



Fraunhofer

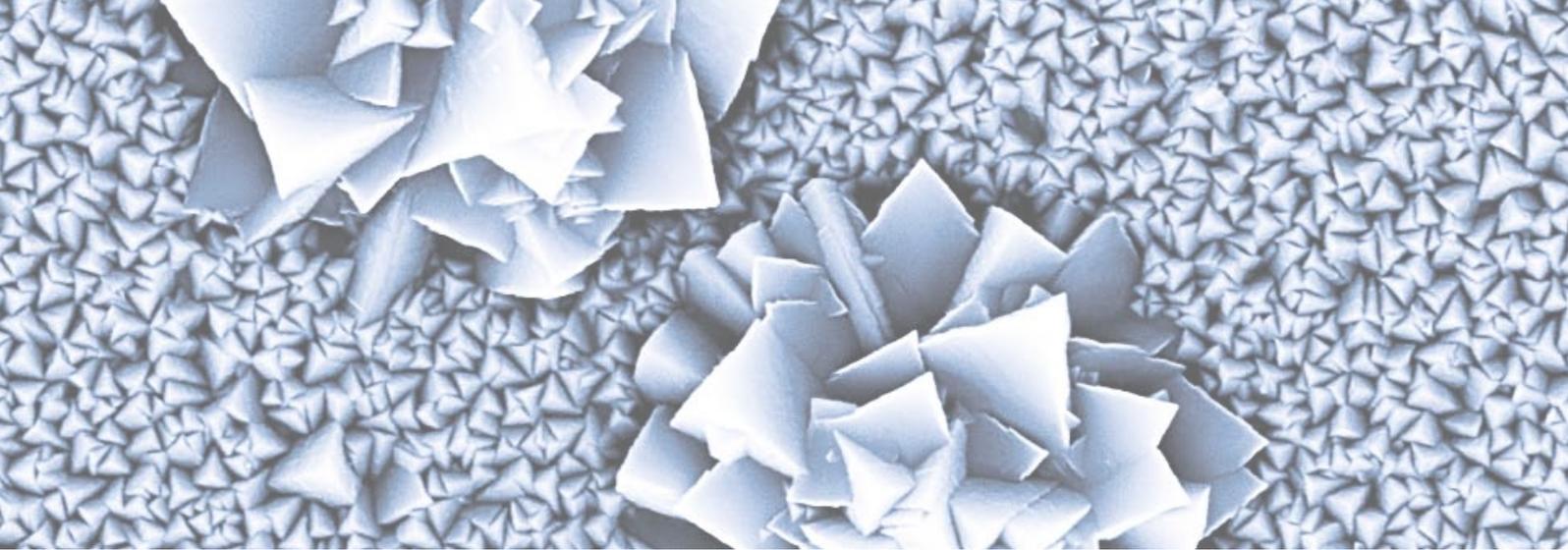
IWM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM



JAHRESBERICHT

2011



Elektronenmikroskopische Charakterisierung von Nukleations- und Wachstumsphänomenen am Beispiel strukturierter Hartstoffschichten für die Formgebung.

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 18 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, bearbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 1,66 Milliarden Euro. Davon fallen 1,40 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.

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.

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 2011

**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@iw.fraunhofer.de
www.iw.fraunhofer.de



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

Sehr geehrte Geschäftspartnerinnen, sehr geehrte Geschäftspartner,

Denken ist nach Henry Ford »die schwerste Arbeit, die es gibt« – aber auch die ertragreichste. Wir wollen Sie mit unserem Jahresrückblick zum Nach- und Vorausdenken einladen. Dank Ihrer herausfordernden Fragestellungen konnten wir den vorliegenden Jahresbericht des Fraunhofer IWM wieder mit vielfältigen Ergebnissen füllen.

In vielen Projekten konnten wir mit nachhaltigen Beiträgen zur Zuverlässigkeit sowie zur Material- und Energieeffizienz den Nutzen der Werkstoffmechanik unter Beweis stellen. So haben wir beispielsweise mit der Aufklärung von kritischen Alterungsdefekten in LEDs die Voraussetzungen für höhere Lebensdauer geschaffen. Mit neu entwickelten flüssigkristallinen Schmierstoffen konnten wir aufzeigen, wie die Reibung in Maschinen- und Anlagentechnik-Gleitlagern stark verringert werden kann. Wir haben Lösungen erarbeitet, die die Energieeffizienz in Spritzgießprozessen durch eine konturnahe Temperierung von Formeinsätzen über dünne Schichten wesentlich verbessern.

Und was wäre ein Jahr ohne Feiern: Es freut uns sehr, dass wir zum Jahreswechsel in Freiburg mit dem Bezug des Erweiterungsgebäudes beginnen konnten. Gleichzeitig starten die Planungen für den nächsten Bauabschnitt. Zudem wurde in Schkopau im September 2011 das Modultechnologiezentrum des Fraunhofer CSP eingeweiht und in Betrieb genommen. Im Februar 2011 haben wir im Konzerthaus Freiburg den 65. Geburtstag unseres langjährigen Institutsteilleiters und Geschäftsfeldleiters Dr. Thomas Hollstein gefeiert, der nach

35 Jahren gestaltendem und prägendem Engagement für das Fraunhofer IWM in den Ruhestand ging. Wir sind froh, mit Dr. Rainer Kübler einen engagierten jungen Nachfolger für die Leitung des Institutsteils in Freiburg gefunden zu haben.

Denkanstöße haben wir uns aus eigenem Antrieb in einem Strategieaudit im September 2011 geholt. Nach 2003 und 2006 haben wir die Strategie des Fraunhofer IWM und seiner Geschäftsfelder zum dritten Mal von Experten aus der Industrie begutachten lassen. Wertvolle Anregungen helfen uns, das Institut noch zielgerichteter und marktorientierter weiterzuentwickeln.

Vorausdenken – gemeinsam mit Ihnen, unseren Geschäftspartnern und zu Ihrem Nutzen – ist zentrales Element unseres Selbstverständnisses. Diesem Motto verschreiben wir uns auch 2012 – sowohl in der Analytik und Aufklärung von Mechanismen in Werkstoffen als auch in der Erarbeitung konkreter Lösungen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit technischer Systeme.

Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn

Prof. Dr. Peter Gumbsch



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

Institutsprofil

Das Institut im Profil	6
Fraunhofer IWM: Das Effizienzinstitut	8
Das Institut in Zahlen	10
Kuratorium und Werkstoffmechanikpreis 2011	11
Neuerungen	12
20 Jahre Fraunhofer IWM in Sachsen-Anhalt	13
Organisation und Ansprechpartner	14

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Tribologie	16
»Triboman«: Reduktion von Reibung und Verschleiß in Motoren	18
SiC: Elektrische Potenziale beeinflussen Reibung und Verschleiß	20
Modellierung der Oberflächenstruktur amorpher Kohlenstoffschichten	21
Auslegung künstlicher Adersysteme: ein biomimetischer Ansatz	22
Fertigungstechnologie	24
Simulationsgestütztes Design von mikrofluidischen Systemen	26
Prozessentwicklungen für neue energiesparende Verglasungen	28

Schnelles Heißprägen: Innovative Technologie für höhere Fahrsicherheit	29
Hochdynamische Temperierung in der Kunststoffverarbeitung	30
Warum sind Keramiken nicht nur spröde?	31
Bauteilsicherheit	32
Crashsicherheit von Aluminium-Schweißverbindungen	34
Crashsicherheit von Elektrofahrzeug-Komponenten	36
Lebensdauervorhersage bei kombinierter nieder- und hochfrequenter Belastung	37
Prozess- und Werkstoffbewertung	38
Bewertung der Kaltrissicherheit beim Schweißen ...	40
Warmumformung von Titanlegierungen	42
Bewertung des Gefüges von Blechwerkstoffen beim Walzen	44
Hybridverbunde: Krafteinleitung in faserverstärkte Thermoplaste	45
Polymeranwendungen	46
Schadenstoleranz von CFK-Schaum-Sandwichstrukturen	48
Strukturen aus nachwachsenden Rohstoffen für das Bauwesen	50
Mikrophasenseparierte Copolymere: neues Materialkonzept	51

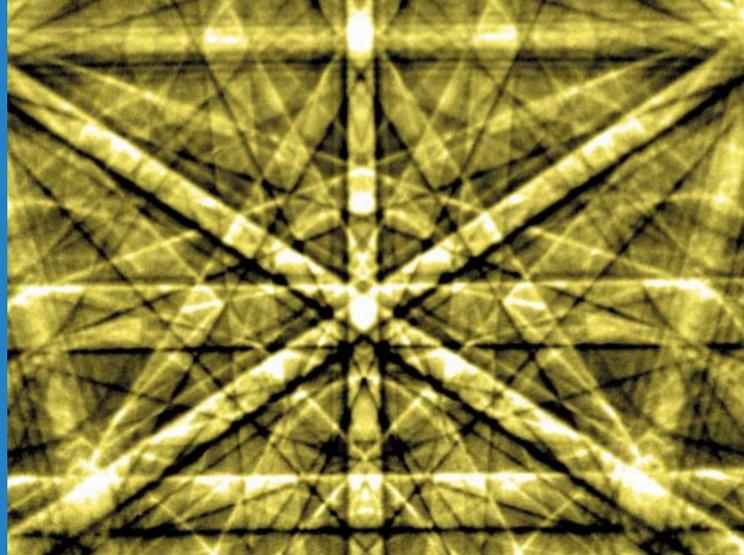
Optimierung des Eigenschaftsprofils von Polyamid-Compounds	52
Biologische und makromolekulare Materialien	54
Neue Lacksysteme für das elektrochemische Antifouling	56
Minimal-abrasive Effekte auf der Zahnoberfläche ...	57
Inline-Diagnosik von Nassbeschichtungen	58
Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik	60
Werkstoffanalytik an Embedded Wafer Level Ball Grid Arrays	62
Zerstörungsfreie Bewertung wafergebundeter Mikrosysteme	64
Alterungsbedingte Strukturdefekte in organischen Leuchtdioden	65
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP	66
Rekombinationsaktive Kristalldefekte in multikristallinen Solarzellen	68
Verarbeitung und Zuverlässigkeit polymerer Verkapselungen	69
Zuverlässigkeit von Metal-Wrap-Through(MWT)-Solarzellen	70
Laserstrukturierte Deckgläser: Lichtmanagement in Solarmodulen	71

■ Vernetzung des Fraunhofer IWM

Forschungsk Kooperationen mit Fraunhofer-Instituten	72
Gemeinschaftsforschung in der Fraunhofer-Gesellschaft	74
Innovationscluster und Max-Planck-Gesellschaft	76

Anhang

Geräteausstattung	77
Personen, Ausbildung, Ereignisse	80
Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften	82
Sonstige Veröffentlichungen	85
Veröffentlichte Konferenzbeiträge	86
Impressum	89



*Kristallographische Analyse von Kristallstrukturen zur Verzerrungsmessung:
Electron backscatter diffraction.*

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.

Das Fraunhofer IWM nutzt die neuesten Erkenntnisse aus Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, um die Leistungsgrenzen von Werkstoffen und Bauteilen zu erweitern und um Fertigungsprozesse zu verbessern. Fundiertes werkstoffmechanisches Know-how ist der Schlüssel zu innovativen Funktionalitäten und zu beschleunigten Entwicklungsprozessen. Durch die breite Aufstellung des Fraunhofer IWM mit 500 engagierten und fachlich weit diversifizierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern lassen sich für jede Fragestellung individuelle Projektteams zusammenstellen. Mit der in weiten Bereichen modernsten am Markt verfügbaren Geräteausstattung sind oft unerwartete Einblicke in das Verhalten von Werkstoffen und Bauteilen und damit auch innovative Lösungsansätze möglich. Mehr als 500 Forschungs- und Entwicklungsprojekte jährlich und ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem zeugen von einer an die Rahmenbedingungen der Industrie angepassten zuverlässigen Projektbearbeitung. Die durch Umfragen ermittelte hohe Kundenzufriedenheit zeigt, dass das Fraunhofer IWM einen sehr guten Ruf genießt.

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

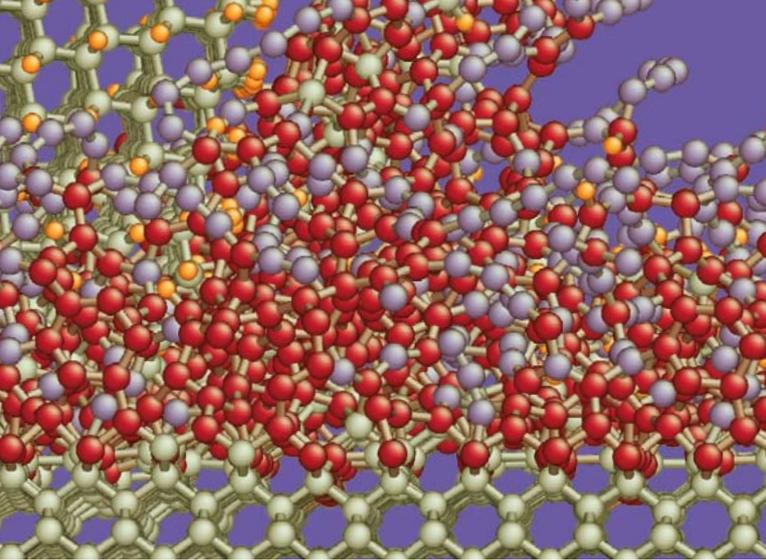
Zur Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung untersuchen wir die Reaktion von Werkstoffen und Bauteilen auf mechanische, thermomechanische und elektromechanische Belastungen und klären Verformungs- und Versagensmechanismen auf. Wir ermitteln die Grenzen der Beanspruchbarkeit von Werkstoffen und Bauteilen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

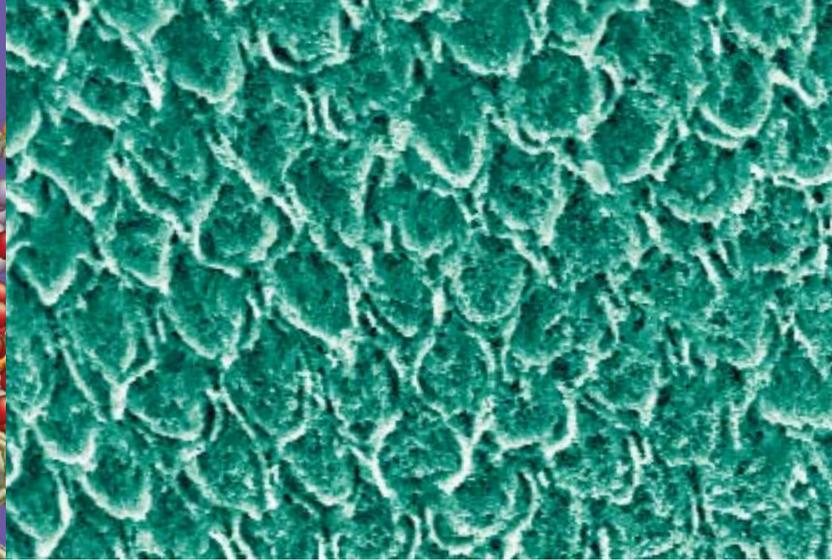
Ansprechpartner:

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

Andreas Krombholz
andreas.krombholz@iwf.fraunhofer.de



Abtrag beim Diamant polieren: Amorphisierung gefolgt von abrasivem Verschleiß.



Erodierte Zahnschmelzoberfläche nach 1-minütiger Säureexposition.

Kernkompetenz

Werkstoffmodellierung und Simulation

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

Werkstoffmodellierung und Simulation helfen, Belastungsszenarien und Prozesse für reale und noch zu entwickelnde Werkstoffe und Bauteile im Rechner abzubilden. Damit können Werkstoffe und Bauteile wirtschaftlich entwickelt und Prozesse verbessert werden. Wir beschreiben das Verformungs-, Schädigungs- und Bruchverhalten von Werkstoffen unter verschiedenen Belastungen und sagen das Einsatzverhalten voraus. Die Bauteilsimulation liefert Aussagen zu 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. Wir koppeln und kombinieren dabei unterschiedliche Simulationsmethoden. Aufwändige numerische Simulationen finden quasi im »Virtuellen Labor« statt, um das Verhalten von Werkstoffen bei gegebener Mikrostruktur und bekannten Eigenschaften der enthaltenen Komponenten zu berechnen. Mit weiteren Simulationen, sozusagen im »Virtuellen Mikroskop«, sind wir in der Lage, Eigenschaften von Werkstoffen auf der Basis von physikalischen Modellen vorherzusagen.

Ansprechpartner:

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

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

Kernkompetenz

Grenzflächen- und Oberflächentechnologie

- Beschichtung und morphologische Oberflächen-gestaltung
- Physikalische und chemische Oberflächenanalytik
- Tribometrie und Oberflächenfunktionalisierung

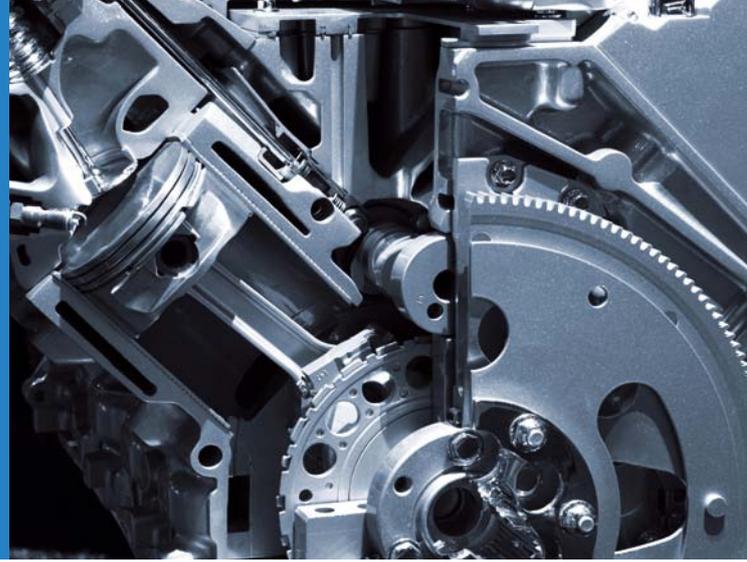
Wir entwickeln moderne Beschichtungstechnologien und Oberflächenmodifizierungsverfahren. Wir bewerten die funktionalen Oberflächeneigenschaften von Materialien und Komponenten wie Benetzung, Adhäsion und Biokompatibilität. Wir zeigen Verbesserungspotenziale auf, beispielsweise bei der chemischen und 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



Tribologische Lösungen helfen die Reibleistung in Antrieben zu reduzieren.

Werkstoffmechanik als Schlüssel zu Energie- und Materialeffizienz

Der weltweite Energiebedarf steigt stetig. Gleichzeitig sehen ambitionierte Klimaschutzpolitische Ziele eine erhebliche Reduzierung von Treibhausgasemissionen vor. Durch die Energiewende in Deutschland bekommen regenerative Energieerzeugungsformen einen enormen Auftrieb. Gefragt sind neue Lösungen bei der Erzeugung, Umwandlung und Speicherung von Energie.

Die vielzitierte Effizienzrevolution lässt sich allerdings nur mit vielen kleinen Schritten herbeiführen. Und die sind nicht allein in der Energietechnik zu finden: Effizienzgewinne durch intelligente Werkstofflösungen sind in allen Industriesektoren möglich. Werkstoffe und Werkstofftechnologien spielen hierbei eine zentrale Rolle. Man denke an Leichtbau, reibarme Antriebe oder temperaturintensive Fertigungsprozesse. Werkstoffmechanik ist eine Schlüsseldisziplin auf dem Weg zu mehr Energie- und Materialeffizienz.

Unternehmen müssen sich vor diesem Hintergrund besonderen Herausforderungen bei der Entwicklung, der Fertigung und dem Einsatz von Werkstoffen und Bauteilen stellen, um ihre Wettbewerbsposition zu erhalten und zu verbessern.

Energieeffizienter Bauteileinsatz erfordert, Werkstoffe und Bauteile bei maximaler Zuverlässigkeit und Sicherheit nahe ihrer Belastungsgrenzen einzusetzen.

Fraunhofer IWM-Beiträge für effizienten Werkstoff- und Bauteileinsatz

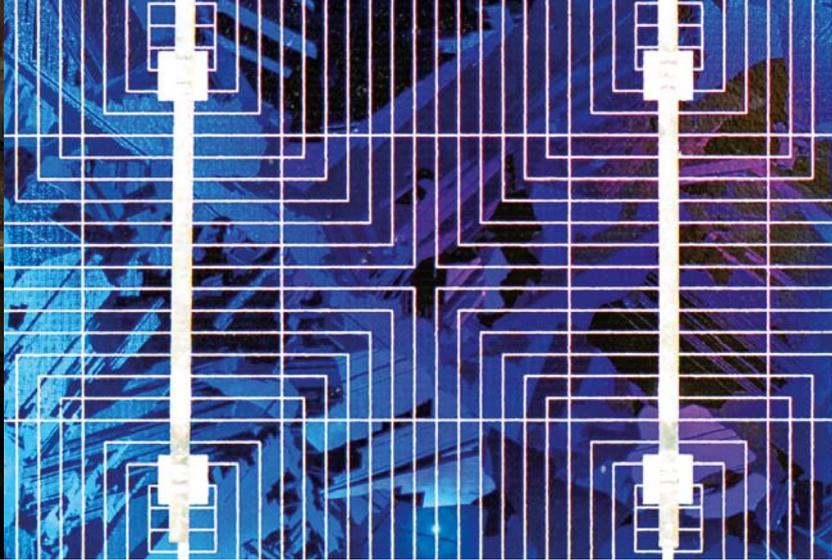
Wir entwickeln Charakterisierungs- und Bewertungsmethoden, mit denen die Auswirkungen mechanischer, thermischer, elektrischer und chemischer Beanspruchungen vorhergesagt werden können. Modernste Mikrostrukturaufklärung stellt sicher, dass wir alle relevanten Veränderungen der Werkstoffeigenschaften im Einsatz berücksichtigen. Leistungssteigernde Maßnahmen wie Oberflächenmodifizierungen und Beschichtungen helfen, Lebensdauer und Standzeiten zu erhöhen.

Beispiele

- Um die Energieausbeute durch maximale Betriebs- und Prozesstemperaturen zu verbessern, führen wir Lebensdauervorhersagen und Sicherheitsanalysen für Kraftwerkskomponenten durch
- Wir bewerten und optimieren neue leistungselektronische Komponenten zur Energieeinsparung
- Zur Gewichtseinsparung im Fahrzeug- und Flugzeugbau entwickeln wir Simulationsmethoden und Prüfkonzepte für höchstbelastete Faserverbund- und CFK-Schaumsandwich-Leichtbaustrukturen
- Für maximale Fahrzeugsicherheit entwickeln wir Werkzeuge zur vorhersagegenauen Crashsimulation
- Zur Reibleistungsverringerung entwickeln wir Verschleißschutzschichten für die Antriebstechnik sowie Antifoulingkonzepte für Schiffsrümpfe
- Wir entwickeln Konzepte zur Steuerung der Reibung in Lagern und Dichtungen über elektrische Potenziale sowie neue Schmierstoffe
- Für die Photovoltaik entwickeln wir Lösungen zur besseren Energieausbeute bei Solarzellen



Mit Werkstoffsimulation können die Prozessparameter beim Walzen von Stahl optimiert werden.



Werkstoffmechanik leistet wichtige Beiträge zur Steigerung der Energieausbeute in Solarzellen.

In energie- und materialeffizienten Entwicklungsprozessen ist der Aufwand für zeit- und kostenintensive Versuchsreihen auf ein Minimum zu reduzieren. Auf teure Versuch-Irrtum-Schleifen muss weitgehend oder ganz verzichtet werden.

Fraunhofer IWM-Beiträge für effiziente Entwicklungsprozesse

Mit Prozessketten- und Multiskalensimulationen bestimmen wir, vom gewünschten Einsatzverhalten ausgehend, das erforderliche Werkstoff- und Bauteildesign. Die Ursachen von Fehlverhalten klären wir mit geeigneten Werkstoffmodellen bereits in der Entwicklungsphase auf. Mit unserem so genannten »Virtuellen Mikroskop« und dem »Virtuellen Testlabor« des Fraunhofer IWM können Werkstoff- und Bauteilfunktionen am Computer in der Designphase getestet und eingestellt werden. Wir helfen bei der Realisierung multifunktionaler Werkstoff- und Bauteileigenschaften.

Beispiele

- Um die Fertigungsausbeute zu erhöhen und die Rissbildung beim Walzen von Blech zu vermeiden, modellieren wir die entsprechenden Werkstoffe und simulieren die Prozesse
- Um die Entwicklungszeit für neue Bauteile zu verkürzen und die Herstellbarkeit sicherzustellen, simulieren wir pulvertechnologische Prozessketten
- Zur Vorhersage ihrer Leistungsfähigkeit und möglicher Schwachstellen testen wir Hochtemperaturbauteile bereits in ihrer Designphase mit virtuellen Werkzeugen
- Zur Substitution bleihaltiger Werkstoffe in Einspritzsystemen bewerten und optimieren wir bleifreie Funktionswerkstoffe mit multiskaligen Simulationsverfahren
- Mit virtuellem molekularem Design qualifizieren wir neuartige Polymerwerkstoffe für innovative Anwendungen

Mit innovativen Fertigungsschritten muss es gelingen, bei möglichst geringem Materialeinsatz vielfältige Funktionen innerhalb eines Bauteils mit möglichst wenigen Bauteilen oder auf geringstem Raum zu realisieren.

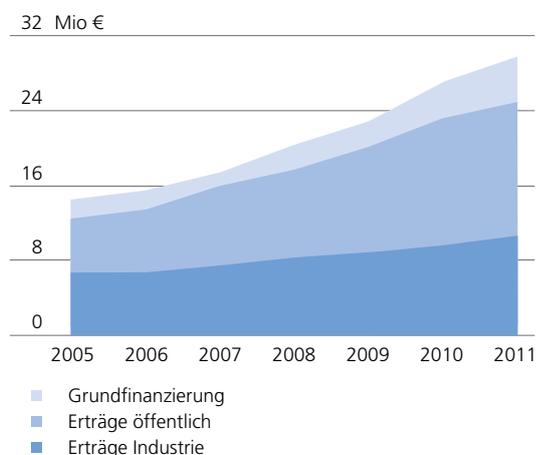
Fraunhofer IWM-Beiträge für effiziente Fertigungsschritte

Ausgehend von einem fundierten Werkstoffverständnis und fortschrittlichen Simulationsmethoden entwickeln wir innovative Prozessschritte für die Formgebung und Verarbeitung. Wir leisten nachhaltige Beiträge zu neuen Halbleiter-, Aufbau- und Verbindungstechniken in der Mikroelektronik.

Beispiele

- Für optimale Wärmedämmung arbeiten wir an Fügeverfahren zur Herstellung von Vakuumisolierglasscheiben
- Um den Materialverlust möglichst gering zu halten, optimieren wir Trennverfahren für dünne Siliziumwafer
- Um den Ausschuss zu minimieren, entwickeln wir Glasbiegeverfahren zur Herstellung konturgenauer Geometrien
- Für Bauteile mit besonderen optischen oder antiadhäsiven Eigenschaften entwickeln wir funktionale Werkzeugbeschichtungen
- Wir führen prozessbegleitend Fehleranalysen an gestapelten höchstintegrierten Schaltkreisen durch

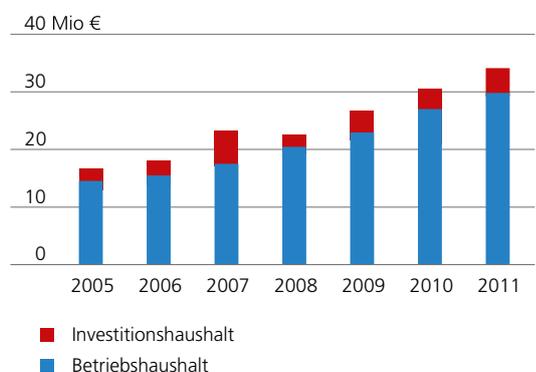
Unsere Lösungen helfen den Material- und Energiebedarf bei der Entwicklung, der Herstellung und im Einsatz von Werkstoffen und Bauteilen zu reduzieren. Durch unsere Projekte verringern wir die Energieverluste bei der Erzeugung und Umwandlung von Energie. Für unsere Partner ergeben sich daraus wirtschaftlichere Prozesse und Kosteneinsparungen.



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

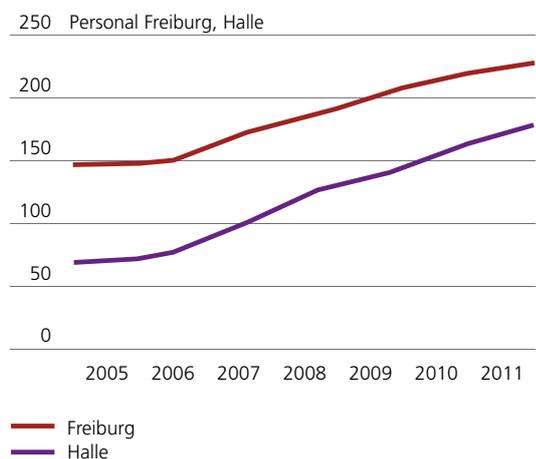
Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Diese werden finanziert durch externe Erträge und institutionelle Förderung (Grundfinanzierung).

Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist weiter gewachsen und beläuft sich auf 29,9 Millionen Euro (Hochrechnung 2011). Davon entfallen 16 Millionen Euro auf den Institutsteil Freiburg und 13,9 Millionen Euro auf den Institutsteil Halle.



Der Investitionshaushalt 2011 betrug 4,2 Millionen Euro.

Der Anteil der Industrieerträge zur Finanzierung des Betriebshaushaltes liegt bei 35,5 Prozent.



Ende 2011 waren am Fraunhofer IWM insgesamt 405 Personen als Stammpersonal beschäftigt, davon 227 in Freiburg und 178 in Halle. Die Beschäftigtenzahl setzt sich zusammen aus 199 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, 113 technischen Beschäftigten, 77 Angestellten in der Infrastruktur und 16 Auszubildenden. Inklusive der 97 wissenschaftlichen Hilfskräfte, Diplomandinnen und Diplomanden sowie Praktikantinnen und Praktikanten waren Ende 2011 insgesamt 502 Personen am Fraunhofer IWM beschäftigt.

Stand: Dezember 2011

KURATORIUM UND WERKSTOFFMECHANIKPREIS 2011

Von links nach rechts: Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn, Dr. Florian Holzapfel, Siegfried Glaser, Prof. Dr. Rudolf Stauber, Dr. Roland Langfeld, Prof. Dr. Alfred Gossner (Vorstand Fraunhofer-Gesellschaft), Prof. Dr. Christina Berger, Prof. Dr. Detlef Löhe, Jens Wemhöner, Dr. Christoph Mühlhaus, Prof. Dr. Peter Gumbsch, Dr. Robert Ruprecht.



Das Kuratorium des Fraunhofer IWM 2011

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.

- Prof. Dr. Rudolf Stauber (Vorsitzender), Zentralinstitut für Neue Materialien und Prozesstechnik ZMP, Fürth
- Prof. Dr. Christina Berger, Technische Universität Darmstadt
- Dr. Karlheinz Bourdon, KraussMaffei Technologies GmbH, München
- Siegfried Glaser, Glaser FMB GmbH & Co. KG, Beverungen
- MinDirig. Hans-Joachim Hennings, Ministerium für Wirtschaft und Arbeit 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 Mülhaupt, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Dr. Matthias Müller, Robert Bosch GmbH, Gerlingen
- Peter Putsch, Putsch Kunststoffe GmbH, Nürnberg
- Dr. Robert Ruprecht, Projektträger PTKA, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Dr. Alexander Sagel, KS Kolbenschmidt GmbH, Neckarsulm
- Dr. Lorenz Sigl, Plansee Group Reutte (Österreich)
- Staatssekretär Marco Tullner, Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt
- MinRat Dr. Joachim Wekerle, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart
- Jens Wemhöner, Cerobear GmbH, Herzogenrath

Werkstoffmechanikpreis 2011, gestiftet von der Plansee Group Reutte

Dr. Matthias Gurr hat mit seiner Dissertation zu neuen photohärtenden Nanokompositen die Preisrichter und das Kuratorium überzeugt: Er gewann den mit 1 500 Euro dotierten Werkstoffmechanikpreis 2011, der hervorragende wissenschaftliche Leistungen im Rahmen von Diplomarbeiten und Dissertationen auf dem Gebiet der Werkstoffmechanik auszeichnet.

Außerdem waren zwei weitere Wissenschaftler für den Preis nominiert worden: Martin Fritz mit seiner Diplomarbeit zur Herstellung und Charakterisierung eines nativen Epoxidharzschaumstoffs sowie Dr. Iyas Khader mit seiner Dissertation »Damage mechanisms in silicon nitride rolling tools applied in caliber rolling copper and steel wires«.

Dr. Matthias Gurr: Neue photohärtende Nanokomposite zur Anwendung in Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing

Die für Modelle bei der Produktentwicklung im Automobilbereich oder in der Medizintechnik genutzten photohärtenden Stereolithographie-Harze verziehen sich während ihrer Aushärtung. Matthias Gurr simulierte den Prozess und charakterisierte die mechanischen Eigenschaften der Harze. Er kombinierte photohärtende Nanokomposite mit unterschiedlichen Füllstoffen und verbesserte so ihre mechanischen Eigenschaften erheblich. Durch neuartige Calciumphosphat-Bentonit-Hybridnanopartikel konnte er die Steifigkeit und Bruchzähigkeit um rund 35 Prozent steigern, der Verzug ist 45 Prozent geringer.



Das Beschichtungs- und Simulationszentrum in Freiburg (links) und das Modultechnologiezentrum in Halle (rechts).

Neues Beschichtungs- und Simulationszentrum in Freiburg

In einem neuen Gebäude mit 1 730 m² Nutzfläche für Labore und 60 Büroarbeitsplätze konzentriert das Fraunhofer IWM in Freiburg seine Kompetenzen in der Beschichtungstechnologie sowie der Prozess- und Werkstoffsimulation. Im Mai 2011 wurde das Beschichtungs- und Simulationszentrum gemeinsam mit rund 400 Gästen aus Industrie, Wissenschaft und Politik eingeweiht. Der Baden-Württembergische Minister für Finanzen und Wirtschaft, Dr. Nils Schmid, überreichte symbolisch einen Schlüssel an den Fraunhofer-Vorstand Prof. Dr. Alfred Gossner. »Die Entwicklung des IWM ist beispielgebend für die Dynamik in der Werkstoffforschung«, so Gossner.

Die Gesamtinvestition von 7 Millionen Euro für Gebäude und Anlagen wurde jeweils zur Hälfte von der Baden-Württemberg Stiftung sowie vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF getragen. Ein weiterer Bauabschnitt ist bereits in Planung.



Der Minister für Finanzen und Wirtschaft, Dr. Nils Schmid, gratuliert Institutsleiter Prof. Dr. Peter Gumbsch zum neuen Gebäude.

Einweihung des Modultechnologiezentrums des Fraunhofer CSP

Auf rund 2 000 m² können nun in Schkopau Verfahren zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Kunststoffverarbeitung sowie Integration von Solarmodulen entwickelt werden. 12,8 Millionen Euro investierten das Land Sachsen-Anhalt und die Fraunhofer-Gesellschaft in das Modultechnologiezentrum, das Teil des Fraunhofer CSP ist. Die Ministerin für Wissenschaft und Wirtschaft von Sachsen-Anhalt, Prof. Dr. Birgitta Wolff, weihte es im September 2011 ein.



Von links: Prof. Dr. Jörg Bagdahn (Leiter Fraunhofer CSP), Frank Bannert (Landrat Saalekreis), Prof. Dr. Ulrich Buller (Vorstand Fraunhofer-Gesellschaft), Prof. Dr. Birgitta Wolff (Ministerin für Wissenschaft und Wirtschaft), Prof. Dr. Ralf Wehrspohn (Institutsleiter Fraunhofer IWM).

Das Fraunhofer CSP kann nun Solarmodul-, Geräte- und Materialherstellern mit kompletten Forschungsdienstleistungen schnelle und flexible Lösungen anbieten. Mit neuesten Maschinen und Verfahren im industriellen Maßstab werden Materialien und Bauteile zur Serienreife entwickelt und das wissenschaftliche Know-how den Photovoltaik- und Kunststoffindustriunternehmen zur Verfügung gestellt.

20 JAHRE FRAUNHOFER IWM IN SACHSEN-ANHALT



Das Gebäude in der Walter-Hülse-Straße in Halle.

Eine Ost-West-Geschichte: Nach der Wende dehnte die Fraunhofer-Gesellschaft ihre Forschungsaktivitäten in den neuen Bundesländern aus. Das Fraunhofer IWM in Freiburg hatte eine Ergänzung seines Forschungspotenzials im Blick und übernahm eine Patenschaft für Teile des Instituts für Festkörperphysik und Elektronenmikroskopie der Akademie der Wissenschaften der DDR. Ein sehr gutes Matching: Aus dem Akademie-Institut hervorgegangen, wurde im Juni 1991 die Außenstelle »Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen« in Halle gegründet. Mit nur 16 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, viel Engagement und einem tragfähigen Konzept zur Bewertung der Komponenten-, Bauteil- und Systemsicherheit formte sich die damals fünfte Abteilung des Freiburger Mutterhauses.



Das Team des Fraunhofer IWM in Halle mit vielen Gründungsmitgliedern anlässlich der Fünf-Jahres-Feier 1997. In der Mitte der vordersten Reihe: Ehemaliger Institutsleiter des Fraunhofer IWM Prof. Dr. Erwin Sommer (links) und ehemaliger Leiter des Standorts in Halle Prof. Dr. Dieter Katzer (rechts).

Im Fokus der Arbeitsgruppe stand das Zusammenspiel von Mikrostrukturaufklärung, Modellbildung und Simulation, um ein tiefgehendes Verständnis werkstoffmechanischer Kenngrößen wie Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu erhalten. Insbesondere neue Themen in der Mikrosystemtechnik, zum Beispiel die siliziumbasierte Batch-Technologie, waren von strategischer Bedeutung. Denn zunehmend entstand ein Wirtschaftsinteresse für die Bewertung der Zuverlässigkeit miniaturisierter Bauteile, für die es bis dato noch keine etablierten Verfahren gab. Forschungsstrategien – speziell im Bereich der Fehlerdiagnostik – führten zu einem schnellen Wachstum, so dass am 1. Januar 1992 aus der Außenstelle ein offizieller zweiter Standort des Fraunhofer IWM wurde.

20 Jahre später ist die Hallesche Kompetenz in der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik auch von internationalen Industriepartnern gefragt. Konsequenterweise nach den Bedürfnissen des Marktes ausgerichtet, forschen heute mehr als 180 Beschäftigte in wirtschaftlich und gesellschaftlich relevanten Bereichen wie der Automobilelektronik, Mikroelektronik, Mikrosystemtechnik, Photovoltaik, Biotechnologie, Medizintechnik, Polymerverarbeitung und dem Flugzeugbau.

