



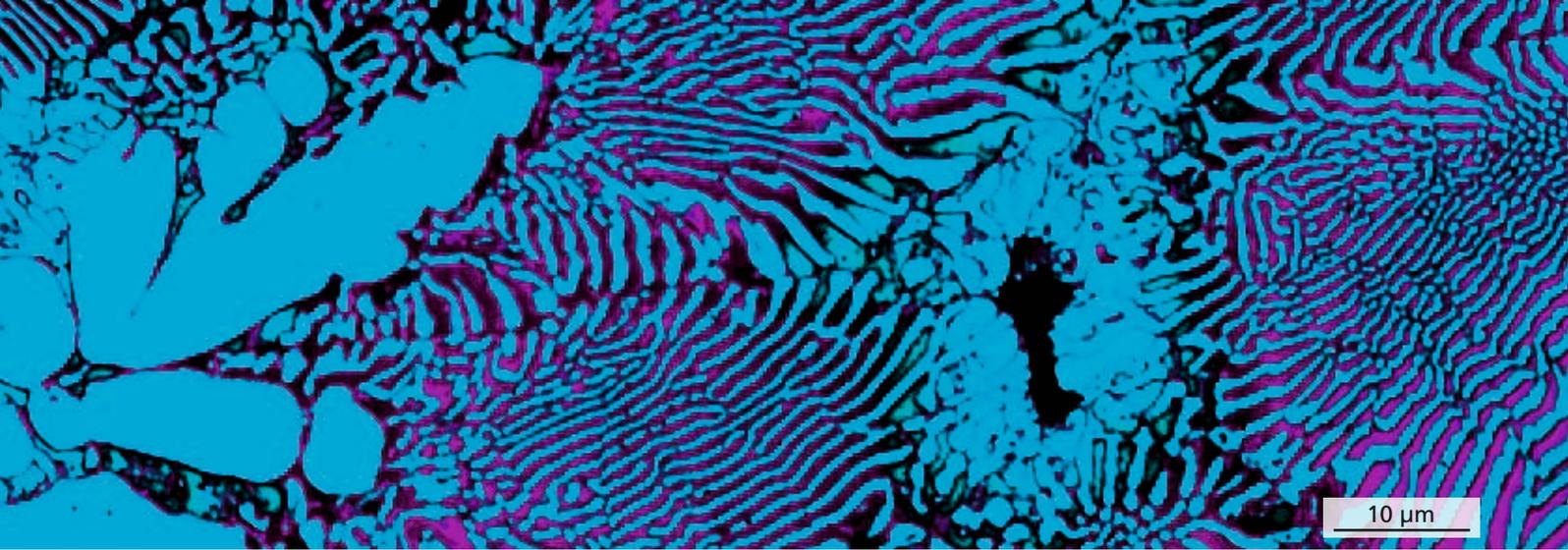
**Fraunhofer**

**IWM**

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM



**JAHRESBERICHT**  
**2015**



*Schliff durch die Auftragsschweißung einer Ventilspindel, Werkstoff: Cobalt-Molybdän-Silizium Hartphase, eingebettet in einer Cobalt-Chrom-Matrix.*

---

## Die Fraunhofer-Gesellschaft

---

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 66 Institute und Forschungseinrichtungen. Knapp 24 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2 Milliarden Euro. Davon fallen rund 1,7 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 entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang 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 aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten 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.

[www.fraunhofer.de](http://www.fraunhofer.de)

# JAHRESBERICHT 2015

---

**Fraunhofer-Institut  
für Werkstoffmechanik IWM**

---

Fraunhofer IWM Freiburg  
Wöhlerstraße 11  
79108 Freiburg  
Telefon +49 761 5142-0

Fraunhofer IWM Halle  
Walter-Hülse-Straße 1  
06120 Halle  
Telefon +49 345 5589-0

[info@iwm.fraunhofer.de](mailto:info@iwm.fraunhofer.de)  
[www.iwm.fraunhofer.de](http://www.iwm.fraunhofer.de)



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

# VORWORT

## Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

während Sie diesen Jahresbericht in Händen halten, vollzieht das Fraunhofer IWM eine strategische Weichenstellung. Mit Beginn des Jahres 2016 gliedert sich der Institutsteil Halle des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM aus und wird zum Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS.

Damit tragen wir der Tatsache Rechnung, dass sich die beiden Institutsteile in Freiburg und Halle in den letzten 20 Jahren wirtschaftlich und wissenschaftlich sehr erfolgreich entwickelt haben. Sie haben damit eine kritische Masse erreicht, die nach unserem Erfolgsverständnis die Ausgliederung ökonomisch und organisatorisch vorteilhaft und – so unsere Prämisse – für unsere Geschäftspartner attraktiv macht. Beide »neuen« Institute werden Sie wie gewohnt als Forschungs- und Entwicklungspartner unterstützen und Ihre Produkte und Prozesse mit Werkstoffkompetenz bereichern. Unser Anspruch ist, dass sich die gewonnene Flexibilität und Schlagkraft an den beiden Standorten in stärkerer Kundenorientierung niederschlagen werden und Sie als unsere Geschäftspartner von der Neugliederung profitieren.

Der Aufteilung geht ein umfassendes internes Projekt voraus, in dem wir uns mit dem Kuratorium, dem Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft und Kunden beraten, unsere Geschäftsprozesse neu geregelt und natürlich alle formalen Beschlüsse herbeigeführt haben. Ein solcher Schritt ist ja auch für die Fraunhofer-Gesellschaft kein Routinevorgang.

Sie werden sich fragen, ob und worin sich die beiden Institute künftig inhaltlich unterscheiden. Die Geschäftsfelder der beiden Standorte haben sich bereits in der Vergangenheit unabhängig voneinander mit minimalem Überlapp und gleichzeitig klarem Fokus auf bestimmte Marktsegmente

hin entwickelt. Beispiele hierzu finden Sie im vorliegenden Jahresbericht. Aber auch die Zusammenarbeit geht weiter. In strategisch relevanten Themen, beispielsweise bei Langfaserthermoplasten, der Hochdurchsatzanalytik oder der Biotribologie, werden wir wie bisher komplementäre Kompetenzen zusammenbringen und attraktive Lösungsangebote für Sie entwickeln.

Ein besonderes Highlight unserer Kooperation ist das Fraunhofer-Leitprojekt Kritikalität Seltener Erden, in dem ein Konsortium aus fünf Fraunhofer-Instituten daran arbeitet, den Anteil Seltener Erden in Hochleistungsmagneten zu reduzieren. Hier konnten wir 2015 mit standortübergreifenden Kräften einen vielversprechenden Durchbruch bei der Entwicklung eines Ersatzwerkstoffs erzielen.

Wirtschaftlich hat uns das vergangene Jahr an beiden Standorten große Anstrengungen abverlangt, unsere Erfolgsziele zu erreichen. Wir sind daran inhaltlich und organisatorisch gewachsen und so blicken wir zuversichtlich in das kommende Jahr.

Die künftige Ausgliederung des Institutsteils Halle haben wir im vorliegenden Jahresbericht bereits berücksichtigt und die Ergebnisberichte nach den beiden Standorten getrennt aufgeführt.

Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre.



Prof. Dr. Peter Gumbsch



Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn



*Die Institutsleiter des Fraunhofer IWM:  
Prof. Dr. Peter Gumbsch, Sprecher der Institutsleitung (links),  
Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn (rechts).*

# INHALT

## Institutsprofil

Mission des Fraunhofer IWM .....	6
Kuratorium .....	7
Das Institut in Zahlen .....	8
Organisation Fraunhofer IWM und Ansprechpartner .....	10
Fortschrittliche Lösungen mit dem Fraunhofer IWM Freiburg .....	12
Fortschrittliche Lösungen mit dem Fraunhofer IWM Halle .....	14

## Ausgewählte Forschungsergebnisse

<b>Standort Freiburg .....</b>	<b>17</b>
--------------------------------	-----------

## Materialdesign .....

Computational Screening von hartmagnetischen Metallphasen .....	20
Dünnschicht-Thermoelemente für die Verpackungsindustrie .....	22
Kleinskalige Struktur bestimmt Metamaterialeigenschaften .....	23

## Fertigungsprozesse .....

Mechanismenbasierte Schadensvorhersage für die Massivumformung .....	26
Spannungsoptische Methoden unterstützen Schadensanalysen in Glas .....	28
Partikelbasierte Simulation von schlecht fließfähigem Pulver .....	29

## Tribologie .....

Intelligente tribologische Systeme .....	32
Polar und hydrophob: Wie passt das zusammen? .....	34
Optimale Auslegung eines künstlichen Adersystems .....	35
Radnabenmotor: reibarme, verschleißfeste Elastomerdichtungen .....	36
Randzonenverformung: Charakterisierung mittels FIB-Analysen .....	37

## Bauteilsicherheit und Leichtbau .....

Lebensdauermodelle für oberflächenbehandelte Bauteile .....	40
Effiziente thermomechanische Modellierung des Crashverhaltens .....	42
Crashanalyse mit schnellen Infrarotmessungen .....	43
Ermüdung von CFK in Experiment und Simulation .....	44
Beeinflussung von Verzug und Eigenspannungen beim Schweißen .....	45

## Werkstoffbewertung, Lebensdauerkonzepte .....

Eigenspannungsbewertung reibrührgeschweißter Raumfahrt-Komponenten .....	48
Das Hochtemperaturverhalten von Metallen besser verstehen .....	50
Vernetzung des Fraunhofer IWM Freiburg .....	52

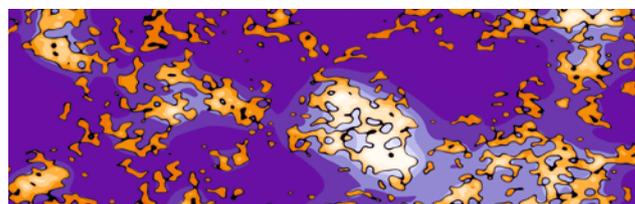
Technische Ausstattung am Fraunhofer IWM Freiburg .....	56	Lokalisierung von Schwachstellen in dünnen Isolationsschichten .....	88
Personen, Ausbildung, Ereignisse, Veröffentlichungen am Fraunhofer IWM Freiburg .....	59	Mikrostrukturelle Bewertung für die Automobilelektronik .....	90
<b>Ausgewählte Forschungsergebnisse</b>		Bewertung von Halbleiterbauelementen mit Oberflächendefekten .....	91
<b>Standort Halle .....</b>	<b>67</b>	<b>Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP ...</b>	<b>92</b>
<b>Polymeranwendungen .....</b>	<b>68</b>	Zuverlässige Solarmodule für jedes Klima .....	94
Entwicklung von biobasierten unidirektionalen Tapes	70	Defektfreie Halbzellen durch optimierte Laserprozesse ...	96
Röntgen-CT an thermoplastischen Faserverbundstrukturen .....	72	Simulationsbasierte Optimierung von Lötprozessen .....	97
Kautschukbasierte Komposite für Reifenanwendungen ..	74	Herstellung und Charakterisierung diamantdrahtgesägter Wafer .....	98
Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten Thermoplasten...	75	Zuverlässige Technologien für gewölbte Solarmodule ...	99
<b>Biologische und makromolekulare Materialien .....</b>	<b>76</b>	<b>Fraunhofer-Anwendungszentrum für Anorganische Leuchtstoffe .....</b>	<b>100</b>
Nanofaser-Vliese für medizinische Anwendungen .....	78	Entwicklung von temperaturstabilen Leuchtstoffen für weiße LEDs .....	101
Antifouling-Beschichtung von Umkehrosmose-Membranen .....	80	Vernetzung des Fraunhofer IWM Halle .....	102
Mittelgesichtsimplantate mit nanostrukturierten Oberflächen .....	81	Technische Ausstattung am Fraunhofer IWM Halle .....	106
Mikrostrukturanalytik an infiltrierten Kariesläsionen .....	82	Personen, Ausbildung, Ereignisse, Veröffentlichungen am Fraunhofer IWM Halle .....	109
Ligninbasierte multifunktionale Naturstoffkomposite ....	83	Impressum .....	117
<b>Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik .....</b>	<b>84</b>		
microPREP™ – Laserbasierte Probenpräparationsplattform .....	86		

# MISSION DES FRAUNHOFER IWM

## Unsere Mission: Werkstoffe intelligent nutzen

Der intelligente Einsatz von Werkstoffen ist Schlüssel zum Erfolg und Investition in die Zukunft: Unsere Forschungsarbeiten ermöglichen innovative und zuverlässige Produkte bei unseren Kunden. Wir tragen zu einer Gesellschaft bei, die nach einer effizienten und nachhaltigen Nutzung von Energie und Ressourcen strebt.

