Investigation of sandwich crack stop elements under fatigue loading
 Journal of Sandwich Structures & Materials 14 (2012) 55-73; 109/2012
- Rublack, T.; Schade, M.; Muchow, M.; Leipner, H.S.; Seifert, G.
Proof of damage-free selective removal of thin dielectric coatings on silicon wafers by irradiation with femtosecond laser pulses
 Journal of Applied Physics (JAP) 112 (2012) 023521 1-7; 480/2012
- Schlegel, R.; Duan, Y.X.; Weidisch, R.; Hölzer, S.; Schneider, K.; Stamm, M.; Uhrig, D.; Mays, J.W.; Heinrich, G.; Hadjichristidis, N.
High-strain-induced deformation mechanisms in block-graft and multigraft copolymers
 Macromolecules 44 (2011) 9374-9383; 200/2011
- Schmidt, C.; Altmann, F.; Breitenstein, O.
Application of lock-in thermography for failure analysis in integrated circuits using quantitative phase shift analysis
 Materials Science and Engineering B 177 (2012) 1261-7; 773/2012
- Schriever, C.; Bohley, C.; Schilling, J.; Wehrspohn, R.B.
Strained silicon photonics
 Materials 5 (2012) 889-908; 151/2012
- Schulze, S.-H.; Pander, M.; Naumenko, K.; Altenbach, H.
Analysis of laminated glass beams for photovoltaic applications
 International Journal of Solids and Structures 49 (2012) 2027-2036; 274/2012
- Schwaiger, R.; Weber, M.; Moser, B.; Gumbsch, P.; Kraft, O.
Mechanical assessment of ultrafine-grained nickel by micro-compression experiment and finite element simulation
 Journal of Materials Research 27 (2012) 266-277; 178/2012
- Shen, Z.; Yan, H.; Gruener, D.; Belova, L.M.; Sakamoto, Y.; Hu, J.; Nan, C.-W.; Hoeche, T.; Reece, M.J.
Ferroelectric ceramics with enhanced remnant polarization by ordered coalescence of nano-crystals
 Journal of Materials Chemistry 22 (2012) 23547-23552; 542/2012
- Siegele, D.
Welding mechanics for advanced component safety assessment
 Frontiers of Materials Science 5 (2011) 224-235; 621/2012
- Sorochynska, L.; Grishchuk, S.; Korres, S.; Riehn, C.; Niedner-Schatteburg, G.; Georgieva, V.; Georgiev, G.; Karger-Kocsis, J.
Energy transfer and photoactivity of photozymes included in polyacrylate hydrogels
 Journal of Applied Polymer Science 125 (2012) 3721-3729; 426/2012
- Sprafke, A.N.; Wehrspohn, R.B.
Light trapping concepts for photon management in solar cells
 Green 2 (2012) 177-187; 679/2012
- Syha, M.; Rheinheimer, W.; Baurer, M.; Lauridsen, E.M.; Ludwig, W.; Weygand, D.; Gumbsch, P.
Three-dimensional grain structure of sintered bulk strontium titanate from X-ray diffraction contrast tomography
 Scripta Materialia 66 (2012) 1-4; 182/2012
- Turek, M.
Interplay of bulk and surface properties for steady-state measurements of minority carrier lifetimes
 Journal of Applied Physics (JAP) 111 (2012) 9; 319/2012
- Wahl, R.; Schneider, J.; Gumbsch, P.
Influence of the real geometry of the protrusions in micro textured surfaces on frictional behavior
 Tribology Letters 47 (2012) 447-453; 408/2012
- Wahl, R.; Schneider, J.; Gumbsch, P.
In situ observation of cavitation in crossed microchannels
 Tribology International 55 (2012) 81-86; 309/2012
- Weber, J.K.R.; Vu, M.; Paßlick, C.; Schweizer, S.; Brown, D.E.; Johnson, C.E.; Johnson, J.A.
The oxidation state of europium in halide glasses
 Journal of Physics: Condensed Matter 23/49 (2011) 495024; 184/2011
- Wehrspohn, R.B.; Üpping, J.
3D photonic crystals for photon management in solar cells
 Journal of Optics 14 (2012) 024003; 383/2012
- Wessely, P.J.; Wessely, F.; Birinci, E.; Riedinger, B.; Schwalke, U.
In situ CCVD grown graphene transistors with ultra-high on-off-current ratio in silicon CMOS compatible processing
 Advances in Science and Technology 77 (2013) 258-265; 599/2012
- Wessely, P.J.; Wessely, F.; Birinci, E.; Riedinger, B.; Schwalke, U.
Hysteresis of in situ CCVD grown graphene transistors
 Electrochemical and Solid-State Letters 15 (2012) K31-K34; 284/2012
- Wessely, P.J.; Wessely, F.; Birinci, E.; Schwalke, U.; Riedinger, B.
Transfer-free fabrication of graphene transistors
 Journal of Vacuum Science & Technology B 30 (2012) 2166-2746; 243/2012
- Wessely, P.J.; Wessely, F.; Birinci, E.; Beckmann, K.; Riedinger, B.; Schwalke, U.
Silicon-CMOS compatible in situ CCVD grown graphene transistors with ultra-high on/off-current ratio
 Physica E: Low-dimensional systems and nanostructures 44 (2011) 1132-1135; 240/2012
- Zhao, S.; Gan, Y.; Kamlah, M.; Kennerknecht, T.; Rolli, R.
Influence of plate material on the contact strength of Li₄OSi₄ pebbles in crush tests and evaluation of the contact strength in pebble-pebble contact
 Engineering Fracture Mechanics (2012) online; 280/2012
- Zia, Q.; Tranchida, D.; Androsch, R.; Schönherr, H.
Effect of crystal habit and superstructure on modulus of elasticity of isotactic polypropylene by AFM nanoindentation
 Journal of Materials Science 47 (2012) 3040-3045; 153/2012