Das Fraunhofer IWM in Halle feiert am 25. April 2012 in Anwesenheit des Ministerpräsidenten des Landes Sachsen-Anhalt Dr. Reiner Haseloff sein 20-jähriges Jubiläum.

ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER

Sprecher der Institutsleitung,
 Institutsleiter und Institutsteilleiter Halle
 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

Leiter Institutsteil 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 Werkstoffbewertung 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. Michael Luke (komm.) +49 761 5142-338
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 Werkstoffmodellierung Prof. Dr. Christian Elsaesser +49 761 5142-286		

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. Roland Weidisch +49 345 5589-430</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 Rapthel (komm.) +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 (komm.) +49 345 5589-130</p>
<p>Polymerbasiertes Materialdesign</p> <p>Prof. Dr. Roland Weidisch +49 345 5589-430</p>		<p>Diagnostik Halbleitertechnologien</p> <p>Frank Altmann +49 345 5589-139</p>

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>Dr. Michael Busch +49 345 5589-111</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>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>	

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

* Fraunhofer ISE
** Fraunhofer IAP

Geschäftsfeld

TRIBOLOGIE

Für moderne Materialien und Beschichtungen erschließen wir wettbewerbsrelevante neue Anwendungen vorzugsweise in tribologisch beanspruchten Systemen. Mit konsequenter Kombination von Experiment und Simulation bieten wir unserer Kundschaft eine ganzheitliche Problemlösungsstrategie. Wir verbessern mit unseren Projektpartnern die Gebrauchseigenschaften der Werkstoffe für die jeweiligen Einsatzbedingungen und ermitteln deren Grenzen.

Tribologische Optimierungen werden durch gezielt entwickelte Werkstoffe und Oberflächenbehandlungen erreicht. Für den optimalen Werkstoffeinsatz ermitteln wir die Belastungen möglichst genau. Unsere Problemlösungen basieren auf einer mechanismenbasierten Sichtweise. Jede neue Werkstoffpaarung erfordert zudem die genaue Kenntnis der Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften und deren Veränderung im Betrieb. Diese ermitteln wir mit mechanischen, tribologischen und physikalisch-chemischen Untersuchungsverfahren, die speziell für die praktischen Anwendungen optimiert wurden.

Bemerkenswertes aus 2011

Am 1. Januar übergab Dr. Thomas Hollstein die Geschäftsfeldleitung an Prof. Dr. Matthias Scherge. Dr. Hollstein wurde mit einem wissenschaftlichen Kolloquium im März verabschiedet. Im Juni stand der Sieger des Architekturwettbewerbs für das Hauptgebäude des MikroTribologie Centrums μ TC in Karlsruhe fest: das Architekturbüro van den Valentyn aus Köln. Der Entwurf ist auf der Webseite des Architekturbüros zu sehen. Zeitgleich begannen die Fachplanungen für den Bau des Prüfstandsgebäudes auf dem Areal des Karlsruher Instituts für Technologie KIT Campus Ost.

Im ersten Quartal starteten fünf Promotionsarbeiten gemeinsam mit den strategischen Partnern des MikroTribologie Centrums. Sie umfassen Experimente und Simulationen zu

Metall-Metall-Kontakten sowie zu diamantartigen Kohlenstoffschichten. In der Gruppe von Prof. Dr. Michael Moseler gab es spektakuläre Ergebnisse zum Schleifen von Diamant. Durch molekulardynamische Simulation ist es gelungen, die Schleifmechanismen aufzuklären. Diese Arbeiten wurden in einem weitbeachteten Aufsatz in *Nature Materials* veröffentlicht. In einem wissenschaftlichen und von der Fraunhofer-Gesellschaft geförderten Vorlaufprojekt (TriboMan) ist es erstmals gelungen, untereutektische Aluminium-Silizium-Legierungen für motorische Anwendungen fit zu machen. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFAM wurden die Legierungen entwickelt und danach mit neuartigen Verfahren vom Fraunhofer IWU endbearbeitet. Neben dem Legierungskonzept ist bemerkenswert, dass auf das Honen verzichtet wurde und trotzdem kleinste Verschleißraten erzielt werden konnten. Zurzeit laufen Radionuklidverschleißmessungen auf einem Einzylindermotorenprüfstand.

Gruppe

Verschleißschutz, Technische Keramik

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

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

Gruppe

Biomedizinische Materialien und Implantate

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

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

Gruppe

Tribologische Schichtsysteme

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

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

Gruppe

Mikrotribologie

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

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

Gruppe

Multiskalenmodellierung und Tribosimulation

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

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

Prof. Dr. Matthias Scherge
Geschäftsfeldleiter



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

MIKROTRIBOLOGIE

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

»TRIBOMAN«: REDUKTION VON REIBUNG UND VERSCHLEISS IN MOTOREN

Nachdem in den vergangenen Jahren hauptsächlich die Verbrennung im Mittelpunkt der Motor-Forschung stand, haben die Forderungen nach Kraftstoffeinsparung und Verringerung der CO₂-Emission in jüngster Zeit Reibungsphänomene wieder in den Fokus der Entwickler gerückt. Dabei haben sich zwei Problemkreise herauskristallisiert: Erstens kann nur eine ganzheitliche Optimierung des mechanischen Systems einen signifikanten Beitrag leisten und zweitens müssen dazu die physikalischen und chemischen Grundlagen verstanden sein.

Zur tribologischen Optimierung eines Motors sind grundsätzlich drei Stellhebel nutzbar. Als stärkster tribologischer Hebel ist der motorische Einlauf zu nennen. Hier können Reibung und Verschleiß durch eine Steuerung der Belastung, wie Drehzahl und Last, eingestellt werden. Der Hersteller hat hier leider wenig Handhabe, da die Belastungssteuerung hauptsächlich in den Händen des Autofahrers liegt. Der zweite Optimierungshebel ist die Auslegung des Öls und seiner Additive. Hierzu ist das Zusammenwirken der Motorhersteller mit den Öl- und Additivfirmen notwendig, was oftmals an Regelungen zur Geheimhaltung scheitert. Bleibt als dritter Hebel die mechanische Endbearbeitung, mit der eine Vorkonditionierung der Motorteile möglich ist.

Mechanische Endbearbeitung und Beschichtung

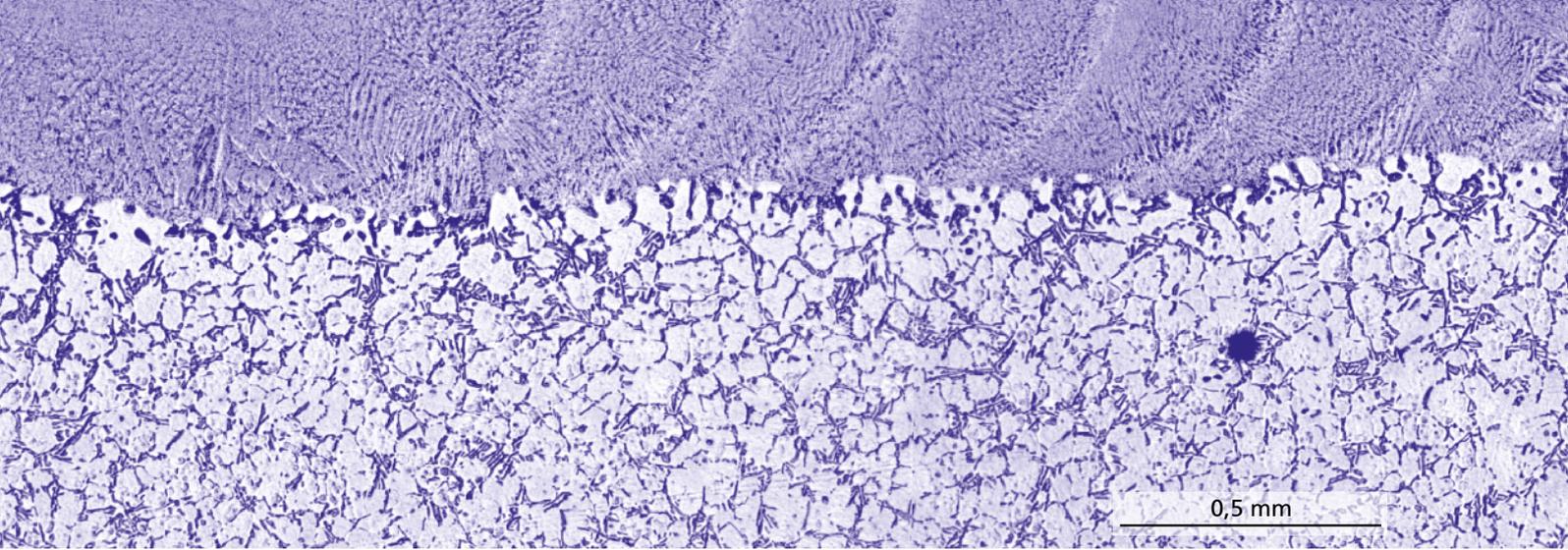
Der mechanischen Endbearbeitung haben sich fünf Fraunhofer-Institute in dem internen Projekt Triboman gewidmet. Das Fraunhofer IFAM hat für Aluminiumsilizium(AlSi)-Leichtbauzylinder eine neuartige untereutektische Legierung entwickelt. Das Material hat ein feinkristallines Gefüge, welches im Zuge des Einlaufs schnell und stabil nanokristallin wird und wenig

Reibung bei gleichzeitig geringem Verschleiß aufweist. Mithilfe der Kollegen des Fraunhofer IWU sollen die so gewonnenen Zylinder präzisionsendbearbeitet werden, um einerseits das Honen zu ersetzen und andererseits den Einlauf teilweise schon während der Fertigung vorwegzunehmen. Das Verfahren, das auch für Wellen entwickelt wurde, nennen wir »energetisch gesteuerte Endbearbeitung«. Alternativ zu spanender Endbearbeitung arbeitet das Fraunhofer IPT am Laserumschmelzen von Tribowerkstoffen. Auch hier soll nanokristallines Gefüge entstehen, das im Reibkontakt zügig zu geringer Reibung führt. Nicht alle Teile des Motors werden allerdings endbearbeitet, beispielsweise Kolbenringe. Zur Reibungsreduktion werden diese Teile daher am Fraunhofer IST mit diamantartigem Kohlenstoff (DLC) beschichtet.

Messung von Reibung und Verschleiß

Zum Nachweis der Reibungsreduktion erfolgen im MikroTribologie Centrum μ TC des Fraunhofer IWM Motorprüfstandsuntersuchungen, bei denen im laufenden Aggregat neben den Reibungsverlusten auch der Verschleiß der Bauteile gemessen wird. Abbildung 1 zeigt einen Einzylinderforschungsmotor, mit dem die Reibungsverluste bestimmt werden können. Durch Nutzung der Radionuklidtechnik kann ebenso der Verschleiß kontinuierlich gemessen werden. Die neuen AlSi-Legierungen ergaben Verschleißraten, die kleiner als 10 Nanometer pro Stunde sind.

Abbildung 2 zeigt die Laufspuren des Kolbenrings im AlSi-Zylinder. Das besondere daran ist, dass, anders als bei den herkömmlichen übereutektischen Legierungen, nicht der Einlauf



Laserumgeschmolzene AlSi-Legierung.

für die Herstellung der nanokristallinen Struktur notwendig ist. Das neue System ist also stabil und weniger empfindlich gegenüber äußeren Einflussgrößen. Greifen alle geplanten Maßnahmen, erwarten die Mikrotribologinnen und Mikrotribologen eine Reibungsverringerung von bis zu 10 Prozent.

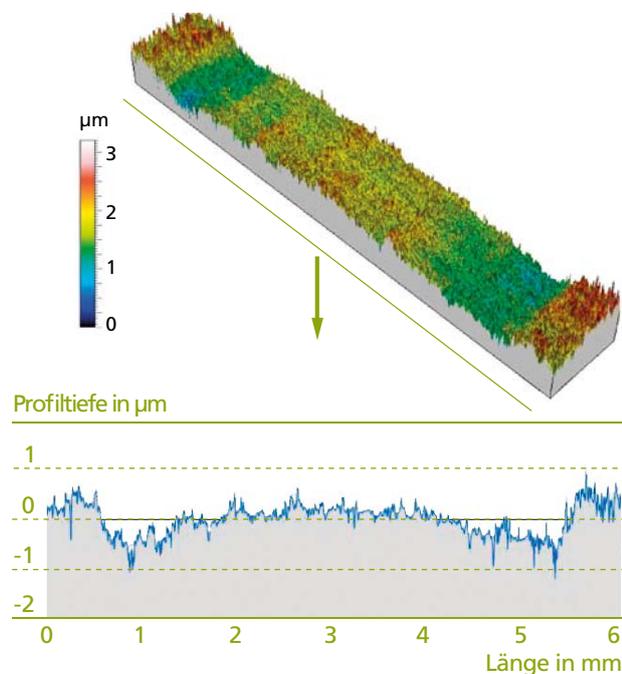
Zur Charakterisierung der tribologischen Eigenschaften setzen wir neben der hochgenauen Verschleißmessung auch

physikalisch-chemische Analytik ein. Systeme mit ultrakleinen Verschleißraten zeigen neben der nanokristallinen Struktur auch deutliche Veränderungen der chemischen Eigenschaften des oberflächennahen Materials, die auf Reaktionen der AlSi-Legierung mit Additivbestandteilen des Öls deuten. Derartige Änderungen wurden mit der Photoelektronenspektroskopie nachgewiesen.

Prof. Dr. Matthias Scherge



1 Einzylinderforschungsmotor zur Messung von Reibung und Verschleiß.



2 Dreidimensionale Darstellung der Verschleißspur des Kolbenrings. Ein Abtrag von rund 1,5 µm führt bei einer Laufzeit von 150 h zu einer Verschleißrate von 10 nm/h.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

VERSCHLEISSSCHUTZ, TECHNISCHE KERAMIK

Dr. Andreas Kailer

andreas.kailer@iw.fraunhofer.de

SiC: ELEKTRISCHE POTENZIALE BEEINFLUSSEN REIBUNG UND VERSCHLEISS

Gleitlager und Gleitringdichtungen in Pumpen bestehen heute standardmäßig aus Siliziumcarbidwerkstoffen (SiC), die meist in wässriger Umgebung eingesetzt werden. Bisher besteht die Annahme, dass niedrige Reibungskoeffizienten durch eine starke Einglättung der Oberflächen entstehen und dass Si-Oxide die Reibung an der Oberfläche verringern.

Elektrische Leitfähigkeit nutzen

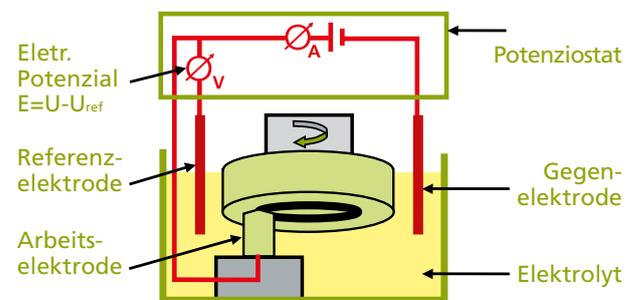
Da Siliziumcarbid elektrisch leitfähig ist, besteht die Möglichkeit, eine chemische Reaktion mit Wasser und somit Reibung, Verschleiß und Korrosionsverhalten elektrochemisch zu beeinflussen. Das Fraunhofer IWM hat gemeinsam mit dem Fraunhofer IKTS elektrochemische Eigenschaften verschiedener SiC- und SiC/Si₃N₄-Werkstoffe untersucht: Eine Stift-Scheibe-Versuchs-anordnung wurde so modifiziert, dass in wässriger Umgebung SiC-Gleitpaarungen unter Einfluss elektrischer Potentiale zwischen -1 und +1 Volt untersucht werden konnten. Die Ergebnisse zeigten, dass eine negative (kathodische) elektrische Polarisierung der Reibpaarung sowohl die Reibkoeffizienten als auch die Verschleißraten erheblich gesenkt hat. Die Reibwerte reagierten dabei schlagartig auf die elektrischen Potentiale: Beim Abschalten der Spannungsquelle stiegen die Reibwerte innerhalb weniger Sekunden von zirka 0,02 auf 0,1 an. Bei anodischer Polarisierung konnten die Tribologen hingegen einen deutlich erhöhten Reibwert um 0,2 sowie eine wesentlich höhere Verschleißrate beobachten.

Silikatschichten doch nicht reibmindernd?

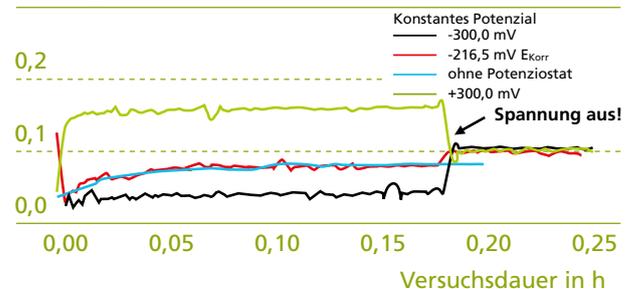
Diese Ergebnisse zeigen: Grundsätzlich ist es möglich, durch elektrische Potentiale das Reibungs-, Verschleiß- und Korrosionsverhalten elektrisch leitfähiger Werkstoffe stark zu beein-

flussen. Gleichzeitig stellen sie die bisherige Annahme eines reibmindernden Einflusses von Silikatschichten grundsätzlich infrage. In Pumpen können nun mithilfe elektrischer Potentiale keramische Gleitlager und Gleitringdichtungen langlebiger, leistungsfähiger und zuverlässiger gemacht werden.

Dr. Andreas Kailer, Tobias Amann



Reibungskoeffizient



1 Skizze der Versuchsanordnung: Über den stehenden Pin wird die Reibpaarung unter ein elektrisches Potenzial gesetzt (oben). Einfluss elektrischer Potentiale auf die Reibung: Negatives Potenzial führt zu Verringerung, positives Potenzial zur Erhöhung der Reibung. Beim Abschalten stellen sich Reibungskoeffizienten von zirka 0,1 ein (unten).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

TRIBOLOGISCHE SCHICHTSYSTEME

Dr. Sven Meier

sven.meier@iwm.fraunhofer.de

MODELLIERUNG DER OBERFLÄCHENSTRUKTUR AMORPHER KOHLENSTOFFSCHICHTEN

Für die Reduktion von Reibung und Verschleiß in hoch belasteten tribologischen Kontakten kommen weitverbreitet diamantartige amorphe Kohlenstoffschichten (diamond like carbon – DLC) zum Einsatz. Oft zeigt sich bei der Analyse des Reibverhaltens, dass die Struktur der Schichtoberfläche von zentraler Bedeutung für die Leistungsfähigkeit solcher Schichten ist. Während in manchen Anwendungen eine glatte Schicht entscheidend für eine lange Lebensdauer bei geringen Reibungsverlusten ist, zeigt sich in anderen Anwendungen, dass eine strukturierte Schicht zu wesentlich besseren Ergebnissen führt.

Das am Fraunhofer IWM entwickelte Beschichtungsverfahren zur Abscheidung von wasserstoffhaltigen amorphen Kohlenstoffschichten auf Basis plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PACVD) erlaubt die Abscheidung einer großen Bandbreite von Oberflächenstrukturen. Sie wird zudem erweitert durch verschiedene Verfahren zur Vorstrukturierung der Bauteiloberflächen.

Charakterisierung der Oberfläche

Die Charakterisierung der Schichtoberfläche wie auch der Oberflächenstruktur des Bauteils vor der Beschichtung wird mithilfe eines Rasterkraftmikroskops durchgeführt. Dieses erlaubt die präzise Erfassung der Oberflächenstruktur bis in den Nanometer-Bereich.

Simulation des Wachstums

Zur Beschreibung der Strukturentwicklung, insbesondere auch in Abhängigkeit von der Struktur des Substrates, wurde ein mesoskopisches Kontinuumsmodell entwickelt. Dieses Modell berücksichtigt die unter den verwendeten Abscheidebedingungen

für die Strukturentwicklung ausschlaggebende Selbstabschätzung der Oberfläche. Durch ein am Fraunhofer IWM entwickeltes Berechnungsverfahren ist es erstmals gelungen, diesen komplexen Vorgang auf für die praktische Anwendung interessanten Längen- und Zeitskalen zu simulieren. Hierdurch ist es möglich, die resultierende Oberflächenstruktur eines mittels PACVD-Verfahren beschichteten Bauteils in Abhängigkeit von seiner Struktur vor der Beschichtung vorherzusagen. So kann das Verfahren optimiert werden, ohne dass hierfür aufwändige Beschichtungsversuche notwendig sind.

Dr. Christoph Hormann



1 Oberflächenstruktur einer schwach strukturierten Schicht auf polierter Oberfläche (links, zehnfach überhöht) und einer stärker strukturierten Schicht auf mikrogestrahltem Substrat (rechts), jeweils mit Rasterkraftmikroskop gemessen (oben) und aus der Simulation (unten).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppen

**BIOMEDIZINISCHE MATERIALIEN
UND IMPLANTATE**

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

**MULTISKALENMODELLIERUNG
UND TRIBOSIMULATION**

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

AUSLEGUNG KÜNSTLICHER ADERSYSTEME: EIN BIOMIMETISCHER ANSATZ

Damit Zellen überleben, ist ihre Versorgung mit Nährstoffen und eine Ableitung von Stoffwechselprodukten wesentlich. In natürlichem Gewebe übernimmt diese Aufgabe das Blutgefäßsystem. Für die Züchtung von Gewebe im Bioreaktor stellt die Versorgung der Zellen in vielen Fällen noch eine Herausforderung dar. Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems ist die Fertigung eines künstlichen Blutgefäßsystems, das Zellen in vitro mit Nährstoffen versorgen und Stoffwechselprodukte abführen kann.

Das natürliche Blutgefäßsystem kann als ein hierarchisch aufgebauter »Baum« aufgefasst werden, dessen Struktur durch Verzweigungen von der Aorta bis zu den Kapillaren hin entsteht. Für die technische Herstellung derartiger hierarchischer Strukturen sind generative Fertigungsverfahren ideal geeignet. In dem Verbundprojekt »BioRap« arbeiten fünf Fraunhofer-Institute an der Entwicklung einer Technologie zur Herstellung künstlicher Adersysteme: neben dem Fraunhofer IWM die Fraunhofer-Institute IAP, IGB, ILT und IPA. Die Aufgabe des Fraunhofer IWM ist die optimale Auslegung des Systems: Wie muss das System aussehen, um ein definiertes Volumen mit Nährstoffen zu versorgen, um Bedingungen herzustellen, bei denen sich Endothelzellen an den Wänden des Systems ansiedeln, und um Strömungsanomalien zu vermeiden, die beispielsweise Ablagerungen verursachen können?

Optimale Verzweigungsstruktur

Zuerst wurde eine optimale Verzweigungsstruktur des Adersystems gesucht unter den Prämissen, dass der Druck vom Eingang des Adersystems zu seinen Ausgängen auf einen definierten Wert abfällt und der Fluss am Eingang auf bestimmte

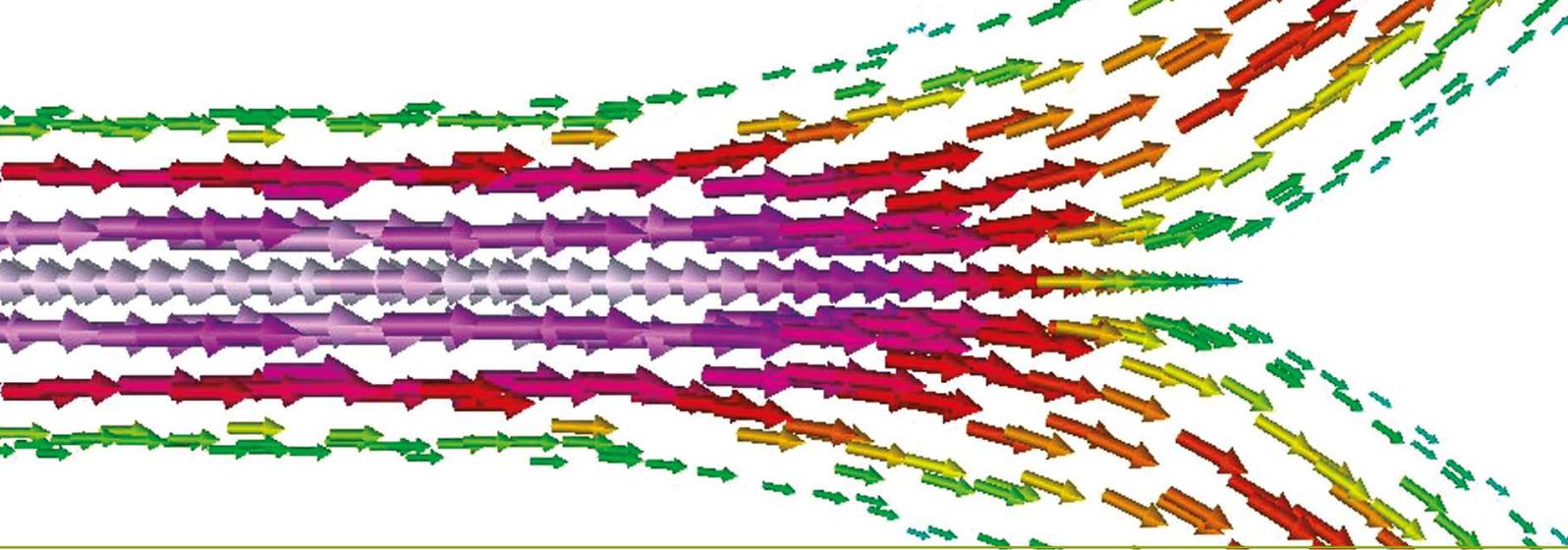
Weise auf die Ausgänge verteilt wird. Gesucht wurden die optimalen Orte der Verzweigungspunkte sowie die idealen Durchmesser und Längen der einzelnen »Äste« des Adersystems. Natürliche Adersysteme sind nach bestimmten Regeln aufgebaut, die sich aus grundlegenden Prinzipien ableiten und sich in einigen Aspekten durch einfache Algorithmen beschreiben lassen. Zur Auslegung des künstlichen Adersystems wurde ein Programm entwickelt, das nach Vorgabe von Druck und Fluss im Eingang und den Ausgängen diese mit einem verzweigten Adersystem verbindet, dessen grundlegende Struktur einem natürlichen Adersystem gleicht.

Endothelzellen brauchen Scherspannungen

Nachdem die Topologie des Adersystems bestimmt war, musste dessen lokale Struktur optimiert werden. Die inneren Gefäßwände sind mit Endothelzellen beschichtet, die für den Nährstofftransfer in das umgebende Gewebe sorgen. Zur Erfüllung ihrer Funktionen müssen die Endothelzellen durch Scherspannungen stimuliert werden. Die Verzweigungen werden mittels Computational-fluid-dynamics(CFD)-Simulationen so ausgelegt, dass die Scherspannungen an den Gefäßwänden die gewünschten Stimuli auslösen (Abbildung 1). Zudem wurde aus den metabolischen Raten des zu versorgenden Gewebes und der Topologie des Adersystems die erforderliche Porosität der Gefäßwände für eine ausreichende Nährstoffversorgung berechnet.

Richtige Strömung vermeidet Ablagerungen

Für eine dauerhafte Funktionalität des künstlichen Adersystems sind unbedingt Ablagerungen an den Gefäßwänden

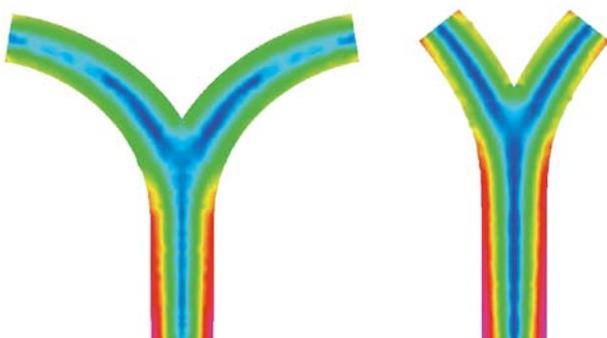


Simulation der Strömungsgeschwindigkeit in einer Verzweigung eines Adersystems.

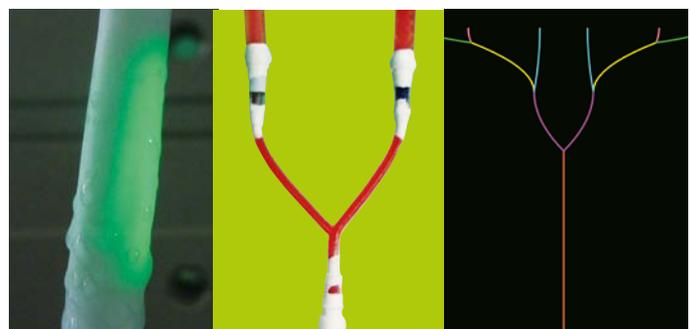
zu vermeiden. Hierzu muss ein laminares Strömungsprofil ohne Totflusszonen sichergestellt sein. Dabei ist in den CFD-Simulationen die Nachgiebigkeit der Gefäßwände zu berücksichtigen, da diese die Strömung wiederum beeinflusst (Fluid-Struktur-Interaktion). Die zur Simulation erforderlichen mechanischen Kennwerte der künstlich hergestellten Adern wurden ebenfalls am Fraunhofer IWM gemessen (Abbildung 2).

Die geometrischen Daten des durchgängig optimierten Adersystems werden an die Partnerinstitute Fraunhofer ILT und IPA übermittelt, die sie generativ fertigen. Das künstliche Adersystem soll dann im Bioreaktor zur Züchtung von Organ- gewebe eingesetzt werden und damit bestehende Engpässe in der Transplantationsmedizin verringern.

Dr. Raimund Jaeger, Dr. Claas Bierwisch



1 *Simulation der Scherspannungen bei unterschiedlichen Verzweigungswinkeln. Blau entspricht niedrigen, Rot hohen Scherspannungen.*



2 *Messung des Durchmessers eines künstlichen Blutgefäßes mit einem Laserabtaster während pulsierender Belastung (links), alternativ: verzweigtes System (Mitte) und optimale Auslegung eines verzweigten Adersystems (rechts).*

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

Bemerkenswertes aus 2011

Für die Herstellung von Vakuumisoliertglas wurden im Rahmen des Projektes »ProVIG« Fertigungsmethoden und -prozesse entwickelt, die technische Lösungen für die dauerhafte Vakuumabdichtung bereitstellen.

Um in der Herstellung keramischer Folien über den Gießprozess die Gefügeausbildung zu kontrollieren, haben wir eine neue Simulationsmethode entwickelt. Sie stellt die komplexen Strömungsvorgänge im Gießkasten beim Foliengießen dar. Für die Optimierung der Prozesstechnik haben wir in der Folge Vorgaben erarbeitet, die in der Kooperation mit Industriepartnern umgesetzt werden.

Für keramisches Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) haben wir erstmals die Entwicklung einer durchgängigen multiskalen Materialmodellierung demonstrieren können. Mittels Beschreibung von Kristallstrukturen und chemischen Bindungen durch die First-principles-Dichtefunktionaltheorie wurden im Modell PZT Materialien unterschiedlicher Mikrostruktur sowie ferroelektrische Eigenschaften und piezoelektrisches Bauteilverhalten dargestellt. Die Ergebnisse wurden in einem Verbundprojekt direkt in die Material- und Bauteilentwicklung eingebracht und vom Projektkonsortium erstmals auf der internationalen Konferenz MMM2010 präsentiert.

Gruppe

Bearbeitungs- und Trennverfahren

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

Dr. Rainer Kübler

rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de

Gruppe

Heißformgebung Glas

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

Dr. Peter Manns

peter.manns@iwm.fraunhofer.de

Gruppe

Funktionale Schichtsysteme

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

Dr. Frank Burmeister

frank.burmeister@iwm.fraunhofer.de

Gruppe

Pulvertechnologie

Durch die Simulation von Prozessschritten wie Pressen, Trocknen, Granulieren oder Sintern tragen wir dazu bei, die Bauteilherstellung effizienter zu gestalten. Wir verbessern in dieser Weise Halbzeuge und Fertigprodukte, verkürzen Entwicklungszeiten und sparen Kosten. Neben kontinuumsmechanischen Simulationsansätzen wenden wir diskrete Partikel-Methoden an.

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

Gruppe

Physikalische Werkstoffmodellierung

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

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

Dr. Günter Kleer
Geschäftsfeldleiter



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

PULVERTECHNOLOGIE

Dr. Torsten Kraft

torsten.kraft@iwm.fraunhofer.de

SIMULATIONSGESTÜTZTES DESIGN VON MIKROFLUIDISCHEN SYSTEMEN

Der Einsatz mikrofluidischer Systeme in Biotechnologie, Medizintechnik oder Sensorik nimmt stetig zu. Ein erfolgreiches Design solcher Systeme erfordert die Kontrolle über den Transport kleinster Flüssigkeitsvolumina. So ist beispielsweise die restlose Entleerung kleiner Kanäle und Kavitäten wesentlich für die Reproduzierbarkeit und Effizienz von Nachweisverfahren der In-vitro-Diagnostik (Abbildung 1).

In der Praxis ist der Flüssigkeitstransport abhängig vom Benetzungsverhalten der Flüssigkeit auf der Oberfläche der Komponente. Deren Oberflächenenergie beeinflusst die Benetzung und die Mobilität der Flüssigkeit ebenso wie größere Rauheiten oder Oberflächendefekte, beispielsweise Risse oder Löcher. Diese führen zum Pinning der Dreiphasen-Kontaktlinie (Kontaktlinie zwischen den Phasen fest, flüssig, gasförmig) und zur Ausbildung einer sogenannten Kontaktwinkelhysterese. Damit wird beispielsweise das Entleerungsverhalten der Komponente signifikant beeinflusst. Günstig für eine möglichst restlose Entleerung ist eine möglichst niedrige Kontaktwinkelhysterese. Das Ziel am Fraunhofer IWM ist es, das Benetzungsverhalten von Flüssigkeiten auf strukturierten Oberflächen besser zu verstehen und gezielt zu steuern, um so verbesserte Eigenschaften von Mikrofluidikkomponenten zu erreichen.

Vorbild: Natur

Die Natur bietet dazu einige Beispiele. So ist die Oberfläche des Lotusblatts mit einem hydrophoben Wachsfilm beschichtet. Zusätzlich garantiert eine hierarchisch angelegte Strukturierung der Oberfläche ein superhydrophobes Benetzungsverhalten und dadurch eine äußerst effiziente Selbstreinigung und beste Antihafteigenschaften. Diese geometrische Strukturierung soll in

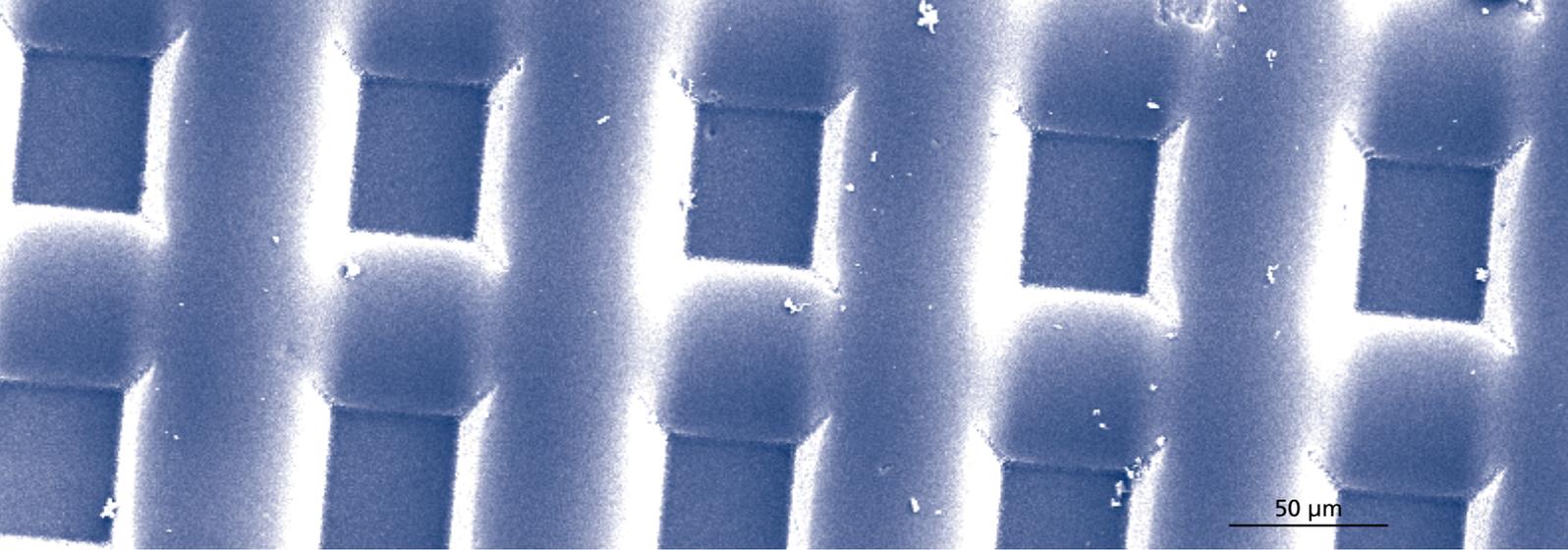
der Praxis adaptiert werden, um durch künstliche Oberflächenstrukturen die verbleibende Restmenge beim Umfüllen oder Entleeren möglichst weit abzusinken.

Tropfen-Simulation entwickelt

Um die Zusammenhänge zwischen Oberflächenstrukturierung und Benetzung zu untersuchen, wurde am Fraunhofer IWM ein Simulationstool entwickelt, mit dem die Bewegung einzelner Tropfen numerisch verfolgt werden kann. Dadurch ist es möglich, Hinweise auf optimale Oberflächenstrukturierungen zur Prozessierung von Fluiden mit unterschiedlichen Eigenschaften zu geben. Die Simulation basiert auf der Computational-Fluid-Dynamik(CFD)-Methode, die eine genaue Vorhersage der Bewegung der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Luft ermöglicht.

Flüssigkeitstransport auf strukturierten Substraten

Mit dem Tool wurden die Benetzung und der Flüssigkeitstransport auf zahlreichen strukturierten Substraten simuliert. Abbildung 2 zeigt am Beispiel der statischen Benetzung einer strukturierten Polystyroloberfläche mit einem Wassertropfen die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Gleichzeitig liefert die Simulation in der vorhergesagten Ausbildung von Luftpolstern in den unterhalb des Tropfens befindlichen Kavitäten die Erklärung für den – in Anbetracht der relativen Hydrophilie unstrukturierter Polystyroloberflächen – überraschend hohen Kontaktwinkel. Die deutlich erkennbare Abweichung des Tropfenrandes von der Kreisform beruht auf dem Bemühen des Fluids, den Kontakt mit dem Substrat zu maximieren und den Kontakt mit der Luft zu minimieren. Neben dieser statischen Kontur des Tropfens können in der Simulation auch dynamische Benetzungsphänomene vorhergesagt werden.