- Wir machen Mechanismen und Prozesse in Werkstoffen und Materialsystemen beherrschbar, indem wir sie bewerten und modellhaft beschreiben. Dadurch erschließen wir Reserven bei der Leistungsfähigkeit und Effizienz von technischen Systemen.
- Wir erfassen Werkstoffe bis in atomare Strukturen und nehmen Einfluss auf Wechselwirkungen. Damit können wir Werkstoffeigenschaften für geforderte und neue Funktionalitäten einstellen.
- Wir durchdringen Materialsysteme und Fertigungsprozesse grundlegend und überführen sie in zuverlässige Produkte und Technologien. So verwirklichen wir gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft wettbewerbsentscheidende Innovationen.



*Beispiele unserer Kernkompetenzen »Werkstoffmodellierung und Simulation«, »Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung« und »Grenzflächen- und Oberflächentechnologie«: Simulation eines Kontakts zwischen rauher und elastischer Oberfläche (oben), Ermüdungsversuch bei kryogener Temperatur (Mitte) und funktionale Oberflächenbeschichtung (unten).*

# KURATORIUM

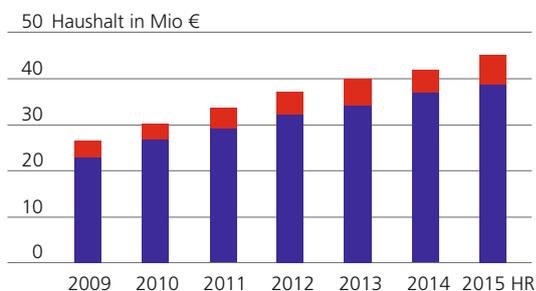
## Das Kuratorium des Fraunhofer IWM 2015

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. Die Kuratoriumsmitglieder gaben ein einstimmiges Votum zur Ausgliederung des Fraunhofer IMWS aus dem Fraunhofer IWM.

- Dr. Alexander Sagel, Kuratoriumsvorsitzender, Vorsitzender der Divisionsleitung Hardparts, KS Kolbenschmidt GmbH, Neckarsulm
- Prof. Dr. Lorenz Sigl, Stellvertretender Kuratoriumsvorsitzender, Head of Innovation Services, Plansee SE, Reutte, Österreich
- Dr. Markus Baur, BMW Group, München
- Dr. Karlheinz Bourdon, Vizepräsident Technologie, KraussMaffei Technologies GmbH, München
- Dr. Jörg Eßlinger, Director Materials Engineering (TEW), MTU Aero Engines AG, München
- Siegfried Glaser, Geschäftsführer, Glaser FMB GmbH & Co. KG, Beverungen
- MinDirig. Hans-Joachim Hennings, Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg
- Dr. Florian Holzapfel, Geschäftsführer, Calyxo GmbH, Bitterfeld-Wolfen
- Bernhard Hötger, Geschäftsführer, HEGLA GmbH & Co. KG, Beverungen
- Dr. Jürgen Kirschner, Geschäftsleiter, Robert Bosch GmbH, Gerlingen
- Dr. Roland Langfeld, Vice President, Schott AG, Mainz
- Prof. Dr. Detlef Löhe, Vizepräsident für Forschung und Information, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Prof. Dr. Ingrid Mertig, Nominierungsausschuss Leibniz Preis, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Dr. Christoph Mühlhaus, Sprecher des Clusters Chemie/Kunststoffe Mitteldeutschland, Halle (Saale)
- Prof. Dr. Rolf Mühlhaupt, Geschäftsführender Direktor des Freiburger Materialforschungszentrums, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Peter Putsch, Geschäftsführer, Exipnos GmbH, Merseburg
- Dr. Frank Stietz, Leitung Haereus Electronics, Heraeus Holding GmbH, Hanau
- Hans-Jürgen Straub, Vorstandsvorsitzender, X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt
- Staatssekretär Marco Tullner, Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg
- MinRat Dr. Joachim Wekerle, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart
- Jens Wemhöner, Geschäftsführer, Cerobear GmbH, Herzogenrath

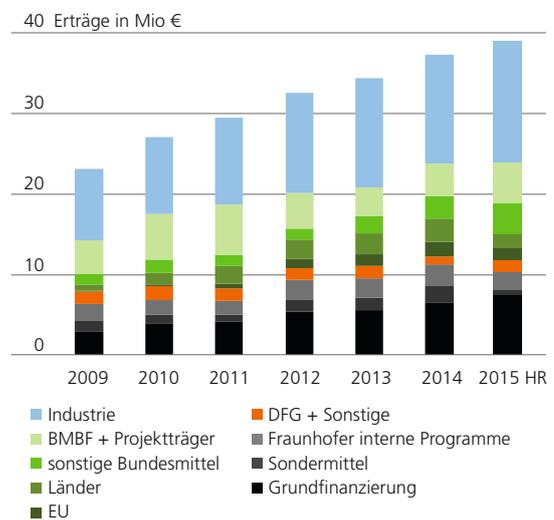
# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## Haushalt



1 Entwicklung des Investitionshaushalts (rot) und des Betriebshaushalts (blau) des Fraunhofer IWM.

Der Haushalt des Fraunhofer IWM setzt sich zusammen aus einem Betriebshaushalt und einem Investitionshaushalt. Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist weiter gewachsen und beläuft sich auf 39 Millionen Euro (Hochrechnung HR von November 2015). Davon entfallen 19,1 Millionen Euro auf den Institutsteil Freiburg und 19,9 Millionen Euro auf den Institutsteil Halle. Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Er wird finanziert durch externe Erträge aus Industrie und öffentlicher Hand und durch insti-

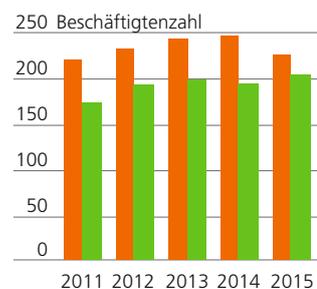


2 Entwicklung der Erträge des Fraunhofer IWM (Freiburg und Halle).

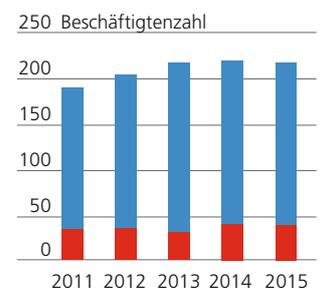
tutionelle Förderung (Grundfinanzierung). Der Anteil der Industrieerträge am Betriebshaushalt 2015 liegt bei 38,4 Prozent. Der Investitionshaushalt 2015 beträgt 6,4 Millionen Euro.

## Personalentwicklung

Ende 2015 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 429 Personen als Stammpersonal beschäftigt, davon 225 in Freiburg und 204 in Halle. Die Beschäftigtenzahl setzt sich zusammen aus 40 Wissenschaftlerinnen und 179 Wissenschaftlern, 133 technischen Beschäftigten, 95 Angestellten in der Infrastruktur und 15 Auszubildenden. Inklusiv der 114 wissenschaftlichen Hilfskräfte sowie Praktikantinnen und Praktikanten waren Ende 2015 insgesamt 576 Personen am Fraunhofer IWM beschäftigt (292 in Freiburg und 284 in Halle).



3 Stammpersonalentwicklung des Fraunhofer IWM in Freiburg (orange) und Halle (grün).



4 Personalentwicklung der Wissenschaftlerinnen (rot) und Wissenschaftler (blau) des Fraunhofer IWM.

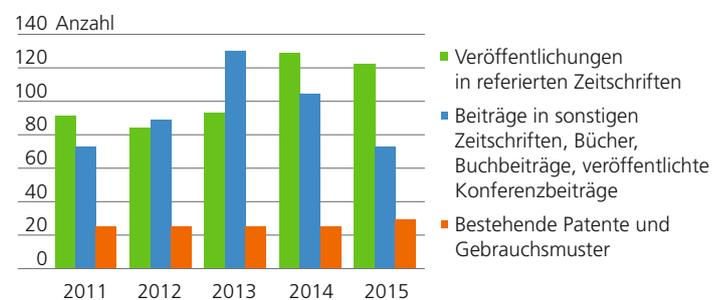
Stand: Nov. 2015

## Wissenschaftliche Exzellenz darstellen

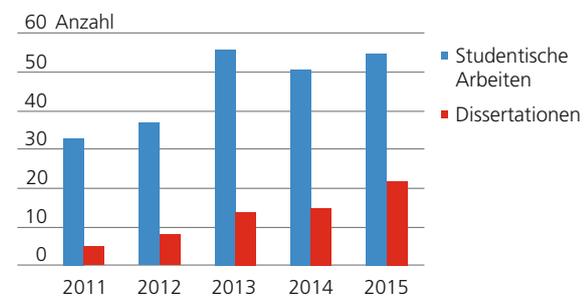
Die Fraunhofer-Institute betreiben anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für die Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Dabei ist neben dem wirtschaftlichen Erfolg die wissenschaftliche Exzellenz ein notwendiges Kriterium, um die Mission eines Instituts erfolgreich zu erfüllen. Um Qualität und Quantität der wissenschaftlichen Arbeit sowie die Exzellenz der Institute und der einzelnen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler darstellen zu können, erhebt die Fraunhofer-Gesellschaft mit ihren Fraunhofer-Wissenschaftsindikatoren diese Daten nun systematisch. Hierdurch richtet die Fraunhofer-Gesellschaft ihr Augenmerk deutlich auf ihre wissenschaftlichen Leistungen und ihre wissenschaftliche Reputation. Die Daten werden in drei Betrachtungsrichtungen zusammengefasst:

- Qualifikation von wissenschaftlichem Nachwuchs
- Wissenschaftlicher Output in Patenten und Veröffentlichungen
- Wissenschaftliche Anerkennung und Vernetzung

Das Fraunhofer IWM war Vorreiter bei der Erfassung und federführend an der Ausarbeitung der Fraunhofer-Wissenschaftsindikatoren beteiligt.