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Zeitschriften

- Böhme, W.; Memhard, D.; Brand, M.; Siegele, D.
Versagensverhalten crashrelevanter Aluminium-Schweißverbindungen
Schweißen und Schneiden 63 (2011) 716-722; 116/2012
- Böhme, W.; Reissig, L.
Neue, höchstfeste ADI-Werkstoffe für den Automobilbau
Giesserei 99 (2012) 34-40; 596/2012
- Jahn, I.
Schlagzäh-Modifizierung durch Faserkonzentrate
Fiber News (2012) 9-10; 299/2012
- Lagger, H.; Bierwisch, C.; Peguiron, J.; Moseler, M.
Partikelbasierte Simulation magnetorheologischer Flüssigkeiten für die Anwendung in Kupplungen
NAFEMS Online-Magazin (2012) 1-5; 438/2012
- Metzger, M.; Nieweg, B.; Seifert, T.
Lebensdauervorhersage für die Graugusswerkstoffe EN GJS700, EN GJV450 und EN GJL250 bei kombinierter nieder- und hochfrequenter Belastung
Giesserei 99 (2012) 50-55; 425/2012
- Meyer, S.; Richter, S.; Balski, M.; Hagendorf, C.
Trace element analysis in solar silicon
Photovoltaics International 14 (2011) 34-39; 198/2011
- Rublack T.; Krause, S.; Schweizer, S.; Seifert, G.
Increasing solar-cell efficiency by femtosecond laser microstructuring
SPIE Newsroom (2012) online; 628/2012
- Stuedel, F.; Dyrba, M.; Schweizer, S.
Fluorescent borate glass enhances cadmium telluride solar cells
SPIE Newsroom (2012) online; 288/2012
- Teuscher, N.; Schubert, W.; Heilmann, A.
Optische Schichtdickenmessung von funktionellen Nassbeschichtungen auf Kunststofffolien/Optical thickness measurement of functional wet coatings on polymer films
Coating International 44 (2011) 13-29; 199/2012
- Wehrspohn, R.B.
Rationales Werkstoffdesign als Schlüssel zu mehr Energieeffizienz
Konstruktion 5 (2012) IW 2; 387/2012
- Weps, M.; Zierdt, P.
Ermittlung von Haftfestigkeiten innerhalb eines Polymerverschweißungsbundes
Konstruktion 10 (2011) IW 6-7; 718/2012
- Wüstenhagen, S.
Ökokleid für Stromtankstellen
E-Mobility (2012) 48-50; 721/2012