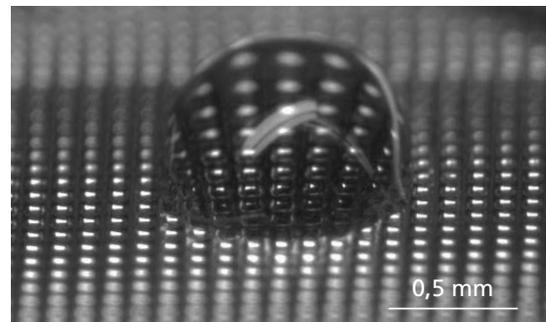
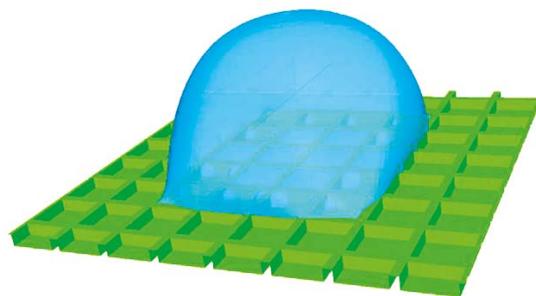
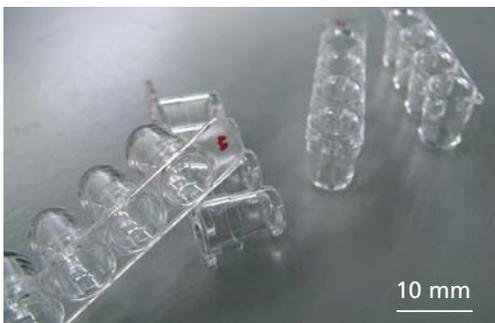


Mikrometerfeine strukturierte Polystyroloberfläche für mikrofluidische Anwendungen.

Mit dem entwickelten Simulationsmodell kann das Design von mikrofluidischen Komponenten im Computer optimiert und neue Designvarianten bezüglich ihrer Praxistauglichkeit schnell analysiert werden. Darüber hinaus ist das Tool auch für andere

Systeme mit Fest-Flüssig-Wechselwirkungen, wie Nanoprinting, Lötens oder Oberflächenbeschichtungen einsetzbar.

Dr. Adham Hashibon, Pit Polfer



1 Beispiel für den Einsatz funktionalisierter Kunststoffoberflächen in der Medizintechnik: Multiwellplatten mit mikrofluidisch wirksamen Oberflächenstrukturen (oben), Diagnostikchip zur Detektion von DNA-Sequenzen in wässrigen Substraten (unten).

2 Statische Benetzung einer strukturierten Polystyrol-Oberfläche mit Wasser. Vergleich von Simulation (oben) und Experiment (unten).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

BEARBEITUNGS- UND TRENNVERFAHREN

Dr. Rainer Kübler

rainer.kuebler@iw.fraunhofer.de

PROZESSENTWICKLUNGEN FÜR NEUE ENERGIESPARENDE VERGLASUNGEN

Ein vielversprechender Ansatz, leistungsfähige und hoch isolierende Fensterverglasungen zu realisieren, besteht darin, zwischen zwei Glasscheiben ein dauerhaftes Hochvakuum einzurichten, um den Wärmetransport über Gasmoleküle zu unterbinden. Dafür muss der für das Vakuum bestimmte Raum zwischen den beiden Flachglasscheiben am Rand gas- und druckdicht abgeschlossen werden. Klebewerkstoffe auf Polymerbasis scheiden aufgrund ihrer naturgemäßen hohen Gaspermeabilität und der Freisetzung flüchtiger Stoffe aus.

Forschungsergebnisse am Fraunhofer IWM zeigten, dass eine direkte, starre Verbindung der beiden Glasscheiben am Rand, beispielsweise durch Glaslot, nur für kleine Scheibendimensionen (etwa bis 1 m²) dauerhaft stabil ist. Der Grund: Mit zunehmender Scheibendimension steigen die im Einsatz entstehenden mechanischen Spannungen im starren Randverbund. Die Spannungen entstehen aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnung von Außen- und Innenglas bei Temperaturunterschieden. Bei einer Überbelastung entsteht Glasbruch.

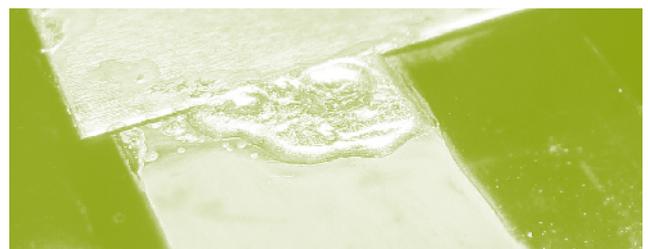
Schicht- und Prozessentwicklung

Im vom Bundesministerium für Umwelt geförderten Verbundprojekt ProVIG entwickelt das Fraunhofer IWM mit dem Fraunhofer ISE ein Randverbundkonzept. Es beruht auf einem Lötverfahren und ist durch ein flexibles Metallband zwischen den Scheiben auch für großformatige Verglasungen geeignet.

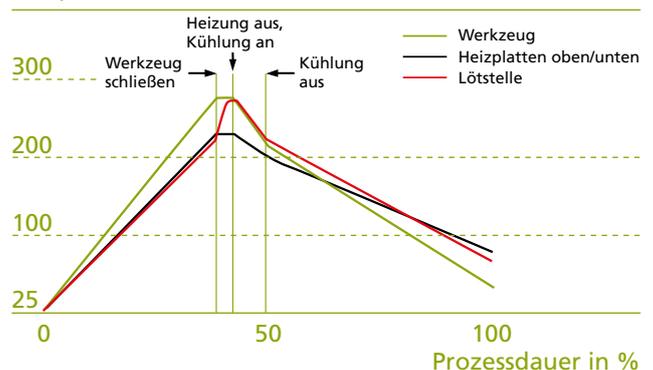
Im Projekt wurde zunächst die Aufgabe bearbeitet, die speziell auf die Wärmedehnung des Glases angepasste Metallfolie mit einem metallischen Lot auf Glas lötlbar zu machen. Es wurde eine großflächig applizierbare Mehrlagenschicht entwickelt, die eine

besonders hohe Haftung auf dem Glasgrund aufweist und zudem an der Oberfläche von bleifreien Loten benetzt wird. Im zweiten Schritt wurde ein Lötprozess im Labor erarbeitet, der durch materialgerechte Temperaturführung und Einstellung von gezielten Temperaturgradienten in den Fügepartnern die prozessbedingten Spannungen von Verbindungen über lange Strecken minimiert (Abbildung 1). Damit sind in Testaufbauten hochvakuumdichte und stabile Lötverbindungen von Glas und Metall darstellbar.

Tobias Rist



Temperatur in °C



1 Schema zur Temperaturführung des Lötprozesses. Metallfolie auf eine beschichtete Glasscheibe mit Metalllot aufgelötet.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

HEISSFORMGEBUNG GLAS

Dr. Peter Manns

peter.manns@iwm.fraunhofer.de

SCHNELLES HEISSPRÄGEN: INNOVATIVE TECHNOLOGIE FÜR HÖHERE FAHR SICHERHEIT

Nachts mit dem Auto unterwegs, plötzlich taucht wie aus dem Nichts ein Fußgänger, ein Fahrradfahrer oder ein Reh auf – ein Schreckensmoment für jeden Autofahrer. Laut Statistik der Bundesanstalt für Straßenwesen findet nachts nur 20 Prozent des gesamten Verkehrsaufkommens statt, aber 40 Prozent der tödlichen Unfälle. Mit Nachtsicht-Assistenten sind aber trotz hohen Marktvolumens und steigenden Wachstumspotenzials bisher nur Pkws der Luxusklasse (Mercedes S-Klasse, BMW 5er und 7er) ausgestattet. Die Gründe dafür sind die hohen Kosten der Nachtsichtgeräte, die derzeit bei rund 2000 € liegen.

Kostengünstige Infrarotkameras

Das Ziel eines Verbundprojektes mit mehreren Industriepartnern ist, neue Technologieansätze für die kostengünstige Massenproduktion der Halbleiter- und Optikkomponenten für Infrarotkameras zu erarbeiten.

Die konventionelle Fertigung der Infrarotlinsen umfasst spanende Bearbeitung von kristallinen Materialien wie Germanium, Zinkselenid oder Zinksulfid durch Schleifen und Polieren oder Diamantdrehen.

Am Fraunhofer IWM können die optischen Linsen aus Chalkogenidglas durch nicht-isothermes Heißprägen mit sehr guter Abbildungsqualität kostengünstig repliziert werden. Diese Glasart zeigt im infraroten Bereich (8–14 μm) hohe Transmission, ist röntgenamorph und hat eine niedrige Erweichungstemperatur (T_g), zudem ist sie kostengünstiger als Germanium, ZnS und ZnSe. Die Glasrohlinge werden auf etwa 200 °C erwärmt und verpresst, die gepressten Linsen brauchen keine Nachbearbeitung mehr. Für den Formgebungsprozess werden

Presswerkzeuge aus Stahl gefertigt und mit einer Tegonit®-Schicht versehen. Diese Schicht verhindert das Ankleben des heißen Glases und erhöht damit die Lebensdauer der Werkzeuge. Die Zykluszeiten liegen bei etwa 3 bis 10 Minuten.

Abbildungsqualität verbessern

Damit sind die ersten Schritte in Richtung kostengünstiger Produktion von Infrarotoptiken getan. Des Weiteren wird die Abbildungsqualität der Infrarotlinsen verbessert. Dazu sind Untersuchungen zur Konturgenauigkeit, Oberflächenqualität und zur Standzeit der Presswerkzeuge geplant. Im Formgebungsprozess spielen Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit ebenfalls eine wichtige Rolle.

Dr. Helen Müller



1 Infrarot-Nachtsichtsystem in einem Pkw: Die Chalkogenidlinsen (rechts) sind in der Optik der Infrarot-Nachtsichtgeräte integriert.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

FUNKTIONALE SCHICHTSYSTEME

Dr. Frank Burmeister

frank.burmeister@iw.fraunhofer.de

HOCHDYNAMISCHE TEMPERIERUNG IN DER KUNSTSTOFFVERARBEITUNG

Beim Spritzgießen von Formteilen entstehen durch ungenügende Temperierung der Formenwände vielfach Oberflächenfehler wie Bindenahtkerben oder Glanzunterschiede. Zur gezielten Verbesserung werden Spritzgießwerkzeuge deshalb zunehmend dynamisch (variotherm) temperiert. Dabei wird in jedem Zyklus vor dem Einspritzen die Oberflächentemperatur der Werkzeugkavität auf einen Wert oberhalb der Glasübergangstemperatur (T_g) des Kunststoffes gebracht. Zur Entformung muss sie jedoch nach dem Einspritzen wieder unterhalb T_g gesenkt werden. Dies führt zu Zykluszeitverlängerungen gegenüber konventionellen Spritzgießprozessen, höherem Energiebedarf und Einbußen in der Wirtschaftlichkeit.

Kostengünstigeres Spritzgießen

Zur Realisierung eines kosteneffizienten, variothermen Spritzgießprozesses ist eine Steuerung der Kontakttemperatur zwischen Schmelze und Werkzeugwand erforderlich. Dabei soll nur diese Kontaktfläche beheizt und die restliche Werkzeugmasse auf der Entformungstemperatur des Kunststoffes gehalten werden.

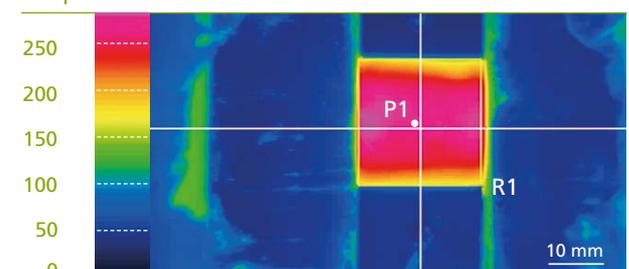
Beheizung der Werkzeugwand

Dazu wird am Fraunhofer IWM ein neues Verfahren zur direkten Beheizung der formgebenden Werkzeugwand erarbeitet: eine resistive Widerstandsheizung über dünne Schichten. Diese nur wenige μm dicken Schichten werden im reaktiven PVD-Prozess erzeugt und können direkt auf den Oberflächen von Spritzgießwerkzeugen abgeschieden werden. In Messungen an Labormustern wurde eine sehr hohe Temperaturdynamik von rund 15 K/sec bei niedrigen Heizleistungen beobachtet (Abbildung 1). Wegen der sehr geringen zu temperierenden Massen werden signifikante Energie- und Kosteneinsparungen erwartet. Allein bei der Werk-

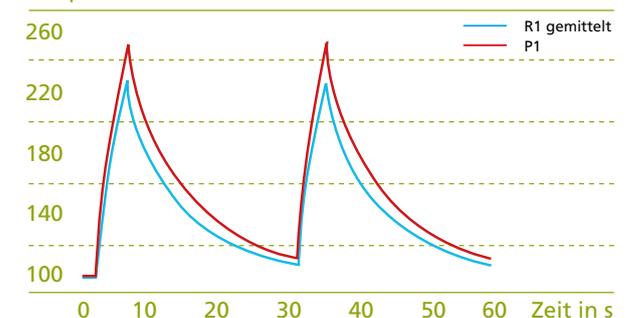
zeugtemperierung kann dadurch für bestimmte Produkte der Energiebedarf auf etwa ein Zehntel gesenkt werden. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens: Eine an die Bauteilgeometrie angepasste, konturfolgende Oberflächentemperierung verspricht eine bessere Abformung bei gesteigerter Oberflächenqualität der Spritzlinge. Anwendungsfelder bestehen bei mikrooptischen und mikrofluidischen Bauteilen, bei Komponenten mit Hochglanzoberflächen sowie bei der Erzeugung funktionaler Mikro- und Nanostrukturen.

Alexander Fromm, Dr. Frank Burmeister

Temperatur in $^{\circ}\text{C}$



Temperatur in $^{\circ}\text{C}$



1 Ausschnitt der zugehörigen Thermografiemessung (oben); Temperaturverlauf einer Dünnschichtheizung (unten).

WARUM SIND KERAMIKEN NICHT NUR SPRÖDE?

Die Erfahrung zeigt: Metalle sind bei Raumtemperatur duktil verformbar, keramische Materialien zerbrechen spröde. Experimentell wurde beobachtet, dass technologisch wichtige Keramiken mit Perowskit-Kristallstruktur sich unerwartet verhalten können. Bei niedrigen Temperaturen sind sie verformbar, bei hohen Temperaturen dagegen spröde. Was verursacht dieses untypische Verhalten?

Versetzungen modellieren

Die Verformbarkeit von kristallinen Materialien hängt mit der Bewegung mikroskopischer linearer Strukturfehler zusammen, den Versetzungen. Diese können heute mit Elektronenmikroskopie sehr genau analysiert werden. Für ein solides Verständnis der Ursachen für Verformbarkeit oder Sprödigkeit sind physikalische Modellbildung und Computersimulationen auf der atomaren Skala hilfreich. Die Modellierung von Versetzungen in Perowskiten ist eine besondere Herausforderung, da diese Materialien durch eine komplexe Mischung von kovalenten und ionischen Bindungen zwischen Atomen zusammengehalten werden.

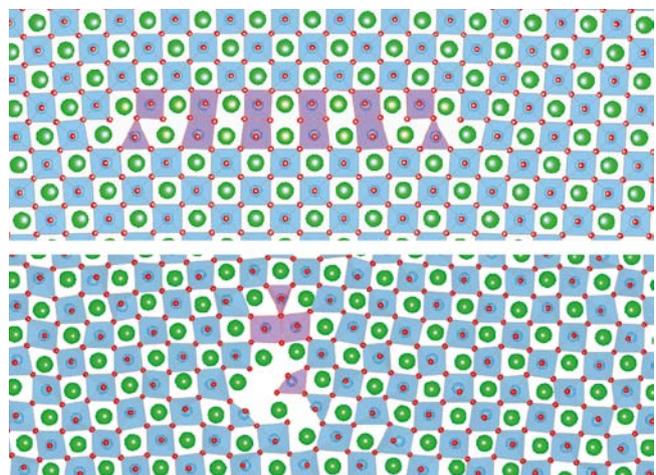
Verhalten verstehen

Um die Eigenschaften von Versetzungen in Perowskiten besser zu verstehen, wurden am Fraunhofer IWM mit quantenmechanischen und klassischen Methoden atomistische Simulationen für $\langle 110 \rangle$ -Versetzungen in Strontiumtitanat (SrTiO_3), einer prominenten Perowskit-Verbindung, durchgeführt. Diese Versetzungen in SrTiO_3 wurden experimentell als wahrscheinlichste Ursache für die untypische Verformbarkeit bei tiefer Temperatur identifiziert. Mit den atomistischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass es für eine $\langle 110 \rangle$ -Versetzung energetisch günstiger ist, sich in zwei halbe $\langle 110 \rangle$ -Partialversetzungen aufzuspalten, die

durch einen planaren Strukturfehler, einen Stapelfehler, getrennt sind. Da die Bildung des Stapelfehlers einen Energieaufwand erfordert, bleiben die beiden Partialversetzungen aneinander gebunden und werden breit ausgedehnt ($\sim 40\text{--}50 \text{ \AA}$). Eine solche Versetzungskonfiguration kann durch eine kleine mechanische Last bewegt werden. Damit lässt sich die Verformbarkeit von SrTiO_3 bei niedrigeren Temperaturen erklären.

Bei höheren Temperaturen ändert sich die atomistische Struktur der Versetzung, wodurch deren Beweglichkeit stark eingeschränkt wird. Damit wird auch die Sprödigkeit bei hohen Temperaturen verständlich.

Dr. Pierre Hirel, Dr. Matous Mrovec



1 Atomistische Struktur des $\langle 110 \rangle$ -Versetzungskernes in SrTiO_3 bei tiefer (oben) und hoher (unten) Temperatur.

Kern des Geschäftsfelds ist die Bewertung der Sicherheit und Lebensdauer von Bauteilen unter den jeweiligen betriebsrelevanten Beanspruchungen. Hierzu müssen die Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur, der Beanspruchungsart (monoton, zyklisch) und der Beanspruchungsgeschwindigkeit (statisch, dynamisch/crashartig) experimentell bestimmt und entsprechenden Werkstoffmodellen für die Bauteilbewertung durch numerische Simulation zugeführt werden.

Die Werkstoffmodellierung erfolgt dabei auf der Grundlage experimentell abgeleiteter und physikalisch basierter Mechanismen des Verformungs- und Versagensverhaltens der jeweiligen Werkstoffe. Neben deterministischen Konzepten werden dabei auch probabilistische Methoden entwickelt und eingesetzt, die die Streuung der Werkstoffeigenschaften und Fehlerverteilungen berücksichtigen. Für ihre Anwendung entwickeln wir in der Regel Software-Werkzeuge, die in der industriellen Praxis für die Bauteilbewertung eingesetzt werden.

Typische Problemstellungen sind die Sicherheits- und Lebensdauerbewertung von Kraftwerk-, Turbinen und Automobilkomponenten, wobei einerseits die bruchmechanisch basierte Fehlerbewertung für statische Festigkeit, Ermüdung und Stoßbelastung von Bauteilen und andererseits die Bewertung der Lebensdauer aufgrund mechanischer, thermischer und thermomechanischer Ermüdungsbeanspruchung im Vordergrund stehen. Im Automobilbereich spielt zusätzlich die Crashesicherheit eine zentrale Rolle. Für automobilrelevante Werkstoffe und Fügeverbindungen entwickeln wir entsprechende Versagensmodelle, validieren sie an Versuchen und stellen sie den Industriekunden für deren spezielle Anwendungen zur Verfügung.

Bemerkenswertes aus 2011

Die rechnerische und experimentelle Bewertung von Bauteilen und Werkstoffen unter dynamischen Belastungen, beispielsweise beim Crash, gewinnt zunehmend an Bedeutung. Für neue Werkstoffe und Fügeverbindungen, wie Kunststoffe, Verbundwerkstoffe, Schäume oder Klebverbindungen, die zur Umsetzung von Leichtbaukonzepten und der Elektromobilität im Fahrzeugbau eingesetzt werden, entwickelten wir 2011 neue Versuchskonzepte auch für mehrachsige Beanspruchung. Zudem entwickelten wir rechnerische Modelle zur Versagensbewertung und setzten sie erfolgreich in verschiedenen Projekten ein.

Der Bereich der Energietechnik strebt zur Erhöhung des Wirkungsgrads immer höhere Betriebstemperaturen bei neuen fossilen Kraftwerken an. Die mechanischen Werkstoffeigenschaften der eingesetzten Hochtemperaturwerkstoffe werden dabei zunehmend von mikrostrukturellen Änderungen im Werkstoff beeinflusst. Wir haben damit begonnen, solche thermisch aktivierten Vorgänge als Bestandteil der am Fraunhofer IWM entwickelten Lebensdauer-Software für thermomechanische Ermüdung numerisch zu modellieren.

Gruppe

Anlagensicherheit, Bruchmechanik

Mit experimentellen und rechnerischen Methoden, insbesondere der Bruch- und Schädigungsmechanik, wird das Werkstoff- und Bauteilverhalten herkömmlicher und neuer Leichtbauwerkstoffe unter statischer bis Stoßbelastung analysiert und die Sicherheit und Verfügbarkeit von Komponenten bewertet.

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

Gruppe

Crashsicherheit, Schädigungsmechanik

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

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

Gruppe

Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik

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

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

*Dr. Dieter Siegele
Geschäftsfeldleiter*



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

ANLAGENSICHERHEIT, BRUCHMECHANIK

Dr. Dieter Siegele

dieter.siegele@iwm.fraunhofer.de

CRASHSICHERHEIT VON ALUMINIUM-SCHWEISSVERBINDUNGEN

Zur Gewährleistung der passiven Sicherheit von Fahrzeugen müssen die häufig eingesetzten Schweißverbindungen von Strukturbauteilen sowohl genügend Festigkeit als auch gute Verformungseigenschaften aufweisen. Im Rahmen eines AiF-geförderten Vorhabens wurde der Einfluss von lokalen Werkstoffeigenschaften, der Belastungsgeschwindigkeit und Eigenspannungen auf das Verformungs- und Versagensverhalten MIG-geschweißter Al-Legierungen (AW6060 und AW7003) systematisch untersucht, quantifiziert und im Hinblick auf die Crashesicherheit bewertet.

Bauteil-Crashversuche

Als Demonstratorbauteile wurden Kehlnaht-geschweißte Crashboxen verwendet. Die Belastung erfolgte quer zur Längsrichtung des Hohlprofils der Crashboxen, um die Kehlnaht maximal bis zur Belastungsgrenze zu beanspruchen (Abbildung 1). Hierzu wurde das Zweikammer-Hohlprofil durch Aluminium-Kerne verstärkt. Es wurden sowohl statische Versuche als auch Bauteil-Crashtests in einer Fallgewichtsanlage durchgeführt (Masse: 270 kg, Aufschlaggeschwindigkeit: 3 m/s).

Zusätzlich zum Kraftverlauf wurde auch die Verformung der Crashboxen mit zwei Hochgeschwindigkeits-Videokameras aufgezeichnet. Mit ARAMIS® wurden die lokalen Dehnungsfelder im Schweißnahtbereich mit einer 3D-Analyse ermittelt (Abbildung 2). Aufgrund des Aufschlags ist das Signal der Piezo-Kraftmesszelle von Schwingungen überlagert, der mittlere Kraftverlauf ist bis zum Versagen aber gut auswertbar. Die ermittelten lokalen technischen Dehnungen bei Versagensbeginn betragen in der Kehlnaht der Crashboxen mehr als 20 Prozent. Als Ursache für das Versagen im Schweißgut ist vor allem die Mismatch-Situation

mit dem deutlich niedrigeren Festigkeitsniveau des Schweißguts im Vergleich zum Grundwerkstoff anzusehen, die bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten sogar noch zunimmt. Darum kommt es dort mit zunehmender Beanspruchung zu einer Dehnungslokalisation.

Analyse des Versagensverhaltens

Um das Verformungs- und Versagensverhalten der Schweißverbindungen rechnerisch zu analysieren, wurde ein Materialmodell verwendet, das ein dehnratenabhängiges Plastizitätsmodell sowie ein Versagensmodell nach Gurson mit einem zusätzlichen Versagenskriterium nach Johnson-Cook enthält. Dieses Modell erlaubt sowohl die Beschreibung des Werkstoffversagens unter Zug- als auch unter Scherbeanspruchung. Für den Grundwerkstoff wurden die Modellparameter aus Zugversuchen an glatten und gekerbten Proben sowie aus Scherversuchen bestimmt. Für das Schweißgut konnten die Parameter aufgrund des geringen verfügbaren Werkstoffvolumens nur aus Zugversuchen ermittelt werden. Mit den so abgeleiteten Werkstoffparametern wurde eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten sowohl im globalen Kraft-Verformungsverhalten als auch im berechneten Versagensort erzielt. Das lokale Versagen im Bereich des Schweißguts erfolgt in den Berechnungen durch Erreichen der kritischen Gurson-Parameter.

Schweißen induziert Eigenspannungen

Die zusätzliche Simulation des Schweißprozesses liefert Eigenspannungen im Bereich der Schweißnaht, die etwa der Hälfte der Streckgrenze des Grundwerkstoffs entsprechen. Diese Eigenspannungen wurden als Anfangsbedingungen



Mit Drahterosion aus der Schweißnaht herauspräparierter Rohling und daraus gefertigte Mini-Rundzugprobe mit etwa 1,8 mm Prüfdurchmesser.

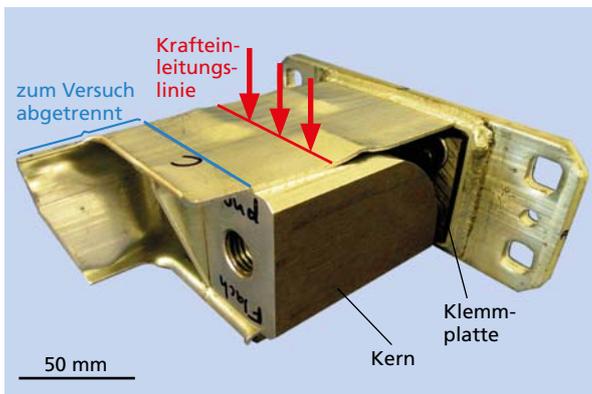
auf das FE-Modell für die Crashsimulationen übertragen. Die Ergebnisse zeigen einen vernachlässigbaren Einfluss der Schweißbeigenspannungen auf das Verformungs- und Versagensverhalten der Crashboxen.

Erfolgreiches Simulationsmodell

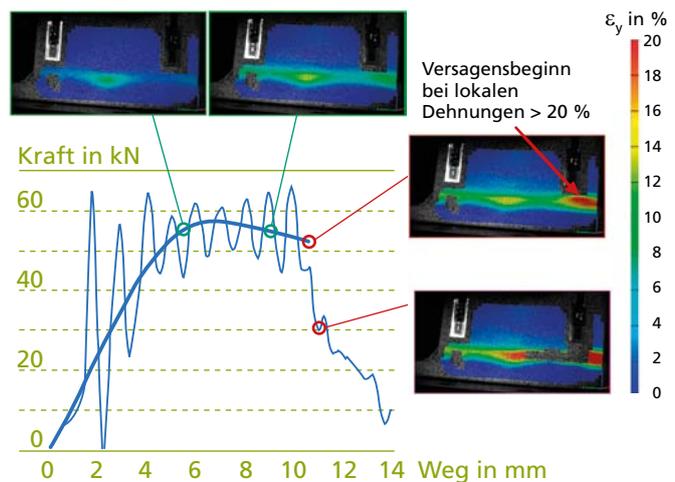
Die Ergebnisse zeigen: Die Verwendung der Schweißzonen-spezifischen, dehnratensabhängigen Fließkurven sowie eine ausreichend feine Diskretisierung im Bereich des Schweißguts sind für die rechnerische Analyse und

eine zuverlässige Bewertung der Belastbarkeitsgrenze erforderlich. Die verwendete Modellkombination ist zur Beschreibung des Versagensverhaltens gut geeignet, wobei sich für das Schweißgut eine alleinige Beschreibung mit dem Gurson-Modell als gute Näherung erwies. Ersatzweise ist eine konservative Versagensmodellierung über eine aus der Bruchdehnung des einachsigen Zugversuchs abgeleitete Grenzdehnung möglich.

Dr. Wolfgang Böhme, Dr. Dieter Memhard



1 Belastung der Crashboxen zur Maximierung der Schweißnaht-Beanspruchung.



2 Analyse eines Crashboxen-Crashtests mit Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen und einer 3D-Dehnungsfeldanalyse mit ARAMIS®, $v_0 = 3 \text{ m/s}$.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe
CRASHSICHERHEIT, SCHÄDIGUNGSMECHANIK

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

CRASHSICHERHEIT VON ELEKTROFAHRZEUG-KOMPONENTEN

Zur Gewährleistung der Crashesicherheit des Fraunhofer-Elektrofahrzeugs Frecc0 wurde das Verformungs- und Versagensverhalten des Heckrahmens, der das Batteriepack umschließt, vorausgerechnet und mit realen Versuchen verglichen. Das Ziel dieser Untersuchungen war der Nachweis, dass die Batterie bei einem Heckaufprall (nach ECE 34 Verhütung von Brandgefahr) durch die umgebende Struktur ausreichend geschützt wird.

Werkstoffcharakterisierung und -modellierung

Eine zuverlässige Bauteilbewertung setzt die Kenntnis der Werkstoffeigenschaften voraus. Zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften der Aluminiumwerkstoffe im Stoßfänger wurden verschiedene Zugversuche an Glattzug-, Kerbzug- und Scherproben durchgeführt. Im Anschluss wurden die Versuche zur Kalibrierung des Versagensmodells numerisch simuliert. Die Einflüsse der Mehrachsigkeit und der Elementgröße auf die Bruchdehnung sind im Versagensmodell berücksichtigt.

Vorhersage des Schadensbilds und Identifizierung der Schwachstellen

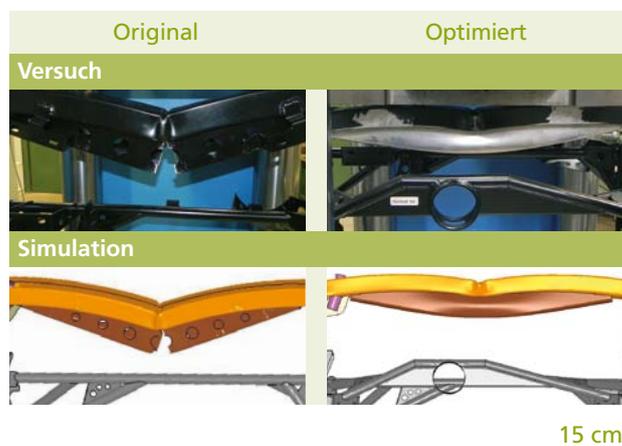
Sowohl die Vorausrechnung als auch die später durchgeführten Bauteilversuche am originalen Heckrahmen zeigten beim Heck-Crash eine Intrusion des Stoßfängers in den Batterieraum.

Die Schwachstellen des Heckrahmens wurden durch die Crashsimulationen identifiziert. Schwachstellen waren dann vor allem der Bruch in der Mitte des Stoßfängers sowie die Neigung der Crashboxen, wegzuknicken anstatt sich zu falten, und eine zu weiche Anbindung der Crashboxen an den restlichen Rohrahmen.

Optimierung Heckrahmen und Wirksamkeit

Zur Optimierung des Heckrahmens wurde die Steifigkeit der Crashboxen durch strukturelle Veränderungen herabgesetzt, der Stoßfänger mit einem optimierten Versteifungsblech verstärkt und die Anbindung des Stoßfängers an den Rohrahmen durch eine neue Konstruktion des Industriepartners verbessert. Die gesteigerte Wirksamkeit dieser Überarbeitungen wurde in vergleichenden quasistatischen Bauteilversuchen und den entsprechenden Simulationen bewiesen. Abbildung 1 zeigt die Verbesserung im Verformungs- und Versagensverhalten des Stoßfängers in Experiment und Simulation. Das Resultat dieser umfassenden Arbeiten ist ein optimierter Heckrahmen, der im Fraunhofer-Demonstrationsfahrzeug Frecc0 umgesetzt wird und die erforderliche Crashesicherheit nach ECE 34 gewährleistet.

Dr. Dong-Zhi Sun, Armin Schley



1 Vergleich des Verformungsverhaltens des originalen und optimierten Heckrahmens in Versuch und Simulation.

LEBENSDAUERVORHERSAGE BEI KOMBINIERTER NIEDER- UND HOCHFREQUENTER BELASTUNG

In Motoren, Turbinen- oder Abgaskomponenten treten durch Start- und Stopp-Zyklen thermomechanische Wechselbelastungen auf. An kritischen Stellen ist die mechanische Belastung meist ausreichend, um nach wenigen Lastwechseln erste Mikrorisse zu erzeugen. Die Lebensdauer der Komponente wird hauptsächlich durch das Risswachstum bestimmt, das zudem häufig durch hochfrequente Belastungen, beispielsweise Zündvorgänge, beschleunigt wird.

Risswachstumsversuche

Das Wachstum kurzer Ermüdungsrisse wurde mithilfe der Replika-Technik beobachtet. Für verschiedene Werkstoffe zeigt sich, dass zusätzliche hochfrequente Belastungen ab einer kritischen Risslänge das Risswachstum beschleunigen können. Diese kritische Risslänge ist abhängig von der Belastungsamplitude der hochfrequenten Überlagerung.

Materialmodell

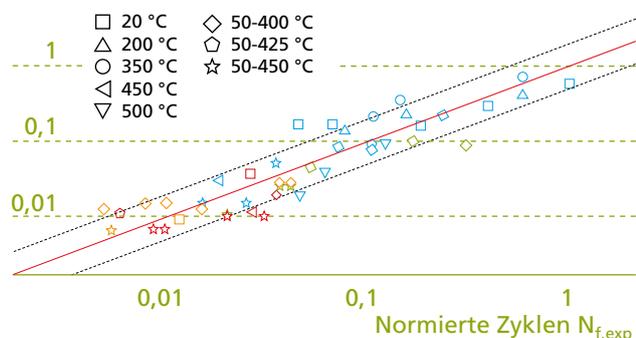
Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit der Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen wurde ein Deformations- und Lebensdauermodell als Materialunterroutine für Abaqus-Standard implementiert. Das Deformationsmodell ist in der Lage, zeit- und temperaturabhängige zyklische Wechselplastizität von Eisengusswerkstoffen zu beschreiben. Ergänzt wird es mit einem Modell für Risswachstum, das auf einer bruchmechanischen Abschätzung der zyklischen Risspitzenöffnung beruht. Zur Berechnung der Risslängenentwicklung unter kombinierter hoch- und niederfrequenter Belastung wird angenommen, dass jeder einzelne hochfrequente Belastungszyklus zum Rissfortschritt beiträgt, sofern die Belastung größer als der Schwellenwert für Ermüdungsrisswachstum ist.

Simulation versus Experiment

Verschiedene isotherme (LCF) und thermomechanische (TMF) Ermüdungsversuche mit und ohne hochfrequente Überlagerung (HCF) wurden für die Werkstoffe EN GJS700, EN GJV450 und EN GJL250 durchgeführt. In Abbildung 1 sind die vom Modell vorhergesagten und die experimentell bestimmten Lebensdauern ($N_{f,sim}$ und $N_{f,exp}$) für EN GJV450 dargestellt. Die rote Linie entspricht der idealen Modellvorhersage, die gestrichelten Linien stellen ein Streuband von Faktor 2 dar. Die Symbolform bezieht sich auf die Versuchstemperatur der isothermen LCF beziehungsweise die Temperaturschwingbreite der TMF-Versuche. Mit der Implementierung des Modells als Benutzerunterroutine in Finite-Elemente-Programme wird der Bogen von der Forschung zur direkten Anwendung in der Industrie gespannt.

Mario Metzger, Christoph Schweizer

Normierte Zyklen $N_{f,sim}$



1 Experimentell ermittelte sowie berechnete Zyklen (normiert auf max. $N_{f,exp}$) bis zum Versagen für EN GJV450. Blaue Symbole: ohne HCF-Überlagerung; grüne, rote und orangene Symbole: Versuche mit zunehmender HCF-Belastung.

Wir unterstützen unsere Auftraggeber bei der Auswahl und Substitution von Werkstoffen, der Bewertung und Optimierung von Fertigungsschritten und der Charakterisierung des Festigkeits- und Einsatzverhaltens von Werkstoffen, Werkstoffverbunden und Bauteilen. Die Simulation und experimentelle Aufklärung der Mikrostruktur von Werkstoffen, deren Veränderung durch beispielsweise formgebende Verfahren, thermisches Fügen oder durch die Betriebsbeanspruchungen stehen im Fokus der Arbeiten. Es werden Lösungsvorschläge zum Design, zur Beeinflussung des Eigenspannungszustands und zur Optimierung der Herstellungs- und Beanspruchungsbedingungen erarbeitet. Die schadungsfreie Formgebung und Umformung schwer verformbarer Metalle profitiert von der mikrostrukturbasierten Simulation der Gefüge- und Schädigungsentwicklung bei diesen Prozessen. Für die Bewertung von Schadensfällen steht auch ein öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger zur Verfügung.

Bemerkenswertes aus 2011

Zusammen mit drei weiteren Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft entwickeln wir in dem strategischen Projekt SUPERGRID Schlüsseltechnologien zur Einspeisung erneuerbarer Energien ins Netz. In Zusammenarbeit mit den Geschäftsfeldern Bauteilsicherheit und Fertigungstechnologie des Fraunhofer IWM bauen wir Kompetenzen und Versuchseinrichtungen zur Bewertung von Werkstoffen in Speichern und Wärmetauschern thermischer Solaranlagen auf. Die derzeit favorisierten Wärmeträger- und Speichermedien sind geschmolzene Salze, die während des Tag- und Nachtzyklus wechselnde Temperaturen zwischen etwa 200 °C bis 550 °C aufweisen. Metallische Werkstoffe der konventionellen thermischen Kraftwerke müssen deshalb zusätzlich zur thermomechanischen Belastung für überlagerte korrosive Belastungen qualifiziert und Schutzkonzepte müssen abgeleitet werden.