1 Wissenschaftlicher Output des Fraunhofer IWM Freiburg und Halle.



2 Akademische Qualifizierung am Fraunhofer IWM Freiburg und Halle.

# ORGANISATION FRAUNHOFER IWM UND ANSPRECHPARTNER

## STANDORT FREIBURG

Institutsleiter und Sprecher der Institutsleitung Prof. Dr. Peter Gumbsch	Stellvertretende Institutsleiter Prof. Dr. Chris Eberl und Dr. Rainer Kübler
--	---

<b>Materialdesign</b> Prof. Dr. Christian Elsässer	<b>Fertigungsprozesse</b> Dr. Dirk Helm	<b>Tribologie</b> Prof. Dr. Matthias Scherge	<b>Bauteilsicherheit und Leichtbau</b> Dr. Dieter Siegele	<b>Werkstoffbewertung, Lebensdauerkonzepte</b> Dr. Wulf Pfeiffer
<b>Funktionale Schichtmaterialien</b> Dr. Frank Burmeister	<b>Pulvertechnologie, Fluidodynamik</b> Dr. Torsten Kraft	<b>Verschleißschutz, Technische Keramik</b> Dr. Andreas Kailer	<b>Ermüdungsverhalten, Bruchmechanik</b> Dr. Michael Luke	<b>Mikrostruktur, Eigenspannungen</b> Dr. Wulf Pfeiffer
<b>Meso- und Mikromechanik</b> Prof. Dr. Chris Eberl	<b>Umformprozesse</b> Dr. Dirk Helm	<b>Multiskalenmodellierung und Tribosimulation</b> Prof. Dr. Michael Moseler	<b>Crashsicherheit, Schädigungsmechanik</b> Dr. Dong-Zhi Sun	<b>Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik</b> Dr. Christoph Schweizer
<b>Materialmodellierung</b> Prof. Dr. Christian Elsässer	<b>Bearbeitungsverfahren, Glasformgebung</b> Dr. Rainer Kübler	<b>Polymertribologie und bio-medizinische Materialien</b> Dr. Raimund Jaeger	<b>Crashdynamik</b> Frank Huberth	
		<b>Tribologische Schichtsysteme</b> Bernhard Blug	<b>Fügeverbindungen</b> Dr. Silke Sommer	
		<b>Angewandte Nanotribologie</b> Dr. Martin Dienwiebel	<b>Verbundwerkstoffe</b> Dr. Jörg Hohe	

<b>Infrastruktur</b> Michael Schmid	<b>Stab Institutsleitung</b> Dr. Rainer Kübler	<b>Projektadministration, Einkauf</b> Nina Halaczinsky	<b>Mechanische Werkstatt</b> Stefan Frei	<b>Technische Dienste</b> Roland Guth
	<b>Personal und Dienstreisen</b> Kerstin A. Drüsedau	<b>Informationstechnik IT</b> Klaus Merkel	<b>Qualitäts- und Besuchermanagement</b> Elke Schubert	<b>Unternehmensstrategie und Kommunikation</b> Thomas Götz

## STANDORT HALLE

Institutsleiter Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn	Stellvertretender Institutsleiter Prof. Dr. Matthias Petzold
--	---

## GEMEINSAM MIT ANDEREN ORGANISATIONEN BETRIEBENE FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

<p><b>Polymeranwendungen</b></p> <p>Prof. Dr. Peter Michel Prof. Dr. Mario Beiner (wiss. Leiter)</p> <p><b>Thermoplastbasierte Faserverbund-Halbzeuge</b> Ivonne Jahn</p> <p><b>Faserverbundstrukturen</b> Dr. Ralf Schlimper</p> <p><b>Polymerbasiertes Materialdesign</b> Prof. Dr. Mario Beiner</p> <p><b>Hochleistungs-thermoplaste</b> Dr. Matthias Zscheyge</p>	<p><b>Biologische und makromolekulare Materialien</b></p> <p>Prof. Dr. Andreas Heilmann</p> <p><b>Technologien für Biofunktionale Oberflächen</b> Prof. Dr. Andreas Heilmann</p> <p><b>Charakterisierung med. u. kosmet. Pflegeprodukte</b> Dr. Andreas Kiesow</p> <p><b>Bewertung von Materialien der Medizintechnik</b> Dr. Sven Henning</p> <p><b>Naturstoffkomposite</b> Andreas Kromholz</p>	<p><b>Komponenten der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik</b> Prof. Dr. Matthias Petzold</p> <p><b>Bewertung elektronischer Systemintegration</b> Sandy Klengel</p> <p><b>Nanomaterialien und Nanoanalytik</b> Prof. Dr. Thomas Höche</p> <p><b>Diagnostik Halbleitertechnologien</b> Frank Altmann</p> <p><b>Anwendungszentrum Anorganische Leuchtstoffe</b> Prof. Dr. Stefan Schweizer</p>	<p>Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP</p> <p>Prof. Dr. Jörg Bagdahn Dr. Peter Dold*</p> <p><b>Abteilung Zuverlässigkeit und Technologie für die Netzparität</b> Prof. Dr. Jörg Bagdahn</p> <p><b>Diagnostik Solarzellen</b> Dr. Christian Hagendorf</p> <p><b>Zuverlässigkeit von Solarmodulen und Systemen</b> Dr. Matthias Ebert</p> <p><b>Siliziumwafer</b> Prof. Dr. Stephan Schönfelder</p> <p><b>Modultechnologie</b> Prof. Dr. Jens Schneider</p> <p><b>Abteilung Labor für Kristallisationstechnologie</b> Prof. Dr. Peter Dold*</p>	<p>Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und -verarbeitung PAZ Prof. Dr. Michael Bartke**</p> <p><b>Polymerverarbeitung</b> Prof. Dr. Peter Michel</p> <p><b>Polymersynthese</b> Dr. Ulrich Wendler**</p> <p>* Fraunhofer ISE ** Fraunhofer IAP</p>
---	---	---	---	--

<b>Infrastruktur</b> Thomas Merkel	<b>Projekte &amp; Finanzen</b> Helga Steinhäuser	<b>Technische Dienste und IT</b> Sebastian Gerling	<b>Personal &amp; Dienstreisen</b> Constanze Pälecke
<b>Wissenschaftsmanagement</b> Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn	<b>Büro Institutsleitung</b> Heike Gehritz	<b>Öffentlichkeitsarbeit</b> Clemens Homann	<b>Forschungsstrategie und Geschäftsentwicklung</b> Andreas Dockhorn

# FORTSCHRITTLICHE LÖSUNGEN MIT DEM FRAUNHOFER IWM FREIBURG

Die Werkstoffmechanik des Fraunhofer IWM in Freiburg umfasst alle Fragen der Funktion, des Verhaltens und der Eigenschaften von Werkstoffen während ihrer Entwicklung, ihrer Herstellung, ihrer Verarbeitung und ihres Einsatzes. Basierend auf werkstoffmechanischem Know-how können die Eigenschaften, Funktionen und Belastungsgrenzen von Werkstoffen und Bauteilen für die Anforderungen unserer Kunden bewertet, eingestellt und verbessert werden. Besonders wirkungsvoll ist die Expertise des Fraunhofer IWM Freiburg dort, wo Werkstoffe in Bauteilen und Fertigungsverfahren extremen und komplexen Belastungsbedingungen ausgesetzt sind und wo Verbesserungen in Leistungsfähigkeit und Funktionen daher nur durch ein tiefgreifendes und ganzheitliches Verständnis realisiert werden können.

## **Wettlauf um Leistungsfähigkeit und Innovation bei Werkstoffen, Prozessen, Bauteilen und Systemen**

Aktuell besteht beispielsweise ein großer Bedarf an Werkstoffbewertungen und der Entwicklung neuer Werkstofflösungen im Energiesektor bei den Themen Anlagensicherheit, Energiewandlung, Energiespeicherung und Lebensdauerkonzepte. In der Fahrzeugindustrie sind Leichtbau, Multimaterialsysteme sowie Sicherheit treibende Themen. Die Antriebstechnik fordert Lösungen zur Reibungsminderung, um den Kraftstoff- und Ölverbrauch zu reduzieren. In der Fertigungstechnik sind verschleißarme Werkzeuge genauso gefragt wie effiziente und robuste Prozesse. In Hochleistungswerkstoffen wie Magneten gilt es, kritische Rohstoffe zu ersetzen. Als einem der führenden Institute der Werkstoffforschung ist es unser Anspruch, mit innovativen werkstoffbasierten Lösungen zur Bewältigung aktueller markt- oder technologiegetriebener Herausforderungen wie der Energiewende, Industrie 4.0 oder besserer Ressourceneffizienz beizutragen.

- Das Fraunhofer IWM charakterisiert und bewertet die Eigenschaften von Werkstoffen in Bauteilen und Fertigungsverfahren und das Verhalten von Bauteilen auf vielen Skalen. Es betrachtet Entwicklung, Fertigung und Einsatz von Werkstoffen und Bauteilen integral und hilft so, neue Funktionen und Fertigungsschritte zu realisieren.
- Um die Eigenschaften von Werkstoffen aus ihrer inneren Struktur abzuleiten, entwickelt und nutzt das Fraunhofer IWM mechanismenbasierte Werkstoffmodelle. Über solche Struktur-Eigenschaftsbeziehungen kann umgekehrt Einfluss auf die Strukturentwicklung bei der Herstellung und im Einsatz genommen werden.
- Aus dem etablierten Zusammenspiel von Experiment und Simulation ergibt sich eine hervorragende Lösungskompetenz für werkstoffbezogene Fragen aus nahezu allen Industriebereichen.

### **Leitmotiv**

Mit Lösungen zur optimierten Nutzung von Werkstoffeigenschaften und neuen Werkstofffunktionen innovative und zuverlässige technische Bauteile und Fertigungsverfahren bei unseren Auftraggebern ermöglichen.

### Nachhaltigkeit – Leichtbaulösungen und Speicherung erneuerbarer Energien

Im Leistungszentrum Nachhaltigkeit (Seite 53) liefert das Fraunhofer IWM in Freiburg mit Partnern der Albert-Ludwigs-Universität wichtige Beiträge zur Speicherung erneuerbarer Energien und Leichtbaulösungen aus Verbundwerkstoffen.

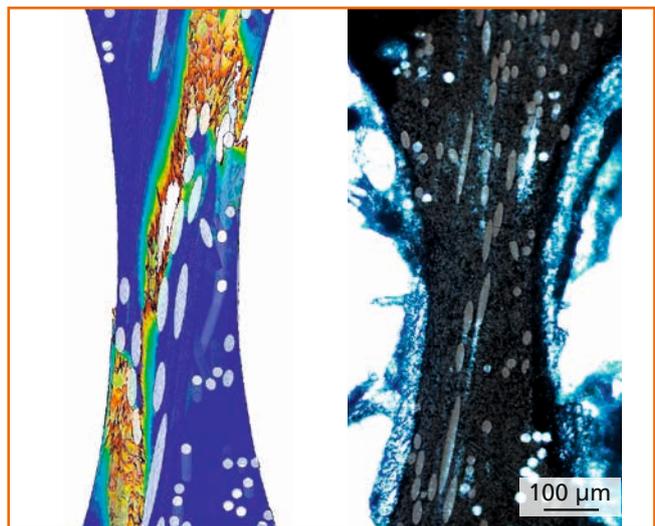
### Neuer Flüssigkraftstoff

Das HyCO<sub>2</sub>-Netzwerk erarbeitet Technologien, um erneuerbare Energie durch Hydrogenierung von CO<sub>2</sub> in Flüssigkraftstoff umzuwandeln. So wird die fluktuierende Energie speicherbar und leichter nutzbar. Das Ziel: langlebigere, vor Ort reaktivierbare und aktivere Methanol-Katalysatoren. Das Fraunhofer IWM entwickelt Simulationsmethoden, um die atomistischen Mechanismen der Katalysatoren besser zu verstehen und sie effektiver entwickeln zu können (Prof. Dr. Michael Moseler).

### Neue Materialien für den Leichtbau

Um den Energieverbrauch von Fahrzeugen zu senken, arbeitet das Fraunhofer IWM an zwei Projekten. Gemeinsam mit dem Institut für Mikrosystemtechnik IMTEK entwickelt das Fraunhofer IWM Methoden zur Verbesserung der Haftung zwischen Kunststoffen und verstärkenden Fasern aus Glas, Kohlenstoff oder biologischem Material. Eine besondere Rolle spielt dabei das spätere Rezyklieren der Materialien. Die Eigenschaften dieser großserienfähigen Leichtbauwerkstoffe sollen auf die jeweilige Anwendung eingestellt werden (Dr. Jörg Hohe).

Um die kosten-, öko- und energieeffizienten Polyolefine als Leichtbauwerkstoffe nutzen zu können, entwickelt das Team des Projekts susCOMP sortenreine Komposite. Dabei bestehen Matrix und Verstärkungsphase aus dem gleichen Basispolymer Polyethylen, jedoch in verschiedenen Modifikationen. Hierdurch sind diese Kompositwerkstoffe problemlos rezyklierbar. Das Fraunhofer IWM charakterisiert die Verformungs-, Versagens-, Reib- und Verschleißigenschaften dieser All-Polyethylen-Kompositwerkstoffe und entwickelt entsprechende Materialmodelle. (Dr. Raimund Jaeger).