Bücher, Buchbeiträge

- Altenbach, H.; Dresbach, C.; Petzold, M.
Characterizing the anisotropic hardening behavior of aluminum bonding wires
in Materials with complex behavior II; Öchsner, A.; da Silva, L.F.M.; Altenbach, H. (Eds.); Springer-VDI-Verlag Düsseldorf (2012) 583-598; 297/2012
- Gurr, M.; Mülhaupt, R.
Rapid prototyping
in Polymer Science A: A Comprehensive Reference; Band 8; Matyjaszewski, K.; Möller, M. (Eds.); Elsevier BV, Amsterdam (2012) 77-99; 330/2012
- Hanbücken, M.; Müller, P.; Wehrspohn, R.B.
Mechanical stress on the nanoscale
in Mechanical Stress on the Nanoscale; WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2011) 364; 150/2011
- Hanke, T.; Lucas, J.; Heilmann, A.; Kaufmann, A.
Mechanische Besonderheiten von Membrankissenkonstruktionen
in Innovationen für die Baubranche, Beispiele aus Forschung und Entwicklung; Sedlbauer, K. (Hrsg.); Fraunhofer Verlag (2012) 65-72; 637/2012
- Hoffmann, M.J.; Kungl, H.; Acker, J.; Elsässer, C.; Körbel, S.; Marton, P.; Eichel, R.-A.; Erünal, E.; Jakes P.
Influence of the A/B stoichiometry on defect structure, sintering, and microstructure in undoped and Cu-doped KNN Lead-Free Piezoelectrics; Priya, S.; Nahm, S. (Eds.); Springer Science+Business Media (2012) Part 2, 209-251; 320/2012
- Krause, M.; Petzold, M.; Wehrspohn, R.B.
Determination of elastic strains using electron backscatter diffraction in the scanning electron microscope
in Mechanical Stress on the Nanoscale; Hanbücken, M.; Müller, P.; Wehrspohn, R.B. (Eds.); Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim (2011) 3-26; 205/2011
- Krombholz, A.; Voigt, P.
Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen für tragende Baukonstruktionen
in Innovationen für die Baubranche, Beispiele aus Forschung und Entwicklung; Sedlbauer, K. (Hrsg.); Fraunhofer Verlag (2012) 87-93; 627/2012
- Lucas, J.; Neuber, M.; Heilmann, A.
Anwendung des Laserdurchstrahlverfahrens im konstruktiven Membranbau
in Innovationen für die Baubranche, Beispiele aus Forschung und Entwicklung; Sedlbauer, K. (Hrsg.); Fraunhofer Verlag (2012) 80-86; 636/2012
- Wonisch, A.; Rasp, T.; Kraft, T.; Riedel, H.
Discrete element method sintering simulation: A grain-scale simulation approach
in Engineering Materials 35; Castro, R.; van Benthem, K. (Eds.); Springer-Verlag Heidelberg (2012) 1-18; 757/2012