Zur Bewertung von Leichtbaustrukturen im Fahrzeugbau haben wir experimentelle Methoden weiter ausgebaut: beispielsweise eine servohydraulische Torsionsprüfanlage für Momente bis 4 kNm sowie ein klimatisierter Shaker für Vibrations- und Shocktests. Mit dem Shaker wurden beispielsweise Untersuchungen zur Verbesserung des Ermüdungsverhaltens von Fügeverbindungen, Dichtigkeit, Kontaktierung und Funktionalität von Kühlsystemen für Batteriemodule der Elektromobilität begonnen. Die Bewertung des Kriechverhaltens von Polymerblends und Faserkunststoffverbunden bei Raumtemperatur sowie unter Einfluss von Temperatur und Feuchte wurde durch den Aufbau hochauflösender optischer Messsysteme verbessert.

Gruppe

Mikrostruktur- und Schadensanalyse

Wir untersuchen den Einfluss von Herstellungsverfahren und Betriebsbeanspruchungen auf die Mikrostruktur und Schädigung von Werkstoffen und Bauteilen. Unser Schwerpunkt ist die Aufklärung von Degradationsmechanismen der Korrosion, Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprödung. Dafür sind experimentelle Methoden wie Permeationsprüfungen bei überlagerter mechanischer Belastung sowie numerische Methoden wie die thermodynamische Simulation der Gefügeausbildung im Einsatz. Bei akuten Schadensfällen unterstützen wir unsere Kunden durch Gutachten und Klärung der technischen Verantwortung.

Dr. Wulf Pfeiffer

wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de

Gruppe

Ermüdungsverhalten, Eigenspannungen

Wir entwickeln experimentelle und numerische Methoden zur statischen und zyklischen Festigkeitsbewertung hochbelasteter Werkstoffe, Bauteile und Fügeverbindungen. Bei Leichtbau-

strukturen stehen Hybridverbunde wie Faserverbundwerkstoffe mit metallischen Inserts oder langfaserverstärkte Thermoplasten mit UD-Tapes im Fokus. Zudem betrachten wir Verfahren zur Bestimmung und Beeinflussung von Eigenspannungszuständen, Wärmewirkungen von Schweißungen und Wärmebehandlungen sowie Einflüsse der Wasserstoffversprödung.

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

Gruppe

Verbundwerkstoffe

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

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

Gruppe

Formgebungs- und Umformprozesse

Wir analysieren, bewerten und optimieren auf Basis werkstoffmechanischer Modellierungsansätze und Simulationen Formgebungs- und Umformprozesse, zugehörige Werkzeuge und Fertigungsschritte. Zudem verknüpfen wir die Mikrostruktur von Werkstoffen mit den Werkstoffeigenschaften. Wir sagen das Einsatzverhalten von Bauteilen vorher und bestimmen davon ausgehend »rückwärts« ein optimiertes Werkstoff- und Bauteildesign.

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

Dr. Wulf Pfeiffer
Geschäftsfeldleiter



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

ERMÜDUNGSVERHALTEN, EIGENSPANNUNGEN

Dr. Michael Luke

michael.luke@iwf.fraunhofer.de

BEWERTUNG DER KALTRISSICHERHEIT BEIM SCHWEISSEN

Bei den seit vielen Jahren erfolgreich im Fahrzeug- und Maschinenbau eingesetzten hochfesten Stählen können Risse im erkalteten Bauteil (Kaltrisse) unmittelbar oder auch erst nach Stunden oder Tagen zum Versagen der Schweißverbindungen führen. Diese Risse werden durch die Aufnahme von Wasserstoff bei der Halbzeug-Herstellung begünstigt und können am Bauteil beim Schweißen oder während des Einsatzes entstehen. Die Konstruktion und Entwicklung geschweißter Bauteile aus hochfesten Stählen ist deswegen mit einem finanziell und zeitlich hohen Aufwand für die experimentelle Bewertung der Kaltrissicherheit verbunden. Die für die Kaltrissbildung maßgebliche Spannung und Wasserstoffkonzentration zu erfassen, ist messtechnisch nicht oder nur sehr schwer zu realisieren.

Im vom BMBF geförderten Vorhaben »Simulationsgestützte Vorhersage der Kaltrissicherheit beim Schweißen von hochfesten Stählen« werden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS Grundlagen zur Ermittlung der Zusammenhänge wasserstoffinduzierter Kaltrissbildung beim Schweißen erarbeitet. Das Ziel ist, die Kaltrissicherheit von Bauteilen unter Verwendung von numerischen Simulationen bewerten zu können, um Prozessoptimierungen zeit- und kostengünstig bereits im Entwurfstadium zu überprüfen.

Kaltriss-Einflussfaktoren

Im experimentellen Teil der Arbeiten werden Kaltriss-Einflussfaktoren beim Schweißen charakterisiert. Hierfür werden Schweißversuche mit unterschiedlicher Wasserstoffkonzentration und bei verschiedenen Spannungszuständen durchgeführt. Für die Ermittlung des Eigenspannungseinflusses werden Schweißungen mit zeitabhängig aufgebrachtener mechanischer Last an

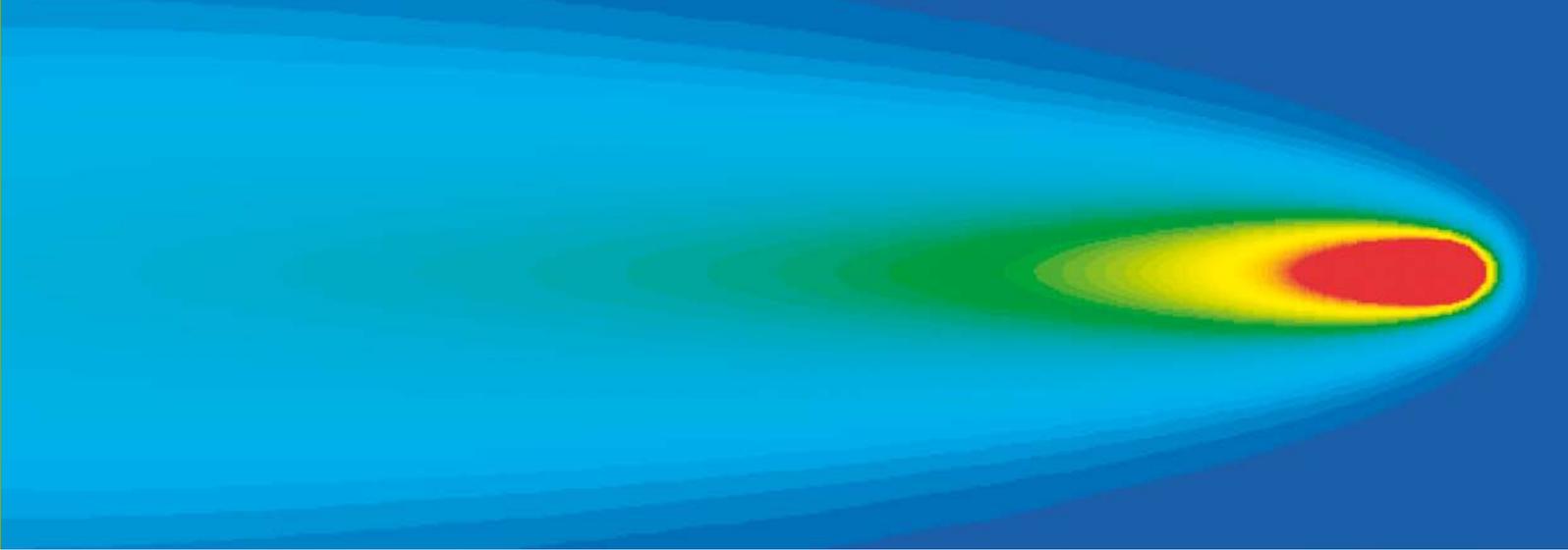
verschiedenen hochfesten Werkstoffen durchgeführt. In den Schweißproben werden vor dem Schweißen über kathodische Wasserstoff-Beladung unterschiedliche Wasserstoffkonzentrationen eingestellt. Das Gefüge wird über metallografische Auswertungen sowie Härtemessungen beurteilt.

Schweißprozess simulierbar machen

Der simulationsseitige Teil der Arbeiten dient der Werkstoffcharakterisierung und der Modellierung des Schweißprozesses. Besonders hervorzuheben ist hierbei neben der bereits etablierten Simulation von Temperaturfeldern und Spannungs-Dehnungs-Zuständen eine neu eingesetzte Methode zur Simulation der Wasserstoffdiffusion im Bauteil. Sie berücksichtigt verschiedene Bindungsmöglichkeiten des Wasserstoffs, die Abhängigkeit von Temperatur und den Spannungs-Dehnungs-Zustand des Materials. Abbildung 1 zeigt die einzelnen Simulationsschritte. In der Farbskalierung entspricht jeweils blau einem niedrigen und rot einem hohen Wert.

Verbesserungsmaßnahmen bewerten

Abbildung 2 zeigt die sich zeitlich entwickelnden Größen, die zu Kaltrissen führen, in einem einzelnen Finiten Element in der Wärmeeinflusszone. Anhand eines werkstoffabhängigen Kriteriums können die kaltrissgefährdeten Bereiche für jedes Finite Element eines simulierten Bauteils ausgewertet werden. Dies wird über den Vergleich einer von der Wasserstoffkonzentration abhängigen kritischen Spannung mit den lokalen Größen der Schweiß-Eigenspannungen erreicht. Somit ist es auch möglich, die Wirkungen von Maßnahmen gegen Kaltrisse in der Simulation vorauszuberechnen,



FEM-Simulation eines Laserstrahl-Schweißprozesses.

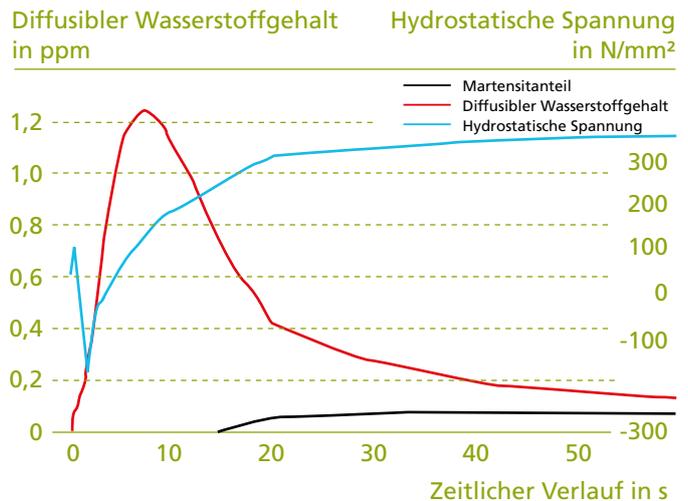
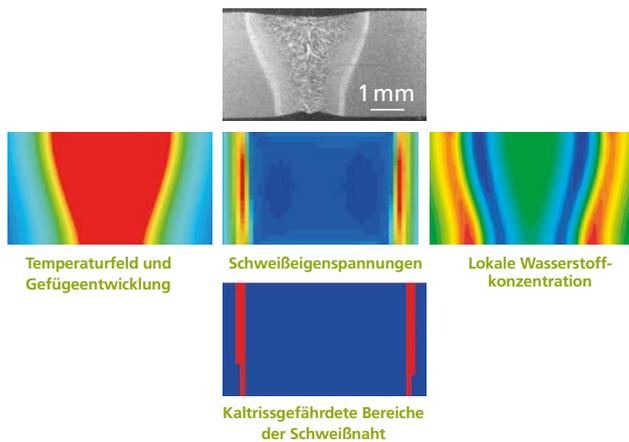
beispielsweise die Auswirkung von Vorwärmung, Nachwärmung oder Änderung der Schweißparameter.

Die Anwendung simulationsgestützter Methoden in der Schweißtechnik führt zu einem verbesserten Verständnis des Schweißprozesses und der kaltrissbildenden Einflussgrößen

eines Bauteils. Hierdurch lassen sich kosten- und zeitintensive Versuche zur Prozessoptimierung verringern, was zu kürzeren Entwicklungszeiten sowie einer höheren Produktsicherheit beiträgt.

Frank Schweizer

Laserstrahlgeschweißte Blindnaht auf hochfestem Stahl



1 Laserstrahlgeschweißte Blindnaht auf hochfestem Stahl, um die Kaltrissneigung bei mechanischen Lasten und Wasserstoffkonzentrationen zu testen (oben). Simulationsschritte zur Auswertung kaltrissgefährdeter Bereiche in einem laserstrahlgeschweißten Blech aus hochfestem Stahl (unten). Hohe Werte sind jeweils rot, niedrige Werte jeweils blau dargestellt.

2 Lokale Auswertung kaltrissbeeinflussender Größen in einem Bauteil mittels Simulation.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

FORMGEBUNGS- UND UMFORMPROZESSE

Dr. Dirk Helm

dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

WARMUMFORMUNG VON TITANLEGIERUNGEN

Titanlegierungen sind aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften wie dem günstigen Verhältnis zwischen Gewicht und Festigkeit, der guten Duktilität, der hohen thermischen Belastbarkeit sowie Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität ein idealer Werkstoff für die Luftfahrt, Medizintechnik und viele weitere hochtechnologische Bereiche.

Bei der Bauteilherstellung kommen oftmals aufwändige Zerspanprozesse mit hohem Materialverbrauch zum Einsatz. Ab einer bestimmten Stückzahl sind Umformprozesse wesentlich effizienter und kostengünstiger, wobei die Blechumformung im Bereich der Titanverarbeitung besondere Anforderungen an die eingesetzten Fertigungsverfahren stellt. Blechwerkstoffe aus Titanlegierungen werden typischerweise bei höheren Temperaturen umgeformt, um ausreichende Umformgrade zu erreichen. Um aufwändige und kostenintensive Versuche zur Prozess- und Bauteilauslegung auf ein Minimum zu reduzieren, spielt die Simulation hierbei eine immer größere Rolle. Am Fraunhofer IWM werden zu diesem Zweck spezielle Materialmodelle entwickelt, anhand von Experimenten angepasst und an einfachen Umformprozessen validiert, um das Verhalten von komplexen Bauteilen möglichst genau zu simulieren.

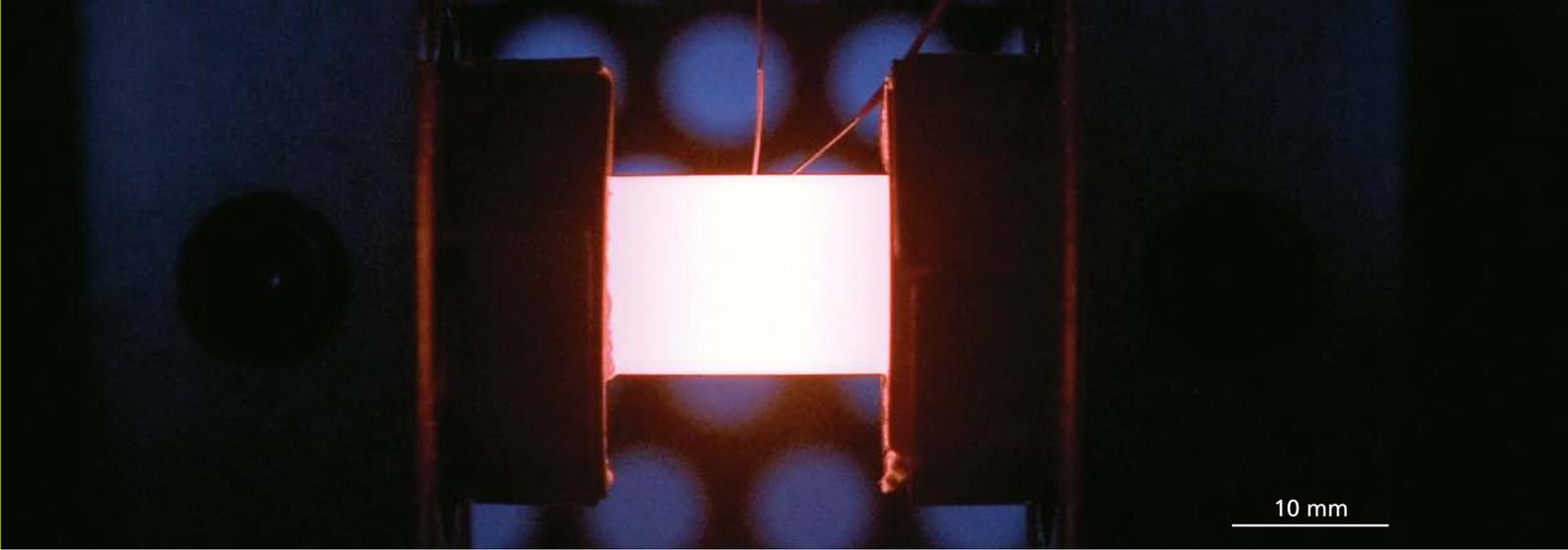
Hohe Heizraten und hohe Umformgeschwindigkeiten

Zuerst werden die Materialeigenschaften der untersuchten Titanwerkstoffe experimentell bestimmt. Hierzu werden am Fraunhofer IWM Warmzug- und Warmstauchversuche bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten durchgeführt. Neben Standard-Universalprüfmaschinen kommt eine »Gleeble«-

Prüfmaschine zum Einsatz. Bei dieser Versuchseinrichtung können Proben mechanisch sowie durch konduktive Erwärmung thermisch belastet werden. Dabei können hohe Heiz- beziehungsweise Abkühlraten und hohe Umformgeschwindigkeiten realisiert werden. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse von Warmzugversuchen eines Titanblechs bei verschiedenen Temperaturen und konstanter Dehnrate. Um den Wärmehaushalt in thermomechanisch gekoppelten Simulationsmodellen zu berücksichtigen, ist zudem die Bestimmung der thermophysikalischen Größen erforderlich. Im Thermophysikalischen Labor des Fraunhofer IWM können der Längenausdehnungskoeffizient, die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit mittels Dilatometer (bis 1 650 °C), Differential Scanning Calorimetry (DSC, bis 1 650 °C) und Laser-Flash-Apparatur (LFA, bis 2 000 °C) bestimmt werden.

Phänomenologische Modelle

Die experimentell ermittelten Daten werden zur Anpassung der am Fraunhofer IWM entwickelten Materialmodelle genutzt. Zur Simulation von Blechumformprozessen wird das Werkstoffverhalten auf makroskopischer Ebene mittels phänomenologischer Modelle beschrieben. Sie sind in der Lage, die besonderen Eigenschaften der Titan-Blechwerkstoffe abzubilden. Das komplexe Materialverhalten dieser Blechwerkstoffe sowie die ausgeprägte Blechanisotropie und das Warmfließverhalten stellen dabei besondere Herausforderungen an das Materialmodell. In Abbildung 2 sind zwei simulierte Titannäpfe dargestellt. Sie wurden bei Raumtemperatur und bei 600 °C unter Einsatz eines geeigneten Werkstoffmodells tiefgezogen.



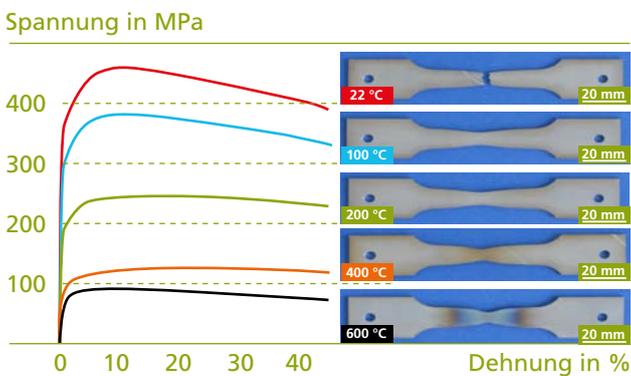
Zylinderstauchversuch an Titan bei 950 °C an der thermomechanischen Umformanlage Gleeble.

Titan – ein Sonderfall

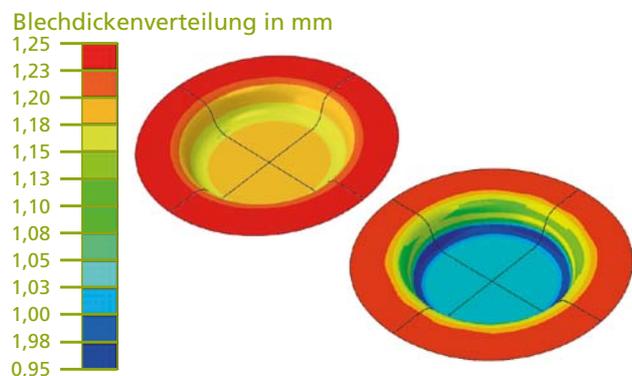
Bei Titanlegierungen ist das Prozessfenster aufgrund der beiden Parameter Temperatur und Dehnrates deutlich größer als bei typischen Blechumformprozessen. So werden Prozesstemperaturen von bis zu 850 °C bei geringen Umformgeschwindigkeiten erreicht. Außerdem neigt Titan sehr stark zu so genannten »Reißen«. Das Ziel ist daher, durch Simulation ein geeignetes Prozessfenster zu bestimmen, um

damit im Vorfeld mögliche Schwachstellen im Bauteil zu vermeiden und einen optimalen Herstellungsablauf erreichen zu können. Diese Möglichkeit der Simulation führt zu enormen Kosteneinsparungen, da aufwändige Prototypen-Versuche nach dem Prinzip »Versuch und Irrtum« auf ein Minimum reduziert werden.

Andre Koch, Matthias Tritschler



1 Technische Spannungs-Dehnungs-Kurven von Titan in Abhängigkeit von der Temperatur.



2 Blechdickenverteilung an einem Titan-Napf mit 100 mm Durchmesser bei Raumtemperatur (links) und bei 600 °C (rechts).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

MIKROSTRUKTUR- UND SCHADENSANALYSE

Dr. Wulf Pfeiffer

wulf.pfeiffer@iwm.fraunhofer.de

BEWERTUNG DES GEFÜGES VON BLECHWERKSTOFFEN BEIM WALZEN

Gewalzte Metalllegierungen sind die Ausgangsmaterialien bei der Verarbeitung von Blechteilen. Durch das Walzen erhält das Blech bereits spezifische Eigenschaften, die weitere Verarbeitungsschritte wesentlich beeinflussen. Um auszumachen, welche Veränderungen der Walzprozess im Werkstoff bewirkt, sind detaillierte Untersuchungen der Mikrostruktur notwendig.

Warm- und Kaltwalzprozesse

Während des Warmwalzens werden Poren aus dem Gießprozess geschlossen und das Material rekristallisiert. Dabei bilden sich günstige Korngefüge aus. Dadurch bleibt der Werkstoff für weitere Umformprozesse gut verformbar und zeigt in der Regel geringere Eigenspannungen sowie eine weniger stark ausgeprägte Richtungsabhängigkeit in den mechanischen Eigenschaften. Beim Kaltwalzen kann die Blechdicke mit großer Genauigkeit eingestellt werden. In Abhängigkeit vom jeweiligen Werkstoff ist es günstig, dass das Material kaltverfestigt und damit im Einsatz bessere mechanische Eigenschaften aufweist.

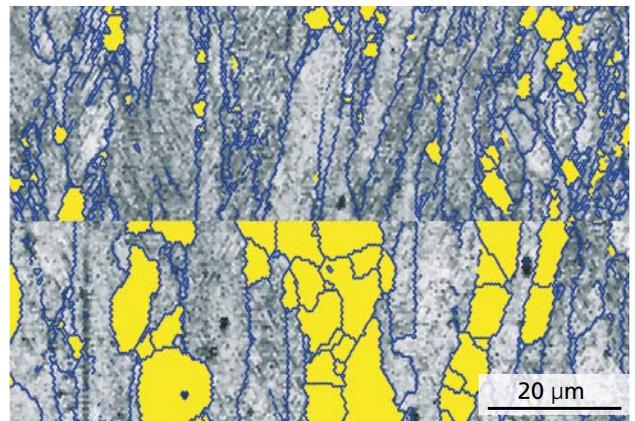
Kaltwalzen und Rekristallisation

Abbildung 1 zeigt einen kaltgewalzten Tiefziehstahl aus dem Fahrzeugbau, der einer anschließenden Glühbehandlung unterworfen wurde. Das Material ist nicht vollständig rekristallisiert. Mittels Electron Backscatter Diffraction (EBSD) und geeigneten numerischen Auswerterroutinen lassen sich rekristallisierte Bereiche des Gefüges (gelb eingefärbt) von denjenigen Bereichen exakt unterscheiden, die sich noch im verformten Zustand befinden. Weiterführende Untersuchungen ermöglichen zudem – in Abhängigkeit von Umformgrad und Temperatur-Zeit-Verlauf des Walzprozesses – Korngröße, Kornform, Textur und lokale Missorientierungen im Gefüge zu bestimmen.

Mikrostrukturelle Größen in Simulationen

Am Fraunhofer IWM wurden ein- und mehrphasige Stahlbleche sowie Aluminium-, Nickel- und Titanwerkstoffe nach entsprechenden Walzprozessen untersucht. Die jeweils ermittelten mikrostrukturellen Größen liefern wichtige Daten für eine Simulation von Umformprozessen. So kann der Walzprozess selbst optimiert werden, um beispielsweise Kantenrisse zu vermeiden und eine optimale Stichabnahme zu erreichen. Ebenso dienen mikrostrukturelle Daten dazu, in anschließenden Umformprozessen richtungsabhängige Werkstoffeigenschaften in einem Materialmodell mit zu berücksichtigen.

Dr. Johannes Preußner



1 Gefüge eines gewalzten Tiefziehstahlblechs nach unterschiedlichen Zeiten einer Rekristallisationsglühung (oben nach 10 s, unten nach 70 s bei 600 °C). Rekristallisierte Bereiche sind gelb, Korngrenzen blau eingefärbt.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

VERBUNDWERKSTOFFE

Dr. Michael Luke

michael.luke@iwf.fraunhofer.de

HYBRIDVERBUNDE: KRAFTEINLEITUNG IN FASERVERSTÄRKTE THERMOPLASTE

Im Rahmen der Fraunhofer-Systemforschung für Elektromobilität (FSEM) wurde ein crashtolerantes Batterieschutzgehäuse entwickelt. Das Fraunhofer IWM war maßgeblich an der Bauteilbewertung beteiligt, um einen sicheren Betrieb bereits in der Konstruktionsphase vorhersagen zu können. Im Folgenden werden Untersuchungen an hoch belasteten Kunststoff-Metall-Hybridverbunden vorgestellt, die der zielgerichteten Kräfteinleitung von metallischen Trägerstrukturen (Traversen) in die Seitenwände des Batterieschutzgehäuses dienen.

Materialkombination

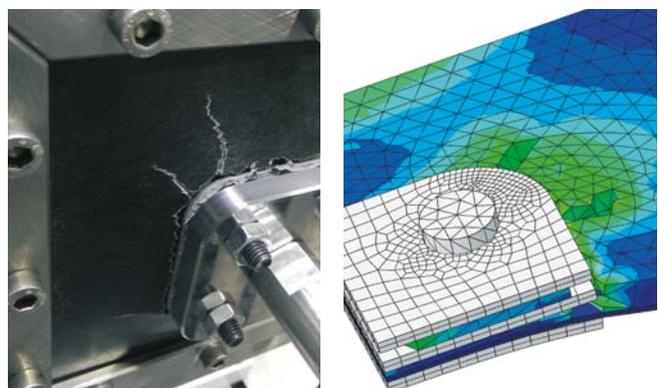
Das Batterieschutzgehäuse wird im Fließpress-Verfahren aus langglasfaserverstärktem Polypropylen (PPGF30) hergestellt. Der am Fraunhofer ICT entwickelte Prozess gewährleistet eine besonders hohe Faserlänge von mindestens 20 mm. Zusätzlich weist der Sandwichaufbau eine Decklage aus Glasfasergewebe (so genanntes Organoblech) auf. An den Kräfteinleitungspunkten der Traversen sind metallische Einleger integriert, die bei der Herstellung vom Grundmaterial PPGF30 umflossen werden.

Experimente und Modellierung

Für Querzugversuche wurde ein Ausschnitt der Seitenwand, welcher den metallischen Einleger beinhaltet, auf einen Rahmen aufgespannt. Ein Hydraulikzylinder wurde in gleicher Weise am Hybridverbund angebracht, wie die Traversen im Bauteil befestigt werden. Aufgrund des asymmetrischen Aufbaus wurde das Verformungs- und Versagensverhalten in beide Richtungen (Organoblech auf der Ober- bzw. Unterseite) messtechnisch erfasst.

Die FEM-Modellierung erfolgte mit Materialeigenschaften, die zuvor an Zugversuchen der Einzelmaterialien bestimmt wurden. Es wurde ein dehnungsbasiertes Versagenskriterium für die Einzelschichten eingesetzt. Beim Grundmaterial PPGF30 wurde eine höhere Festigkeit bei Druckbeanspruchung als bei Zugbeanspruchung berücksichtigt. Auf diese Weise kann in der Simulation unterschiedliches Verhalten in beide Belastungsrichtungen abgebildet werden. Darauf aufbauend konnte die Form des metallischen Einlegers unter Leichtbauaspekten optimiert und die mechanischen Eigenschaften (spezifische Steifigkeit und Festigkeit) für die verbesserte Geometrie berechnet werden.

Sascha Fliegener



1 Experiment (links) und FE-Simulation (rechts) der Querzugversuche, Kantenlänge Einlegerblech: 70 mm. Es ist eine gute Übereinstimmung des Versagensorts und -fortschritts ersichtlich. Die Farbskala visualisiert das dehnungsbasierte Versagenskriterium: blau = ungeschädigt, grün = geschädigt.

Wir bieten die komplette Entwicklungskette vom Materialdesign bis zum Bauteilprototyp für thermoplastische Polymere und Polymercompounds sowie polymerbasierte Hochleistungsverbundmaterialien. Das Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum PAZ ermöglicht dabei auch die Polymerverarbeitung im Technikumsmaßstab. Zahlreiche Aktivitäten widmen sich der Vorhersage von Material- und Bauteileigenschaften, was den Bedarf an Prototypen bei Neuentwicklungen reduzieren soll.

Aktuelle Schwerpunkte sind thermoplastisch verarbeitbare Elastomere mit extrem hoher Dehnbarkeit, der funktionsintegrierte Leichtbau mit Verbundwerkstoffen sowie CFK-Schaum-Sandwiches und andere Polymerschaumanwendungen, bei denen naturstoffbasierte Ausgangsmaterialien eingesetzt werden.

Bemerkenswertes aus 2011

Wir freuen uns, dass im Juli 2011 der von der DFG geförderte Transregio-SFB TRR 102 »Polymere unter Zwangsbedingungen« unter Beteiligung der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, der Universität Leipzig und des Fraunhofer IWM etabliert wurde. Das Geschäftsfeld Polymeranwendungen ist mit zwei Teilprojekten vertreten.

Gruppe

Naturstoffkomposite

Hier steht die Reduzierung des Anteils petrochemischer Komponenten bei gleichzeitiger Erhöhung des Gebrauchswertes im Vordergrund. Das Materialspektrum reicht dabei von duroplastischen bis hin zu thermoplastischen Matrixmaterialien. Durch die Untersuchung von Verarbeitungsparametern und Funktionen neuartiger Materialkombinationen werden Polymercompounds und Materialkreisläufe entwickelt.

André Rapthel

andre.rapthel@iwmh.fraunhofer.de

Gruppe

Polymerbasierte Hochleistungsverbundwerkstoffe

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

Dr. Ralf Schäuble

ralf.schaeuble@iwmh.fraunhofer.de

Gruppe

Polymerbasiertes Materialdesign

Der Schwerpunkt ist die Weiterentwicklung von thermoplastisch verarbeitbaren superelastischen Polymeren, nanostrukturierten Copolymeren sowie mit nanoskaligen Füllstoffen modifizierten Polymersystemen. Wir untersuchen und optimieren die Zusammenhänge zwischen molekularer Struktur, Morphologie und mechanischen Eigenschaften.

Prof. Dr. Roland Weidisch

roland.weidisch@iwmh.fraunhofer.de

Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ

Das Fraunhofer-Forschungszentrum PAZ wird vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP und dem Fraunhofer IWM betrieben. Das Pilotanlagenzentrum liefert maßgeschneiderte Prozesslösungen vom Polymersyntheserohstoff bis hin zum geprüften Hochleistungsbauteil. Dabei wird der Einfluss der Verarbeitung auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften besonders berücksichtigt.

Bemerkenswertes aus 2011

Das Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ in Schkopau hat einen neuen, 8500 qm großen Erweiterungsbau erhalten.

Gruppe

Polymerverarbeitung

Die Gruppe widmet sich der Entwicklung anwendungsspezifischer Thermoplast-Compounds und prototypischer Bauteile unter besonderer Berücksichtigung der Verarbeitungseinflüsse auf die Werkstoff- und Bauteileigenschaften.

Dr. Michael Busch
michael.busch@iwmh.fraunhofer.de



*Prof. Dr. Roland Weidisch
Geschäftsfeldleiter*

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

POLYMERBASIERTE HOCHLEISTUNGSVERBUNDWERKSTOFFE

Dr. Ralf Schäuble

ralf.schaeuble@iwmh.fraunhofer.de

SCHADENSTOLERANZ VON CFK-SCHAUM-SANDWICHSTRUKTUREN

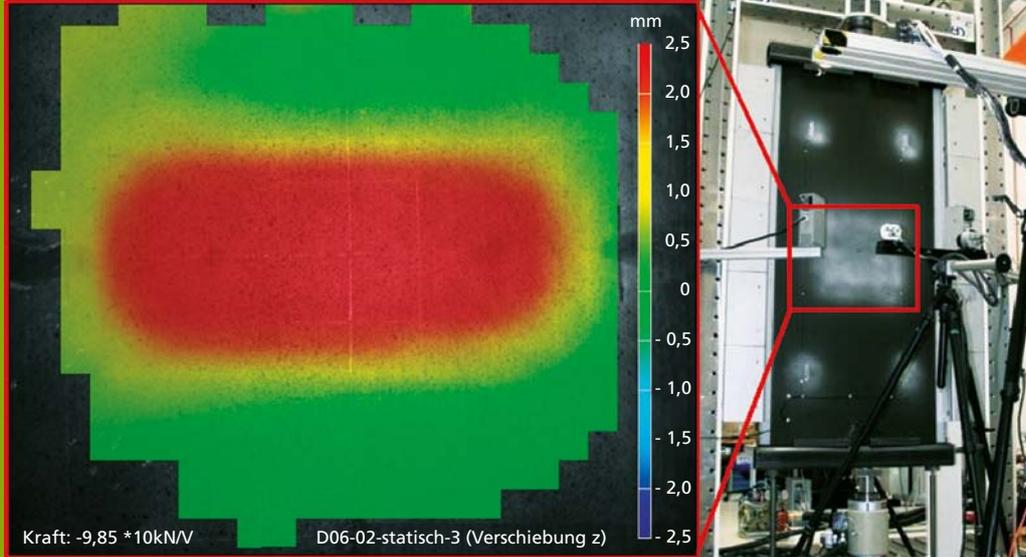
CFK-Schaum-Sandwichstrukturen weisen vor allem hohe gewichtsspezifische Biegesteifigkeiten auf und eignen sich deshalb besonders für den Einsatz in beulgefährdeten Schalenstrukturen, beispielsweise von Luftfahrzeugen. Schlagschäden im Betrieb oder aber Fehler bereits bei der Herstellung verursachen oftmals von außen schlecht oder gar nicht sichtbare Schäden in der Anbindung zwischen Deckschicht und Kern. Wenn die Restfestigkeit der geschädigten Struktur für ihren Betrieb noch ausreichend ist oder der Schaden das globale Strukturverhalten nicht erkennbar beeinflusst, besteht die Gefahr, dass sich diese Schäden zunächst unerkannt weiter vergrößern und schließlich zu einem katastrophalen Schaden führen.

Im Falle einer lokalen Deckschichtablösung erfolgt ein Risswachstum zumeist in der beziehungsweise nahe der Grenzschicht zwischen der CFK-Deckschicht und dem Schaumkern. Um den Widerstand des Sandwichverbunds gegen Risswachstum im Schaumkern beziehungsweise Deckschicht-Kern-Interface zu bewerten, wurden in vorherigen Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der CTC GmbH bruchmechanische Versuche unter quasi-statischer und zyklischer globaler Mode-I- und Mode-II-Belastung durchgeführt sowie die Bruchzähigkeiten und das Ermüdungsrisswachstum charakterisiert. Anschließend sollten die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Kennwerte sowie die verwendeten Methoden mithilfe eines bauteilnahen Tests validiert werden. Entsprechend dem derzeit für Composite-Strukturbauteile von Verkehrsflugzeugen geltendem No-growth-Konzept sollte untersucht werden, wie groß der Schaden bei vorgegebener Ermüdungsbelastung sein darf, ohne sich zu vergrößern.

Experimenteller Untersuchungsansatz

In Zusammenarbeit mit der CTC GmbH wurde ein 2 m x 1 m großer Schalenprüfkörper ausgelegt. Die Geometrie der unsymmetrischen Schale entspricht der realen Anwendung. In der Schalenmitte wurde ein künstlicher Anbindungsfehler zwischen Außendeckschicht und Kern in Form einer Folie eingebracht. In plane Druck- und Schubbelastungen gehören zu den auslegungsrelevantesten Belastungen von Leichtbaustrukturen. Deshalb wurde die Schale in Längsrichtung gestaucht und an den Seiten in Dickenrichtung gelagert. Im Bereich der abgelösten Deckschicht beult diese mit Überschreiten der kritischen Beullast vom Kern weg, was zu einer erhöhten Belastung der Delaminationsfront führt. Mithilfe von quasi-statischen und Fatigue-Belastungsreihen wurde untersucht, wie sich die Delamination ausbreitet.

Neben DMS- und ARAMIS-Verformungsmessungen im Versuch kamen zur Erfassung der von außen nicht sichtbaren Schadensausbreitung zwischen den Belastungsreihen Durchschallungs- und Impuls-Echo-Ultraschallverfahren der Projektpartner zum Einsatz. Während des Versuchs am Fraunhofer IWM wurde zudem das Vibro-Thermographie-Verfahren angewendet, bei welchem der thermoelastische Effekt basierend auf der mechanischen Anregung des Prüfzylinders gemessen wird. Der Vergleich der verschiedenen Verfahren (Abbildung 1) und das abschließende visuelle Erfassen der Schadensausbreitung durch Aufsägen des Prüfkörpers zeigen die Eignung beider NDT-Methoden.



Schalenprüfstand auf dem Mehrzweckprüffeld (rechts) und Messung des Nachbeulverhaltens mithilfe des optischen Verformungsmesssystems ARAMIS (links).