1 *Miniaturnugversuch und Finite-Elemente Analyse der aufgelösten Mikrostruktur zur Bestimmung der Interface-Belastungen.*

# FORTSCHRITTLICHE LÖSUNGEN MIT DEM FRAUNHOFER IWM HALLE

Der Standort Halle des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM – ab Januar 2016 Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS – ist mit methodischer Ausrichtung in den Fachdisziplinen Materialwissenschaft und Werkstofftechnik tätig. Das Institut ist Ansprechpartner für die Industrie und öffentliche Auftraggeber für alle Fragestellungen, die die Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen betreffen – mit dem Ziel, Materialeffizienz und Wirtschaftlichkeit zu steigern und Ressourcen zu schonen.

Die Arbeiten zielen darauf ab, Fehler und Schwachstellen in Werkstoffen, Bauteilen und Systemen auf der Mikro- und Nanoskala zu identifizieren, deren Ursachen aufzuklären und darauf aufbauend Lösungen für die Kunden anzubieten. Dazu wurden in Halle mehr als 35 Millionen Euro in Geräte zur Mikrostrukturaufklärung investiert. Das Institut verfügt innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft über die umfassendste gerätetechnische Ausstattung zur Mikrostrukturaufklärung. Die industriellen Auftraggeber des Instituts kommen unter anderem aus dem Bereich der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik, der Photovoltaik, der Kunststofftechnik, der chemischen Industrie, der Energietechnik, dem Automobilbau oder dem Flugzeugbau. Diese Arbeiten werden begleitet durch die Weiterentwicklung von mikrostrukturaufklärenden Methoden. Zusammen mit Herstellern von Analytikgeräten können passgenaue Gerätekonfigurationen entwickelt werden, damit industrielle Auftraggeber in Zukunft Fehlerquellen eigenständig erkennen und vermeiden können.

Das Institut stellt an sich selbst höchste wissenschaftliche und technologische Anforderungen. Die international anerkannte, mikrostrukturanalytische Kompetenz wird ergänzt um das mikrostrukturelle Design von Werkstoffen, Bauteilen und

Systemen. Der mikrostrukturelle Ansatz ermöglicht es, Technologieentwicklung zusammen mit den Kunden schon in der Entwicklungsphase werkstoffspezifisch zu designen und die funktionellen Eigenschaften der Bauteile oder Systeme maßzuschneidern. Neben der mikrostrukturbasierten Technologieentwicklung steht auch hier die Entwicklung neuer Hochdurchsatzratenscreening-Methoden im Vordergrund. Etablierte Technologieentwicklungsschwerpunkte liegen in den Polymer- und Halbleitertechnologien, die in Zukunft um andere Materialklassen und Multimaterialsysteme erweitert werden.

Anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für die Wirtschaft und zum Vorteil für die Gesellschaft fördert und betreibt das Institut in internationaler Vernetzung. Es leistet wichtige Beiträge zur Materialeffizienz, Ressourcenschonung und Wirtschaftlichkeit und stellt sich damit der zentralen Herausforderung des 21. Jahrhunderts, der Nachhaltigkeit aller Lebensbereiche und insbesondere dem effizienten Umgang mit begrenzten Rohstoffen. Gleichzeitig trägt es somit zur Wettbewerbsfähigkeit von Sachsen-Anhalt, Deutschland und Europa bei.

## Leitmotiv

Mikrostrukturbasierte Technologieentwicklung und Diagnostik für effiziente und zuverlässige Werkstoffe, Bauteile und Systeme.

### **Mikrostrukturdesign – passgenaue Werkstoffe für mehr Ressourceneffizienz**

Die Beherrschung der Mikrostruktur ermöglicht Eingriffe in fundamentale Materialeigenschaften. Das gilt nicht nur für die Möglichkeiten der Mikrostrukturdiagnostik, um bestehende Werkstoffe und Bauteile untersuchen zu können, sondern kann bereits am Beginn der Wertschöpfungskette ansetzen: Mikrostrukturdesign ermöglicht die Entwicklung passgenauer Materialien.

Das Fraunhofer IWM Halle – künftig Fraunhofer IMWS – baut diese Kernkompetenz kontinuierlich aus, sodass Kunden bereits während der Entwicklungsphase vom Know-how des Instituts auf der Mikrostrukturebene profitieren können.

#### **Aktuelles Beispiel: optimierte Komposite für Autoreifen**

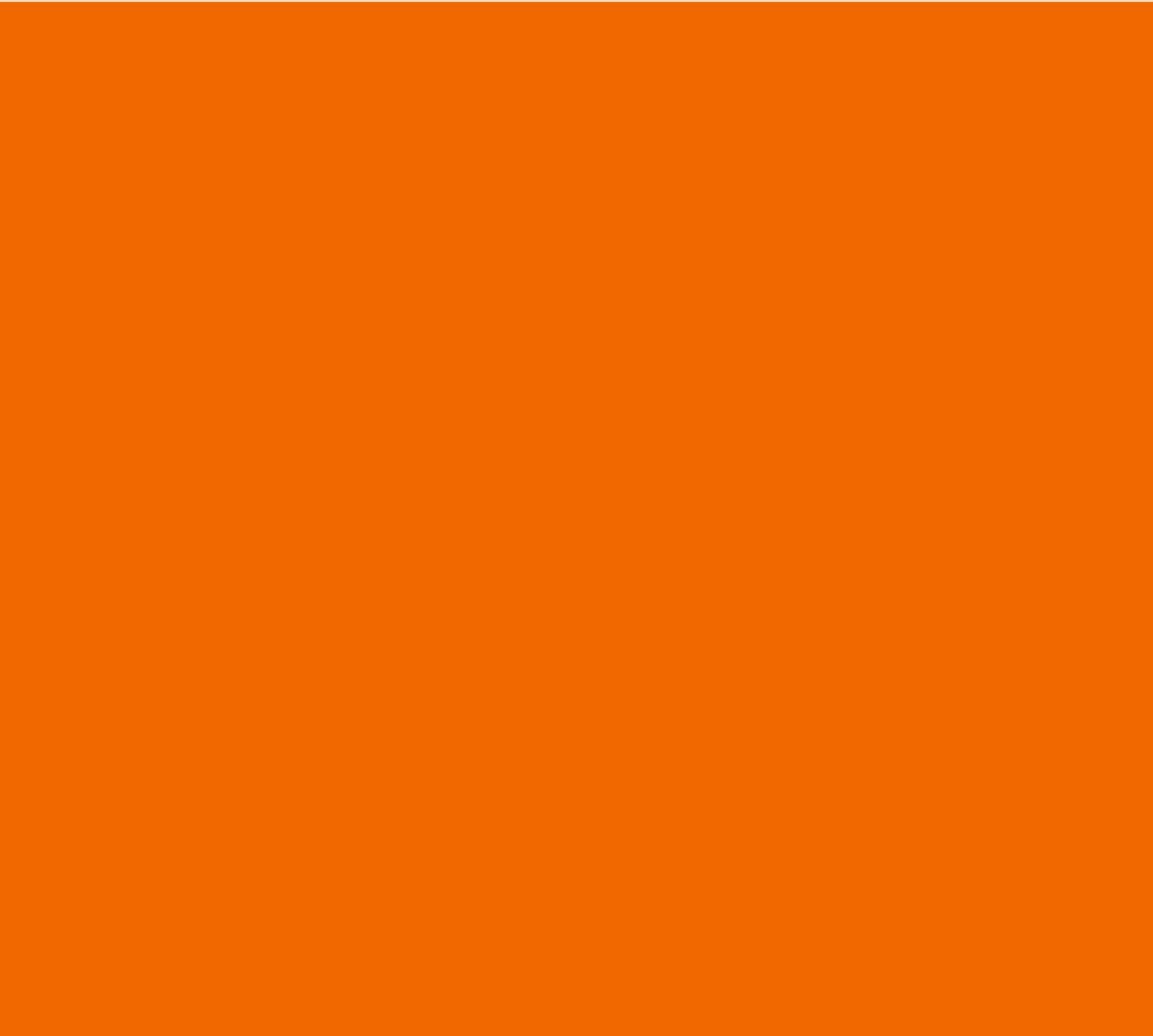
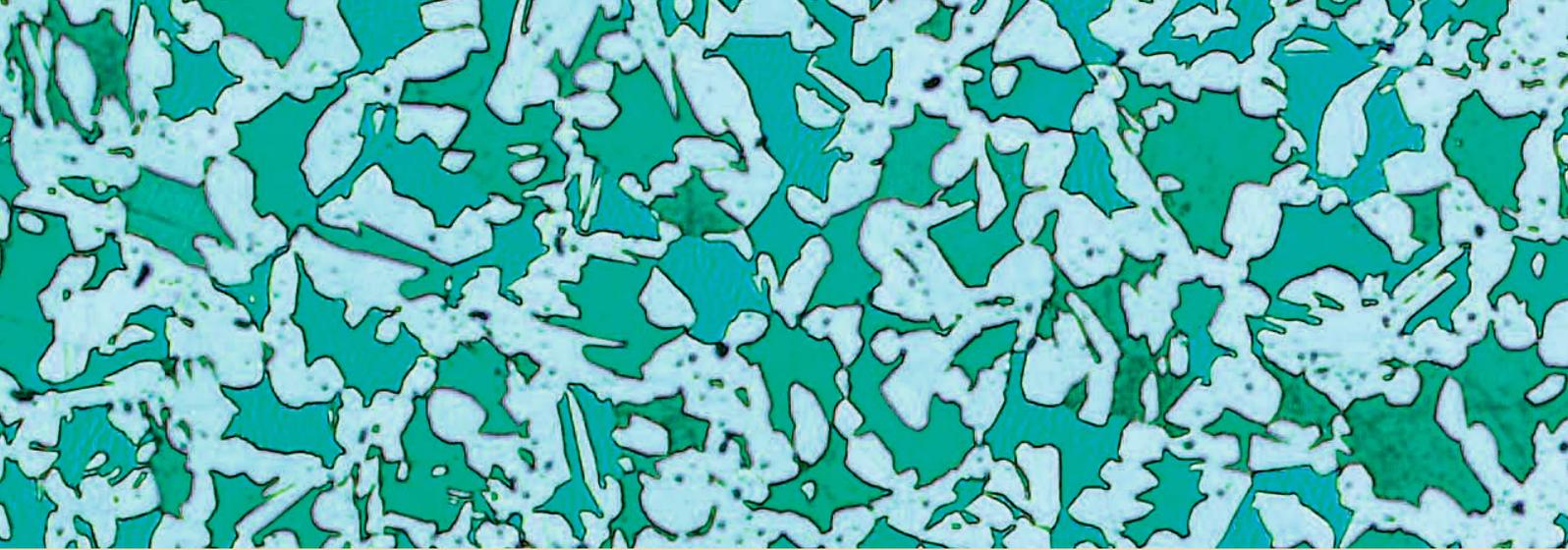
Durch die Zugabe von nanoskaligen Füllstoffen in kautschukbasierte Komposite lassen sich wichtige mechanische Eigenschaften wie Härte, Elastizitätsmodul oder Abriebsfestigkeit beeinflussen. Eine detaillierte Kenntnis des Füllstoffnetzwerks auf der Mikrostrukturebene ermöglicht es, die gewünschte Zusammensetzung von Kautschukkompositen zu schaffen. Das trägt dazu bei, den Rollwiderstand der Reifen und damit den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren, bei gleichzeitiger Erhaltung ihres Nassgriffs.