- Altmann, F.; Schischka, J.; Van Ngo, V.; Stone, S.; Kwakman, L.; Lehmann, R.
A novel method for solar cell characterization combining electron beam induced current imaging (EBIC) and focused ion beam techniques (FIB)
 in Proc. of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC; WIP München (2010) 3694-3696; 251/2010
- Bakowskie, R.; Lantzsch, R.; Kaden, T.; Eller, K.G.; Lausch, D.; Ludwig, Y.; Petter, K.
Comparison of recombination active defects in mc-si by means of photoluminescence imaging and reverse biased electroluminescence
 in Proc. of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC; WIP München (2011) 1839-1842; 122/2011
- Beckmann, C.; Hohe, J.
Analysis of uncertainty effects in sandwich structures with disordered cores – probabilistic analysis of structural response
 in Proc. of 10th International Conference on Sandwich Structures; Casari, P. (Ed.); Université de Nantes, Frankreich (2012) 71-72; 641/2012
- Bercieux, D.; Mayrhofer, L.
Pseudo-spin filter in metallic single-walled carbon nanotubes
 in Proc. of 7th Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems NEMS; IEEE, Washington D.C., USA (2012) 294-297; 608/2012
- Böhme, W.; Reichert, T.
Bestimmung und Bewertung bruchmechanischer Kennwerte bei hohen Rissbelastungsraten für den RDB-Stahl 22NiMoCr37
 in Tagungsband 44. Tagung DVM-Arbeitskreis Bruchvorgänge »Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethoden und Anwendungen«; Klingbeil, D. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung Berlin (2012) 245-254; 190/2012
- Boettcher, T.; Rother, M.; Liedtke, S.; Ullrich, M.; Bollmann, M.; Pinkernelle, A.; Gruber, D.; Funke, H.-J.; Kaiser, M.; Lee, K.; Li, M.; Leung, K.; Li, T.; Farrugia, M.-L.; O'Halloran, O.; Petzold, M.; März, B.; Klengel, R.
Intermetallic Corrosion of Cu-Al wire bonds
 in Proc. of 12th Electronics Packaging Technology Conference – Singapore EPTC, Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE Washington D.C., USA (2010) 585-590; 221/2010
- Boettge, B.; Schippel, F.; Naumann, F.; Berthold, L.; Lorenz, G.; Gerbach, R.; Bagdahn, J.; Petzold, M.
Failure mechanisms and mechanical characterization of reactive bonded interfaces
 in Proc. of Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-state Science PRiME; The Electrochemical Society Pennington, NJ, USA (2012) 215-225; 750/2012
- Boettge, B.; Klengel, S.; Schischka, J.; Lorenz, G.; Knoll, H.
Microstructural and mechanical characterization of ceramic substrates with different metallization for power applications
 in Proc. of 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems CIPS; VDE Verlag Berlin, Offenbach (2012) 291-296; 693/2012
- Butz, A.; Helm, D.; Meier, R.
Microstructural analysis and process chain simulation of copper-ribbons for solar cell interconnections
 in Proc. of 8th European Solid Mechanics Conference ESMC; European Mechanics Society Udine, Italien (2012); 233/2012
- Clement, C.; Seiffe, J.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.; Naumann, V.; Werner, M.
Interface characterization of dry-etched emitters
 in Proc. of the European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; WIP München (2011) 5 (1353-1357); 228/2012
- Dold, C.; Amann, T.; Kailer, A.
Influence of structural variations on imidazolium based ionic liquids
 in Proc. of 18th International Colloquium Tribology, Industrial and Automotive Lubrication, Solving Friction and Wear Problems; Bartz, W.J. (Ed.); Technische Akademie Esslingen (2012) 172; 133/2012
- Dragoi, V.; Czurratis, P.; Brand, S.; Beyersdorfer, J.; Patzig, C.; Krugers, J.; Schrank, F.; Siebert, J.; Petzold, M.
Low temperature fusion wafer bonding quality investigation for failure mode analysis
 in Proc. of Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-state Science PRiME 2012; The Electrochemical Society Pennington, NJ, USA (2012) 227-239; 756/2012
- Dyrba, M.; Wiegand, M.-C.; Ahrens, B.; Schweizer, S.
Neodymium-doped barium borate glasses as fluorescent concentrators for the infrared spectral range
 in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE Vol. 8438; Wehrspohn, R.B.; Gombert, A. (Eds.); SPIE, Bellingham, WA, USA (2012) Art. 84380Z; 220/2012
- Fahr, S.; Rockstuhl, C.; Lederer, F.; Kroll, M.; Pertsch, T.; Beckers, T.; Carius, R.; Rau, U.; Steidl, L.; Zentel, R.; Üpping, J.; Wehrspohn, R.B.
Photonic crystal intermediate reflector in micromorph tandem solar cells
 in Proc. of Lasers and Electro-Optics CLEO; The Optical Society OSA, Washington D.C., USA (2011) CMT1; 137/2011
- Fiedler, J.; Busch, M.; Scheler, T.
Einfluss der Rezeptur auf die Eigenschaften von Celluloseregenerat-fasern verstärktem Polypropylen
 in Tagungsband Technomer 2011, 22. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren; Gehde, M.; Wagenknecht, U.; Bloß, P. (Hrsg.); Institut für Print- und Medientechnik (2011) CD; 186/2012
- Fliegner, S.
Microstructure-based modeling of the creep behavior of long-fiber-reinforced thermoplastics
 in Proc. of 15th European Conference on Composite Materials ECCM; European Society for Composite Materials, Budapest, Ungarn (2012); 434/2012
- Füchsel, K.; Kroll, M.; Käsebier, T.; Otto, M.; Pertsch, T.; Kley, E.B.; Wehrspohn, R.B.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.
Black silicon photovoltaics
 in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE, Photonics for Solar Energy Systems IV; Wehrspohn, R.B.; Gombert, A. (Eds.); SPIE, Bellingham, WA, USA (2012); 393/2012
- Gall, M.; Thielicke, B.
Fatigue lifetime study of piezoceramic patch transducers
 in Proc. of 8th European Solid Mechanics Conference ESMC, European Mechanics Society; Technische Universität Graz, Schweiz (2012); 396/2012
- Graff, A.; Salzer, R.; Altmann, F.; Gemming, T.
Optimal TEM sample geometry after Gallium FIB preparation for post-polishing by focused Argon ions
 in Proc. of Microscopy Conference MC; German Society for Electron Microscopy Kiel (2011) iM7.P206; 174/2011
- Großer, S.; Lausch, D.; Werner, M.; Swatek, S.; Mergner, M.; Naumann, V.; Hagendorf, C.
Shunt analysis in solar cells – electro-optical classification and high resolution defect diagnostics
 in Proc. of 2nd International Conference on crystalline silicon photovoltaics SiliconPV; editors committee SiliconPV; Elsevier München, Berlin (2012) 7-12; 650/2012
- Gumbsch, P.; Sandfeld, S.; Senger, J.; Weygand, D.; Hochrainer, T.;
Continuum modeling of dislocation plasticity: theory, numerical implementation and comparison to discrete dislocation simulations
 in Proc. of 3rd International Conference on Heterogeneous Material Mechanics ICHMM, Advances in Heterogeneous Material Mechanics; Fan, J.; Zhang, J.; Chen, H.; Jin, Z. (Eds.); DEStech Publications Inc., Lancaster, PA, USA (2011) 7-15; 85/2011
- Helm, D.; Baiker, M.; Bienger, P.
Multiscale representation of the microstructure evolution and the mechanical properties of steel grade DC04 during the production process
 in Proc. of 8th European Solid Mechanics Conference ESMC; European Mechanics Society; Technische Universität Graz, Schweiz (2012) 395/2012