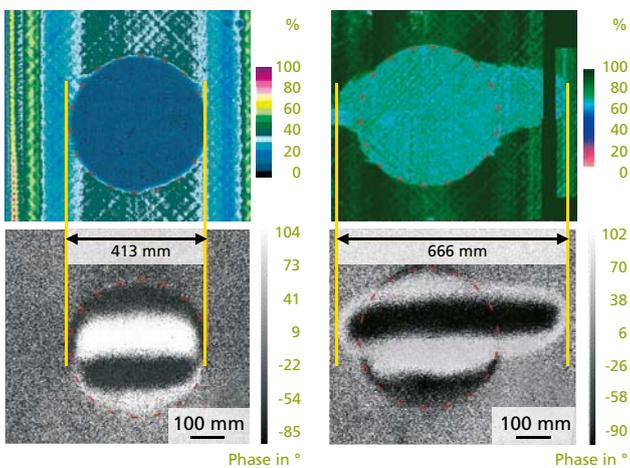
Numerische Simulation

Die Rissfrontbelastung und der Rissfortschritt wurden mithilfe der FEM (ABAQUS in Kombination mit Patran), der Virtual Crack Closure Technique und des Paris-Gesetzes berechnet. Ausgehend von der Anfangsdelamination wurde für jeden vorgegebenen Lastwechselschritt ein FEM-Modell basierend auf der zuvor berechneten Rissfront erstellt und die neue Rissfront berechnet (Abbildung 2).

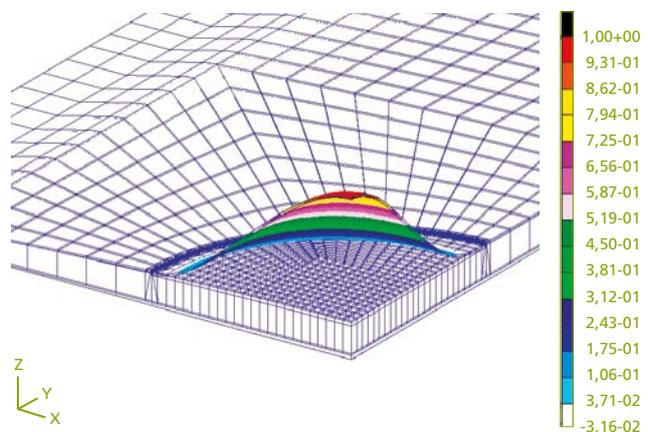
Fazit

Mithilfe der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Schadenstoleranz der Sandwichstruktur verhältnismäßig hoch und zudem berechenbar ist, was deutlich zur Erhöhung der Akzeptanz und Einsatzrelevanz derartiger Strukturen beiträgt.

Dr. Martin Rinker



1 Ultraschall- (oben) und Thermographiemessung (unten) der Delaminationsfläche bei Versuchsbeginn (links) und nach 10 Millionen Lastwechseln (rechts) mit 2 Hz.



2 FEM-Berechnung des lokalen Beulens der abgelösten Deckschicht.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

NATURSTOFFKOMPOSITE

Dr. André Rapthel
andre.rapthel@iwmm.fraunhofer.de

STRUKTUREN AUS NACHWACHSENDEN ROHSTOFFEN FÜR DAS BAUWESEN

Das Bundes-Energiekonzept räumt dem Klimaschutz eine hohe Priorität ein und sieht gleichzeitig vor, die Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung zu gewährleisten. Ein Ziel besteht in der Reduktion der Treibhausgase auf 60 Prozent bis 2020 sowie auf maximal 20 Prozent des Standes von 1990 bis 2050. Dies kann durch eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs von 14 000 Petajoule (Stand 2010) auf 7 000 Petajoule (Ziel 2050) erreicht werden. Die in Deutschland bestehenden 20 Millionen Gebäude haben mit 40 Prozent einen hohen Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Daraus ergibt sich ein dringender Bedarf an Innovationen für Materialien und Technologien zur hochwertigen thermischen Isolierung von Gebäuden.

Dämmung plus Stabilität

In einem gemeinsamen Forschungsvorhaben mit der Industrie wird am Fraunhofer IWM ein Verbundsystem entwickelt, das hervorragende Wärmedämmeigenschaften aufweist und mechanische Lasten aufnehmen kann. Es besteht darüber hinaus zu einem hohen Anteil aus nachwachsenden Rohstoffen. Mit einem Kern aus »brandfesten« petrochemischen Phenolschaum und stabilisierenden Decklagen-Vliesen aus Flachs und Hanf wird ein leichtes, stabiles Dämmsystem entwickelt. Durch die eingesetzten Materialien kann schon mit einer Verbunddicke von 20 mm eine ausreichende Isolationswirkung erreicht werden, die der Wirkung von etwa 360 mm Hochlochziegelwand entspricht oder jeweils 25 mm extrudiertem Polystyrol, Mineralwolle oder Polyurethan-Hartschaum. Aufgrund der stabilisierenden Wirkung der Decklagen kann das Sandwich über die Wärmedämmung hinaus noch eine

lasttragende Funktion übernehmen. So kann perspektivisch bei entsprechender Dimensionierung die klassische Mauerwand durch ein bifunktionales Verbundelement ersetzt werden.

Zusätzliche Pluspunkte

Neben dem erreichbaren Passivhausstandard bietet das geringe Leistungsgewicht dieses Bausystems weitere Vorteile: Neben kostengünstigem Transport kann davon ausgegangen werden, dass der Aufwand für eine Schwerlastmontage reduziert wird. Dies bietet insbesondere in unwegsamen oder zerstörten Regionen eine solide Option zur Errichtung von »Transitional Homes« oder »Übergangswohnungen«, welche über längere Zeiträume nutzbar oder ausbaufähig sind.

Andreas Krombholz, Sven Wüstenhagen



1 Thermisch isolierendes Architekturelement im Beultest.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe
POLYMERBASIERTES MATERIALDESIGN

Prof. Dr. Roland Weidisch
roland.weidisch@iwmh.fraunhofer.de

MIKROPHASENSEPARIERTE COPOLYMERE: NEUES MATERIALKONZEPT

Blockcopolymere sind Makromoleküle, die aus zwei oder mehreren kovalent miteinander verbundenen Homopolymerblöcken bestehen. Dies und die chemische Unverträglichkeit der Blöcke resultieren in einer Mikrophasenseparation und in nanoskaligen Morphologien. Über die gezielte Beeinflussung der molekularen Architektur und der Morphologie lassen sich die mechanischen Eigenschaften »maßschneidern«. Speziell Styrol-Butadien-basierte Blockcopolymere sind als Haftvermittler und Zähigkeitsadditive in Folien und Haushaltsprodukten in kommerziellem Einsatz. Ein relativ neues Anwendungsfeld sind Schrumpffolien.

Struktur-Eigenschaftskorrelation

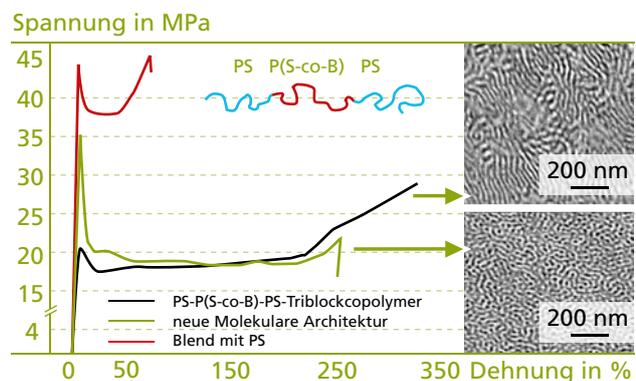
Das Ziel der Forschungsarbeiten mit Partnern der BASF SE war, hochsteife, feste und gleichzeitig zähe S-B-Blockcopolymere zu entwickeln. Als Basis der Untersuchungen diente das detaillierte Verständnis der Zusammenhänge zwischen der molekularen Architektur, den Morphologien und den Eigenschaften dieser Polymere. Neben den mechanischen Eigenschaften ist das bruchmechanische Verhalten für den Anwendungsfall von Interesse, da während der Verarbeitung zu Folien Störstellen oder Anrisse im Material zum Versagen führen können. Die Bewertung der Bruchzähigkeit erfolgte mit dem Konzept der wahren Brucharbeit sowie anhand der Charakterisierung des zeitlichen Verlaufs der Rissausbreitung. Die Elektronenmikroskopie (TEM) und die Röntgenkleinwinkelstreuung dienten zur Morphologieaufklärung.

Hohe Steifigkeit und Festigkeit

Die Untersuchungen zeigten, dass die Blockzusammensetzung, das Molekulargewicht sowie die Blockanordnung enormen Einfluss auf die Morphologieausbildung und die

mechanischen Eigenschaften haben. In der Abbildung sind Spannungs-Dehnungs-Kurven ausgewählter S-B-Blockcopolymere und zugehörige TEM-Aufnahmen der Morphologie dargestellt. Aufgrund der guten Verträglichkeit der S-B-Blockcopolymere mit Polystyrol ist eine Zähigkeitsoptimierung in Blends möglich, sodass transparente Materialien mit hoher Steifigkeit und Festigkeit sowie adäquater Zähigkeit entwickelt werden konnten. Auch bei hohen Styrolanteilen von 82 Masseprozent können sich lamellare Morphologien ausbilden, die sich günstig auf die Bruchzähigkeit des Materials auswirken und die Rissausbreitungsgeschwindigkeit reduzieren.

Martin Ganß, Prof. Dr. Roland Weidisch



1 Spannungs-Dehnungs-Kurven ausgewählter S-B-Blockcopolymere und die dazugehörigen TEM-Aufnahmen der Morphologie.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

POLYMERVERARBEITUNG

Dr. Michael Busch

michael.busch@iwmh.fraunhofer.de

OPTIMIERUNG DES EIGENSCHAFTSPROFILS VON POLYAMID-COMPOUNDS

Das Einsatzgebiet von technischen Kunststoffen wächst beständig. Ihr Vorteil ist, dass sich mithilfe verschiedener Basis-kunststoffe, Füllstoffe und Additive die Eigenschaften für den jeweiligen Einsatzbereich maßschneidern lassen. Die aktuellen Entwicklungen zielen neben generell verbesserten Materialeigenschaften zunehmend auf einen verringerten Materialeinsatz und damit verbundener Gewichtseinsparung. Die Voraussetzung für die Entwicklung solcher Kunststoff-Compounds ist jedoch die richtige Kombination aus Materialwissenschaft und Verfahrenstechnik. Das Ergebnis sind innovative Werkstoffe, die Funktionalität mit Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit verbinden.

Schlagzähmodifizierung

Vor allem für die Automobilindustrie haben sich Polyamid-Compounds als die wichtigsten technischen Konstruktionswerkstoffe entwickelt. Sie besitzen ein hohes mechanisches Eigenschaftsniveau bei guter Verarbeitbarkeit und ausgezeichneter Oberflächenqualität. Viele Anwendungen im Fahrzeuginterieur verlangen dabei eine sehr hohe Schlagzähigkeit. Aufgrund ihrer teilkristallinen Mikrostruktur weisen Polyamide zwar einen guten Widerstand gegen Rissbildung durch einachsige Spannungszustände auf, besitzen jedoch nur mäßigen Widerstand gegen Rissfortpflanzung durch die mehrachsigen Spannungszustände an der Rissspitze. Die Optimierungsansätze dieser Materialien befassen sich daher vor allem mit der Schlagzähmodifizierung.

Eine Verbesserung der Schlagzähigkeit von Polyamiden kann durch die Einarbeitung von amorphen Styrolcopolymerisaten erfolgen. Entsprechende Untersuchungen wurden an einem

ternären Materialsystem durchgeführt. Es bestand aus der Polyamid-Matrix (PA6) und einem mit Maleinsäureanhydrid modifizierten Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA-g-MA) als Schlagzähmodifikator sowie einem organophilen Schichtsilikat zur Stabilisierung der Steifigkeit. Der Gewichtsanteil der Nanopartikel wurde mit 2 Prozent konstant gehalten, während der Anteil an ASA-g-MA zwischen 10, 15 und 20 Prozent variiert wurde. Die mechanische Charakterisierung ergab einen signifikanten Anstieg der Charpy-Schlagzähigkeit, bei moderatem Absinken der Steifigkeit im Zugversuch (Abbildung 1).

Angepasste Verfahrensführung

Die Grundlage für eine erfolgreiche Eigenschaftsmodifizierung durch Schmelze-Compoundierung ist die homogene Verteilung der Füllstoffe in der Kunststoff-Matrix. Entscheidend sind hier die Strukturbildungsprozesse während der Verarbeitung, wodurch eine angepasste Verfahrensführung notwendig wird. Die Herstellung der untersuchten Polyamid-Compounds erfolgte mit einem industriekompatiblen Doppelschneckenextruder. Dessen Schneckenengeometrie und Prozessparameter wurden hinsichtlich einer gleichzeitig homogenen Verteilung des Schlagzähmodifikators und der Schichtsilikate optimiert. Die Untersuchung der resultierenden Compound-Morphologien erfolgte mittels Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und Rasterkraftmikroskopie (AFM). Die Ergebnisse belegen sowohl eine exfoliierte Struktur der Schichtsilikate als auch eine sehr feine Verteilung des Schlagzähmodifikators mit durchschnittlichen Partikeldurchmessern im Bereich von 500 nm in der



Spritzgegossenes Strukturbauteil aus einem am Fraunhofer IWM entwickelten Polyamid-Compound.

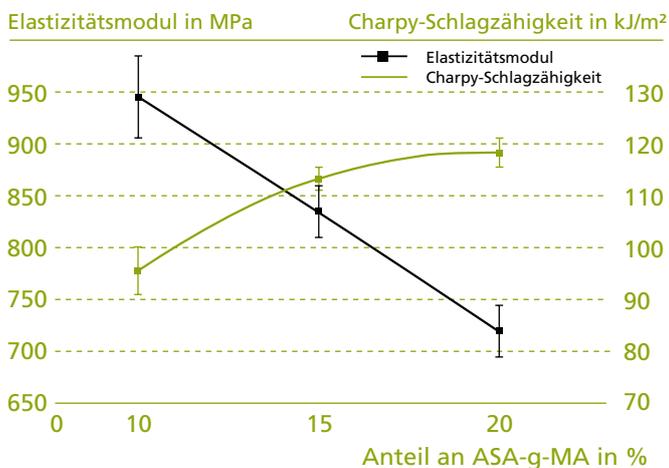
Polyamid-Matrix. In Abbildung 2 ist dies für das entwickelte Polyamid-Compound mit einem Gewichtsanteil an ASA-g-MA von 10 Prozent dargestellt.

Leichtere, effizientere Bauteile

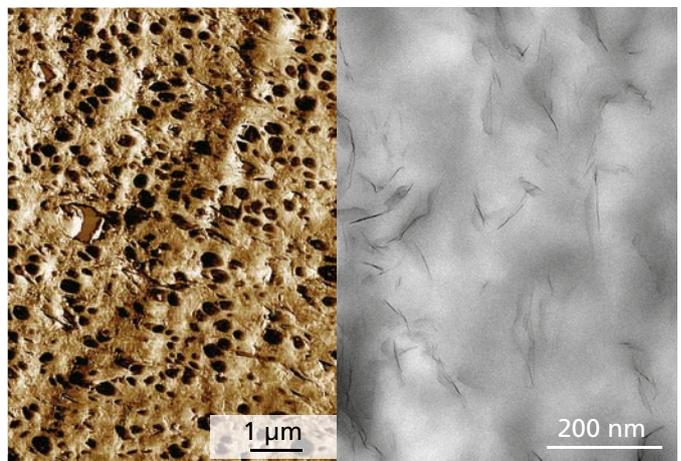
Durch die anwendungsspezifische Entwicklung von technischen Kunststoffen im industriellen Maßstab werden

dem Anwender optimierte Werkstoffe bereitgestellt, die unmittelbar zur Konstruktion von leichteren und somit effizienteren Bauteilen genutzt werden können. Beim Beispiel Automobil führt das zu einem geringeren CO₂-Ausstoß und einer verbesserten Ökobilanz.

Patrick Zierdt



1 Elastizitätsmodul und Charpy-Schlagzähigkeit der Polyamid-Compounds in Abhängigkeit vom Anteil am Schlagzähmodifikator ASA-g-MA (konditioniert nach ISO 1110).



2 Morphologie eines entwickelten Polyamid-Compounds: AFM-Aufnahme der Compound-Morphologie (links), TEM-Aufnahme des exfolierten Schichtsilikats (rechts).

BIOLOGISCHE UND MAKROMOLEKULARE MATERIALIEN

Für Anwendungen in der Kunststoffverarbeitung, Medizintechnik und Biotechnologie erarbeiten wir im Auftrag unserer Kunden Lösungen zu innovativen Veredlungsverfahren von Polymerfolien, entwickeln und bewerten Oberflächenmodifizierungs- und Beschichtungsverfahren für biologische und biokompatible Materialien und verwenden Nanotechnologien zur Materialfunktionalisierung. Projektschwerpunkte sind die Entwicklung und Einsatzqualifizierung von Beschichtungs- und Fügeverfahren für Polymerfolien und Filtrationsmembranen sowie die Erzeugung von funktionalen Oberflächen durch Plasmaverfahren und Nassbeschichtungen. Wichtige Fragestellungen sind weiterhin die elektronenmikroskopische Charakterisierung von biologischen Materialien (Zahn, Biofilme, Zellkulturen, Knorpelmaterialien), wobei spezielle Präparations- und Untersuchungsmethoden wie In-situ-Techniken und Kryotechniken zur Materialcharakterisierung genutzt werden.

Bemerkenswertes aus 2011

Die Industrie fragt zunehmend nach Verfahren, mit denen Biokorrosion verringert beziehungsweise eine Biofilmbildung vermieden werden kann. Neben der Entwicklung von leitfähigen Beschichtungen für Antifouling-Maßnahmen wenden wir jetzt auch plasmagestützte und nasschemische Oberflächenmodifizierungsverfahren an, die in unserem Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ genutzt und weiterentwickelt wurden. Eine derartig funktionalisierte Membran soll für die Wasseraufbereitung genutzt werden. Dabei ist das Ziel, die Biofilmbildung zu verringern oder zu vermeiden und gleichzeitig die Trennfunktion der Membran beizubehalten. Mit dem Aufbau von Bioreaktoren erfolgt die Optimierung der Antifoulingausrüstung der Membranoberflächen. Diese Testeinrichtungen simulieren die Biokorrosion unter einsatznahen Bedingungen.

Neben der weiteren Entwicklung von Präparations- und Untersuchungsmethoden zur Bewertung der Morphologie von biologischen Materialien tritt auch zunehmend die mechanische Prüfung von biologischen Materialien und Implantatwerkstoffen in den Mittelpunkt. Zusammen mit dem Translationszentrum für Regenerative Medizin (TRM) der Universität Leipzig führen wir Untersuchungen im Tierversuch zur Regeneration von Bandscheiben durch. Dabei testen wir verschiedene Implantatmaterialien auf Hydrogelbasis. In einem weiteren Projekt (Gewinner des Medizintechnikwettbewerbs des BMBF 2010) entwickeln wir Implantatmaterialien für den Unterkieferbereich unter physiologischen Bedingungen weiter und prüfen sie.

Gruppe

Polymerfolien und Membranen

Vorrangig für die kunststoffverarbeitende Industrie werden Verfahren zur Beschichtung und zum Fügen von Polymerfolien und Polymermembranen entwickelt und optimiert. Zielstellungen sind dabei vorrangig die Verbesserung der Bedruckbarkeit bzw. die Vermeidung der Biofilmbildung. Für die dafür notwendigen elektronenmikroskopischen Untersuchungen werden die Präparationstechniken (Kryo-Mikrotomie, Kryo-FIB) für die jeweilige Anwendung modifiziert und weiterentwickelt. Diese Präparationstechniken werden ebenso für die morphologische Charakterisierung von biologischen Materialien genutzt. Zusammen mit der einsatznahen mechanischen Bewertung von biologischen Materialien und Implantaten werden Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen entwickelt, die zu einem besseren Verständnis des Einsatzverhaltens führen.

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

Gruppe

Biofunktionale Oberflächen

Um die Biofunktionalität der Oberfläche von biologischen und biokompatiblen Materialien zu verstehen und letztendlich zu verbessern, werden verschiedene Verfahren der Oberflächenanalytik angewendet. Es werden Erfordernisse für die Oberflächenmodifizierung abgeleitet, die dann bei der Entwicklung von Oberflächenbehandlungsprozessen berücksichtigt werden. Ein Schwerpunkt dabei ist die Anwendung und Weiterentwicklung von Atmosphärendruck-Plasmaverfahren, verbunden mit Verfahrensentwicklungen zur Inline-Diagnostik. Weiterhin werden problemorientiert Methoden entwickelt, um Oberflächenprozesse zu beschreiben und zu optimieren. So werden z.B. für die Entwicklung von Zahnpflegeprodukten chemische (Erosion und Remineralisierung) und mechanische Vorgänge (Abrasion) an Zahnschmelz- und Dentinoberflächen untersucht, um ein verbessertes Verständnis von komplexen Oberflächenprozessen zu erreichen.

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

*Prof. Dr. Andreas Heilmann
Geschäftsfeldleiter*



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

POLYMERFOLIEN UND MEMBRANEN

Prof. Dr. Andreas Heilmann

andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de

NEUE LACKSYSTEME FÜR DAS ELEKTROCHEMISCHE ANTIFOULING

Biofilme sind mit Mikroorganismen besiedelte Biopolymerschichten und praktisch allgegenwärtig. Bei schädlichen Biofilmen spricht man von Biofouling. Es begünstigt die Korrosion, verringert den Wärme- und Massenübergang und ruft beispielsweise in Rohrleitungen oder auf Schiffsrümpfen eine drastisch erhöhte hydrodynamische Reibung hervor. Die wenigen wirksamen passiven Beschichtungen gegen Biofouling enthalten Biozide, die in Abwässern und im Seewasser zu inakzeptablen Umweltbelastungen führen.

Chemisch und mechanisch stabiler Lack

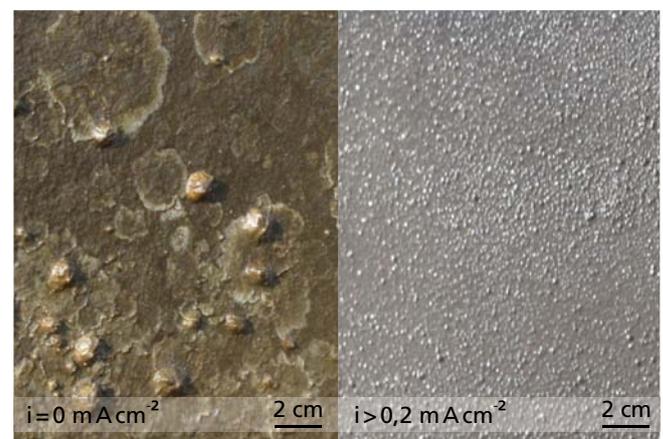
Um das Biofouling auf marinen Unterwasserflächen zu verhindern, wurden in einem Verbundprojekt mit den Firmen bioplan, NTC nano tech coatings, ASV innovative Chemie, Heppe Medical Chitosan, Schiffswerft Barth, Sovello, BEC und dem Helmholtzzentrum für Umweltforschung UFZ – ausgehend von den Vorarbeiten der bioplan GmbH und ihrem Patent EP 1570010 – neuartige elektrochemisch aktive und biozidfreie Anstriche auf der Grundlage von Sol-Gel-Lacken und Mikro- und Nanopartikeln aus Kohlenstoff entwickelt. Chemisch und mechanisch stabile Lackschichten mit optimierten Schichteigenschaften sollen zu einem bezüglich Installation und Nutzung verbesserten elektrochemischen Antifoulingssystem führen.

Im Ostseewasser getestet

Paarweise gegeneinander geschaltete, beschichtete Flächensegmente werden intervallweise mit einer geringen Stromdichte $\geq 0,1 \text{ mA cm}^{-2}$ betrieben. Direkt an den Oberflächen finden wasserelektrolytische Prozesse statt, die lokal zur Erhöhung beziehungsweise Verringerung des pH-Wertes führen. Der wech-

selnde pH-Stress – das von bioplan entwickelte Grundprinzip – verhindert den Bewuchs durch Mikroorganismen, Makroalgen und Seepocken. Es kann über die Einstellungen von Stromdichte und Zeitintervallen den Erfordernissen der jeweiligen Gewässersituation angepasst werden. Damit ist es bereits gelungen, die Oberfläche der neuen Unterwasseranstriche über mehrere Monate in einem Ostseehafen bewuchsfrei zu halten (Abbildung 1). Laborversuche zeigen bereits, dass dies auch über noch längere Zeiträume möglich ist, was für die Seeschifffahrt, aber auch in der technischen Wasseraufbereitung und der Klimatechnik große ökonomische Bedeutung erlangen kann.

Dr. Uwe Spohn, Prof. Dr. Manfred Fütting



1 Ohne aktives Antifouling: starker Bewuchs, unter anderem mit Seepocken (links). Elektrochemische Antifoulingwirkung bei intermittierender Umpolung mit 4 min Strom in einem Intervall von 25 min auf einem mit Graphit modifizierten Sol-Gel-Lack nach etwa 5 Monaten im Ostseewasser (rechts).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

BIOFUNKTIONALE OBERFLÄCHEN

Dr. Andreas Kiesow

andreas.kiesow@iwmh.fraunhofer.de

MINIMAL-ABRASIVE EFFEKTE AUF DER ZAHNOBERFLÄCHE

Zur Beseitigung von oralen Biofilmen müssen Zahnpasten eine gewisse Abrasivität aufweisen. Sie sollte jedoch moderat gehalten werden, um den Zahnschmelz nicht zu schädigen, da eine Regeneration von Zahnschmelz nicht möglich ist. Die Abrasivität einer Zahnpasta hängt von der Härte, Form und Größe der beigefügten Abrasiva (Putzkörper) ab. Ein Maß für die Abrasivität von Zahnpasten ist der RDA-Wert (radioactive dentin abrasion). Hierbei werden radioaktiv markierte Dentinproben in einem standardisierten Verfahren gebürstet und das abradierete Material in der Zahnpasta-Slurry bestimmt. Die Aussagekraft des RDA-Wertes ist umstritten, da die Abrasion am Dentin gemessen wird und diese Methode auf einen großen Materialabtrag in relativ kurzer Zeit ausgerichtet ist. Es werden daher alternative Verfahren gesucht, mit denen es möglich ist, realistische Abriebsraten zu bestimmen und auftretende Wechselwirkungen zwischen der Bürste, den Abrasiva, der Zahnpasta und dem Zahnschmelz näher zu charakterisieren.

Tribologisches System

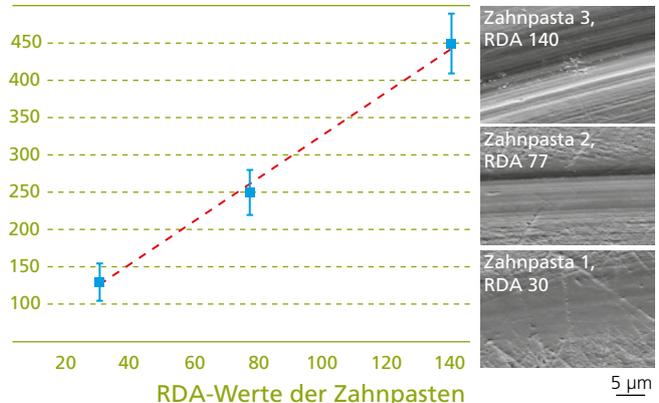
In Zusammenarbeit mit dem Geschäftsfeld Tribologie wurde ein neuer methodischer Ansatz entwickelt. Für die Untersuchungen wurde der Vorgang des Zähneputzens auf die Betrachtung des mikrotribologischen Systems »Einzelbürstfilament und Zahnschmelz in Umgebung mit Zahnpasta« reduziert. Mit den mikrotribologischen Experimenten ist es möglich, den Abrieb in mikroskopischer Größenskala und die Reibwerte zu bestimmen. Zudem können unmittelbare Wechselwirkungen zwischen Filament, Abrasiva und Zahnschmelz untersucht werden.

RDA-Wert korreliert mit Abrieb

Anhand der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der RDA-Wert der Zahnpasten mit der Abrasionstiefe korreliert. Je höher der RDA-Wert der Zahnpasta, desto höher der Abrieb (Abbildung 1). Durch die Bestimmung von Reibwerten sind auch Rückschlüsse auf die Reibleistung und auf kritische Reibenergien möglich. Weiterhin kann die Methode für die Untersuchung der Reinigungswirkung von Zahnpasten an Proben mit einer künstlichen Plaque sowie für die Bewertung des Kontakt- und Verschleißverhaltens von verschiedenen Filamentgeometrien genutzt werden.

Sandra Sarembe

Abrasionstiefe in nm



1 Abrasionstiefe in Abhängigkeit der RDA-Werte von Zahnpasten (links); Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Zahnschmelzoberflächen nach den Reibversuchen (rechts).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

POLYMERFOLIEN UND MEMBRANEN

Prof. Dr. Andreas Heilmann

andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de

INLINE-DIAGNOSIK VON NASSBESCHICHTUNGEN

Die kontinuierliche Nassbeschichtung von Kunststoff-Folien mit funktionellen organischen Schichten zur gezielten Beeinflussung der Folienoberflächeneigenschaften wird in der Kunststoffindustrie zunehmend nachgefragt. Die Folien können beispielsweise Antihaft- und Antistatikbeschichtungen erhalten oder antibakteriell, flammhemmend oder hydrophil funktionalisiert werden.

Verfahren zur Schichtdickenbestimmung

Üblicherweise erfolgt eine Bestimmung der Schichtdicke offline, wobei die Proben aus dem Produktionsprozess entnommen werden. Dabei sind eine Reihe von Verfahren zur Schichtdickenmessung nicht anwendbar: Profilometrische Verfahren sind beispielsweise für Folien schwierig durchzuführen, da der erforderliche Schnitt ohne gleichzeitiges Eindringen in die Folie aufgrund der geringen Härte der Unterlage kaum eingebracht werden kann und für eine Inline-Messung ungeeignet ist. Geeignete Verfahren zur Messung von Schichtdicken und gleichzeitig auch von Foliendicken sind optische Verfahren im sichtbaren (VIS) oder im nahinfraroten (NIR) Spektralbereich. Dabei wird die Streuung des Lichts und die dabei entstehenden Interferenzen an den Grenzflächen Luft/Folie, Folie/Beschichtung und Beschichtung/Luft genutzt. Allerdings müssen sich die Brechzahlen der Beschichtung und der Trägerfolie deutlich voneinander unterscheiden. Werden Interferenzen gemessen, können diese unter Verwendung eines einfachen Modells ausgewertet werden.

Schichtdickenbestimmung inline

Zur Messung im industriellen Maßstab wurde im Rahmen eines BMBF-geförderten Projekts die Inline-Diagnostik in eine Uni-

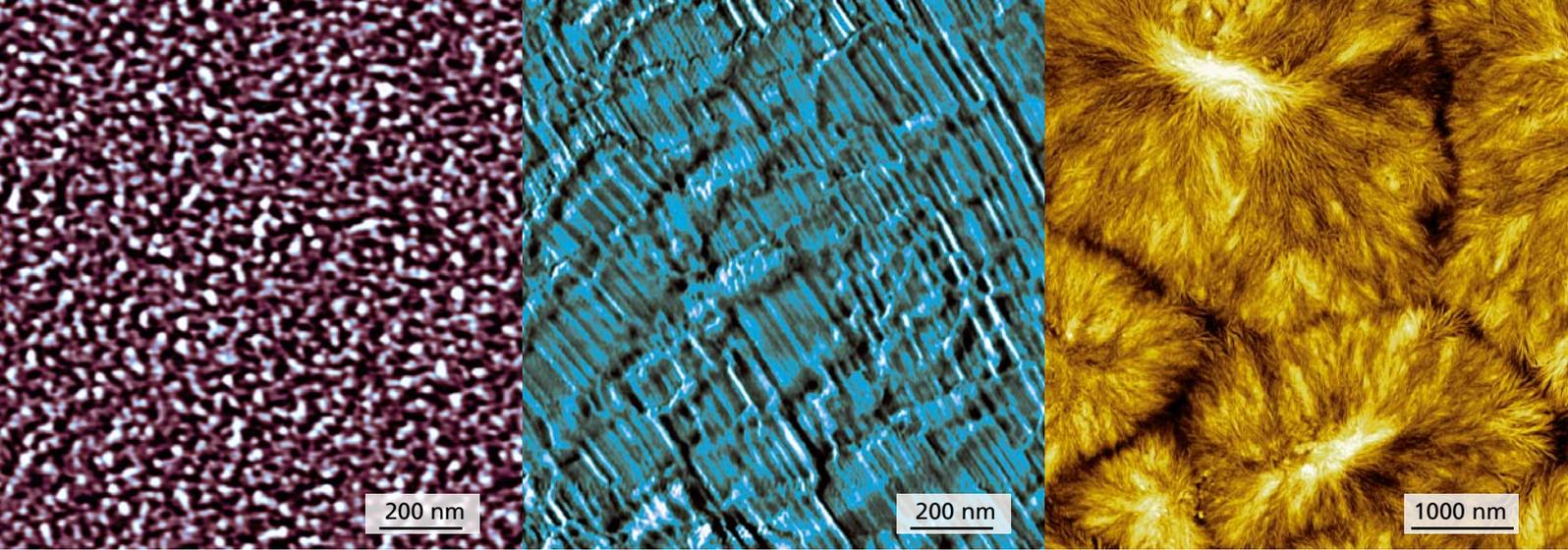
versalbeschichtungsmaschine des Industriepartners UBW GmbH Wolfen integriert. Mit dieser Maschine können Beschichtungsfluide im Technikumsmaßstab kontinuierlich auf Folienbahnen (Geschwindigkeiten der Folienbahnen von 0,5 m/min bis maximal 15 m/min) aufgetragen und sofort getrocknet werden.

Direkt nach der thermischen Trocknung wurde die Lichtleitfaser-einkopplung für die Transmissionsmessung im Spektralbereich von 0,7 bis 2,5 μm mit einem NIR-Spektrometer integriert. Die Inline-Diagnostik erfolgte während der Beschichtung mit einem Fluid Nanosol® unter den für die kommerzielle Folienbeschichtung üblichen Prozessbedingungen einer Walzenauftragsbeschichtung. Hauptsächlich wurden der Auftragsspalt und die Geschwindigkeit der Auftragswalze variiert – während der einzelnen Messungen wurden diese Beschichtungsparameter jedoch konstant gehalten.

Schichtdickenbestimmung anhand von Interferenzen

In Abbildung 1 sind NIR-Transmissionsspektren von einer unbeschichteten und zwei mit Nanosol beschichteten Polyethylenterephthalat(PET)-Folien dargestellt. Hier sind deutlich die Interferenzen der Beschichtung (niederfrequent) und die der Substratfolie (hochfrequent, siehe Ausschnittsvergrößerung) zu erkennen. Mit Messungen im NIR-Spektralbereich können Interferenzen von Schichtdicken bis minimal 480 nm erfasst werden. Geringere Schichtdicken müssen mit Messungen im UV-VIS-Bereich bestimmt werden.

Abbildung 2 zeigt die aus den Schichtdickeninterferenzen unter Verwendung eines einfachen Interferenzmodells berechneten Schichtdicken für verschiedene Geschwindigkeiten der Be-



Rasterkraftmikroskop(AFM)-Abbildungen von verschiedenen Polymeroberflächen: amorphe Polytetrafluorethylenschicht (PTFE, links), teilkristalline PTFE-Schicht (Mitte), lamellare Polyamidschicht (PA6) mit sphärolithischen Überstrukturen (rechts).

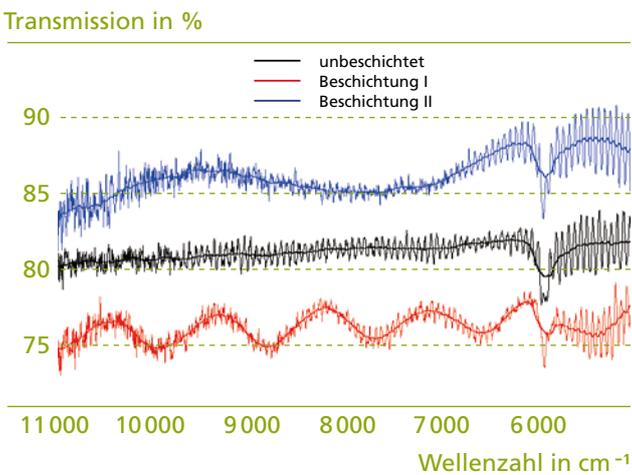
schichtungswalze und damit für unterschiedliche Massen des aufgetragenen Beschichtungsfluids. Es konnte ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Walzengeschwindigkeit festgestellt werden. Kontrollmessungen mittels Profilometrie bestätigen die gefundenen Schichtdicken.

Inline-Schichtdickenmessung zur Prozesskontrolle

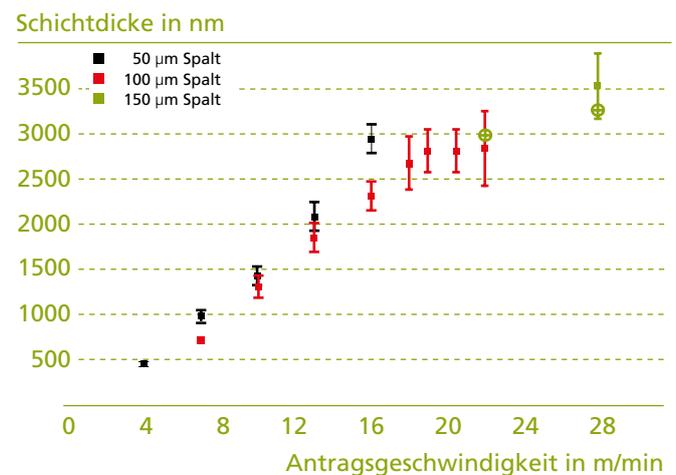
Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mittels NIR-Spektroskopie eine Inline-Schichtdickenmessung von Schichten auf

Kunststoff-Folien möglich ist und dass die erforderlichen Messeinrichtungen in eine industriell genutzte Beschichtungsanlage integriert werden können. Eine sofortige Auswertung der Spektren ist durchführbar und ermöglicht eine kontinuierliche Prozessdokumentation sowie ein schnelles Eingreifen in den Beschichtungsprozess bei auftretenden Abweichungen.

Nico Teuscher, Prof. Dr. Andreas Heilmann



1 NIR-Transmissionsspektren von einer unbeschichteten (schwarz) und zwei in der Beschichtungsanlage D-40 mit Nanosol beschichteten PET-Folien (blau und rot).



2 Aus den NIR-Interferenzen ermittelte Schichtdicken als Funktion der Auftraggeschwindigkeit der Beschichtungswalze. Zur Validierung der Messwerte wurden zwei profilometrisch ermittelte Schichtdickenwerte eingefügt.

KOMPONENTEN DER MIKROELEKTRONIK UND MIKROSYSTEMTECHNIK

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

Bemerkenswertes aus 2011

In enger Zusammenarbeit mit Equipment-Herstellern haben wir in den letzten Jahren an neuen, weiterentwickelten Methoden der Fehleranalyse und Qualitätssicherung für Halbleiter- und Bauelementetechnologien gearbeitet. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten wurden durch unsere Firmenpartner in kommerzielle Diagnostik-Gerätetechniken integriert und auf dem Weltmarkt vertrieben. Im Ergebnis unterstützt das Know-how des Geschäftsfelds im Bereich Lock-in-Thermographie seit 2011 international führende Mikroelektronik-Hersteller unter anderem bei der Fehleranalyse in mehrfach vertikal gestapelten höchstintegrierten Schaltkreisen oder in neuen Automobilelektronik-Bauelementen. Weiterhin steht Herstellern von waferbasierten Solarmodulen jetzt eine deutlich verbesserte und leistungsfähigere mechanische Prüftechnik für die Qualitätssicherung von Lotkontaktierungen zur Verfügung.