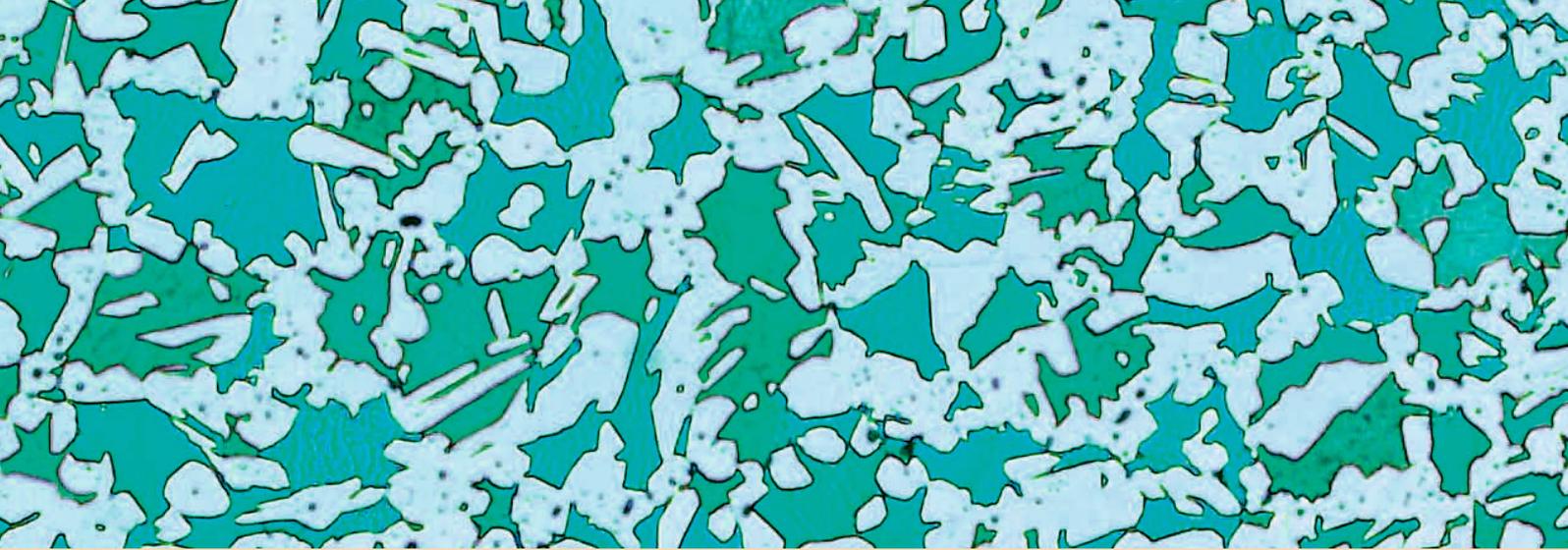
Das Fraunhofer IWM Halle beweist auch bei faserverstärkten Kunststoffen die Potenziale des Mikrostrukturdesigns: Hier lässt sich die Ausrichtung der Fasern direkt an den Lastverlauf anpassen. So wird die auf ein Bauteil einwirkende Last genau verteilt. Das eröffnet ein enormes Anwendungsspektrum vor allem für den Leichtbau, auch mit biobasierten Werkstoffen.

So bietet Mikrostrukturdesign auf Ebene der kleinsten Details innovative Lösungen für große Herausforderungen. Das Fraunhofer IWM Halle leistet damit einen entscheidenden Beitrag zur Ressourceneffizienz und der Wettbewerbsfähigkeit seiner Kunden.



**1** *Auf der Nanoskala optimierte Komposite tragen dazu bei, den Rollwiderstand von Reifen zu senken.*





**AUSGEWÄHLTE  
FORSCHUNGSERGEBNISSE  
STANDORT FREIBURG**

## Gruppen



### **Funktionale Schichtmaterialien**

Für industrielle Anwendungen in Optik und Mikrosystemtechnik entwickeln wir neue Schichtmaterialien. Um Werkzeuge und Komponenten zu schützen, erforschen wir neue Schichtmaterialien mit hoher Barriere Wirkung gegen korrosive Spezies.

*Dr. Frank Burmeister | [frank.burmeister@iwm.fraunhofer.de](mailto:frank.burmeister@iwm.fraunhofer.de)*



### **Meso- und Mikromechanik**

Wir untersuchen mechanische Eigenschaften und Zuverlässigkeit kleinvolumiger Proben. Zudem entwickeln wir die experimentelle Mechanik zur Untersuchung mechanischer Materialeigenschaften in kleinen Dimensionen kontinuierlich weiter.

*Prof. Dr. Chris Eberl | [chris.eberl@iwm.fraunhofer.de](mailto:chris.eberl@iwm.fraunhofer.de)*



### **Materialmodellierung**

Mit physikalischen Modellen und numerischen Methoden simulieren wir das Verhalten von Werkstoffen, sagen Struktur-Eigenschaft-Prozess-Beziehungen voraus und leisten Beiträge zur Funktionsoptimierung und Materialsubstitution.

*Prof. Dr. Christian Elsaesser | [christian.elsaesser@iwm.fraunhofer.de](mailto:christian.elsaesser@iwm.fraunhofer.de)*

*» Mit wissensbasiertem und zielorientiertem Materialdesign schlagen wir unseren Kunden neuartige Substitutionsmaterialien mit gewünschten Funktionseigenschaften vor, mit denen sie ihre Produkte ressourceneffizienter und versorgungssicherer herstellen können.«*



## **GESCHÄFTSFELDLEITER**

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

### **Fokus**

Mit experimentellen und simulatorischen Methoden, basierend auf der Werkstoffmechanik, Beschichtungstechnologie und Festkörperphysik, klären wir Werkstoffverhalten auf und sagen Materialeigenschaften vorher. Dadurch können wir Materialstrukturen und Werkstofffunktionen gestalten. Wir decken die Einflüsse von Kristalldefekten und Mikrostrukturbestandteilen auf das Materialverhalten »im Großen« auf. Diese Erkenntnisse nutzen wir, um in gezielter Weise Werkstoffe ressourcen- und energieeffizient zu kombinieren und dadurch technische Systeme nachhaltig zu verbessern.

### **Bemerkenswertes aus 2015**

Im Jahr 2015 hat sich »Materialdesign« als erfolgreiches Geschäftsfeld innerhalb des Fraunhofer IWM etabliert. Unsere drei Gruppen unterstützen und ergänzen sich mit ihren recht unterschiedlichen Expertisen sehr gut. Wir stellen Materialsysteme mit physikalischen und chemischen Beschichtungsverfahren her, charakterisieren sie mit mikromechanischen Messtechniken und simulieren sie mit Multiskalen-Materialmodellierung- und High-Throughput-Screening-Methoden.

In diesem Jahr ist es unserem Geschäftsfeld gelungen, in einem vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft von Baden-Württemberg geförderten Themenfeld »Technologischer Ressourcenschutz« drei Kooperationsprojektanträge bewilligt zu bekommen. Dabei geht es um Materialdesign von Klebstoffen mit schaltbarer Klebewirkung, Materialdesign multifunktionaler Schutzbeschichtungen sowie Materialdesign hartmagnetischer Kristallphasen für Dauermagnete. Diese drei Materialsysteme illustrieren die Vielfalt von Problemstellungen, für die unser Geschäftsfeld Lösungswege entwickeln kann.

# COMPUTATIONAL SCREENING VON HARTMAGNETISCHEN METALLPHASEN

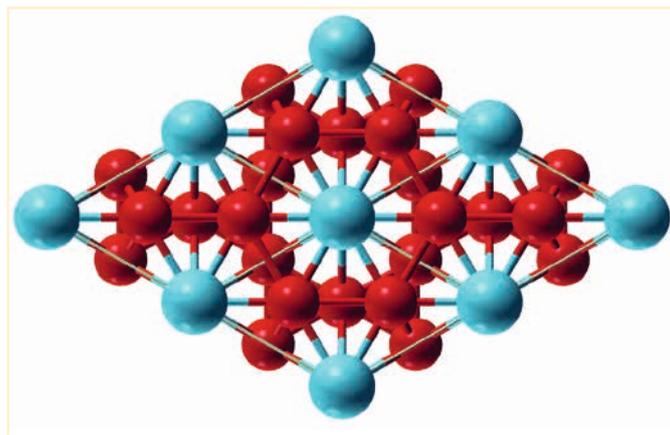
Gruppe  
**Materialmodellierung**

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

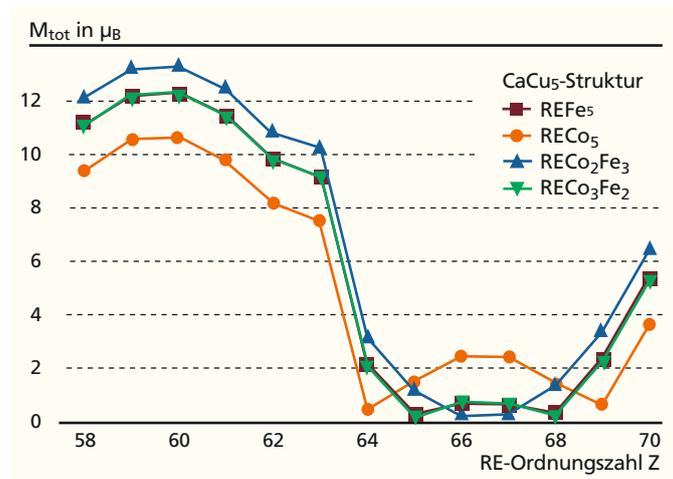
Für neuartige, starke Dauermagnete besteht in den Zukunftsbranchen Elektromobilität und Erneuerbare Energien zurzeit eine sehr große Nachfrage. Die aktuell eingesetzten Dauermagnete enthalten die Seltenerdmetalle Neodym und Dysprosium. Die Versorgungssicherheit dieser Elemente wird als kritisch eingestuft, da sie zu 90 Prozent aus China importiert werden und ihre Preise am Markt stark schwanken. Wir haben uns die materialwissenschaftliche Aufgabe gestellt, durch Computational-Screening-Simulationen nach neuartigen intermetallischen Phasen mit guten hartmagnetischen Eigenschaften zu suchen. Solche Substitutionsmaterialien sollen möglichst geringe Mengen an Seltenerdmetallen und ansonsten leicht verfügbare, ungiftige und kostengünstige Rohstoffe enthalten.

## High Throughput Screening zur effizienten Suche nach neuen Materialien

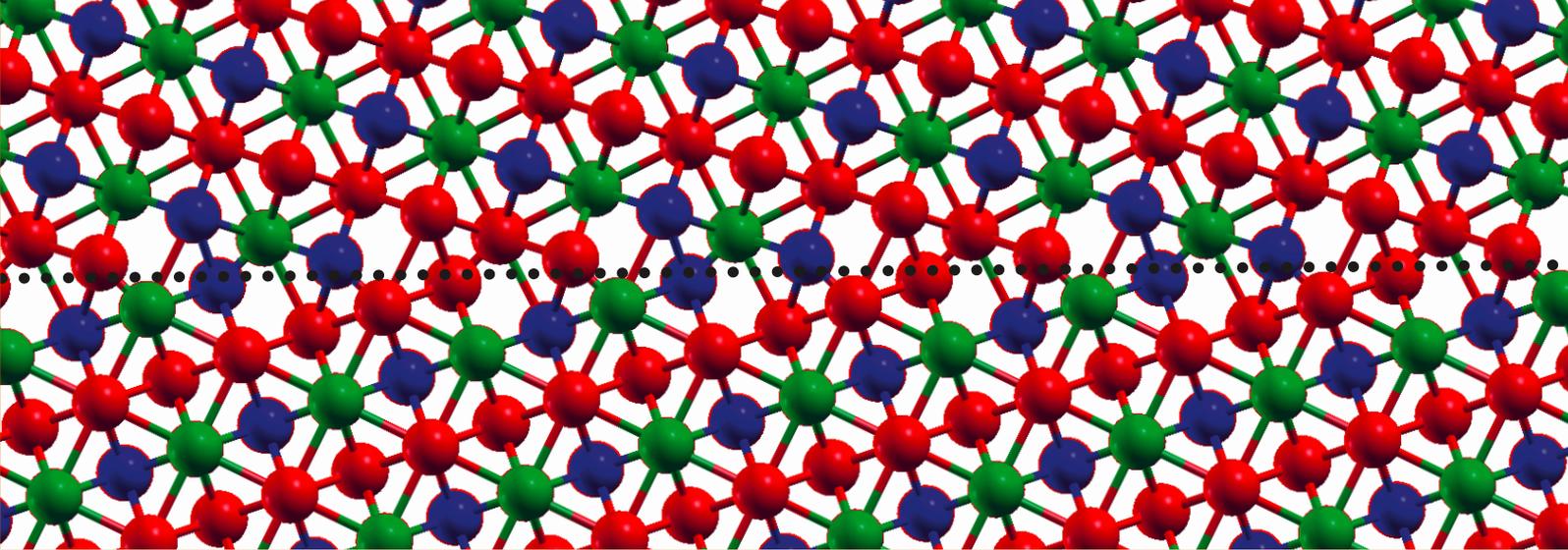
Die systematische Suche nach neuen Materialien mit konventionellen Simulationsmethoden ist sehr aufwändig. Der HTS-Ansatz (High Throughput Screening) stammt ursprünglich aus der Pharmaforschung und beruht auf kombinatorischen Variationen verschiedener Prozessparameter oder Ausgangsmaterialien, um in kurzer Zeit geeignete Materialien zu identifizieren. Wir verwenden diesen innovativen Ansatz, um für eine Vielzahl möglicher Strukturen und Zusammensetzungen von intermetallischen Phasen deren Stabilitäten und Magnetischen Eigenschaften automatisiert zu berechnen. Um die konstruierten Strukturen zu bewerten, nutzen wir am Fraunhofer IWM eine schnelle Methode der Dichtefunktionaltheorie. Diese erlaubt die Berechnung intrinsischer Eigenschaften wie Bildungsenergien, magnetische Momente und effektive Austauschintegrale



1  $CaCu_5$ -Struktur einer Magnetphase. Im Kristallgitter werden Seltenerd- (blau) und Übergangmetallatome (rot) kombiniert.