- Jaeger, R.; Bierwisch, C.; Ziegler, T.; Courseau, J.; Ebel, D.
Additive manufacturing of an artificial blood vessel system: optimum layout and fluid-mechanical characterization
 in Proc. of World Conference on Regenerative Medizin; Fraunhofer IZI, Leipzig (2011) CD-ROM; 191/2012
- John, M.; Teich, B.; Schäuble, R.
Monitoring CFRP/PMI foam core sandwich structures-observing thermal and hygroscopic strains
 in Proc. of abstracts 10th International Conference on Sandwich Structures ICSS; Casari, P. (Ed.); Université de Nantes, Frankreich (2012) 99; 526/2012
- Klengel, S.; Böttge, B.; Petzold, M.; Schneider, W.
High resolution microstructural investigation of leadfree aluminum-germanium and aluminium-germanium-copper alloys for high temperature silicon die attach
 in Proc. of 18th European Microelectronics & Packaging Conference; IMAPS-Europe, Hamsphire, UK (2011) USB-Stick; 108/2011
- Klengel, S.; Krause, M.; Berthold, L.; Petzold, M.; Förster, J.; Presse, K.; Meyer, T.
High resolution analyzes of resistance behavior in eWLB metal contacts
 in Proc. of 44th International Symposium on Microelectronics IMAPS; IMAPS Washington D.C., USA (2011) 241-248; 164/2011
- Krause, S.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.; Seifert, G.
Structuring of transparent conductive oxide (TCO) films on glass by femtosecond laser pulses
 in Proc. of 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; WIP München (2012) 464-466; 740/2012
- Krause, S.; Steudel, F.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.
Laser structuring of solar glasses for light management
 in Proc. of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC; WIP München (2011) 358-360; 159/2011
- Kroll, M.; Otto, M.; Kasebier, T.; Fuchsel, K.; Wehrspohn, R.B.; Kley, E.B.; Tünnermann, A.; Pertsch, T.
Black silicon for solar cell applications
 in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE, Photonics for Solar Energy Systems IV, 8438; Wehrspohn, R.B.; Gombert, A. (Eds.); SPIE, Bellingham, WA, USA (2012); 392/2012
- Lagger, H.; Bierwisch, C.; Peguiron, J.; Moseler, M.
Partikelbasierte Simulation magnetorheologischer Flüssigkeiten für die Anwendung in Kupplungen
 in Tagungsband National Agency for Finite Element Methods and Standards NAFEMS; Berechnung und Simulation – Anwendungen, Entwicklungen, Trends; NAFEMS Rosenheim (2012) 1-5; 168/2012
- Lauer, K.; Walter, S.; Sidelnicov, A.; Herms, M.; Diez, S.; Ludwig, Y.; Turek, M.; Reibenweber, S.
Round-robin ov excess charge carrier lifetime and decay time measurements on silicon blocks and adjacent surface passivated wafers
 in Proc. of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC; WIP München (2011) 1492-1496; 195/2011
- Lausch, D.; Werner, M.; Breitenstein, O.; Swatek, S.; Schneider, J.; Hagendorf, C.
Non-destructive p-n junction testing on thin film solar cells
 in Proc. of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC; WIP München (2011) 2784-2787; 119/2011
- Lich, J.; Eckstein, M.; Turek, M.
Equivalence of carrier decay time (μ PCD) and photoluminescence measurements on Si-blocks
 in Proc. of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC; WIP München (2011) 1843-1846; 194/2011
- Lich, J.; Turek, M.
Correlation between different carrier-lifetime measurement methods for Si-blocks
 in Proc. of 1st International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics; Glunz, S.; Aberle, A.; Brendel, R. (Eds.); Energy Procedia Elsevier München, Berlin (2011) 58-63; 87/2011
- Lu, H.; Amann, T.; Kailer, A.
Electric potentials effects on friction between silicon carbide surfaces in aqueous solutions