Gruppe

Bewertung mikroelektronischer Systemintegration

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

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

Gruppe

Charakterisierung Mikrosysteme

Wir analysieren Festigkeit und Einsatzverhalten von Si-Mikrosystemen sowie Waferbond-Technologien mittels mechanischer Prüftechnik, Simulation und mikrostruktureller Analytik und entwickeln geeignete Prüfverfahren und Modelle.

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

Gruppe

Diagnostik Halbleitertechnologien

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

Frank Altmann
frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de

*Prof. Dr. Matthias Petzold
Geschäftsfeldleiter*



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

BEWERTUNG MIKROELEKTRONISCHER SYSTEMINTEGRATION

Prof. Dr. Matthias Petzold

matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

WERKSTOFFANALYTIK AN EMBEDDED WAFER LEVEL BALL GRID ARRAYS

Elektronische Bauteile, aufgebaut mit Wafer Level Packages (WLP), sind klein, kostengünstig und bieten hohe elektrische Performance. Die von Infineon Technologies entwickelte Technologie Embedded Wafer Level Ball Grid Array (eWLB) erweitert diese günstigen Eigenschaften deutlich: Die vereinzelt Silizium-Chips werden in einem Moldcompound zu einem neuen künstlichen Wafer angeordnet. Die elektrischen Anschlüsse des IC können nun mithilfe von Dünnschichtprozessen flächenhaft zusätzlich auch über die den Chip umgebenden Bereiche des Moldcompounds umverdrahtet werden (Fan-out-WLB). Dadurch wird bei eWLB-Packages die Begrenzung der realisierbaren Anschlusszahl durch die Größe des Siliziumchips aufgehoben, wodurch sich weit bessere Potenziale für den flexiblen Aufbau sehr hoch integrierter und leistungsfähiger Bauelemente und Systeme ergeben.

Untersuchung von Kontaktwiderständen

Im Rahmen einer vom BMBF geförderten Kooperation mit Infineon wurden hochauflösende prozessbegleitende Analysen durchgeführt, um die Optimierung der Technologie zu unterstützen. Ein typisches Beispiel dafür ist die Untersuchung von Kontaktwiderständen zwischen dem Umverdrahtungssystem und den IC-Anschlüssen. Bei Tests des Kontaktwiderstands von eWLB-Wafern war eine Veränderung des Widerstands vom Rand des künstlichen Wafers zur Mitte hin sowie eine hohe Streuung der Werte detektiert worden (Abbildung 1, »Referenz«).

Fehlermechanismen bei eWLB-Wafern

Um die physikalischen Ursachen für die Veränderung des Kontaktwiderstands zu analysieren, wurden am

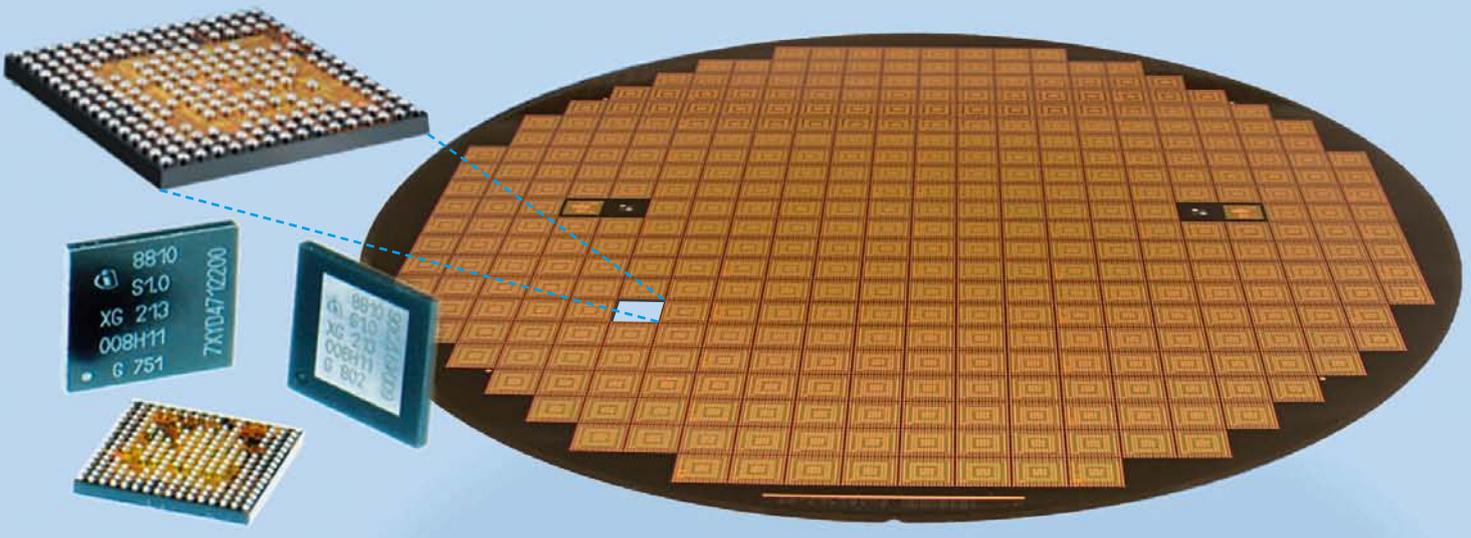
Fraunhofer IWM verschiedene eWLB-Metallisierungssysteme nach unterschiedlichen Prozessschrittvariationen untersucht. Einzelkontakte, die einen erhöhten elektrischen Widerstand verursachen, konnten mittels Flugzeit-Massen-Spektrometrie (ToF-SIMS) charakterisiert werden. Weiterhin wurden die Grenzflächen zwischen dem UBM-System (Al/TiW/Cu) und der Cu-Leitbahn der Umverdrahtung mikrostrukturell mithilfe der fokussierten Ionenstrahltechnik (FIB) und hochauflösender Elektronenmikroskopie (REM/HRTEM) analysiert. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die hochohmigen Kontakt-Grenzflächen eine 2–10 nm dicke, poröse Zwischenschicht aus den Bestandteilen Sauerstoff, Kohlenstoff, Fluor, Chlor und Schwefel aufweisen (Abbildung 2).

Aufbauend auf den am Fraunhofer IWM durchgeführten Analysen wurden seitens Infineon drei Fehlermechanismen verifiziert:

- Feuchtigkeit tritt während des Sputterprozesses aus dem Moldcompound aus und wird in der Plasma-Pre-Clean-Kammer in H₂ und O₂ aufgespalten. O₂ reoxidiert die Aluminium-Pads auf dem IC während des Pre-Clean-Prozesses.
- Wasserdampf aus dem Moldcompound kondensiert, führt einen Teil des Dielektrikums mit und verunreinigt die Aluminumpads.
- Die Ätzrate des Pre-Clean-Prozesses wird durch eine Verbiegung des Wafers reduziert.

Weltweite Markteinführung von eWLB

Durch die Analyseergebnisse konnte Infineon Prozessoptimierungen ableiten, die ein zuverlässiges und reproduzierbares elektrisches Kontaktverhalten gewährleisten (Abbildung 1,



Künstlicher eWLB-Wafer und einzelne eWLB-Bauelemente.

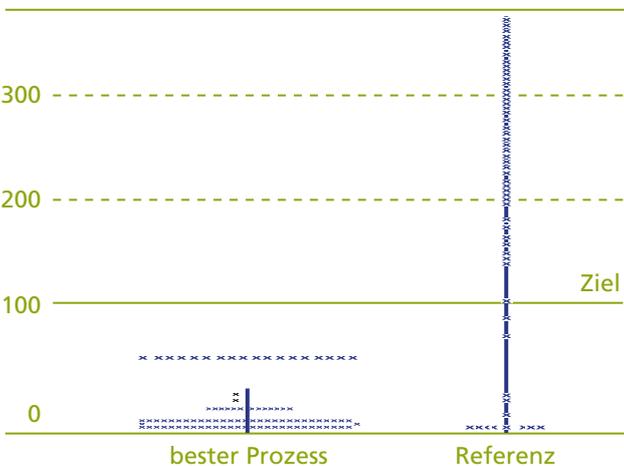
»bester Prozess«). Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination unterschiedlicher Analytikmethoden (beispielsweise HRTEM und ToF-SIMS) sehr wichtig für optimierte Prozessentwicklungen moderner Gehäusetechnologien ist.

Mithilfe der am Fraunhofer IWM durchgeführten Arbeiten wurde ein Beitrag zur weltweiten Markteinführung der eWLB-Technologie

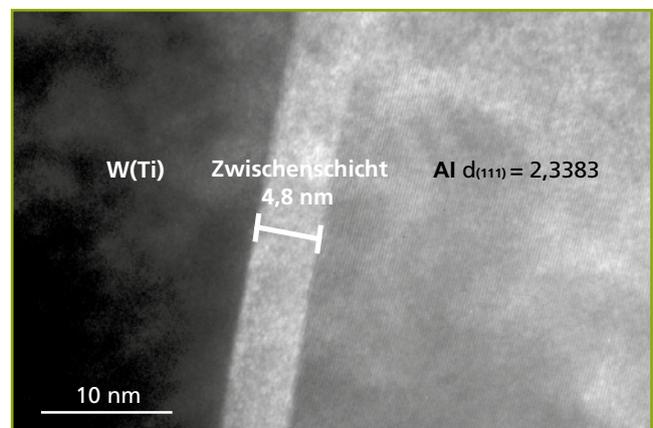
durch Infineon im Jahr 2009 geleistet. Die eWLB-Technologie hat sich mittlerweile zu einer eindrucksvollen Erfolgsstory entwickelt: Mittlerweile sind bereits mehr als hundert Millionen eWLB-Bauelemente vorwiegend für Mobiltelefone durch Infineon am Standort Regensburg hergestellt und verkauft worden.

Sandy Klengel, Michael Krause

Kontaktwiderstand in % Ohm



1 Minimierung des Kontaktwiderstands R_c durch den optimierten Prozess (bester Prozess) im Vergleich zum Referenzprozess.



2 Hochauflösende TEM-Abbildung (Netzebenen) der widerstandserhöhenden Zwischenschicht, im Beispiel mit 4,8 nm Dicke.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

CHARAKTERISIERUNG MIKROSYSTEME

Prof. Dr. Matthias Petzold

matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de

ZERSTÖRUNGSFREIE BEWERTUNG WAFER GEBONDETER MIKROSYSTEME

Das Waferbonden ist einer der grundlegenden Prozessschritte bei Aufbau und Entwicklung komplexer mikroelektronischer Bauteile und Baugruppen. Mit steigender Integrationsrate und einer damit einhergehenden Erhöhung der Komplexität mikroelektronischer Komponenten wachsen die Anforderungen an das Bondinterface. Auch in kleinsten Dimensionen stellen Defekte wie Delaminationen oder Einschlüsse im Bondinterface ein hohes Zuverlässigkeitsrisiko dar und können zum vollständigen Versagen eines Bauelements führen. Folglich ist eine zerstörungsfreie Detektion solcher Defekte für die Anwendung in der Qualitätskontrolle sowie die Fehleranalyse von großem Interesse.

Interfaceintegrität: Inspektion und Visualisierung

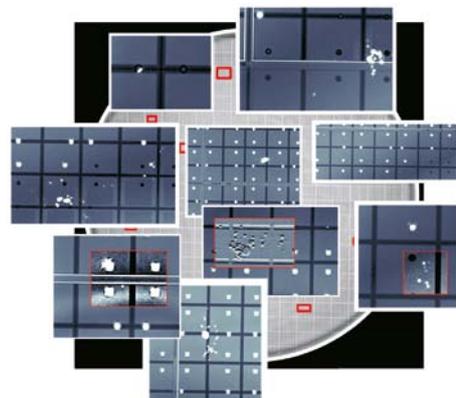
Ultraschallbasierte Untersuchungsverfahren haben den Vorteil, optisch nicht transparente Materialien »durchleuchten« zu können, und erlauben, die interne Struktur zerstörungsfrei abzubilden. Die akustische Rastermikroskopie in Kombination mit stark fokussierenden Ultraschallwandlern bietet die Möglichkeit, die Integrität von Bondinterfaces zu untersuchen und selbst Defekte geringer Ausdehnung zerstörungsfrei zu erfassen. So ist es beispielsweise möglich, gasgefüllte Einschlüsse wie Delaminationen, die eine axiale Ausdehnung im Nanometerbereich haben, sehr genau abzubilden. Anders verhält es sich bei Einschlüssen oder Mikrorissen, die im Vergleich zu Delaminationen nur einen relativ schwachen Abbildungs- kontrast bieten. Zur Detektion solcher Fehler und von Defekten mit lateralen Dimensionen im einstelligen Mikrometerbereich werden am Fraunhofer IWM in enger Kooperation mit dem Gerätehersteller PVA Tepla Analytical Systems GmbH Algo-

rithmen zur akustischen Signal- und Bildanalyse entwickelt und in einer umfassenden Analysesoftware zur Durchführung ultraschallbasierter Untersuchungen kombiniert.

Anwendung der akustischen Analyse

Der Einsatz der entwickelten akustischen Analysemethoden ist breit gefächert. Die Möglichkeit zur Untersuchung von Wafern mit bis zu 30 cm Durchmesser in Kombination mit einem Auflösungsvermögen im unteren Mikrometerbereich wird durch die Anwendung der entwickelten Analysemethoden erreicht. In Abbildung 1 sind Ergebnisse einer akustischen Analyse eines Bondinterfaces dargestellt. Die Größenordnung der Defekte liegt bei etwa 20 µm.

Dr. Sebastian Brand, Bianca Böttge



1 Akustische Untersuchung eines gebondeten Wafers – die kleinsten Defekte sind bis zu 2 µm groß. Das Bild im Hintergrund hat eine Pixelauflösung von 25 µm. Die prozessierten Detailbilder sind im Vordergrund zu sehen – ihre Auflösung reicht hinunter bis zu 2 µm.

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

DIAGNOSTIK HALBLEITERTECHNOLOGIEN

Frank Altmann

frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de

ALTERUNGSBEDINGTE STRUKTURDEFEKTE IN ORGANISCHEN LEUCHTDIODEN

Mit organischen Leuchtdioden lassen sich extrem dünne und nahezu beliebig skalierbare diffuse Lichtquellen herstellen, darum finden sie zunehmend Einsatz in der industriellen Produktentwicklung. Dabei ist die Gewährleistung eines stabilen und langlebigen Betriebes von entscheidender Bedeutung. Die Lebensdauer einer organischen Leuchtdiode wird durch Alterungsprozesse im lichtemittierenden Schichtstapel bestimmt. Er besteht aus dünnen Polymerschichten und elektrisch leitenden Metall- bzw. ITO-Schichten. Das Fraunhofer IWM befasst sich mit der mikrostrukturellen Charakterisierung von definiert gealterten organischen Leuchtdioden, um herstellungs- und einsatzbedingte Ausfallursachen zu ermitteln. Ein typisches Ausfallbild ist die Ausbildung lokaler Kurzschlusspfade in der lichterzeugenden Struktur.

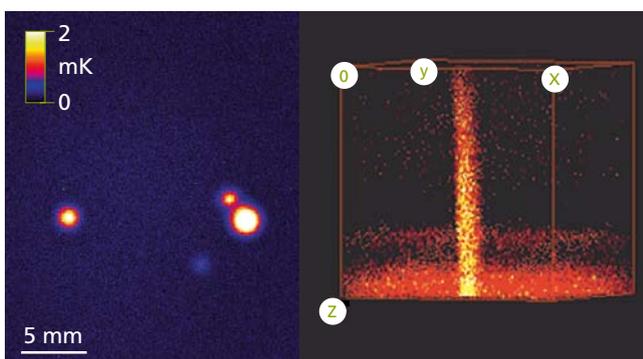
Lokalisierung alterungsbedingter Schadstellen

Zur gezielten Alterung werden organische Leuchtdioden im Arbeitspunkt über mehrere Stunden betrieben. Zur frühzeitigen Lokalisierung von Schadstellen werden die Proben mit dem Verfahren der Lock-in-Thermographie untersucht. Dabei werden die Proben mit einer gepulsten Rechteckspannung von einigen Hertz angeregt und die resultierende Temperaturverteilung auf der Oberfläche mit einer hochauflösenden Thermographiekamera erfasst. Durch Korrelation der elektrischen Anregung mit der Bilderfassung nach dem Lock-in-Prinzip können Temperaturerhöhungen im Mikrokelvin-Bereich nachgewiesen und lokal mikrometergenau zugeordnet werden. Schadstellen mit erhöhter Stromdichte können so anhand der lokalen Temperaturerhöhung frühzeitig identifiziert werden (Abbildung 1, links).

Mikrostrukturelle Bewertung von Alterungsdefekten

Zur Charakterisierung der Schichtstruktur und der chemischen Zusammensetzung an lokalisierten Schadstellen im Vergleich zu Referenzbereichen werden Untersuchungsverfahren der Elektronenmikroskopie und Sekundärionenmassenspektrometrie eingesetzt. Dabei konnten in Schadbereichen metallisch verunreinigte Kanäle im Polymerstapel identifiziert und dreidimensional visualisiert werden. Die Eindiffusion von Metall-Ionen aus dem Elektrodenmaterial konnte so als eine alterungsbedingte Ausfallursache identifiziert werden (Abbildung 1, rechts).

Frank Altmann



1 Mittels Lock-in-Thermographie lokalisierte Bereiche mit erhöhter Stromaufnahme und resultierender Temperaturerhöhung als potenzielle Schadstellen (links). 3D-Rekonstruktion der Fe-Verteilung in einem Messfeld mit lateraler Ausdehnung 250 µm x 250 µm; die Farbskalierung spiegelt die relative Intensität des Fe-Signals wider; gelb ist hohe Intensität (rechts).

Fraunhofer-Forschungszentrum

FRAUNHOFER-CENTER FÜR SILIZIUM-PHOTOVOLTAIK CSP

Das 2007 gegründete Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP ist eine gemeinsame Einrichtung der Fraunhofer-Institute für Werkstoffmechanik IWM und Solare Energiesysteme ISE. Das Fraunhofer CSP ist in Halle lokalisiert und unterhält ein Modultechnologiezentrum in Schkopau. Das Fraunhofer CSP untergliedert sich in die Bereiche »Labor für Kristallisationstechnologie LKT« und »Zuverlässigkeit und Technologie für die Netzparität ZTN«. Der dem Fraunhofer IWM zugeordnete Teil (ZTN) konzentriert sich auf die Entwicklung kostengünstiger Siliziumwafer, neuartiger optischer Materialien und neuer Modultechnologien. Die Technologieentwicklungen werden durch elektrische, optische, mechanische und mikrostrukturelle Diagnostik an Solarzellen und Wafern sowie durch Solarmodulzuverlässigkeitsuntersuchungen unterstützt.

Bemerkenswertes aus 2011

Im September wurde das Modultechnologiezentrum in Schkopau mit rund 2000 m² Technikumsfläche unter Beisein der Ministerin für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Prof. Dr. Birgitta Wolff, und dem Forschungsvorstand der Fraunhofer-Gesellschaft, Prof. Dr. Ulrich Buller, feierlich eröffnet. Das Modultechnologiezentrum bildet die infrastrukturelle Basis für die Bearbeitung verschiedener Vorhaben des CSP im Bereich der Modultechnologie.

Die Forschungsarbeiten von Sascha Dietrich, Rico Meier, Dr. Stefan Schulze und Dr. Matthias Ebert zum Thema »Mechanical Issues on Solar Modules and Encapsulated Components« wurden auf dem »PV Module Reliability Workshop« des National Renewable Energy Laboratory in den USA mit dem »Best Poster Award« ausgezeichnet.

Gruppe

Diagnostik Solarzellen

Wir beschäftigen uns mit der elektrischen Charakterisierung von Solarzellen, der Spurenanalytik von Ausgangsmaterialien und Prozessstoffen sowie der Mikrostrukturdiagnostik von Halbleitermaterialien – von der Charakterisierung kristallisierten Solarsiliziums bis zur mikrostrukturbasierten Defektdiagnostik für die Dünnschicht-Photovoltaikindustrie. Zudem entwickeln und charakterisieren wir Schichtsysteme und Laserstrukturierungen für die Solarzellen der nächsten Generation.

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

Gruppe

Modulzuverlässigkeit

Im Fokus stehen materialwissenschaftliche Analysen, mechanische Versuche und Charakterisierungen, Leistungsmessungen in Labor und Feld sowie mechanische und thermomechanische Finite-Elemente-Simulation von Solarmodulen. Wir untersuchen Solarmodule hinsichtlich Zuverlässigkeitsaspekten, optimieren sie und entwickeln technologische Prozesse und Materialien weiter. So erhalten Partner und Kunden eine umfassende, einzigartige Charakterisierung von Modulen aus einer Hand.

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

Gruppe

Siliziumwafer

Wir entwickeln Verfahren zur Herstellung dünner Siliziumwafer und zur Bewertung mechanischer Eigenschaften von Wafern und Solarzellen. Wir betrachten die gesamte Prozesskette: von der Vereinzelung von Ingots über das Wafersägen bis hin zur Vermessung und Sortierung. Um die Bruchrate zu reduzieren

und die Ausbeute zu erhöhen, charakterisieren wir die Festigkeit und untersuchen industrielle Wafer- und Zelllinien.

Dr. Hartmut Schwabe
hartmut.schwabe@csp.fraunhofer.de

Gruppe

Optische Materialien und Spektroskopie

Zur Charakterisierung des optischen Zusammenspiels des Deckglases, der Verkapselungsmaterialien sowie der Antireflex- und gegebenenfalls TCO-Schichten von Solarmodulen bieten wir eine breite Palette spektroskopischer und bildgebender Verfahren. Wir entwickeln neuartige Materialien für das so genannte »Licht- und Photonenmanagement«. Unser Ziel ist, den Wirkungsgrad eines Solarmoduls zu steigern, indem wir das einfallende Licht geeignet manipulieren.

Dr. Stefan Schweizer
stefan.schweizer@csp.fraunhofer.de

Gruppe

Modultechnologie

Unser Fokus ist die Analyse, Optimierung und Neuentwicklung industrieller Fertigungstechniken für Solarmodule. Wir arbeiten an der Zellmetallisierung und an unterschiedlichen Serienverschaltungstechnologien – von der konventionellen Löttechnik bis zu innovativen Laser- und Kunststoffkontaktierungen. Neben klassischen Laminiertechnologien optimieren wir innovative Verkapselungsprozesse wie die Nutzung von polymeren Verguss- und Spritzgusstechnologien.

Dr. Jens Schneider
jens.schneider@csp.fraunhofer.de

Prof. Dr. Jörg Bagdahn
Leiter Fraunhofer CSP und Abteilungsleiter
Zuverlässigkeit und Technologien für die Netzparität



Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

DIAGNOSTIK SOLARZELLEN

Dr. Christian Hagendorf

christian.hagendorf@csp.fraunhofer.de

REKOMBINATIONSAKTIVE KRISTALLDEFEKTE IN MULTIKRISTALLINEN SOLARZELLEN

Jede zweite Solarzelle am Markt besteht aus multikristallinem Silizium und ist somit kosten- und energieeffizient hergestellt worden. Multikristalline Solarzellen weisen jedoch eine Vielzahl von Kristalldefekten wie Korngrenzen und Versetzungen auf. An diesen Defekten können sich Verunreinigungen anlagern, die Strukturen werden dadurch »rekombinationsaktiv« und verringern den Wirkungsgrad der Solarzelle. Aufgrund der Vielzahl rekombinationsaktiver Defekte ist eine Klassifizierung und anschließende Ursachenforschung in den jeweiligen Klassen nötig.

Das Fraunhofer CSP und die Firma Q-Cells SE haben in einem gemeinsamen Projekt eine entsprechende Klassifizierung entdeckt und basierend darauf weiterführende Untersuchungen vorgenommen.

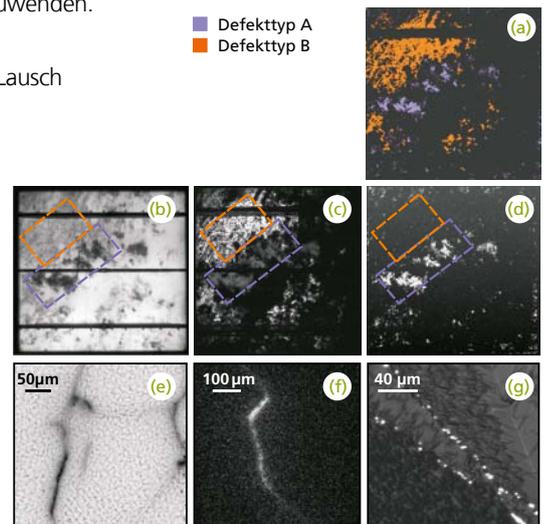
Klassifizierung auf makroskopischem Niveau

Zur Klassifizierung der rekombinationsaktiven Defektstrukturen einer 6"-Standard-Solarzelle wurde die etablierte und industriennahe Methode der Elektrolumineszenz der Solarzelle unter verschiedenen Arbeitsbedingungen herangezogen. Unter Berücksichtigung der strahlenden Band-Band-Lumineszenz (Abbildung 1b), der Defektlumineszenz (Abbildung 1c) und der Lumineszenz der Durchbrüche unter Sperrspannung (Abbildung 1d) lassen sich die Vielzahl der detektierten Defektstrukturen in zwei verschiedene Klassen (Typ A und Typ B, Abbildung 1a) unterteilen. Damit ist es möglich, mit einem schnellen Verfahren auf industriellem Niveau eine Vielzahl von Proben auf das Vorkommen der jeweiligen Defektklassen zu untersuchen und Rückschlüsse auf deren Herkunft zu erhalten.

Klassifizierung auf mikroskopischem Niveau

Für weiterführende Untersuchungen wurde die eingeführte Klassifizierung auch auf mikroskopischer Skala vorgenommen. Dafür wurde mittels eines Rasterelektronenmikroskops der elektronenstrahl-induzierte Strom und die Defekt- und Sperrlumineszenz mittels eines Lichtmikroskops gemessen (Abbildung 1e–g). Die verschiedenen Typen konnten auch hier eindeutig detektiert und separiert werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, durch Anwendung weiterer Methoden die Ursachen der Rekombinationsaktivität zu detektieren und im Kreisschluss für die makroskopische Klassifizierung anzuwenden.

Dominik Lausch



1 Verteilung der Defekttypen A und B auf einer 6" multikristallinen Solarzelle (a). Die Klassifizierung der Defekttypen wird mittels der Band-Band-Lumineszenz (b), der Defektlumineszenz (c) und der Lumineszenz der Durchbrüche (d) vorgenommen. Gleiche Eigenschaften mikroskopisch untersucht (e–g).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

MODULZUVERLÄSSIGKEIT

Dr. Matthias Ebert

matthias.ebert@csp.fraunhofer.de

VERARBEITUNG UND ZUVERLÄSSIGKEIT POLYMERER VERKAPSELUNGEN

Um Solarzellen zuverlässig und dauerhaft vor Umwelteinflüssen und mechanischen Belastungen zu schützen, werden diese in die weiche Matrix eines transparenten Polymers eingebettet. In der Fertigung von Solarmodulen spielen hierbei die Auswahl geeigneter, als Verkapselungsmaterialien bezeichneter Polymerfolien sowie deren kostengünstige Verarbeitung eine entscheidende Rolle. Bei einer garantierten Lebensdauer von Solarmodulen von mehr als 25 Jahren bestehen darüber hinaus extreme Anforderungen an die Materialbeständigkeit unter verschiedenen Witterungseinflüssen wie Feuchtigkeit, Wärme, einwirkung, UV-Strahlung und Temperaturwechsellasten. Im Team Polymermaterialien werden solche Polymere auf dieses komplexe Eigenschaftsbild hin getestet. Dabei werden polymerbezogene Verarbeitungsprozesse und Modulaufbauten entwickelt und die Materialien für die Eignung zur dauerhaften Verkapselung von Solarzellen qualifiziert.

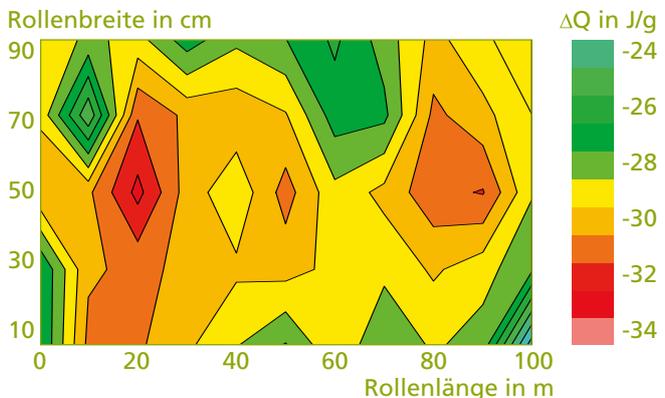
Homogenität vernetzender Einbettungsmaterialien

Das am weitesten verbreitete Verkapselungsmaterial stellt peroxidisch vernetzendes Ethylvinylacetat (EVA) dar, welches sich für eine dauerhafte Einbettung von Solarzellen seit Jahrzehnten bewährt hat. Dennoch bestehen bei der Herstellung der Folien mittels Extrusion Fragestellungen, welche die Homogenität dieser Materialien und somit die Zuverlässigkeit von Solarmodulen direkt betreffen. In Projekten mit Rohmaterial- und Folienherstellern werden Folien entwickelt, die den Ansprüchen einer homogenen Einbettungsfolie gerecht werden. Die orts aufgelöste Vernetzungswärme entlang der Foliendimensionen ist in Abbildung 1 für ein kommerzielles Produkt dargestellt.

Verarbeitungseigenschaften von Verkapselungsmaterialien

Die Art und die Menge des Vernetzers, welcher mit der frei werdenden Reaktionswärme korreliert werden kann, beeinflusst zudem die Geschwindigkeit der Ausbildung des kovalenten Netzwerks. In der Arbeitsgruppe werden Methoden der Differentiellen Wärmestromkalorimetrie (DSC) und Dynamisch-Mechanischen Analyse (DMA) herangezogen, um diese Vernetzungskinetik zu bewerten. Damit können mittels formalkinetischer Modellierungsverfahren Vernetzungsprozesse unter dynamischer Temperaturführung vorhergesagt und der Laminationsprozess von Solarmodulen hinsichtlich der Temperaturführung optimiert werden.

Dr. Stefan Schulze



1 Ortstreuere Vernetzungswärme einer EVA-Folie entlang der Foliendimensionen (Heizrate 10 K/min, $\Delta Q = -28,44$ J/g, $s = 1,83$ J/g).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

SILIZIUMWAFER

Dr. Hartmut Schwabe

hartmut.schwabe@csp.fraunhofer.de

ZUVERLÄSSIGKEIT VON METAL-WRAP-THROUGH(MWT)-SOLARZELLEN

Das Metal-Wrap-Through-Konzept ist ein Solarzellendesign, bei dem Abschattungsverluste aufgrund der Kontaktstrukturen auf der Zellvorderseite verringert werden, indem sie durch Löcher auf die Solarzellenrückseite gelegt werden. In der Fertigung werden die Löcher mittels Laser in den gesägten Siliziumwafer, dem Ausgangssubstrat für die Solarzelle, gebohrt. Neben der elektrischen Effizienz der Solarzelle ist auch die mechanische Zuverlässigkeit wichtig, um Bruchraten sowie Fertigungskosten zu minimieren. Daher muss der Einfluss der Löcher auf das Festigkeitsverhalten analysiert werden.

Wahrscheinlichkeit relevanter Defekte

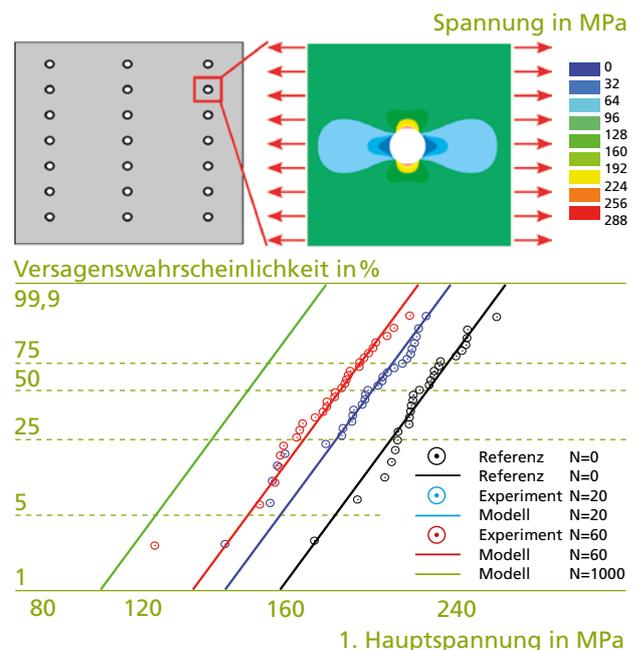
Da es sich bei Silizium um ein sprödes Material handelt, führen einzelne kritische Defekte zum Versagen der gesamten Struktur. Daher ist nicht nur die maximale Beanspruchung im Material, sondern auch die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines kritischen Defektes entscheidend. Für die Metal-Wrap-Through-Wafer bedeutet dies, dass an den Löchern durch eine homogene Zugbelastung zwar eine 3-fache Spannungsüberhöhung entsteht, diese aber nur ein kleines Volumen im Gesamtwufer belastet. Die Änderung der Waferfestigkeit aufgrund der Löcher ist von der Wahrscheinlichkeit relevanter Defekte im Bereich der Löcher abhängig.

Mechanische Zuverlässigkeit

Für die Lösung wurde das Versagensmodell gemäß der Weibullverteilung unter Berücksichtigung der Anzahl und Geometrie der Löcher erweitert. Das Modell basiert dabei auf experimentellen Festigkeitskennwerten von Referenzwafern ohne Löcher, kann aber die Veränderung des Versagens von Wafern mit Löchern vorhersagen (Abbildung 1). Im Ergebnis

zeigt sich ein geringer Einfluss der Löcher auf das Festigkeitsverhalten der Wafer, da das Volumen der hoch belasteten Bereiche vergleichsweise gering ist. Mit zunehmender Lochanzahl steigt auch der Einfluss auf die Festigkeit. Mit diesem Modell lässt sich eine beliebige Lochgeometrie, -anzahl und -position auf dem Wafer berücksichtigen und die Veränderung der mechanischen Zuverlässigkeit vorhersagen.

Dr. Stephan Schönfelder



1 Skizze MWT-Wafer (oben links) und 1. Hauptspannung an einem 130 µm Loch in monokristallinem Silizium, $\sigma = 100$ MPa (oben rechts), Weibullverteilungen aus Experiment (Kreise) und Modell (Linie) für Wafer mit unterschiedlicher Lochanzahl N (unten).

Ausgewählte Forschungsergebnisse

Gruppe

OPTISCHE MATERIALIEN UND SPEKTROSKOPIE

Dr. Stefan Schweizer

stefan.schweizer@csp.fraunhofer.de

LASERSTRUKTURIERTE DECKGLÄSER: LICHTMANAGEMENT IN SOLARMODULEN

Die Strukturierung und Funktionalisierung der Glasoberfläche in Solarmodulen bietet einen bisher nur teilweise erforschten Ansatzpunkt zur Optimierung des Wirkungsgrades. Mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen können Solargläser flexibel und innovativ im Mikro- und Nanometerbereich strukturiert werden, um ein verbessertes Lichtmanagement in Solarmodulen zu erreichen.

Laserpuls-Einsatz

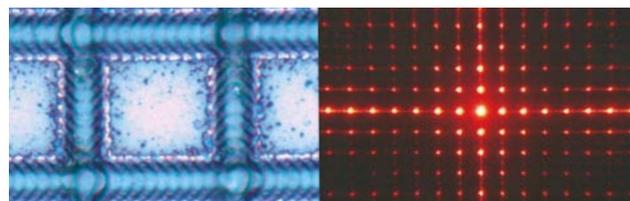
Der Einsatz von intensiven Femtosekunden-Laserpulsen ermöglicht im Gegensatz zur herkömmlichen Strukturierung mittels Nanosekunden-Lasern die Herstellung völlig neuartiger Strukturen, da hier die besonderen nichtlinearen Wechselwirkungsmechanismen (Photoablation, Photodisruption) auf einer Zeitskala unterhalb der thermischen Prozesse ablaufen. Das Glas in unmittelbarer Umgebung des Laserpulsfokus wird hierbei nicht geschädigt. Ultrakurze Pulse eines Femtosekunden-Lasersystems wurden genutzt, um die Oberfläche eines Solarglases zu strukturieren. Die zentrale Laserwellenlänge betrug 1030 nm, die Pulsdauer etwa 300 Femtosekunden. Die hergestellten 2D-Gitter bestehen aus vielen feinen, parallel oder senkrecht zueinander verlaufenden Gräben. Die Linienabstände der Gräben liegen im Bereich von 10 bis 100 μm , die Breite der ablatierten Gräben beträgt etwa 8 μm . Abbildung 1, oben links, zeigt beispielhaft eine Lichtmikroskopaufnahme eines Gitters mit 25 μm Linienabstand. Die 2D-Gitterstrukturen weisen alle das typische Verhalten eines optischen Gitters auf (Abbildung 1, oben rechts).

Steigerung der Vorwärtsstreuung

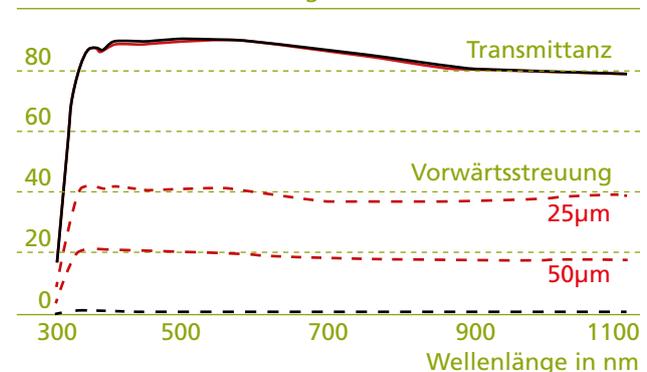
Messungen der Transmittanz und der Vorwärtsstreuung (Abbildung 1, unten) zeigen, dass unstrukturiertes Solarglas im untersuchten Spektralbereich keine signifikante Streuung

besitzt (weniger als 1 Prozent). Laserstrukturierung führt bei nahezu gleichbleibender totaler Transmittanz zu einer deutlichen Steigerung der Vorwärtsstreuung. Die Vorwärtsstreuung einer 2D-Struktur mit einem Gitterabstand von 50 μm beträgt etwa 20 Prozent, für die 25 μm Gitterstruktur kann der Anteil der Vorwärtsstreuung auf 40 Prozent erhöht werden.