2 Magnetmomente für RE-Elemente (RE: rare earth) in Magnetphasen mit  $CaCu_5$ -Struktur. Simulationen liefern systematische, für das Materialdesign nützliche Trends.



*Korngrenze in Fe<sub>2</sub>CoGa (Fe: rot, Co: grün, Ga: blau);  
Für solche Defekte berechnen wir Magnetmomente im  
Vergleich zu Daten für perfekte Kristalle.*

für einige 1 000 Verbindungen pro Woche (siehe Abbildungen 1 und 2). Die Ergebnisse können in verschiedenen Formaten gespeichert und als Materialdatenbank genutzt werden.

#### **Vorhersage von hartmagnetischen Materialkennwerten**

Im BMBF-Projekt »REleaMag« haben wir, zusammen mit Kollegen von der Robert Bosch GmbH, die HTS-Methodik für Magnetphasen entwickelt. Mittlerweile haben wir im Rahmen des Fraunhofer Leitprojektes »Kritikalität Seltene Erden« auch eine approximative Berechnung von für Hartmagnete wichtigen Kennwerten zur magnetokristallinen Anisotropie implementiert. Durch die Wahl von Suchkriterien wie günstigen Bildungsenergien, hohen Magnetmomenten und hohen Kristallanisotropien können aus einer Materialdatenbank vielversprechende hartmagnetische Verbindungen gefiltert werden. Bereits im Projekt REleaMag konnte ein neues hartmagnetisches Material theoretisch vorhergesagt und experimentell nachgewiesen werden. Dies weist auf ein hohes Erfolgspotenzial der HTS-Methodik in Bezug auf leistungsstarke Dauermagnete hin.

#### **Simulation der Mikrostruktur**

Die makroskopischen Eigenschaften eines Dauermagneten sind nicht nur durch intrinsische Magneteigenschaften von Einkristallphasen bestimmt. In realen Magneten spielt die Mikrostruktur, also die Anordnung und Ausrichtung von Kristalliten verschiedener Phasen, eine große Rolle. Insbesondere zur Erzielung einer hohen Anisotropie und hoher Koerzitivfelder ist ein Materialdesign der Mikrostruktur unverzichtbar. Wir analysieren daher auch den Einfluss von strukturellen Defekten wie Stapelfehlern, Korngrenzen (siehe Abbildung oben) und

Phasengrenzen auf die Magneteigenschaften. Das Ziel ist hierbei nicht, solche Defekte zu vermeiden, sondern ihre Effekte über eine Analyse lokaler Magnetmomente und Anisotropieparameter aufzuklären und für die Optimierung der Magneteigenschaften nutzbar zu machen.

Ein mit dem rechnergestützten Materialdesign entwickeltes Magnetmaterial kann dann in Energiekonversionssysteme wie Elektromotoren und -generatoren integriert werden. Mit dem Materialdesign können wir Industriepartner dabei unterstützen, ihre Wettbewerbsfähigkeit mit der Entwicklung innovativer Funktionsmaterialien zu sichern.

Dr. Georg Krugel, Dr. Wolfgang Körner

# DÜNNSCHICHT-THERMOELEMENTE FÜR DIE VERPACKUNGSINDUSTRIE

Gruppe

**Funktionale Schichtmaterialien**

Dr. Frank Burmeister | Telefon +49 761 5142-244 | frank.burmeister@iwf.fraunhofer.de

Für das Verschließen von Verpackungen in der Lebensmittel-, Kosmetik- und Pharmaindustrie wird bisher das Wärmekontaktverfahren eingesetzt. Dauerbeheizte Werkzeuge schmelzen dabei die Verpackungsfolien auf und versiegeln diese. Die Sicherheit und Qualität der Siegelnaht hängt insbesondere von der exakten, schnellen Erfassung der Prozesstemperatur ab. Dünne Folien, hohe Taktzeiten und komplexe Packungsgeometrien bringen das klassische Verfahren jedoch an seine Grenzen. Die Folge sind undichte Packungen, die beispielsweise bei Lebensmitteln zum Produktverderb führen. Um den Siegelvorgang sicherer zu gestalten, wird ein System mit schneller Temperaturerfassung benötigt.

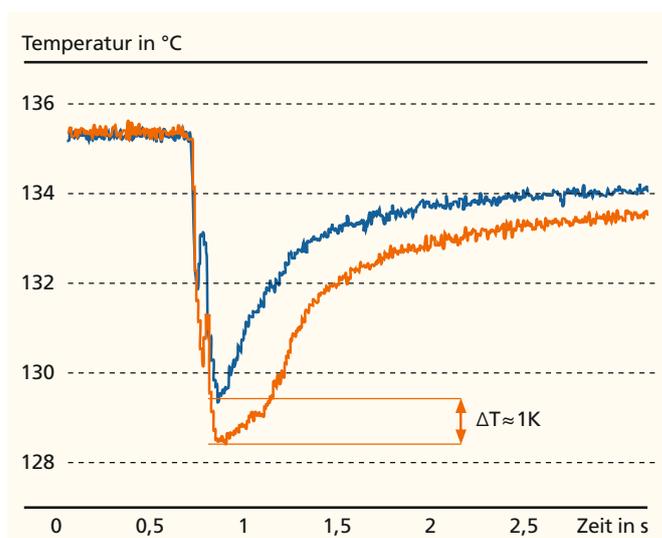
## Schnelle, oberflächennahe Temperaturmessung

Anstelle der klassischen Werkzeuge mit integrierten, relativ trägen Drahtsensoren erarbeitet das Fraunhofer IWM Thermoelemente, die als dünne Schicht direkt auf die Oberfläche der Siegelschienen appliziert werden. Die in dieser PVD-Technik (Physikalische Dampfabcheidung) hergestellten Sensoren zeichnen sich durch eine geringe Dicke im Nanometerbereich und extrem schnelle Ansprechzeiten aus. Ihre Verwendung ermöglicht eine präzise Messung von Temperaturen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Eine beständige, antiadhäsive Deckschicht schützt die Thermoelemente, vermindert Anhaftungen von Füllgut und Folienresten und verkürzt so die für Reinigungsvorgänge notwendigen Maschinenstillstandszeiten. In Kooperation mit dem Fraunhofer IVV in Dresden werden so die Grundlagen für einen intelligenten Gesamtprozess mit einem oberflächennahen, ortsdiskreten Temperaturmonitoring der Werkzeuge gelegt mit – perspektivisch – reaktionsschnellen, sektoriell beheizbaren Siegelschienen.

## Intelligenter Gesamtprozess

Durch das Zusammenspiel aus schneller Temperaturerfassung und hochdynamischer Regelung werden Siegelprozesse mit bisher unerreichter Dynamik und Prozesssicherheit möglich. So kann mit automatisierten Temperaturanpassungen auf Dickenänderung der Folien oder Lagensprünge (Abbildung 1) reagiert und verbrannte oder undichte Verpackungen vermieden werden. Das Ziel ist dabei, mittelfristig ein inline-Qualitätskontrollsystem aufzubauen.

Alexander Fromm



1 Messung der Temperatur im Siegelprozess: Vergleich der Siegelung zweier Folien (blau) mit der Siegelung eines »nachgestellten« Lagensprungs (4 Folien, orange). © Fraunhofer IVV in Dresden

# KLEINSKALIGE STRUKTUR BESTIMMT METAMATERIALEIGENSCHAFTEN

Gruppe

**Meso- und Mikromechanik**

Prof. Dr. Chris Eberl | Telefon +49 761 5142-495 | chris.eberl@iwm.fraunhofer.de

Metamaterialien sind Stoffe, deren Eigenschaften nicht mehr ausschließlich von den Materialeigenschaften des Grundmaterials abhängen, sondern hauptsächlich durch eine definierte Strukturierung eingestellt werden. Mechanische Metamaterialien sind so fein strukturiert, dass der Werkstoff von außen betrachtet wie ein normales Material wirkt. Die Strukturierung entsteht durch 3D-Laserlithographie, die erlaubt, 3D-Strukturen beliebiger Geometrien im Nano- und Mikromaßstab herzustellen. Dabei werden ingenieurstechnisch entworfene Elementarzellen kristallähnlich aneinander gesetzt – so können die Eigenschaften des Werkstoffs eingestellt werden. Aufgrund der schnellen Herstellungsprozesse sind erste Anwendungen von Metamaterialien bereits im Bereich der Sensorik zu finden. Die weitere Entwicklung und die Beschleunigung der Herstellungsmethoden der Metamaterialien wird die Werkstoffwissenschaft grundlegend ändern, da Materialeigenschaften in hohem Maße kontrolliert eingestellt und neu entwickelt werden können.

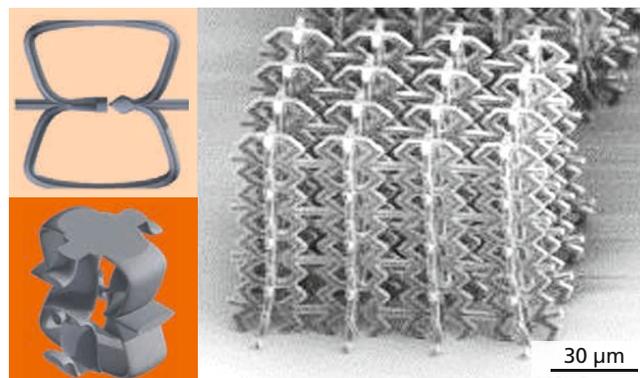
## Künstliches Verformungsverhalten: Poissonzahl-Übergänge

Am Fraunhofer IWM entwickeln wir eine Vielzahl verschiedener Metamaterialien, die neuartige mechanische Eigenschaften aufweisen. Zu diesen gehören Metamaterialien mit negativer Querkontraktion, bei denen eine Kompression zu einer Kontraktion in orthogonaler Richtung führt. In Abbildung 1 links oben ist ein Beispiel der am Fraunhofer IWM entwickelten Strukturen gezeigt, bei welchem sich die Querkontraktion ab einem definierten Verformungszustand ändert: Ab diesem Zustand findet statt der Kontraktion eine Expansion in orthogonaler Richtung statt. Da sich hierbei auch die Verformungsrichtung ändert, liegt ein anisotropes Metamaterial vor, dessen Verformungsverhalten in alle Raumrichtungen vollständig kontrollierbar ist.

## Experimentelle Untersuchung neu entwickelter Metamaterialien

Besonders herausfordernd ist es, die entworfenen Eigenschaften an den kleinskaligen Teststrukturen experimentell zu überprüfen. Dazu setzt das Fraunhofer IWM selbst entwickelte Versuchsaufbauten ein. Die Verformungen werden durch einen Piezoaktor mit einer Positionsgenauigkeit von 1,6 nm aufgebracht und dabei im Mikroskop beobachtet. Währenddessen zeichnet eine Kamera Bilder auf, damit die Dehnungen anschließend per Bildkorrelation berechnet werden können. Diese Ergebnisse liefern wichtige Informationen für das Materialdesign per Simulation und schließen die Entwicklungsfeedbackschleife.