 in Tagungsband 53. Tribologie-Fachtagung; Gesellschaft für Tribologie GfT Aachen (2012) 11-1-11-8; 745/2012
- Meißner, D.; Meyer, S.; Anspach, O.
Enrichment of metal ions in virgin Si-surfaces
 in Proc. of 2nd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics SiliconPV; Editors committee SiliconPV (Eds.); Energy Procedia Elsevier München, Berlin (2012) 27-32; 643/2012
- Miclea, P.-T.; Steudel, F.; Schweizer, S.
Laser structuring of solar glasses for light management
 in Photovoltaic Specialists Conference PVSC; Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE Piscataway, NJ, USA (2011) 904-906; 286/2012
- Moutanabbir, O.; Hähnel, A.; Reiche, M.; Erfurth, W.; Tarun, A.; Hayazawa, N.; Kawata, S.; Naumann, F.; Petzold, M.
Strain nano-engineering: SSOI as a playground
 in Proc. of 219th Electrochemical Society ECS Meeting; Omura, Y.; Gamiz, F.; Ishii, H.; Martino, J.; Nguyen, B.; Raskin, J.; Selberherr, S. (Eds.); ECS Transactions, Pennington, NJ, USA (2011) 43-50; 168/2011
- Naumann, F.; Bernasch, M.; Brand, S.; Wünsch, D.; Vogel, K.; Czurratis, P.; Petzold, M.
A study of factors influencing micro-chevron-testing of glass frit bonded interfaces
 in Proc. of Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-state Science PRIME; The Electrochemical Society Pennington, NJ, USA (2012) 207-214; 751/2012
- Naumann, V.; Otto, M.; Wehrspohn, R.B.; Werner, M.; Hagendorf, C.
Interface and material characterization of thin ALD-Al₂O₃ layers on crystalline silicon
 in Proc. of 2nd International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics SiliconPV, Volume 27; Poortmans, J.; Glunz, S.; Aberle, A.; Brendel, R.; Cuevas, A.; Hahn, G.; Sinton, R.; Weeber, A. (Eds.); Energy Procedia Elsevier München, Berlin (2012) 312-318; 539/2012
- Nutto, C.; Bierwisch, C.; Lagger H.; Moseler M.
Towards simulations of abrasive flow machining
 in Proc. of 7th International Smoothed Particle Hydrodynamics European Research Interest Community SPHERIC Workshop; University of Manchester, UK (2012) 29-31; 202/2012
- Ockewitz, A.; Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Müller, S.
Development of a numerical method for simulation of aluminum extrusion processes with modeling of microstructure
 in Proc. of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar and Exposition ET; ET Foundation (2012) TH023; 361/2012
- Paul, H.
Evaluation of the joining mechanisms of polymer metal components
 in Proc. of 15th European Conference on Composite Materials ECCM15; European Society for Composite Materials (2012) 433/2012
- Paul, H.; Fleckenstein, J.; Büter, A.; Luke, M.
Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) auch im Hinblick auf den Einsatz in Materialverbänden
 in Tagungsband Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung DVM 679 – Multimaterialsysteme; DVM Berlin (2012) 121-132; 694/2012
- Perlt, S.; Höche, T.; Dadda, J.; Müller, E.; Bauer, P.; Hermann, R.; Brydson, R.
Correlation between microstructure and thermoelectric properties in AgPb₁₈SbTe₂₀ (LAST-18)
 in Proc. of 9th European Conference on Thermoelectrics ECT, Vol. 1449, Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE; Micro Digital Publishing St. Louis, MO, USA (2011) 171-174; 112/2011
- Pfau, C.; Skrzypczak, U.; Miclea, M.; Bohley, C.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.
Low phonon energy BaCl₂ nanocrystals in Nd³⁺-doped fluoro-zirconate glasses and their influence on the photoluminescence properties
 in Proc. of Materials Research Society Symposium, Vol. 1404; Cambridge University Press, UK (2012) 6 / mrsf11-1404-w02-10; 273/2012