Stephan Krause, Dr. Paul-Tiberiu Miclea



Transmittanz und Streuung in %



1 2D-Gitterstruktur mit einem Linienabstand von 25 μm : optisches Mikroskopbild (oben links) und Beugungsbild (oben rechts). Transmittanz (durchgezogene Linien) und Vorwärtsstreuung (gestrichelt) des unstrukturierten Glases (schwarz) und von 2D-Strukturen (rot) mit verschiedenen Linienabständen (unten).

VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM

Forschungskooperationen mit Fraunhofer-Instituten

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile

Fraunhofer-Materialforschung umfasst die gesamte Kette von der Entwicklung und Verbesserung von Materialien über die Herstelltechnologie und Charakterisierung der Eigenschaften bis 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

crashMAT, Freiburger-Zentrum für crashrelevante Material- und Bauteilcharakterisierung

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

Dr. Dieter Siegele

www.crashmat.de

Fraunhofer-Allianz Adaptronik

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

Monika Gall

www.adaptronik.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 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 Mikroenergie-technik.

Dr. Jörg Bagdahn

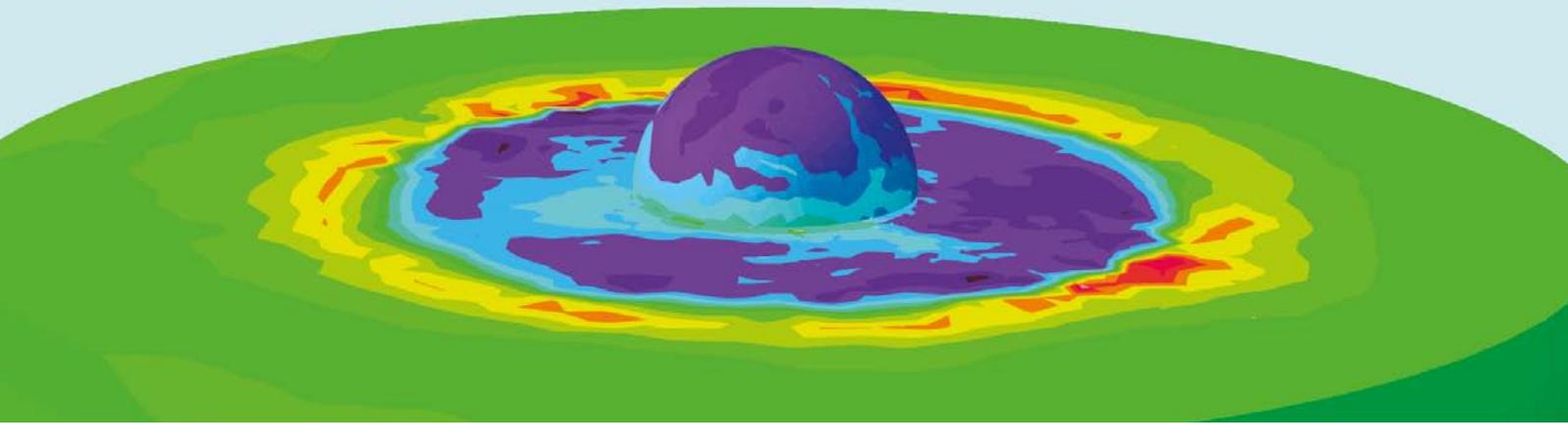
www.energie.fraunhofer.de

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



Rissinitiierung durch gebrochenes Partikel an Korngrenze.

Fraunhofer-Allianz Hochleistungskeramik

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

Dr. Andreas Kailer

www.advancer.fraunhofer.de

Fraunhofer-Allianz 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

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 Submikrostrukturen. 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

VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM

Gemeinschaftsforschung in der Fraunhofer-Gesellschaft

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

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 Wasserabrasivstrahlens ist komplex aufgrund der hochdynamischen Wechselwirkung des Trägerfluids und der Abrasivkörner mit dem Werkstück.

Prof. Dr. Michael Moseler

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

»Tailored Optics« entwickelt und bewertet die gesamte Kette zur Herstellung von hochpräzisen Heißformwerkzeugen für optische Linsen aus Glas. Die Arbeitsschwerpunkte sind die Entwicklung und Herstellung von Hartmetall-Formwerkstoffen, Verfahren zur Ultrapräzisionsbearbeitung der Funktionsflächen, der Beschichtung sowie von Einsatztests der Formwerkzeuge in Heißformgebungstechniken für verschiedene Anwendungsfelder.

Dr. Frank Burmeister

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

Im Projekt werden Verfahren zur Herstellung und Charakterisierung von Werkstoffen aus mehreren geschäumten Materialien entwickelt. Anwendung finden solche Verbundwerkstoffe in der mechanischen Energieabsorption in neuartigen Leichtbau-Crashelementen, im multifunktionalen Schallschutz und in leichten, hochsteifen Konstruktionselementen.

Dr. Jörg Hohe, Andreas Krombholz

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



Akustisches Rastermikroskop beim Scannen eines prozessierten Wafers.

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 auf Basis neuartiger Rapid-Prototyping-Verfahren. Das Projekt umfasst die Entwicklung neuartiger biokompatibler Ausgangsmaterialien für die generativen Fertigungstechniken, die Technologieentwicklung zur Fertigung eines Blutgefäßsystems sowie die Biofunktionalisierung des Gefäßsystems für dessen optimale zelluläre Besiedlung.

Dr. Raimund Jaeger

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

Neue innovative Verfahren zur kostengünstigen Herstellung von kurzfaserverstärkten keramischen Verbundwerkstoffen sollen entwickelt werden. Der Schwerpunkt des Projektes liegt in einer für CMC-Werkstoffe völlig neuartigen Technologieentwicklung zur Herstellung von Keramikhalbzeugen mit Hilfe von Gieß- und Pressverfahren, wie sie zur Massenproduktion von Kunststoffteilen bereits etabliert sind.

Dr. Achim Neubrand, Dr. Ralf Schäuble

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

Durch Kontrolle der Defektchemie und Morphologie von transparenten, halbleitenden Oxiden werden bandgap-optimierte Materialsysteme sowie transparente, halbleitende Oxide entwickelt. Mit diesen Materialsystemen können deutlich kostengünstigere und effizientere Dünnschicht-Solarzellen und OLED-Displays realisiert werden. Weitere Anwendungen sind die transparente Elektronik für Displayanwendungen sowie niedrigemittierende, beschlaghemmende Beschichtungen für Architektur und Fahrzeugverglasungen.

Prof. Dr. Christian Elsässer

Fraunhofer-Systemforschung Elektromobilität

Mit der »Systemforschung Elektromobilität« verfolgt die Fraunhofer-Gesellschaft das Ziel, den Wandel zu einer nachhaltigen »All-electric Economy« wirkungsvoll zu unterstützen. Die Besonderheit des Fraunhofer-Ansatzes ist es, alle Wertschöpfungsstufen der Elektromobilität zu betrachten und aufeinander abgestimmt zu erforschen – ausgehend von der Energieerzeugung, über den Transport und die Verteilung der Energie durch die Stromnetze, die Schnittstellen zwischen Stromnetz und Fahrzeug, die Energiespeicherung bis hin zu neuen Fahrzeugkonzepten mit einer neuen Infrastruktur sowie Nutzungs- und Abrechnungskonzepten. Werkstoffmechanik spielt in der Elektromobilität eine wichtige Rolle. Daher bringt das Fraunhofer IWM in vielen Teileprojekten seine Expertise ein:

Radnabenmotor

- Auslegung Hybridlager
- Simulation PM-Weichmagnete
- Auslegung Batterieaufhängung

Auslegung Batteriemodul und Batteriesystemgehäusen

- Entwicklung von Leichtbaulösungen für die Integration in die Karosserie
- Bewerten des Crashverhaltens von Batteriesystemen

Energiespeichertechnik

- Simulation von Batteriematerialien

Systemintegration

- Simulation magnetorheologische Kupplung

Dr. Michael Luke

VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM

Innovationscluster und Max-Planck-Gesellschaft

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

Polymertechnologie, Halle

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

Dr. Michael Busch

Technologien für den hybriden Leichtbau KITE hyLITE, Karlsruhe

Die Fraunhofer-Institute ICT, IWM und LBF, das Center of Automotive Research and Technology CART 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

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

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

Dem Stahl auf seinen kristallinen Grund gehen

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

Prof. Dr. Hermann Riedel,

Dr. Dirk Helm (Projektleiter am Fraunhofer IWM)

Mechanische Prüfung und Bewertung

Servohydraulische, elektrodynamische und elektromechanische Prüfmaschinen für Prüfkraft 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)
- Schnellerreißmaschinen bis 100 kN und Abzugsgeschwindigkeiten bis 20 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)

- 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

- 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 kV) mit Röntgenanalysesystem (Nanospot-EDX)
- Tecnai-Transmissionselektronenmikroskop
- Titan-Raster-Transmissionselektronenmikroskop
- Einstrahl-Fokussierende Ionenstrahlanlage (FIB) mit integriertem IR-Mikroskop
- Zweistrahl-FIB-Anlage mit In-situ-Manipulator
- Zweistrahl-FIB-Anlage mit EBSD- und EDX-Analytik
- 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, C-Bedampfung und Sputter-Coater, Rotationsmikrotom, Ultramikrotom, Kryo-Ultramikrotom, Kritisch-Punkt-Trocknung, Kryofixierung

- Time-of-Flight-Sekundärionen-Massenspektroskopie (ToF-SIMS)
- Photoelektronenspektroskopie mit Abtragsmodus, Tiefenprofil (XPS, UPS) sowie Auger-Elektronenspektroskopie (AES)
- Tiefenprofil-Glimmentladungsspektrometer (GDOES)
- Massenspektroskopie mit induktiv-gekoppeltem Plasma (ICPMS) mit Laserablation, chemischem Aufschluss und elektrothermischer Verdampfung

GERÄTEAUSSTATTUNG

- Kontaktwinkelmessung
- Plasmaanalytiksystem (OES, VI-Probe, SEERS)
- Konfokales Ramanmikroskop
- Dynamische Widerstandsmessung für hochohmige dünne Schichten (piezoresistive Effekte messbar)
- Automatischer Messplatz für Picoamperemessungen
- Rasterkraftmikroskope (AFM), u.a. mit Lateralkraftmessung und Flüssigkeitsmesszelle
- Weißlichtinterferometer
- Konfokal-Laserscanningmikroskope
- Rauheitsmesseinrichtungen, Profilometer
- Interferometrische Eigenspannungsmessung
- Dynamische Widerstandsmessung für hochohmige dünne Schichten (piezoresistive Effekte messbar)
- Automatischer Messplatz für Picoamperemessungen
- Waferdickenbestimmung
- Interferometer mit Phasenschieber für Konturmessung von Asphären
- Lichtmikroskope, Dunkelfeld- und DIK-Modus (bis 1 500-fache Vergrößerung)
- Quantitative Bildanalyzesysteme: UV/VIS-Spektrometer und Spektralellipsometer
- UV/VIS-Spektroskopie
- Elektrolumineszenz- und Photolumineszenz-Spektroskopie – Infrarot-Mikroskopie
- ATR-FTIR-Spektroskopie und -Mikroskopie
- Mikro-Raman-Spektrometer
- IR-Spannungsoptik
- Verfahren zur Messung der Ladungsträgerlebensdauer (Mikrowellen-Photoconductance-Decay, quasistatische Photoleitfähigkeit)
- Röntgendiffraktometer für Spannungsmessung, Textur- und Phasenanalyse mit Hochtemperatureinrichtung bis 2 300 K und Dünnschichtanalyseeinrichtung
- Drei mobile Diffraktometer für Eigenspannungsanalysen
- Mikrodiffraktometer (laterale Auflösung von 100 µm)
- Bohrlochverfahren für tiefenauflösende Eigenspannungsanalysen
- 3-D-Röntgen-CT-Inspektionsanlage
- Lock-in-Thermographie mit elektrischer und optischer Anregung
- Akustische Mikroskopie (MHz bis GHz)
- Dynamische Differenzkalorimetrie bis 1 600 °C
- Thermogravimetrische Analyse
- Differential-Thermoanalyse
- Dilatometer bis 1 650 °C
- Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsmessung (Laser-Flash-Methode) bis 2 000 °C
- Nanoindenter mit Temperierung
- Scratch-Tester mit Scanning-Option
- Mikro- und Makrohärteprüfer (vollautomatisch und manuell), mobile Härtemessung
- Registrierender Eindruckversuch bis 600 °C
- Rücksprunghärtemessgerät
- Mikrotribometer
- Dilatometer
- Thermomechanische Analyse (TMA)
- Rotationsrheometer
- Hochdruckkapillarviskosimeter
- Schmelzefestigkeits- und Schmelzindexmessgeräte
- HDT-Wärmeformbeständigkeits- und Vicat-Erweichungstemperaturmessung
- Dielektrische Analyse (DEA)
- Schubstangendilatometer
- Wasserstoffanalysator inkl. Auslagerungssofen
- Stickstoff- und Sauerstoffanalysator
- Dichte- und Porositätsmesseinrichtungen
- Wasserstoffpermeationsprüfstand mit Zug- und Temperatureinrichtung
- Karl-Fischer-Titrator (Feuchtemessung)
- Restgasanalysator
- Gaspermeationsmessgerät

Beschichtung, Oberflächentechnik

- 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 Plasmapolymersation
- Plasmaätzenanlagen
- Nasschemische Beschichtungsanlagen (Spin-Coating, Rakelbeschichtung, Tauchbeschichtung)
- Elektrostatische Spinneinrichtung
- Ionenätzenanlage zur Probenpräparation und Oberflächenbearbeitung
- Waferbondanlage mit Plasmaaktivierung
- Drahtbondtechnik zur Kontaktierung von mikroelektronischen Bauelementen
- Blankpressanlage für präzisionsoptische Bauteile aus anorganischem Glas
- Pressanlagen für schnelles Heißprägen von Glas
- Laserschneidanlage zum thermischen Trennen von Glas
- Anlage zum Laserschweißen von Polymerfolien
- Präzisionsdreh- und -fräsmaschinen

GERÄTEAUSSTATTUNG

- Kugelstrahlanlagen zur Verfestigung und Strukturierung von Oberflächen

Polymerverarbeitung im Fraunhofer IWM und Fraunhofer PAZ

- Gleichdrehender Labordoppelschneckenextruder
- Minicompounder mit konischen Doppelschnecken
- Messkneiter bis 400 °C
- Minispritzgießanlage
- Spritzgießcompounder
- Ein- und Doppelschneckenextruder
- Spritzgießmaschine, auch für Polymerrahmen (mit CSP)
- Polyurethan-Anlage für Einbettung von Solarzellen (mit CSP)
- Faserschneider
- Laminat-Pressen

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-Layup-Station
- Halbautomatische Zellverlötungsanlage
- Labor- und Großmodullaminator
- RTP-Ofen
- Siebdrucker
- Präzisionsprüfmaschinen für Verbindungs- und Lotmaterial

Berechnungswerkzeuge

Hardware

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

Software

- ABAQUS, ANSYS, MSC PATRAN/NASTRAN, MSC MARC, PAM-CRASH, LS-Dyna, FEAP, SYSWELD, DEFORM, simufact
- »Gvect« zur Erzeugung von FE-Modellen aus Messungen von Kornorientierungen mit der »Electron Back Scatter Diffraction«-Methode (ANSYS und ABAQUS)
- »Fitit®« zur Parameteridentifikation
- »ThoMat« zur Lebensdauervorhersage von Hochtemperaturbauteilen mit Finite-Elemente-Programmen
- »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

PERSONEN, AUSBILDUNG, EREIGNISSE

Preise und Ehrungen

Förderpreis der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK), Fakultät Maschinen- und Energietechnik, an Matthias Pander für seine Masterarbeit »Mechanische Untersuchungen an Solarzellen in PV-Modulen mittels Finite-Elemente-Modellierung« 20.01.11, Leipzig

Bremer Studienpreis an Janina Zimmermann für ihre Dissertation »Atomistic modeling of the oxidation of titanium nitride and cobalt-chromium alloy surfaces« 31.01.11, Bremen

Preis für den besten Posterbeitrag des Photovoltaic Module Reliability Workshop an Dr. Matthias Ebert für »Mechanical Issues on Solar Modules and Encapsulated Components« 17.02.11, Golden, Colorado, USA

International Materials Science Prize of the Polychar World Forum on Advanced Materials an Dr. Sven Henning für seine wissenschaftliche Forschungsarbeit zu Werkstoffen für den Knochenersatz 24.03.11, Kathmandu, Nepal

Werkstoffmechanikpreis der Plansee SE an Matthias Gurr für seine Dissertation »Neue photohärtende Nanokomposite zur Anwendung in Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing« 01.06.11, Freiburg

FAHL Prize 2011: Preis für den besten Posterbeitrag des Workshops »Defects in Semiconductors and their Characterization« an Dominik Lausch für »Classification and Investigation of Recombination active Defects in polycrystalline Silicon Solar Cells« 20.09.11, Leipzig

Gäste im Institut Freiburg

Christoph Becker
WEFA Inotec GmbH
01.06.11-31.12.11

Nils Beckmann
Robert Bosch GmbH
01.07.10-14.07.13

Prof. Dr. Paul Bristowe
University of Cambridge, UK
18.11.09-31.10.11

Dr. Gabor Csanyi
University of Cambridge, UK
15.01.11-31.03.12

Wei-Jun He
Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China
22.10.11-21.10.12

Tobias Hoppe
Robert Bosch GmbH
01.02.10-31.01.12

Felix Mohr
Daimler AG
01.08.10-31.12.11

Philipp Mößner
Daimler AG
01.07.09-31.12.11

Dr. Lars Pastewka
Johns Hopkins University,
Baltimore, USA
01.01.11-30.06.12

Prof. Dr. Tony Paxton
Queen's University Belfast, UK
01.10.08-30.04.15

Prof. Dr. Thomas Seifert
Hochschule Offenburg
01.03.11-31.12.11

Prof. Dr. Dov Sherman
Technion – Israel Institute of
Technology, Haifa, Israel
01.03.11-30.09.11

Dr. Kisaraghi Yashiro
Kobe University, Japan
29.07.11-29.01.12

Gäste im Institut Halle

André Bärthel
Universität Leipzig
01.07.11-30.06.12

Dr. Felix Göhre
Universität Leipzig
01.07.11-30.06.12

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

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

Ludwig Schloemer
Universität Leipzig
01.07.11-30.06.12

Dissertationen in Freiburg

Friedmann, Valerie
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Bauteilverhalten und Lebensdauer-
vorhersage von Austenit-Martensit-
Rohrmischverbindungen für
600 °C-Kraftwerke

Hormann, Christoph
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Das Wachstum amorpher Kohlen-
stoffschichten auf Basis von Toluol

Dissertationen in Halle

Friedrich, Thomas
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Zuverlässigkeitsaspekte von
polykristallinem Silizium und deren
Einfluss auf die Funktion von
Inertialsensoren

Rinker, Martin
Technische Universität
Braunschweig
Bruchmechanische Bewertung der
Schadenstoleranz von CFK-Schaum-
Sandwichstrukturen

Schulze, Stefan
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Charakterisierung polymerer
Zwischenschichten in Verbundglas-
Solarmodulen

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

Bentele, Richard
Hochschule Ravensburg-Weingarten
Untersuchung stochastischer Ein-
flüsse auf die Schweißpunkttrag-
fähigkeit (B)

Courseau, Julien
École nationale supérieure publique
d'ingénieurs, Paris, Frankreich
Auslegung und Prüfung von gene-
rativ gefertigten Adersystemen (M)

Enterrios, Maria
University of Oviedo, Vegadeo,
Spanien
Validation of the FAD approach for
the assessment of surface flaws in
highly ductile materials (D)

Groß, Johannes
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Der Effekt der Mikrostrukturierung
auf die Reibung wassergeschmierter
Tribokontakte (D)

Horstmann, Konstantin
Fachhochschule Bielefeld
Mechanische Charakterisierung und
Analyse des Schädigungsverhaltens
von Polymerproben mit unterschiedli-
chen Faserverstärkungen (B)

Jacko, Marek
Hochschule Regensburg
Influence of grain orientation on
stress intensity factors in a fracture
mechanics specimen (B)

Küberling, Markus
Hochschule für Technik und
Wirtschaft Berlin
Aktivierung lackierter Stahloberflä-
chen via Atmosphärenplasma (M)

Maier, Johannes
Hochschule Karlsruhe
Simulation des Crashverhaltens me-
chanisch gefügter Verbindungen (M)

Michna, Peter
Hochschule Offenburg
Modellierung von Verformung und
Versagen einer Aluminiumlegierung
(M)

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

Büchner, Torsten
Hochschule Anhalt (FH), Köthen
Effizienzsteigerung von CdTe-Dünn-
schichtmodulen durch lichtkonvertie-
rende Deckgläser (B)

Busch, Franziska
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Morphologie und mechanisches
Verhalten von orientierten Block-
copolymeren (D)

Darr, Philipp
Fachhochschule Jena
Entwicklung einer MATLAB-Soft-
wareumgebung zur Steuerung eines
akustischen Rastermikroskops (B)

De Donno, Remo
Universität Brescia, Italien
Modeling of multicrystalline silicon
wafers considering microstructural
properties (M)

Eßbach, Sven
Hochschule Anhalt (FH), Köthen
Elektrothermische Charakterisie-
rung von CFK-Strukturen (B)

Hasselbarth, Robert
Fachhochschule Jena
Bestimmung der rheologischen
Eigenschaften eines zellbasierten
Implantates für die Bandscheiben-
regeneration (B)

Heilenz, Franziska
Fachhochschule Schmalkalden
Konstruktion einer Temperierkam-
mer (B)

Hera, Daniel
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Einfluss des Füllstoffs auf die
mechanischen Eigenschaften
von Schichtsilikat-gefüllten TPE-
Nanokompositen (D)

Herrmann, Christian
Hochschule für Technik, Wirtschaft
und Kultur Leipzig (HTWK)
Analyse und Optimierung der
Erzeugung von Flächenlasten in
mechanischen PV-Modulprüfstän-
den (B)

Höhle, Nico
Hochschule Anhalt (FH), Köthen
Charakterisierung und Auslegung
elektrisch leitfähiger Lackschichten
für das elektrochemische Antifou-
ling (B)

Hübner, Svenja
Hochschule Anhalt (FH), Köthen
Entwicklung eines biomechanischen
Prüfaufbaus zur Charakterisierung
von lumbalen Bewegungssegmen-
ten (B)

Jogwick, Florian
Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Bewertung des Energieabsorpti-
onsverhaltens bei Schlagbeanspru-
chung von Hybridlaminaten für
Motorradhelme (D)

Kamper, Oliver
Hochschule Merseburg (FH)
Charakterisierung des elektrischen
Kontaktverhaltens mikromechanischer
Prüfnadeln auf Metallisierungen
der Mikroelektronik (B)

PERSONEN, AUSBILDUNG, EREIGNISSE

<p>Kästner, Kathleen Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der lokalen Variation der Knochendichte im Rasterelektronenmikroskop (B)</p>	<p>Vorlesungen WS 2010/2011</p> <p>Electronic structure of condensed matter 1 Prof. Dr. Christian Elsässer Albert-Ludwigs-Universität Freiburg</p>	<p>Oberseminar Mikrostrukturbasiertes Materialdesign Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</p>	<p>Weitere öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen</p> <p>Symbolische Schlüsselübergabe Modultechnologiezentrum des Fraunhofer CSP 23.02.11, Fraunhofer-PAZ Schkopau</p>
<p>Krämer, Anna-Katharina Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Untersuchung zur quantitativen Bestimmung von Dichteänderungen in biologischem Hartgewebe mittels röntgenmikroskopischer Analysetechniken (B)</p>	<p>Computational material science Prof. Dr. Michael Moseler Albert-Ludwigs-Universität Freiburg</p>	<p>Composites Dr. Jörg Hohe Universität Siegen</p>	<p>Girls' Day Workshop für Schülerinnen 14.04.11, Freiburg und Halle (Saale)</p>
<p>Lindig, Sascha Fachhochschule Jena Untersuchung des Transmissionsverhaltens von Verkapselungsmaterialien bei künstlicher Bewitterung (B)</p>	<p>Modulvorlesung Photovoltaik Dr. Christian Hagendorf Fachhochschule Merseburg (FH)</p>	<p>Vorlesungen SS 2011</p> <p>Electronic structure of condensed matter 2 Prof. Dr. Christian Elsässer Albert-Ludwigs-Universität Freiburg</p>	<p>Lange Nacht der Wissenschaften 01.07.11, Halle (Saale)</p> <p>Wissenschaftsmarkt der Universität Freiburg 08.-09.07.11, Freiburg</p>
<p>Marquardt, Susanne Hochschule Anhalt (FH), Köthen Untersuchung des organischen Biofouling durch optische Spektroskopie (B)</p>	<p>Einführung in die Mikrosystemtechnik Prof. Dr. Matthias Petzold Fachhochschule Merseburg (FH)</p>	<p>Auslegung, Zuverlässigkeit und Diagnostik von Mikrosystemen Prof. Dr. Matthias Petzold Hochschule Merseburg (FH)</p>	<p>Messen mit Fraunhofer IWM-Beteiligung</p> <p>BAU 2011 Baumesse München 17.-21.01.11, München</p>
<p>Marré, Anika Hochschule Anhalt (FH), Köthen Systematische Untersuchungen zur Bewertung desensibilisierender Mundspüllösungen in einem In-vitro-Modell (B)</p>	<p>Medizinische Physik und Technik Dr. Stefan Schweizer Fachhochschule Merseburg (FH)</p>	<p>Nanotribologie Dr. Martin Dienwiebel Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>nature.tec Fachschau für Bioenergie und nachwachsende Rohstoffe 21.-30.01.11, Berlin</p>
<p>Mehle, Konrad Hochschule Merseburg (FH) Konstruktion und partieller Aufbau eines dynamischen Versuchsstandes zur mechanischen Charakterisierung von Osteosyntheseplatten-Systemen (B)</p>	<p>Silizium: Eigenschaft, Herstellung, Kristallisation, Waferfertigung Prof. Dr. Jörg Bagdahn Hochschule Anhalt (FH), Köthen</p>	<p>Physik für Ingenieure Prof. Dr. Peter Gumbsch Dr. Alexander Nesterov-Müller Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>JEC Composites 29.-31.03.11, Paris</p> <p>EU PVSEC Europäische Photovoltaik-Solarenergie-Konferenz 05.-08.09.11, Hamburg</p>
<p>Nagel, Matthias Hochschule Merseburg (FH) Herstellung und Charakterisierung von Hybridlaminaten für Leichtbauanwendungen im Hinblick auf den ballistischen Impact (D)</p>	<p>Microsystems Technology Prof. Dr. Andreas Heilmann Hochschule Anhalt (FH), Köthen</p>	<p>Tribologie B Prof. Dr. Matthias Scherge Dr. Martin Dienwiebel Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>Composites Europe 27.-29.09.11, Essen</p> <p>Euromold Weltmesse für Werkzeug- und Formenbau, Design und Produktentwicklung 29.11.-02.12.11, Frankfurt</p>
<p>Ogrodowski, André Hochschule Anhalt (FH), Köthen Konzipierung und Implementation einer Regeleinheit für eine roll-to-roll-Wickelanlage zur Beschichtung von Hochleistungspolymerfolien mittels Vakuumoberflächenmodifikation (B)</p>	<p>Sensor- und Aktortechnik Prof. Dr. Andreas Heilmann Hochschule Anhalt (FH), Köthen</p>	<p>Experimental Methods in Polymer Physics Dr. Mario Beiner Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</p>	<p>Erteilte Patente 2011</p> <p>Gremmelspacher, M.; Kleer, G.; Manns, P. Vorrichtung zur Herstellung von Gegenständen aus Glas durch Heißformen und Herstellungsverfahren Patent-Nr. EP 2247541</p>
<p>Pforte, Sven Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Elektrische Charakterisierung und Simulation von extern-monolithisch verschalteten Cu(In,Ga)Se₂-Dünnschichtsolarellen auf flexiblen Polyimid-Substrat (D)</p>	<p>Nanotribologie und -mechanik Dr. Martin Dienwiebel Dr. Hendrik Hölscher Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>Surface Science Prof. Dr. Andreas Heilmann Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</p>	<p>Hagen, J.; Faber, T.; Kübler, R.; Kleer, G. Method for the permanent connection of two components by means of glass or metal soldering Patent-Nr. US 7926695</p>
<p>Scheibe, Stefan Technische Universität Ilmenau Phasenanalyse mit EBSD im System Gold-Aluminium (D)</p>	<p>Atomistische Simulation und Molekulardynamik Prof. Dr. Peter Gumbsch Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>Moderne Methoden der Solarzellencharakterisierung Dr. Stefan Schweizer Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</p>	<p>Kleer, G.; Kübler, R.; Burmeister, F.; Schäffler, E. Vorrichtung mit einer kratzbeständigen und über optimierte Benetzungseigenschaften verfügende technische Oberfläche sowie Verfahren zur Herstellung der Vorrichtung Patent-Nr. EP 1729893</p>
<p>Singer, Patrick Hochschule Merseburg (FH) Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften von Solarzellenverbindern und deren Veränderungen während des Herstellungsprozesses (B)</p>	<p>Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen: Verformung und Bruch Prof. Dr. Peter Gumbsch Prof. Dr. Oliver Kraft Dr. Daniel Weygand Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>Vom Fraunhofer IWM organisierte Fachveranstaltungen</p> <p>Mit Werkstoffmechanik zu mehr Wertschöpfung Festkolloquium zum 65. Geburtstag von Dr. Thomas Hollstein 09.03.11, Freiburg</p>	<p>Meier, S. Verfahren zur Oberflächenvergütung von metallischen Bauteilen Patent-Nr. DE 10 2008 051 665</p> <p>Pfeiffer, W.; Wenzel, J. Verfahren zur Eigenspannungsermittlung eines Prüfkörpers Patent-Nr. EP 1936346</p>
	<p>Größeneffekte in mikro- und nanostrukturierten Materialien Dr. Daniel Weygand Dr. Patric Gruber Dr. Martin Dienwiebel Dr. Christoph Eberl Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>Einweihung Beschichtungs- und Simulationszentrum Festkolloquium 31.05.11, Freiburg</p>	
	<p>Tribologie A Prof. Dr. Matthias Scherge Dr. Martin Dienwiebel Karlsruher Institut für Technologie KIT</p>	<p>Gleiten versus Wälzen Tribologie-Seminar 28.-29.06.11, Freiburg</p>	
	<p>Experimentalphysik für Biologen Dr. Stefan Schweizer Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</p>	<p>»Trends in der Solarfertigung« und »Großserientauglicher Kunststoffleichtbau« Workshops anlässlich der Einweihung des Modultechnologiezentrums des Fraunhofer CSP 28.09.11, Fraunhofer PAZ Schkopau</p>	
	<p>Medizinische Optik Dr. Stefan Schweizer Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</p>		
	<p>Halbleitertechnologie Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</p>		

- Ahrens, B.; Brand, S.; Büchner, T.; Darr, P.; Schoenfelder, S.; Paßlick, C.; Schweizer, S.
Mechanical properties of fluorozirconate-based glass ceramics for medical and photovoltaic applications
 Journal of Non-Crystalline Solids 357/11-13 (2011) 2264-2267; M61/2011
- Amann, T.; Kailer, A.
Analysis of the ultralow friction behavior of a mesogenic fluid in a reciprocating contact
 Wear 271/9-10 (2011) 1701-1706; M93/2011
- Atrash, F.; Hashibon, A.; Gumbsch, P.; Sherman, D.
Phonon emission induced dynamic fracture phenomena
 Physical Review Letters 106 (2011) 085502 1-4; M11/2011
- Bakowskie, R.; Petter, K.; Eiternick, S.; Lausch, D.; Müller, G.
Efficient methods for detection of SiC and Si₃N₄ precipitates and silicon filaments in multi-crystalline wafers and solar cells
 Physica Status Solidi C 8/4 (2011) 1380-1383; M248/2010
- Bierwisch, C.; Kübler, R.; Kleer, G.; Moseler, M.
Modelling of contact regimes in wire sawing with dissipative particle dynamics
 Philosophical Transactions of the Royal Society A 369/1945 (2011) 2422-2430; M56/2011
- Bohley, C.; Wagner, J.-M.; Pfau, C.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.
Raman spectra of barium halides in orthorhombic and hexagonal symmetry; An ab-initio study
 Physical Review B 83/6 (2011) 024107 1-6; M5/2011
- Breitenstein, O.; Bauer, J.; Bothe, K.; Kwopil, W.; Lausch, D.; Rau, U.; Schmidt, J.; Schneemann, M.; Schubert, M.C.; Wagner, J.-M.; Warta, W.
Understanding junction breakdown in multicrystalline solar cells
 Applied Physics Reviews 1/109 (2011) 071101 1-10; M44/2011
- Butz, A.; Kadkhodapour, J.
Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial, dual-phase steel
 Acta Materialia 59/7 (2011) 2575-2588; M81/2011
- Butz, A.; Kadkhodapour, J.
A micro mechanical study on failure initiation of dual phase steels under tension using single crystal plasticity model
 International Journal of Plasticity 27/7 (2011) 1103-1125; M82/2011
- Chen, Z.M.; Mrovec, M.; Gumbsch, P.
Dislocation-vacancy interactions in tungsten
 Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 19 (2011) 074002 1-14; M140/2011
- Costelle, L.; Järvi, T.; Räisänen, M.; Tuboltsev, V.
Binding of deposited gold clusters to thiol self-assembled monolayers on Au surfaces
 Applied Physics Letters 98/4 (2011) 043107 1-3; M229/2010
- de Pablos-Martín, A.; Hémono, N.; Mather, G.C.; Bhattacharyya, S.; Höche, Th.; Bornhöft, H.; Deubener, J.; Muñoz, F.; Durán, A.; Pascual, M.J.
Crystallisation kinetics of LaF₃ nanocrystals in an oxyfluoride glass
 Journal of the American Ceramic Society 94/8 (2011) 2420-2428; M107/2011
- Dembski, S.; Rupp, S.; Milde, M.; Gellermann, C.; Dyrba, M.; Schweizer, S.; Batentschuk, M.; Osvet, A.; Winnacker, A.
Synthesis and optical properties of luminescent core-shell structured silicate and phosphate nanoparticles
 Optical Materials 33/7 (2011) 1106-1110; M45/2011
- Dresbach, C.; Lorenz, G.; Petzold, M.; Altenbach, H.
Analysis of chip damage risk in thermosonic wire bonding
 Key Engineering Materials 478 (2011) 75-80; M132/2010
- Ferraz, N.; Hoess, A.; Thormann, A.; Heilmann, A.; Shen, J.; Tang, L.; Ott, M.
Role of alumina nanoporosity in acute cell response
 Journal of Nanoscience and Nanotechnology 11/8 (2011) 6698-6704(7); M58/2011
- Friedmann, A.; Hoess, A.; Cismak, A.; Heilmann, A.
Investigation of cell-substrate interactions by focused ion beam preparation and scanning electron microscopy
 Acta Biomaterialia 7 (2011) 2499-2507; M57/2011
- Maier, G.; Riedel, H.; Seifert, T.
Time and temperature dependent cyclic plasticity and fatigue crack growth of the nickel-base Alloy617B – experiments and models
 Advanced Materials Research 278 (2011) 369-374; M77/2010
- Gesemann, B.; Wehrspohn, R.B.; Hackner, A.; Müller, G.
Large-scale fabrication of ordered silicon nanotip arrays used for gas ionization in ion mobility spectrometers
 IEEE Transactions on Nanotechnology 10/1 (2011) 50-52; M34/2011
- Gosvami, N.; Feldmann, M.; Peguiron, J.; Moseler, M.; Schirmeisen, A.; Bennewitz, R.
Ageing of a microscopic sliding gold contact at low temperatures
 Physical Review Letters 107 (2011) 144303 1-5; M67/2011
- Günther, S.; Teuscher, N.; Heilmann, A.; Hänsel, R.; Voigt, H.-M.; Kiesow, A.
In-line investigations of atmospheric pressure plasma processes in correlation with surface analysis
 Journal of Adhesion Science and Technology 8/25 (2011) 857-868; M12/2011
- Hardenacke, V.; Hohe, J.; Friedmann, V.; Siegele, D.
An enhanced local approach model for the assessment of brittle fracture based on micromechanical investigations
 Key Engineering Materials 465 (2011) 539-542; M89/2011
- Heierli, J.; Birkeland, K.W.; Simenhois, R.; Gumbsch, P.
Anticrack model for skier triggering of slab avalanches
 Cold Regions Science and Technology 65 (2011) 372-381; M38/2011
- Helm, D.; Butz, A.; Raabe, D.; Gumbsch, P.
Microstructure-based description of the deformation of metals: theory and application
 JOM – Journal of the The Minerals, Metals & Materials Society (TMS) 63/4 (2011) 26-33; M46/2011
- Höche, T.; Mäder, M.; Bhattacharyya, S.; Henderson, G.S.; Gemming, T.; Wurth, R.; Rüssel, C.; Avramov, I.
ZrTiO₄ crystallisation in nanosized liquid-liquid phase-separation droplets in glass – a quantitative XANES study
 CrystEngComm 13/7 (2011) 2550-2556; M3/2011
- Hohe, J.; Hardenacke, V.; Luckow, S.; Siegele, D.
An enhanced probabilistic model for cleavage fracture assessment accounting for local constraint effects
 Engineering Fracture Mechanics 77/18 (2010) 3573-3591; M227/2010
- Hohe, J.; Luckow, S.; Hardenacke, V.; Sgouizer, Y.; Siegele, D.
Enhanced fracture assessment under biaxial external loads using small scale cruciform bending specimens
 Engineering Fracture Mechanics 78 (2011) 1876-1894; M84/2011
- Järvi, T.T.; Pastewka, L.; Mayrhofer, L.; Moseler, M.
Charge-transfer model for carbonaceous electrodes in polar environments
 Physical Review B 83/16 (2011) 165418 1-6; M64/2011
- Järvi, T.T.; Duin, van A.C.; Nordlund, K.; Goddard, W.A. III
Development of interatomic reaxFF potentials for Au-S-C-H systems
 The Journal of Physical Chemistry A 115/37 (2011) 10315-10322; M128/2011
- Jin, Z.H.; Dunham, S.T.; Gleiter, H.; Hahn, H.; Gumbsch, P.
A universal scaling of planar fault energy barriers in face-centered cubic metals
 Scripta Materialia 64 (2011) 605-608; M36/2011
- Kailer, A.; Amann, T.; Krummhauer O.; Herrmann, M.; Sydow, U.; Schneider, M.
Influence of electric potentials on the tribological behaviour of silicon carbide
 Wear 271/9-10 (2011) 1922-1927; M101/2011
- Kauffmann, Y.; Oh, S.H.; Koch, C.T.; Hashibon, A.; Scheu, C.; Rühle, M.; Kaplan, W.D.
Quantitative analysis of layering and in-plane structural ordering at an alumina-aluminum solid-liquid interface
 Acta Materialia 59 (2011) 4378-4386; M54/2011