Matthew Berwind



1 Entwicklung eines neuen Metamaterials vom ersten Simulationskonzept einer Elementarzelle (links oben) über das 3D-Modell der Zelle (links unten) bis hin zur finalen Struktur (rechts), die aus zahlreichen aneinandergereihten Elementarzellen besteht.

## Gruppen



### **Pulvertechnologie, Fluidodynamik**

Wir simulieren und optimieren pulvertechnologische Prozesse und fluidische Systeme mit dem Ziel einer effizienten Fertigung. Damit verbessern wir Produkte und Prozesse, verkürzen Entwicklungszeiten und helfen unseren Kunden, Kosten zu sparen.

*Dr. Torsten Kraft | [torsten.kraft@iwm.fraunhofer.de](mailto:torsten.kraft@iwm.fraunhofer.de)*



### **Umformprozesse**

Wir nutzen, entwickeln und erweitern Simulationsmethoden zur effizienten Auslegung von Umformprozessen und wenden sie auf industrielle Prozesse an. Wir bestimmen die Werkstoff- und Prozessparameter mittels Experimenten sowie virtuell durch den Einsatz von Werkstoffmodellen.

*Dr. Dirk Helm | [dirk.helm@iwm.fraunhofer.de](mailto:dirk.helm@iwm.fraunhofer.de)*



### **Bearbeitungsverfahren, Glasformgebung**

Schwerpunkte sind Bearbeitungs- und Trennverfahren für Glas, Keramik und Silizium sowie Löttechniken für Vakuumisolierverglasungen. Durch bruchmechanische Methoden entwickeln wir Lösungen zur Einsatzsicherung und Schadensvermeidung.

*Dr. Rainer Kübler | [rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de](mailto:rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de)*

» Form und Funktion von Halbbeugen und Bauteilen werden durch die eingesetzten Fertigungsprozesse maßgeblich bestimmt. Erst die Kombination aus Experiment, Werkstoffmodellierung und Simulation ermöglicht die detaillierte Bewertung und Optimierung von Fertigungsprozessen.«



## GESCHÄFTSFELDLEITER

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

### Fokus

Mit unserem Prozessverständnis und unseren ausgereiften Simulationstechniken tragen wir zur Gestaltung von effizienten und sicheren Fertigungsprozessen bei. Unser Leistungsangebot beinhaltet die Untersuchung und technologische Entwicklung von Fertigungsprozessen zur Herstellung von Halbbeugen und Bauteilen mit funktionalen Eigenschaften. Im Vordergrund stehen pulvertechnologische Prozesse inklusive komplexer Fluidsysteme bis hin zur Mikrofluidik, das Umformen und Bearbeiten von duktilen Werkstoffen sowie Bearbeitungsverfahren für spröde Werkstoffe und die Glasformgebung.

### Bemerkenswertes aus 2015

Das Themenspektrum der Gruppe Umformprozesse ist deutlich gewachsen: Neben den etablierten Kompetenzen im Bereich der Blechumformung sind wir im Bereich der Massivumformung noch aktiver geworden. Um in dieser thematischen Breite auch langfristig innovative Lösungskonzepte auf hohem Niveau erarbeiten zu können, haben wir Mitte 2015 zwei Teams gebildet: für die Blechumformung steht Dr. Alexander Butz, für die Massivumformung Dr. Maksim Zapara als Ansprechpartner zur Verfügung.

In der Gruppe Bearbeitungsverfahren und Heißformgebung stieg die Zahl der Schadensanalysen an hochwertigen Komponenten aus Glas weiter an. Hier gelingt es zunehmend, die Kompetenzen zu Fertigungsprozessen und zur Ermittlung und Bewertung von Einsatzbelastungen mit in das Leistungsspektrum aufzunehmen. Der damit verbundene größere Nutzen führte zu sehr positiven Rückmeldungen unserer Kunden und zu weiteren Aufträgen.

Mit dem in der Gruppe Pulvertechnologie, Fluidynamik entwickelten Simulationscode SimPARTIX® für partikelbasierte DEM- und SPH-Simulationen ([www.simpartix.de](http://www.simpartix.de)) wurden in diesem Jahr mehrere direkte Industrieprojekte erfolgreich bearbeitet. Daneben wurde der Code selbst an einen Konzern in Asien lizenziert, wobei Fraunhofer IWM-Experten vor Ort eine erfolgreiche Nutzer-Schulung durchführten. Im Rahmen einer Kooperation werden zukünftig weitere Fragestellungen angegangen.

# MECHANISMENBASIERTE SCHADENSVOHERSAGE FÜR DIE MASSIVUMFORMUNG

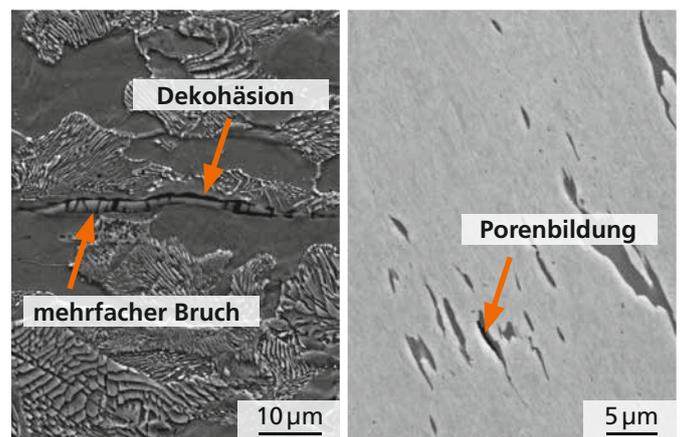
Gruppe  
**Umformprozesse**

Dr. Dirk Helm | Telefon +49 761 5142-158 | dirk.helm@iwf.fraunhofer.de

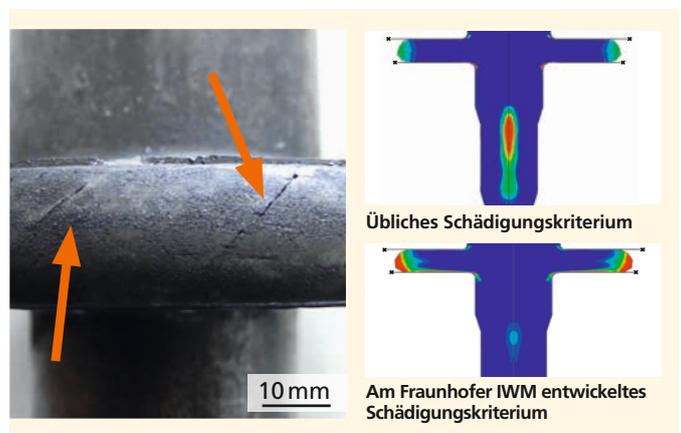
Die Automobil- und Maschinenbaubranche setzt aufgrund hoher Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit ihrer Produkte häufig kaltmassivumgeformte Bauteile ein und gewährleistet so in Autos, Baumaschinen, Flugzeugen oder Schiffen die hohen Sicherheitsanforderungen. Dabei erfordern die komplexen Bauteilformen mehrstufige Umformprozesse. Zu deren Auslegung und Optimierung setzt die Industrie Finite-Elemente (FE) Programme ein. So können kostenintensive und zeitaufwändige Erprobungszyklen während der Werkzeugauslegung eingespart und folglich die Serienreife schneller erreicht werden. Darüber hinaus ermöglichen FE-Simulationen die Realisierung von Produktinnovationen und komplexeren Bauteilgeometrien. Mit den derzeit verfügbaren Simulationsprogrammen ist es jedoch im Allgemeinen nicht möglich, die Schädigungsentwicklung und das Versagen des Werkstoffs beim Umformen präzise genug vorzuberechnen. Ziel unserer Forschungsarbeiten ist es daher, diese Simulationen durch eine fortschrittliche Materialmodellierung zur Vorhersage der Schädigungsentwicklung und des Versagens zu verbessern.

## Mechanismenbasierte Schädigungsmodelle

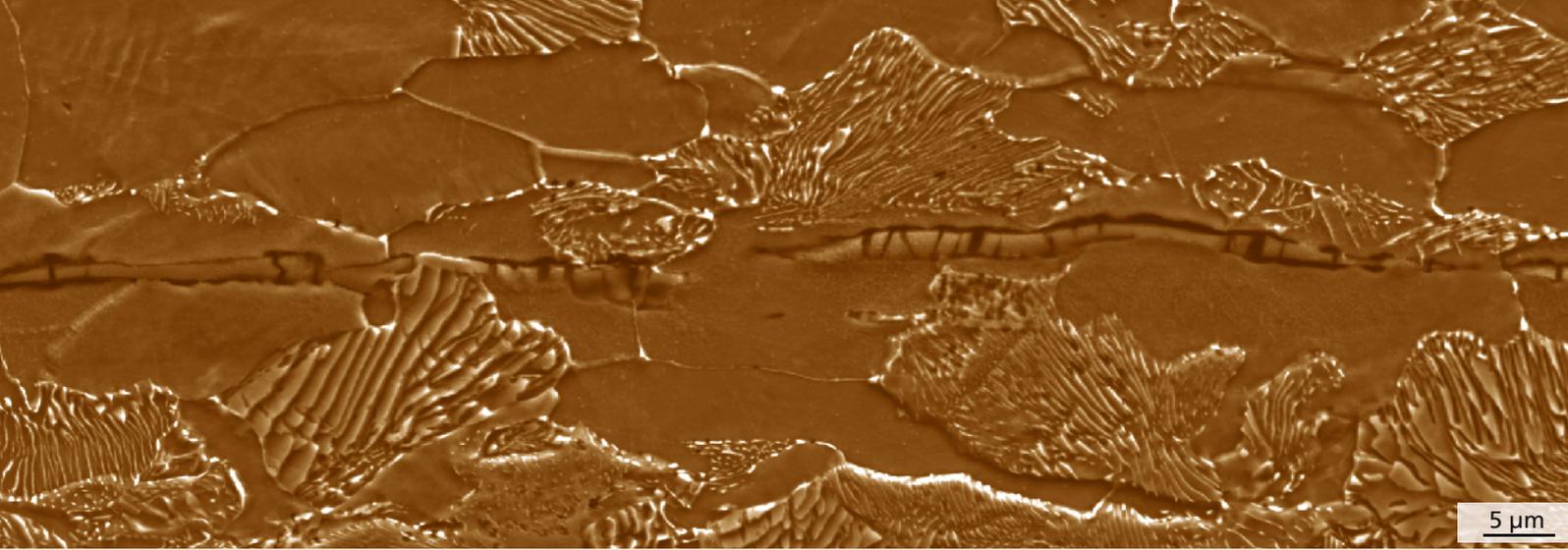
Das Fraunhofer IWM hat bereits in anderen Projekten Simulationsmodelle auf der Basis mechanismenbasierter Schädigungsmodelle entwickelt, die erfolgreich bei der Blechumformung oder beim Walzen zum Einsatz gekommen sind, um die Grenzen der Umformbarkeit vorzuberechnen. In der Massivumformung kommen weitere Herausforderungen hinzu: hohe Umformgrade, wechselnde Belastungsarten und Material-Inhomogenitäten. Mechanismenbasierte Modelle können diese Beanspruchungen abbilden, während herkömmliche Schädigungsmodelle (beispielsweise nach



1 Beobachtete Mechanismen zur Porenbildung an typischerweise vorzufindenden Mangansulfid-Teilchen: Dekohäsion und Bruch (links), Abscheren durch Druckumformung (rechts).



2 Verbesserung der Schadensvorhersage am Beispiel einer Getriebewelle: Das neu entwickelte Materialmodell sagt die tatsächlichen Schadensorte am Bauteil genauer voraus.



*Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Schädigungsinitiierung an einem lang gestreckten Mangansulfid-Teilchen in ferritisch-perlitischem Gefüge.*

Cockroft-Latham) solche Faktoren nur teilweise oder gar nicht berücksichtigen. Dennoch treten in der Massivumformung Schädigungsmechanismen auf, die selbst mit den bisher bekannten mechanismenbasierten Modellen nicht vorhergesagt werden können.