- Posdziech, J.; Wiegand, M.-C.; Dyrba, M.; Schweizer, S.; Hermle, M.; Goldschmidt, J.C.
Characterization of infrared-active fluorescent concentrators
 in Proc. of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC; WIP München (2011) 353-357; 148/2011
- Rublack, T.; Hartnauer, S.; Mergner, M.; Muchow, M.; Schade, M.; Leipner, H.S.; Seifert, G.
Mechanism of selective removal of transparent layers on semiconductors using ultrashort laser pulses
 in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE, Vol. 8247; Heisterkamp, A.; Meunier, M.; Nolte, S. (Eds.); SPIE, Bellingham, WA, USA (2012) 82470Z 1-10 /82470Z; 360/2012
- Schlangen, R.; Motegi, S.; Nagatomo, T.; Schmidt, C.; Altmann, F.; Murakami, H.; Hollingshead, S.;
Use of lock-in thermography for non-destructive 3D defect localization on system in package and stacked-die technology
 in Proc. of 37th International Symposium for Testing and Failure Analysis ISTFA; Materials Information Society ASM International Materials Park, OH, USA (2011) 68-73; 761/2012
- Schlimper, R.; John, M.; Rinker, M.; Schäuble, R.
Influence of mesoscopic foam structure on face sheet debonding in CFRP foam core sandwich panels
 in Proc. of 15th European Conference on Composite Materials ECCM; Quaresimin, M. (Ed.); Universität Padua, Italien (2012) 1-8; 359/2012
- Schmidt, C.; Altmann, F.
Quantitative phase shift analysis for 3D defect localization using lock-in-thermography
 in Proc. of 37th International Symposium for Testing and Failure Analysis, ISTFA; Materials Information Society ASM International Materials Park, OH, USA (2011) 74-80; 731/2012
- Schoenfelder, S.; Breitenstein, O.; Rissland, S.; De Donno, R.; Bagdahn, J.
Glue-cleave: kerfless wafering for silicon wafers with metal on glueing and removable interface
 in Proc. of 22nd Workshop on crystalline silicon cells & modules: material and processes; Sopori, B.; Sinton, R. (Eds.); Vail, CO, USA (2012) 208-214; 652/2012
- Schwiehner, M.; Scholz, A.; Berger, Ch.; Feuillet, C.; Klein, Th.; von Hartrott, Ph.; Schlesinger, M.; Kern, T.-U.
Rechnerische Beschreibung der Verformung und Schädigung von Werkstoffen für Hochtemperatur-Dampfturbinen bis 720 °C
 in Tagungsband 34. VDEh-Vortragsveranstaltung «Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe»; Stahlinstitut VDEh Düsseldorf (2011) 83-98; 467/2012
- Siegele, D.; Baumgartner, J.; Varfolomeev, I.; Moroz, S.; Brand, M.; Bruder, T.
Zum Einfluss von Eigenspannungen bei der Lebensdauerbewertung von Schweißverbindungen
 in Tagungsband 39. Tagung des Deutscher Verband für Materialforschung und prüfung DVM Arbeitskreises Betriebsfestigkeit «Werkstoffe und Fügeverfahren – Neue Herausforderungen für die Betriebsfestigkeit»; Brune, M. (Hrsg.); DVM Berlin (2012) 323-338; 704/2012
- Siegele, D.; Fingerhuth, J.; Mrovec, M.; Schuler, X.; Utz, S.; Fischaleck, M.; Scholz, A.; Oechsner, M.; Vormwald, M.; Bauerbach, K.; Schlitzer, T.; Rudolph, J.; Willuweit, A.
Thermal fatigue materials modeling
 in Proc. of 38th Staatliche Materialprüfungsanstalt MPA Seminar; MPA Stuttgart (2012) 106-144; 677/2012
- Siegert, J.; Cassidy, C.; Schrank, F.; Gerbach, R.; Naumann, F.; Petzold, M.
Quality control of bond strength in low-temperature bonded wafers
 in Proc. of Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-state Science PRIME; The Electrochemical Society Pennington, NJ, USA (2012) 253-262; 755/2012
- Sommer, S.; Burget, S.; Bier, M.
Recent developments in joint modeling for crash simulations
 in Proc. of 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS; Eberhardsteiner, J.; Böhm, H.J.; Rammerstorfer, F.G. (Eds.); Technische Universität Wien, Österreich (2012) CD-ROM; 661/2012
- Steier, V.; Koplín, C.; Kailer, A.; Reinecke, H.
Pressure assisted manufacturing of a novel polymer infiltrated ceramic with interpenetrating matrices
 in Proc. of Brazilian Conference on Composite Materials; Cimini Jr, C.A.; Melo, J.D.D. (Eds.); Magnetic media (2012) USB-Stick; 706/2012