- Kauzlaric, D.; Pastewka, L.; Meyer, H.; Heldele, R.; Schulz, M.; Weber, O.; Plotter, V.; Hausselt, J.; Greiner, A.; Korvink, J.G.
Smoothed particle hydrodynamics simulation of shear-induced powder migration in injection moulding
 Philosophical transactions of the Royal Society A; Mathematical, physical, and engineering sciences 369/1944 (2011) 2320-2328; M132/2011
- Khader, I.; Kailer, A.; Hashibon, A.; Albina, J.-M.
Wear and corrosion of silicon nitride rolling tools in copper rolling
 Wear 271/9-10 (2011) 2531-2541; M100/2011
- Kit, O.O.; Pastewka, L.; Koskinen, P.
Revised periodic boundary conditions: Fundamentals, electrostatics, and the tight-binding approximation
 Physical Review B 84 (2011) 155431 1-16; M156/2011
- Korres, S.; Sorochynska, L.; Grishchuk, S.; Karger-Kocsis, J.
Swelling, compression and tribological behaviors of bentonite-modified polyacrylate-type hydrogels
 Journal of Applied Polymer Science 119/2 (2011) 1122-1134; M12/2010
- Körbel, S.; Elsässer, C.
Ab initio and atomistic study of ferroelectricity in copper-doped potassium niobate
 Physical Review B 84/1 (2011) 14109 1-8; M142/2011
- Körner, W.; Bristowe, P.D.; Elsässer, C.
Density functional theory study of stoichiometric and nonstoichiometric ZnO grain boundaries
 Physical Review B 84 (2011) 045305-1 - 045305-6; M98/2011
- Körner, W., Elsässer C.
Density functional theory study of dopants in polycrystalline TiO₂
 Physical Review B 83 (2011) 205315-1 - 205315-11; M63/2011
- Körner, W.; Elsässer, C.
Density functional theory study for polycrystalline ZnO doped with Si or Nb
 Physical Review B 83 (2011) 205306-1 - 205306-6; M55/2011
- Krummhauer, O.; Kailer, A.; Nickel, K.G.; Presser, V.
In-situ-monitoring and depth-resolved characterization of wet wear of silicon carbide
 Wear 271/9-10 (2011) 2665-2672; M6/2011
- Lausch, D.; Werner, M.; Naumann, V.; Schneider, J.; Hagendorf, C.
Investigation of modified p-n junctions in CSG solar cells
 Physica Status Solidi C 8/4 (2011) 1418-1422; M249/2010
- Lausch, D.; Werner, M.; Naumann, V.; Schneider, J.; Hagendorf C.
Investigation of modified p-n junctions in crystalline silicon on glass solar cells
 Journal of Applied Physics 109 (2011) 084513 1-5; M53/2011
- Luke, M.; Varfolomeev, I.; Lütkepohl, K.; Esderts, A.
Fatigue crack growth in railway axles: assessment concept and validation tests
 Engineering Fracture Mechanics 78 (2011) 714-730; M23/2011
- Macko, S.; Frost, F.; Engler, M.; Hirsch, D.; Höche, Th.; Grenzer, J.; Michely, J.
Phenomenology of iron-assisted ion beam pattern formation on Si (001)
 New Journal of Physics 13 (2011) 073017 1-20; M117/2011
- Madia, M.; Beretta, S.; Schödel, M.; Zerbst, U.; Luke, M.; Varfolomeev, I.
Stress intensity factor solutions for cracks in railway axles
 Engineering Fracture Mechanics 78 (2011) 764-792; M25/2011
- Margine, E.R.; Kolmogorov, A.N.; Reese, M.; Mrovec, M.; Elsässer, C.; Meyer, B.; Drautz, R.; Pettifor, D.G.
Development of orthogonal tight-binding models for Ti-C and Ti-N systems
 Physical Review B 84 (2011) 155120 1-10; M155/2011
- Marquass, B.; Sommerson, J.S.; Hepp, P.; Aigner, T.; Schwan, S.; Bader, A.; Josten C.; Zscharnack, M.; Schulz, R.M.
A novel MSC-seeded triphasic construct for the repair of osteochondral defects
 Journal of Orthopaedic Research 28/12 (2010) 1586-1599; M250/2010
- Marton, P.; Elsässer, C.
Switching of a substitutional-iron/oxygen-vacancy defect complex in ferroelectric PbTiO₃ from first principles
 Physical Review 83 (2011) 020106 1-4; M10/2011
- Marton, P.; Elsässer, C.
First-principles study of structural and elastic properties of the tetragonal ferroelectric perovskite Pb(Zr(0,50)Ti(0,50))O(3)
 Physica Status Solidi B 248/10 (2011) 2222-2228; M146/2011
- Marton, P.; Shimada, T.; Kitamura, T.; Elsässer, C.
First-principles study of the interplay between grain boundaries and domain walls in ferroelectric PbTiO₃
 Physical Review B 83 (2011) 064110 1-8; M13/2011
- Mayrhofer, L.; Bercieux, D.
Pseudospin-dependent scattering in carbon nanotubes
 Physical Review B 84 (2011) 115126 1-5; M120/2011
- Menzer, K.; Krause, B.; Boldt, R.; Kretzschmar, B.; Weidisch, R.; Pötschke, P.
Percolation behaviour of multiwalled carbon nanotubes of altered length and primary agglomerate morphology in melt mixed isotactic polypropylene-based composite
 Composites Science and Technology 71/16 (2011) 1936-1943; M176/2011
- Moras, G.; Pastewka, L.; Gumbsch, P.; Moseler, M.
Formation and oxidation of linear carbon chains and their role in the wear of carbon materials
 Tribology Letters 44 (2011) 355-365; M131/2011
- Moseler, M.; Cervantes-Sodi, F.; Hofmann, S.; Csanyi, G.; Ferrari, A.
Dynamic catalyst restructuring during carbon nanotube growth
 ACS Nano 4/12 (2010) 7587-7595; M65/2011
- Moseler, M.; Cervantes-Sodi, F.; Klemenz, A.; Hofmann, S.; Csanyi, G.; Ferrari, A.
Reply to »Comment on dynamic catalyst restructuring during carbon nanotube growth«
 ACS NANO 5/2 (2011) 686-687; M66/2011
- Moutanabbir, O.; Reiche, M.; Zakharov, N.D.; Naumann, F.; Petzold, M.
Observation of free surface-induced bending upon nanopatterning of ultrathin strained silicon layer
 Nanotechnology 22/5 (2011) 045701 1-5; M171/2011
- Mrovec, M.; Elsässer, C.; Gumbsch, P.
Atomistic simulations of lattice defects in tungsten
 Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 28/6 (2010) 698-702; M236/2010
- Mrovec, M.; Nguyen-Manh, D.; Elsässer, C.; Gumbsch, P.
Magnetic bond-order potential for iron
 Physical Review Letters 106 (2011) 246402 1-4; M74/2011
- Müller, A.; Lorenz, M.; Brachwitz, K.; Lenzner, J.; Skorupa, W.; Mittwoch, K.; Grundmann, M.; Höche, T.
Fresnoite thin films grown by pulsed laser deposition: photoluminescence and laser crystallization
 CrystEngComm 13 (2011) 6377-6385; M2/2011
- Ostas, E.; Schröter, K.; Beiner, M.; Yan, T.; Thurn-Albrecht, T.; Binder, W.H.
Poly(ϵ -caprolactone)-poly(isobutylene): A crystallizing, hydrogen-bonded pseudo-block copolymer
 Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry 49/15 (2011) 3404-3416; M124/2011
- Paßlick, C.; Ahrens, B.; Henke, B.; Johnson, J.A.; Schweizer, S.
Crystallization behavior of rare-earth doped fluorochlorozirconate glasses
 Journal of Non-Crystalline Solids 357/11-13 (2011) 2450-2452; M60/2011
- Pastewka, L.; Moser, S.; Gumbsch, P.; Moseler, M.
Anisotropic mechanical amorphization drives wear in diamond
 Nature Materials 10/1 (2011) 34-38; M7/2011
- Paxton, A.T.; Elsässer, C.
Electronic structure and total energy of interstitial hydrogen in iron: tight-binding models
 Physical Review B 82 (2010) 235125 1-15; M247/2010

- Pergande, D.; Geppert, T.M.; von Rhein, A.; Schweizer, S.L.; Wehrspohn, R.B.; Moretton, S.; Lambrecht, A.
Miniature infrared gas sensors using photonic crystals
Journal of Applied Physics 109/8 (2011) 083117-083117-7; M129/2011
- Pergande, D.; Wehrspohn, R.B.
Polarization-dependent transmission properties of IOSOI W1 photonic crystal waveguides
Photonics and Nanostructures 9/3 (2011) 213-218; M130/2011
- Pfau, C.; Bohley, C.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.
Structural phase transitions of barium halide nanocrystals in fluorozirconate glasses studied by Raman spectroscopy
Journal of Applied Physics 109 (2011) 083545 1-6; M50/2011
- Pfeiffer, W.; Koplín, C.; Reissacher, E.; Wenzel, J.
Residual stresses and strength of hard chromium coatings
Materials Science Forum 681 (2011) 133-138; M58/2010
- Pfeiffer, W.; Wenzel, J.
Shot peening of brittle materials – Status and outlook
Material Science Forum 638-642 (2010) 799-804; M141/2011
- Pulamagatta, B.; Pankaj, S.; Beiner, M.; Binder, W.H.
Hierarchical nanostructures in semifluorinated norbornene block copolymers
Macromolecules 44/4 (2011) 958-965; M19/2011
- Richter, S.; Kaufmann, K.; Hagendorf, C.
Chemical characterization of SiC and Si₃N₄ precipitates in multicrystalline silicon by NIR microscopy and ToF-SIMS
Physica Status Solidi 8/3 (2011) 796-799; M243/2010
- Rinker, M.; John, M.; Zahlen, P.C.; Schäuble, R.
Face sheet debonding in CFRP/PMI sandwich structures under quasi-static and fatigue loading considering residual thermal stress
Engineering Fracture Mechanics 78/17 (2011) 2835-2847; M123/2011
- Sandfeld, S.; Hochrainer, Z.; Zaiser, M.; Gumbsch, P.
Continuum modeling of dislocation plasticity: theory, numerical implementation, and validation by discrete dislocation simulations
Journal of Material Research 26 (2011) 623-632; M39/2011
- Schmitt, W.; Butz, A.; Rist, T.
Kontinuumsmechanische Simulation von Steckverbinder-Elementen Metall – Fachzeitschrift für Metallurgie 64/11 (2010) 419-420; M143/2010
- Senger, J.; Weygand, D.; Kraft, O.; Gumbsch, P.
Dislocation microstructure evolution in cyclically twisted microsamples: a discrete dislocation dynamics simulation
Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering 19 (2011) 074004 1-16; M136/2011
- Senger, J.; Weygand, D.; Motz, C.; Gumbsch, P.; Kraft, O.
Aspect ratio and stochastic effects in the plasticity of uniformly loaded micrometer-sized specimens
Acta Materialia 59 (2011) 2937-2947; M79/2011
- Shimada, T.; Wang, X.; Tomoda, S.; Marton, P.; Elsässer, C.; Kitamura, T.
Coexistence of rectilinear and vortex polarizations at twist boundaries in ferroelectric PbTiO₃ from first principles
Physical Review 83 (2011) 094121 1-9; M151/2011
- Siepi, E.; Lutz, S.; Meyer, S.; Panzner, S.
An ion switch regulates fusion of charged membranes
Biophysical Journal 100/10 (2011) 2412-2421; M59/2011
- Skrzypczak, U.; Miclea, M.; Stalmashonak, A.; Ahrens, B.; Henke, B.; Seifert, G.; Johnson, J.A.; Schweizer, S.
Time-resolved investigations of erbium ions in ZBLAN-based glasses and glass ceramics
Physica Status Solidi C 8/9 (2011) 2649-2652; M94/2011
- Skrzypczak, U.; Williams, G.V.M.; Miclea, M.; Bhuiyan, M.D.H.; Janseens, S.; Schweizer, S.
Z-scan characterization of zwitterionic chromophores for optoelectronic switching
Applied Physics A: Materials Science & Processing 104/3 (2011) 947-951; M95/2011
- Steier, V.; Koplín, C.; Kailer, A.; Reinecke, H.
Investigation of the adhesion promoter distribution in porous ceramic precursors
International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering 2011 (2011) 304129 1-9; M 52/2011
- Uhrig, D.; Schlegel, R.; Weidisch, R.; Mays, J.
Multigraft copolymer superelastomers: Synthesis morphology and properties
European Polymer Journal 47/4 (2011) 560-568; M125/2011
- Ulrich, C.M.; Hashibon, A.; Svoboda, J.; Elsässer, C.; Helm, D.; Riedel, H.
Diffusion kinetics in aluminium-gold bond contacts from first-principles density-functional calculations
Acta Materialia 59/20 (2011) 7634-7644; M232/2010
- Üpping, J.; Salzer, R.; Otto, M.; Beckers, T.; Steidl, L.; Zentel, R.; Carius, R.; Wehrspohn, R.B.
Transparent conductive oxide photonic crystals on textured substrates
Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications 9/1 (2011) 31-34; M35/2011
- Üpping, J.; Bielawny, A.; Wehrspohn, R.B.; Beckers, T.; Carius, R.; Rau, U.; Fahr, S.; Rockstuhl, C.; Lederer, F.; Kroll, M.; Pertsch, T.; Steidl, L.; Zentel, R.
Three-dimensional photonic crystal intermediate reflectors for enhanced light-trapping in tandem solar cells
Advanced Materials 23/34 (2011) 3896-3900; M135/2011
- Urban, A.; Reese, M.; Mrovec, M.; Elsässer, C.; Meyer, B.
Parameterization of tight-binding models from density functional theory calculations
Physical Review B 84 (2011) 155119 1-11; M154/2011
- Varfolomeev, I.; Luke, M.; Burdack, M.
Effect of specimen geometry on fatigue crack growth rates for the railway axle material EA4T
Engineering Fracture Mechanics 78 (2011) 742-753; M24/2011
- Völker, B.; Marton, P.; Elsässer, C.; Kamlah, M.
Multiscale modeling for ferroelectric materials: a transition from the atomic level to phase-field modeling
Continuum Mechanics and Thermodynamics 23 (2011) 435-451; M152/2011
- Walter, M.; Moseler, M.; Whetten R.L.; Häkkinen, H.
A 58-electron superatom-complex model for the magic phosphine-protected gold clusters (Schmid-gold, nanogold) of 1.4-nm dimension
Chemical Science 8 (2011) 1583-1587; M161/2011
- Werner, R.; Höche, T.; Mayr, S.G.
Synthesis of shape, size and structure controlled nanocrystals by pre-seeded inert gas condensation
CrystEngComm 13/8 (2011) 3046-3050; M33/2011
- Wiegand, M.-C.; Sievers, W.; Lindner, J.K.N.; Tröster, Th.; Schweizer, S.
Photoluminescence properties of Sm²⁺-doped BaBr₂ under hydrostatic pressure
Journal of Luminescence 131/11 (2011) 2400-2403; M71/2011
- Wonisch, A.; Polfer, P.; Kraft, T.
A comprehensive simulation scheme for tape casting: From flow behavior to anisotropy development
Journal of the American Ceramic Society 94/7 (2011) 2053-2060; M92/2011

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Zeitschriften

Fiedler, J.; Busch, M.; Krombholz, A.
Cellulose regeneratfaserverstärkte Thermoplaste – Verarbeitung und resultierende Eigenschaften
Gummi Fasern Kunststoff GAK 63/12 (2010) 766-771; M171/2010

Fritz, M.; Weps, M.
Kunststoffe – Hartschäume auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen
Werkstoffe in der Fertigung 5 (2011) 44-45; M153/2011

Hagen, J.; Burmeister, F.; Rendtel, A.; Kübler, M.; Burr, A.
A novel composite ceramic material as heating elements in injection molding processes
cfi – ceramic forum international 88/4 (2011) E23-E26; M42/2011

Kailer, A.; Amann, T.
Weniger Reibung und Verschleiß durch flüssigkristalline Schmierstoffe
Erneuerbare Energien 20/12 (2010) 56-59; M93/2010

Metzger, M.; Knappe, M.; Seifert, T.
Materialmodell zur Lebensdauervorhersage von Bauteilen aus Eisengusswerkstoffen
Motortechnische Zeitschrift 72 (2011) 798-804; M190/2011

Sander, M.; Dietrich, S.; Pander, M.; Ebert, M.
Risse in Solarzellen
eta green 1 (2011) 10-13; M49/2011

Bücher, Buchbeiträge

Hug, M.; Manns, P.; Hagen, J.; Kleer, G.
Schnelles Heißformgebungsverfahren für hochwertige mikrooptische Komponenten
in Schnelles Heißformgebungsverfahren für hochwertige mikrooptische Komponenten; Droß, G. (Hrsg.); Universität Bremen (2011) 150; M4/2011

Manns, P.; Hagen, J.; Spieß, G.; Wirth, M.; Burmeister, F.; Kleer, G.; Naumann, F.; Bergmann, G.
Untersuchungen zur quantitativen Bewertung des Klebeverhaltens von Formenwerkstoffen und Formenbeschichtungen bei der Heißformgebung von Glasschmelzen
DGG-HVG Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. Offenbach/Main (2011) 41; M7/2011

Schoenfelder, S.; Bagdahn, J.; Petzold, M.
Mechanical characterization and modeling of thin chips
in Ultra-thin Chip Technology and Applications; Burghartz, J. (Hrsg.); Springer-Verlag New York (2011) 195-218; M192/2010

Schulze, S.; Pander, M.; Naumenko, K.; Girchenko, A.;
Characterization of polymeric interlayers in laminated glass beams for photovoltaic applications
in Shell-like Structures, Non-classical Theories and Applications 15/5; Altenbach, H.; Eremeyev, V.A. (Eds.); Springer-Verlag Heidelberg (2011) 499-506; M118/2011

Sun, D.-Z.
Crashverhalten von metallischen Werkstoffen und Fügeverbindungen
in Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung; Henning, F.; Moeller, E. (Hrsg.); Carl Hanser Verlag München, Wien (2011) 1020-1032; M191/2011

Amann, T.; Kailer, A.

Rheological and tribological investigation of a mesogenic fluid with ultralow friction

in Tagungsband ECOTRIB 2011 1; Österreichische Tribologische Gesellschaft (Hrsg.); MDH-Media GmbH, Wien, Österreich (2011) 83-88; M14/2011

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

A material model for deformation and failure behavior of cast-iron for prediction of containment safety

in Proc. of 17th International Symposium on Plasticity and its Current Applications; Khan, A.S. (Ed.); Numerical Engineering Analysis and Testing, NEAT Press, Fulton, Maryland, USA (2011) 94-96; M16/2011

Baumgartner, K.; Ahrens, B.; Angelov, O.; Sendova-Vassileva, M.; Dimova-Malinovska, D.; Holländer, B.; Schweizer, S.; Carius, R.

Efficiency of thin film silicon solar cells with spectral down-converter from rare-earth ion doped thin films

in Proc. of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference; WIP-Renewable Energies (Ed.); München (2010) 245-250; M200/2010

Beckmann, C.; Hohe, J.

Stochastische Analyse des effektiven Materialverhaltens von ungeordneten dreidimensionalen Schäumen

in Tagungsband 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde; Wielage, B. (Hrsg.); Technische Universität Chemnitz, Chemnitz (2011) 537-542; M188/2011

Bierwisch, C.; Polfer, P.; Wonisch, A.; Kraft, T.

Optimierung von Strömungsvorgängen komplexer Fluide mit SimPARTIX

in Tagungsband Integration von Strömungsberechnungen in den Entwicklungsprozess; NAFEMS GmbH (Hrsg.); Bernau am Chiemsee (2011); M90/2011

Brand, M.; Asperheim, J.; Stiele, H.; Pfeiffer, W.

Coupling of temperature fluxes induced by electromagnetic induction for transient 3D distortion and residual stress calculation in finite element codes

in Proc. of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources; Lupi, S.; Forzan, M. (Eds.); Servizi Grafici Editoriali, Padova, Italien (2010) 201-208; M29/2011

Brand, M.; Luke, M.

Automatische Anpassung des Wärmeeintrags zur vereinfachten Temperaturfeldberechnung

in Tagungsband SYSWELD Forum 2009; Hildebrand, J.; Loose, T.; Gittens, A. (Hrsg.); Universitätsverlag Weimar (2009) 172-177; M28/2011

Brand, M.; Luke, M.; Hohe, J.

Reduzierung von Rechenzeiten in Mechanikberechnungen unter Berücksichtigung von instationären und quasi-stationären Temperaturfeldern beim Schweißen

in Tagungsband SYSWELD Forum 2009; Hildebrand, J.; Loose, T.; Gittens, A. (Hrsg.); Universitätsverlag Weimar (2009) 54-61; M27/2011

Brand, S.; Petzold, M.; Czurratis, P.; Reed, J.D.; Lueck, M.; Gregory, C.; Huffman, A.; Lannon J.M. (Jr.); Temple, D.S.

High resolution acoustical imaging of high-density-interconnects for 3D-integration

in Proc. of 61st Electronic Components & Technology Conference 2011; IEEE; (2011) CD-ROM, 37-42; M75/2011

Breinlinger, T.; Wonisch, A.; Kraft, T.

Simulation of particulate flows using coupled SPH and DEM simulations

in Schriftenreihe Schiffbau; Rung, T.; Ulrich, C. (Hrsg.); Techn. Universität Hamburg-Harburg, Hamburg (2011) 66-71; M99/2011

Dembski, S.; Milde, M.; Dassonneville, E.; Gellermann, C.; Klockenbring, T.; Dyrba, M.; Schweizer, S.

Biocompatible luminescent nanoparticles on the basis of calcium phosphate

Materials Research Society Symposium Proceedings 1355 (2011) mrs11-1355-jj05-04 1-6; M102/2011

Dyrba, M.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.

Spectral down-conversion in sm-doped borate glasses for photovoltaic applications

in Proc. of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference; WIP-Renewable Energies (Ed.); München (2010) 375-377; M201/2010

Fiedler, J.; Jahn, I.; Theumer, T.; Krombholz, A.

Untersuchungen zum Außeneinsatz von WPC-Spritzgussbauteilen

in Tagungsband 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde; Wielage, B. (Hrsg.); Technische Universität Chemnitz, Chemnitz (2011) 555-564; M17/2011

Hardenacke, V.; Hohe, J.; Friedmann, V.; Siegele, D.

Verbesserung lokaler Spaltbruchmodelle unter Berücksichtigung mikromechanischer Vorgänge

in Tagungsband 43. Tagung DVM-AK Bruchvorgänge (DVM-Bericht 243); Klingbeil, D. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V.; Berlin (2011) 133-142; M22/2011

Hardenacke, V.; Hohe, J.; Luckow, S.; Siegele, D.

An enhanced model for probabilistic cleavage fracture assessment considering local constraint effects

PAMM, Special Issue: 81st GAMM Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics 10/1 (2010) 115-116; M147/2011

Helm, D.; Butz, A.; Raabe, D.; Gumbsch, P.

Microstructure-based description of the deformation of metals: theory and application

in Proc. of 1st World Congress on Integrated Computational Materials Engineering ICME 2011; Collins, P.; Allison, J.E.; Spanos, G. (Eds.); John Wiley, Hoboken, USA (2011) 89-98; M103/2011

Höche, T.; Graff, A.; Altmann, F.; Petzold, M.

Characterization of wafer-bonded joints using high-resolution transmission electron microscopy

in Tagungsband MicroCar 2011; Michel, B. (Ed.); MMCB, Dresden (2011) 154-157; M47/2011

Hohe, J.

Load and frequency interaction in dynamic buckling of soft-core sandwich plates and shells

PAMM, Special Issue: 81st GAMM Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics 10/1 (2010) 165-166; M149/2011

Hohe, J.; Beckmann, C.

Numerical analysis of disorder effects in the thermo-mechanical behaviour of solid foams

in Proc. of 16th International Conference on Composite Structures ICCS16; Ferreira, A. (Ed.); Faculty of Engineering, University of Porto, Porto, Portugal (2011) CD-ROM; M189/2011

Hohe, J.; Beckmann, C.; Hardenacke, V.

Strategies for numerical prediction of the uncertainty in the material response of solid foams

in Proc. of First International Conference on Materials for Energy; Hahn, H.; Hurd, A.J.; Münch, W.; Slaoui, A.; Volkert, C.A. (Eds.); DECHEMA e.V., Frankfurt (2010) B 960-962; M158/2011

Hohe, J.; Beckmann, C.; Reinfried, M.; Luthardt, F.

Numerical prediction of the macroscopic material response for the design of solid foams with structural hierarchy

in Proc. of Cellular Materials 2010; Stephani, G.; Hipke, T. (Eds.); Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Frankfurt (2010) CD-ROM; M157/2011

Hohe, J.; Beckmann, C.; Reinfried, M.; Luthardt, F.

Numerische Bestimmung der makroskopischen Eigenschaften hybrider Schäume

in Tagungsband 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde; Wielage, B. (Hrsg.); Technische Universität Chemnitz, Chemnitz (2011) 543-548; M187/2011

John, M.; Rinker, M.; Zahlen, P.; Schäuble, R.

Investigations on environmental fatigue of CFRP foam core sandwich structures

in Review of Aeronautical Fatigue Investigations in Germany during the Period 2009 to 2011; Dalle Donne, C. (Ed.); EADS Innovations Works, München (2011) 50-52; M73/2011

Khader, I.; Kürten, D.; Kailer, A.; Gumbsch, P.

Drahtwalzen mit Werkzeugen aus Siliziumnitrid

in Tagungsband Abschlusskolloquium SFB 483, KIT Scientific Report 7602; Albers, A.; Schneider, J. (Eds.); KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, Karlsruhe (2011) 05-16; M165/2011

Klute, C.; Lam, L.; Schoenfelder, S.; Bagdahn, J.

Crack investigation in monocrystalline silicon before and after annealing

in Proc. of 21st Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes NREL 2011; Sopori, B.L.; Sinton, R. (Eds.); National Renewable Energy Laboratory (NREL) Golden, Colorado, USA (2011) 208-213; M104/2011

Körbel, S.; Elsässer, C.

Cu substitutionals and defect complexes in the lead-free ferroelectric k9n

in Proc. of High Performance Computing in Science and Engineering '10; Nagel, W.E.; Kröner, D.B.; Resch, M.M. (Hrsg.); Springer Berlin, Heidelberg (2011) 181-188; M246/2010

Kraft, J.; Schrank, F.; Teva, J.; Siegert, J.; Koppitsch, G.; Cassidy, C.; Wachmann, E.; Altmann, F.; Brand, S.; Schmidt, C.; Petzold, M.

3D sensor application with open through silicon via technology

in Proc. of 61st Electronic Components & Technology Conf. 2011; IEEE; (2011) CD-ROM, 560-566; M76/2011

Kraft, T.; Schmidt, I.; Riedel, H.

Simulation von pulvermetallurgischen Formgebungsverfahren

in Tagungsband Hagener Symposium: Chancen der Pulvermetallurgie; Kolaska, H. (Hrsg.); Heimdall Verlag, Witten (2010) 61-73; M237/2010

Krause, M.; Altmann, F.; Schmidt, C.; Brand, S.; Petzold, M.; Malta, D.; Temple, D.

Characterization and failure analysis of TSV interconnects: from non-destructive defect localization to material analysis with nanometer resolution

in Proc. of 61st Electronic Components & Technology Conf. 2011; IEEE (2011) CD-ROM, 1452-1458; M77/2011

Lagger, H.; Peguiron, J.; Bierwisch, C.; Moseler, M.

Magnetization models for particle-based simulations of magnetorheological fluids

in Proc. of IV International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering; Papadrakakis, M.; Onate, E.; Schrefler, B. (Eds.); International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) Barcelona, Spanien (2011) CD-ROM; M91/2011

Lausch, D.; Petter, K.; Richter, S.; Hencke, S.; Hagendorf, C.

Classification of recombination active defects in multicrystalline solar cells made from upgraded metallurgical grade (umg) – silicon

in Proc. of Silicon 2010, 12th Scientific and Business Conference; Vojtechovský, K. (Ed.); TECON Scientific, s.r.o., Roznov pod Radhostem, Tschechien (2010) 129-130; M245/2010

Maas, P.

Phänomenologische Modellierung des Warmfließverhaltens einer NiCrMoFe-Legierung

in Tagungsband des XXX. Verformungskundlichen Kolloquiums; Lehrstuhl für Umformtechnik der Montan Universität Leoben (Hrsg.); Leoben, Österreich (2011) 23-29; M8/2011

Maier, G.

Abschätzung der Lebensdauer von Kraftwerks-Werkstoffen

in Tagungsband Hochlegierte Stähle und Nickellegierungen für Industrieanlagen und Energietechnik; Institut für Korrosionsschutz (Hrsg.); Dresden (2010) 87-95; M233/2010

Malta, D.; Gregory, C.; Lueck, M.; Temple, D.; Krause, M.; Altmann, F.; Petzold, M.

Characterization of thermo-mechanical stress and reliability issues for Cu-filled TSFs

in Proc. of 61st Electronic Components & Technology Conference 2011; IEEE, Piscataway, NJ, USA (2011) CD-ROM, 1815-1821; M78/2011

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

Development and verification of a material model for prediction of containment safety of exhaust turbochargers

in Proc. of 8th European Users Conference LS-DYNA; ALYOTECH (Ed.); Antony Cedex, Frankreich (2011) CD-ROM, Session 10; M32/2011

Naumann, V.; Werner, M.; Swatek, S.; Hagendorf, C.

Defect diagnostics for cadmium telluride thin film solar cells

in Proc. of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference; WIP-Renewable Energies (Ed.); München (2010) 378-380; M238/2010

Ockewitz, A.; Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Mueller, S.

Simulation of hot extrusion of an aluminum alloy with modeling of microstructure

in Proc. of International Conference on Extrusion and Benchmark – ICEB 2011; Tomesani, L.; Donati, L. (Eds.); ARACNE editrice S.r.L., Rom, Italia (2011) CD-ROM; M72/2011

Oswald, M.; Turek, M.; Bagdahn, J.

Numerical simulations of thermo-mechanical stresses during the casting of multi-crystalline silicon ingots

in Proc. of 12th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems EuroSimE; Ernst, L.J.; Zhang, G.Q.; Van Driel, W.D.; Rodgers, P.; Bailey, C.; Saint de Leger, O. (Eds.); IEEE, Piscataway, NJ, USA (2010) 365-369; M241/2010

Pander, M.; Dietrich, S.; Schulze S.-H.; Eitner, U.; Ebert, M.

Thermo-mechanical assessment of solar cell displacement with respect to the viscoelastic behaviour of the encapsulant

in Proc. of 12th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems EuroSimE; IEEE, Piscataway, NJ, USA (2011) 1/6-6/6; M62/2011

Pfau, C.; Miclea, P.-T.; Bohley, C.; Schweizer, S.

Phonon spectra of barium halide nanocrystals in fluorozirconate glasses

in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 15; IOP Publishing Ltd, Bristol, UK (2010) 12021; M230/2010

Polfer, P.; Wonisch, A.; Kraft, T.

Smoothed particle hydrodynamics simulation of non-spherical particle suspensions

in Particles-Based Methods II – Fundamentals and Applications; Onate, E.; Ouedn, D.R.J. (Eds.); International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona, Spanien (2011) CD-ROM; M180/2011

Pyttel, B.; Varfolomeev, I.; Siegele, D.; Berger, C.

FKM-guideline fracture mechanics proof of strength for engineering components – procedures, compendiums, examples

in Proc. of 18th European Conference on Fracture; Klingbeil, D. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2010) Paper #77, CD-ROM; M167/2011

Richter, S.; Naumann, V.; Lausch, D.; Werner, M.; März, B.; Ilse, K.; Hagendorf, C.

Trace elemental analysis of precipitates in multicrystalline silicon and investigation of solar cell shunting

in Proc. of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference; WIP-Renewable Energies, München (2010) 1254-1258; M242/2010

Richter, S.; Werner, M.; Swatek, S.; Maerz, B.; Hagendorf, C.

Trace elemental and structural analysis of different types of Si₃N₄ precipitates grown in block-cast multicrystalline solar silicon

in Proc. of 21st Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes NREL 2011; Sopori, B.L.; Sinton, R. (Eds.); National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, USA (2011) 27-34; M173/2011

Sander, M.; Henke, B.; Schweizer, S.; Dietrich, S.; Pander, M.; Ebert, M.; Bagdahn, J.

Systematische Untersuchung der Rissentstehung und des Rissfortschritts in eingebetteten Solarzellen

in Tagungsband 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie; Heidloff, A. (Hrsg.); OTTI e.V., Regensburg (2011) 302-307; M48/2011

Scherge, M.; Meier, S.; Blug, B.

Kann DLC wirklich Reibung minimieren?

in Tagungsband Ventiltrieb und Zylinderkopf 2010; VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2010) 97-105; M213/2010

Schlesinger, M.; Seifert, T.; Möser, M.; Riedel, H.

LCF- und TMF-Versuche mit kraftwerkstypisch niedrigen Belastungsraten zur Charakterisierung von Nickelbasislegierungen

in Tagungsband Werkstoffprüfung 2010; Pohl, M., Ruhr-Universität Bochum (Hrsg.); Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf (2010) 113-118; M101/2010

- Schulze, S.; Ehrich, C.; Ebert, M.; Bagdahn, J.
Mechanical behavior and lamination issues of solar modules containing elastomeric and amorphous encapsulates
 in Proc. of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference; WIP-Renewable Energies (Ed.); München (2010) 4064-4068; M239/2010
- Schweizer, S.; Henke, B.; Császár, I.; Paßlick, C.; Ahrens, B.; Miclea, P.-T.; Johnson, J. A.
Rare-earth doped fluorozirconate-based glass ceramics for high efficiency solar cells: recent developments
 in Proc. of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference; WIP-Renewable Energies (Ed.); München (2010) 47-51; M199/2010
- Siegele, D.; Hohe, J.; Hardenacke, V.
On the effect of load history on brittle failure of ferritic materials
 in Proc. of 17th International Symposium on Plasticity and its Current Applications; Khan, A.S. (Ed.); Numerical Engineering Analysis and Testing, NEAT Press, Fulton, Maryland, USA (2011) 283-285; M15/2011
- Siegele, D.; Varfolomeev, I.; Hohe, J.
Advanced concepts for fracture mechanics based assessment of components under thermal loading
 in Tagungsband 37. MPA-Seminar; Roos, E. (Hrsg.); Staatliche Materialprüfungsanstalt, Stuttgart (2011) 11.1-11.19; M133/2011
- Sommer, S.; Burget, S.; Bentele, R.
Simulation des Bruchverhaltens von Schweißpunkten mit erweitertem Schädigungsmodell
 in Tagungsband 43. Tagung DVM-AK Bruchvorgänge (DVM-Bericht 243); Klingbeil, D. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung -und -prüfung e.V., Berlin (2011) 17-26; M234/2010
- Sommer, S.; Burget, S.; Bentele, R.
Simulation of the fracture behavior of spot welds using advanced damage models
 in Proc. of 3rd International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures; Markiewicz, E. (Ed.); University of Valenciennes, Valenciennes, France (2011) CD-ROM; M51/2011
- Sommer, S.; Maier, J.
Failure modeling of a self piercing riveted joint using LS-DYNA
 in Proc. of 8th European Users Conference LS-DYNA; Cedex, A., ALYO-TECH (Ed.); Frankreich (2011) CD-ROM, Session 2; M30/2011
- Sommer, S.; Sun, D.-Z.; Bentele, R.
Modeling of rupture of spot welds under crash loading
 in Proc. of Automotive CAE Grand Challenge 2011; carhs.training gmbh (Ed.); Alzenau (2011) CD-ROM, Challenge 2; M20/2011
- Steier, V.; Koplin, C.; Kailer, A.; Reinecke, H.
Polymer infiltrated ceramics-bonding strength of an adhesion promoter using pull off- and shear test
 in Tagungsband 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde in Chemnitz, Band 41; Wielage, B. (Hrsg.); Technische Universität Chemnitz, Chemnitz (2011) 668; M43/2011
- Varfolomeev, I.; Ivanov, D.; Luke, M.
Effect of press fitting conditions on crack propagation behaviour in railway axles
 in Proc. of 18th European Conference on Fracture; Klingbeil, D. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2010) Paper #705, CD-ROM; M163/2011
- Varfolomeev, I.; Ivanov, D.; Siegele, D.
Weiterentwicklung von rechnerischen Methoden zur probabilistischen Fehlerbewertung von duktilen Rohrleitungen
 in Tagungsband 43. Tagung DVM-AK Bruchvorgänge (DVM-Bericht 243); Klingbeil, D. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2011) 35-44; M21/2011
- Varfolomeev, I.; Ivanov, D.; Siegele, D.; Nagel, G.
Probabilistic leak-before-break assessment of a main coolant line
 in Proc. of 2010 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference; Kwon, Y.W.; Jin, T.E.; Hafner, R.S. (Eds.); American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, USA (2010) PVP2010-25676, CD-ROM; M2/2010
- Varfolomeev, I.; Luke, M.; Burdack, M.
Bewertung von Rissinitiierung und Rissfortschrittsverhalten in Presssitzen von Radsatzwellen
 in Tagungsband Werkstoffprüfung 2010; Pohl, M. (Hrsg.); Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf (2010) 229-234; M169/2011
- Varfolomeev, I.; Luke, M.; Moroz, S.; Burdack, M.
Experimental and numerical study of fatigue crack growth behaviour in the threshold range
 in Proc. of 18th European Conference on Fracture; Klingbeil, D. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. Berlin (2010) Paper #519, CD-ROM; M162/2011
- Winzer, N.; Mrovec, M.; Paxton, A.
MultiHy: an EU-FP7-NMP project on multiscale modelling of hydrogen embrittlement
 in Proc. of International Conference on Steel and Hydrogen; OCAS, Zelzate, Belgium (2011) 209-220; M139/2011

IMPRESSUM

Redaktion

Katharina Hien
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

Seiten 3, 12 oben links, 17, 25, 33, 39, 55, 61, 67:

© Alexandra Jung, Emmendingen

Seiten 8, 9: © iStockfoto

Seiten 11, 12 unten links, 43 oben:

© Felizitas Gemetz, Freiburg

Seite 12 oben rechts, unten rechts: © Egbert Schmidt, Halle

Seite 19 links unten: © Foto Fabry, Ettlingen

Seite 29 links: © Robert Bosch GmbH

Seite 47, 75: © Jürgen Jeibmann Photographik, Leipzig

Seite 63 oben und rechts unten: © Infineon Technologies

Alle übrigen Abbildungen:

© Fraunhofer IWM