- Stuedel, F.; Miclea, P.-T.; Teuscher, N.; Heilmann, A.; Schweizer, S.
Optical characterization of ITO films on borate glasses for high efficiency solar cells
 in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE, Vol. 8438; Wehrspohn, R.B. (Ed.); SPIE, Bellingham, WA, USA (2012) 7 / 843819; 218/2012
- Stuedel, F.; Dyrba, M.; Schweizer, S.
Fluorescent borate glass superstrates for high efficiency CdTe solar cells
 in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE, Vol. 8438; Wehrspohn, R.B.; Gombert, A. (Eds.); SPIE, Bellingham, WA, USA (2012) 7 / 843803; 219/2012
- Stuedel, F.; Miclea, P.-T.; Teuscher, N.; Heilmann, A.; Schweizer, S.
Optical characterization of ITO films on fluorescent borate glasses for high efficiency solar cells
 in Proc. of 37th Photovoltaic Specialists Conference PVSC, Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE; IEEE Piscataway, NJ, USA (2011) 277-280; 287/2012
- Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Qiao, L.; Böhme, W.
Modeling of crash behavior of thermoplastics
 in Proc. of 37th Photovoltaic Specialists Conference PVSC Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE; IEEE, Piscataway, NJ, USA (2011) CD-ROM; 179/2012
- Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Qiao, L.
Modeling of strain-rate and temperature dependence of deformation behavior of thermoplastics
 in Proc. of International Symposium on Plasticity; Khan, A. (Ed); Elsevier München, Berlin (2012) CD-ROM; 174/2012
- Sun, D.-Z.; Kailer, A.; Andrieux, F.; Ockewitz, A.
Determination of friction behavior in extrusion processes with a new experimental method
 in Proc. of 10th International Aluminum Extrusion Technology Seminar and Exposition ET; ET Foundation Wanconda, IL, USA (2012) TH015; 358/2012
- Syha, M.; Bäurer, M.; Hoffmann, M.; Lauridsen, E.; Ludwig, W.; Weygand, D.; Gumbsch, P.;
Comparing grain growth experiments and simulations in 3D
 in Proc. of 31st Risoe International Symposium on Materials Science, Vol. 31; Hansen, N.; Juul Jensen, D.; Nielsen, S.F.; Poulsen, H.F.; Ralph, B. (Eds.); (2010) 437-442; 37/2011
- Unterhofer, K.; Preu, H.; Walter, J.; Lorenz, G.; Mack, W.; Petzold, M.
Material characterization to model linear viscoelastic behavior of thin organic polymer films in microelectronics
 in Proc. of 13th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems EuroSimE; Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE Piscataway, NJ, USA (2012) 1-8; 346/2012
- Varfolomeev, I.; Burdack, M.; Moroz, S.; Siegele, D.; Kadau, K.
Experimental and numerical study on mixed mode I/II fatigue crack growth in planar specimens
 in Proc. of 4th International Conference on Crack Paths CP; Carpinteri, A. (Ed.); Università degli Studi di Parma, Italien (2012) 823-830; 701/2012
- Wehrspohn, R.B.; Gesemann, B.; Pergande, D.; Geppert T.M.; Schweizer, S.L.; Moreton, S.; Lambrecht, A.
Periodic silicon nanostructures for spectroscopic microsensors
 in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE; SPIE, Bellingham, WA, USA (2011) 8095; 138/2011

IMPRESSUM

Redaktion

Katharina Hien
Jasmine Ait-Djoudi
Thomas Götz

Gestaltung und Produktion

Erika Hellstab
Marianne Förderer

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut
für Werkstoffmechanik IWM
Öffentlichkeitsarbeit
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg
Telefon +49 761 5142-153
Fax +49 761 5142-510

info@iwf.fraunhofer.de
www.iwf.fraunhofer.de

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

Bildquellen

Titelseite: © Achim Käflein, Freiburg
Seiten 3, 19, 27, 35, 43, 51, 59, 65, 73:
© Alexandra Jung, Emmendingen
Seiten 6, 8, 10: © Jürgen Jeibmann Photo-
graphik, Leipzig, Torsten Proß
Seite 21 links: © Fine Ceramics Technologie FCT
Seite 25 links: © Felizitas Gemetz, Freiburg
Seite 25 rechts: © Natalie Richter
Seite 48 rechts oben: © Robert Klengel
Seite 49: © M. Breik (KIT), © S. Burger (KIT)
Seite 83: © Egbert Schmidt, Halle

Alle übrigen Abbildungen:
© Fraunhofer IWM