#### **Schädigungsmodell anhand experimenteller Werkstoffuntersuchungen**

Um Schädigung und Versagen bei Kaltmassivumformprozessen vorhersagbar zu machen, haben wir das bekannte Modell nach Gurson so erweitert, dass es die tatsächlichen Mechanismen der duktilen Schädigung für die relevanten Materialien und Prozesse besser abbilden kann. Dazu untersuchten wir zunächst die Mikrostruktur unterschiedlicher Proben und beobachteten detailliert die Schädigungsmechanismen: Poren bilden sich während der Umformung insbesondere an Fremdteilchen im Material. Dies kann durch Zerbrechen des Teilchens oder durch Ablösen vom umgebenden Material erfolgen. Selbst unter hohen Druckbelastungen, bei denen in anderen Modellen eher von einer Schädigungsminderung durch Porenschließen ausgegangen wird, konnten wir Porenbildung an Teilchen beobachten. Abbildung 1 zeigt Aufnahmen unserer Beobachtungen zur Porenbildung.

Nach der Schädigungsinitiierung durch Porenbildung kommt es bei weiterer Belastung und Umformung des Materials zum Wachstum der Poren, bis diese schließlich ein kritisches Stadium erreichen: Die Poren verbinden sich und es entsteht ein Riss. Aus diesen Untersuchungen konnten wir Verbesserungen für unser Schädigungsmodell ableiten.

#### **Verbesserungen der Schadensvorhersage durch das neue Modell**

Mit dem anhand unserer mikrostrukturellen Beobachtungen erweiterten Modell simulierten wir industrielle Umformprozesse, bei denen es zur Bauteilschädigung kommt. Abbildung 2 zeigt eine Getriebewelle, bei deren Herstellung Risse an der Außenkante des Bundes auftreten. Verglichen mit herkömmlichen Modellen kann die Schädigung mit unserem weiterentwickelten Modell besser vorhergesagt werden: wir können nicht nur den Ort des Versagens im Bauteil, sondern auch den Versagenszeitpunkt konkreter bestimmen. Zudem können wir die Teilschädigung eines Bauteils quantitativ in Form des Porengehalts ausdrücken.

Das IGF-Vorhaben 17678 N der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Eva Augenstein, Dr. Maksim Zapara

# SPANNUNGSOPTISCHE METHODEN UNTERSTÜTZEN SCHADENSANALYSEN IN GLAS

Gruppe

**Bearbeitungsverfahren, Glasformgebung**

Dr. Rainer Kübler | Telefon +49 761 5142-213 | rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de

Bei getemperten Verglasungen wie Einscheibensicherheitsgläsern (ESG) kann es trotz aufwändiger Kontrollen immer wieder zu unakzeptabel hohen Bruchquoten kommen. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei den Schäden, die im Einsatz des jeweiligen Produkts und direkt beim Endkunden auftreten. Häufig ist dies mit kostspieligen Rückrufaktionen verbunden. Über den Mechanismus für das Auftreten der Brüche ist jedoch meist wenig bekannt. Ein methodisch wichtiger Baustein zur Aufklärung der Ursachen erhöhter Bruchempfindlichkeiten kann die Analyse der im Glas herrschenden Spannungen durch spannungsoptische Verfahren sein (Abbildung 1).

## Spannungsoptik zur Suche nach Ursachen für Bruchempfindlichkeit

Unter dem Begriff »Spannungsoptik« ist die Analyse von Spannungen und Dehnungen unter Ausnutzung der doppelbrechenden Eigenschaften von durchsichtigen Stoffen zu verstehen. Durch die Doppelbrechung ergeben sich Gangunterschiede beim Durchgang des Lichts durch den unter mechanischen Spannungen stehenden Werkstoff.

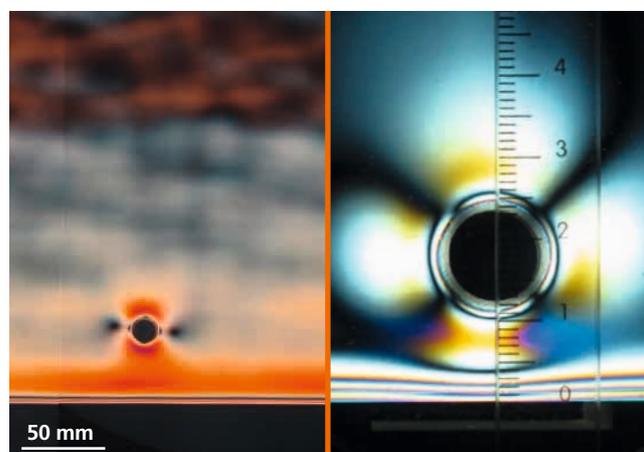
Mit den verschiedenen am Fraunhofer IWM verfügbaren Methoden ist es möglich, am Glasbauteil global auf die Wirkrichtungen von Hauptspannungen und lokal auf signifikante Spannungsgradienten zu schließen (Abbildung 1). Auch besteht für bestimmte Teile die Möglichkeit, über spezielle Laserstreuungspolarimetrie quantitativ und tiefenabhängig Messdaten zu wirkenden Eigenspannungen zu erhalten. Diese Verfahren sind zerstörungsfrei. In der Regel werden für solche Untersuchungen Bauteile aus der Sperr- oder Rückstell-Lagerung des Kunden verwendet oder solche, die bereits im Feldeinsatz

waren, unversehrt sind und aus denselben Herstellungslosen stammen wie die fraglichen Schadensteile.

## Rückschlüsse auf die Herstellung und apparative Verbesserungsmaßnahmen

Wie Ergebnisse unserer Projekte im Auftrag von Industriekunden zeigen, können so vielfach Ursachen für erhöhte Bruchraten aufgeklärt und Schritte zur Reduzierung der Bruchraten eingeleitet und umgesetzt werden. Maßnahmen sind dabei nicht nur auf Feinabstimmungen im Glasherstellprozess oder auf eine Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Verglasungen gerichtet. Sehr häufig geht es auch um werkstoffgerechte Bearbeitung des Glases oder um besser angepasste Einsatzbedingungen.

Martin Krappitz, Dr. Günter Kleer



1 Spannungsoptische Analyse mittels Polariskop an Einscheibensicherheitsglas (ESG) mit Bohrungen (links); Änderungen der Lichtbrechung als Hinweis auf Eigenspannungsunterschiede (rechts).

# PARTIKELBASIERTE SIMULATION VON SCHLECHT FLIESSFÄHIGEM PULVER

Gruppe

**Pulvertechnologie, Fluidodynamik**

Dr. Torsten Kraft | Telefon +49 761 5142-248 | torsten.kraft@iw.fraunhofer.de

In der Pulvertechnologie ist das Trockenpressen ein etabliertes Verfahren, um Bauteile aus technischer Keramik, Sinterstählen oder Hartmetall herzustellen. Vor allem bei Pulvern, die schlecht fließen oder auch verklumpen, ist es wichtig zu gewährleisten, dass die Pressform möglichst gleichmäßig mit Pulver gefüllt ist. Inhomogene Dichteverteilungen in der Schüttung werden durch den Pressvorgang nicht neutralisiert und führen beim anschließenden Sintern zu erheblichen Form- und Maßabweichungen. Wir haben deshalb im Rahmen eines AiF-Projekts Simulationswerkzeuge entwickelt, die speziell auf diesen Füllprozess zugeschnitten sind. Damit erhalten Kunden Hinweise, um ihren Herstellungsprozess noch besser zu gestalten.

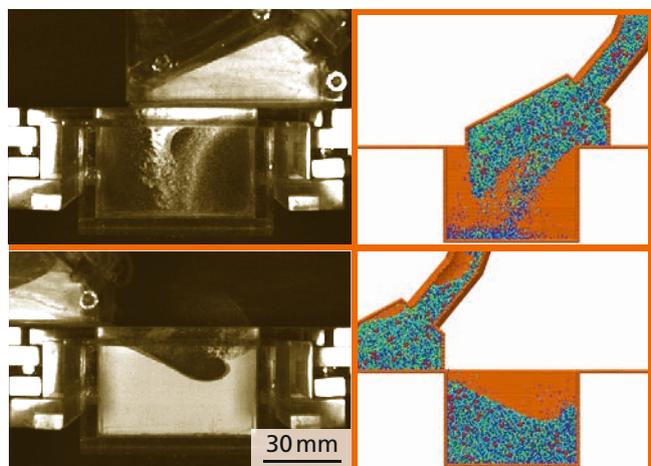
## Modellierung von Kontaktkräften auf Basis der Lastgeschichte

Die von uns genutzte Diskrete-Elemente Methode (DEM) simuliert das Verhalten einer Vielzahl einzelner Teilchen und modelliert darum das Pulver sehr realitätsnah. Die Wechselwirkung der Teilchen untereinander bestimmt unter anderem das komplexe Verhalten des Pulvers während des Schüttvorgangs. So werden Teilchen aneinander gepresst und erhöhen dadurch ihren Zusammenhalt. Bei entsprechend großem Energieeintrag, beispielsweise beim Aufprall am Boden des Presswerkzeugs, lösen sie sich wieder voneinander. Um dies in der Simulation abzubilden, haben wir spezielle Kraftgesetze für die DEM entwickelt, welche die Lastgeschichte der Teilchenkontakte berücksichtigen. Das Werkstoffmodell reagiert damit auf Umwelteinflüsse und passt die Charakteristik des Pulvers dynamisch an die Prozess- und Umgebungsbedingungen an.

## Komplexes Pulververhalten: Kohäsivität, Fließzonen und Fluidisierung

Abbildung 1 zeigt, dass sowohl die Ausbildung verschiedener Fließzonen (Abbildung 1 oben) zu Beginn des Füllvorgangs als auch die spätere Fluidisierung des Pulvers (Abbildung 1 unten) vom Simulationsmodell korrekt wiedergegeben werden. Die Simulation steht jetzt einem breiten Anwenderkreis aus der pulververarbeitenden Industrie zur Verfügung. Unsere Kunden aus den Bereichen Lebensmittel, Pharma, Keramik oder Hartmetalle können so ihre Prozesse gezielt optimieren und eine höhere Prozessstabilität und geringere Ausschussraten erreichen oder qualitativ höherwertige Produkte herstellen.

Dr. Thomas Breinlinger



1 Experiment und Simulation: Die Ausbildung verschiedener Fließzonen (oben) sowie die spätere Fluidisierung des Pulvers (unten) werden korrekt wiedergegeben. Bilder links: © Fraunhofer IKTS

# Geschäftsfeld

# TRIBOLOGIE

## Gruppen



### **Verschleißschutz, Technische Keramik**

Wir prüfen, bewerten und simulieren die Wirkung von Veränderungen in tribologischen Kontakten. Forschungsschwerpunkte sind trockenlaufende und wassergeschmierte Systeme sowie ultraniedrige Reibung (Flüssigkristalle, Graphen).

*Dr. Andreas Kailer | [andreas.kailer@iwf.fraunhofer.de](mailto:andreas.kailer@iwf.fraunhofer.de)*



### **Multiskalenmodellierung und Tribosimulation**

Mit skalenübergreifender numerischer Simulation beziehen wir makroskopische Materialeigenschaften auf Mechanismen der Mikroskala. Dies ermöglicht Optimierungen industrieller Materialsyntheserouten und Prozessführungen sowie des Designs von Nanomaterialien und Suspensionen.

*Prof. Dr. Michael Moseler | [michael.moseler@iwf.fraunhofer.de](mailto:michael.moseler@iwf.fraunhofer.de)*



### **Polymertribologie und biomedizinische Materialien**

Wir bewerten mit Experimenten und Simulationen die Zuverlässigkeit und das Einsatzverhalten biomedizinischer Materialien und Implantate, generativ gefertigte Komponenten sowie die Tribologie von Thermoplasten, Elastomeren und Hydrogelen.

*Dr. Raimund Jaeger | [raimund.jaeger@iwf.fraunhofer.de](mailto:raimund.jaeger@iwf.fraunhofer.de)*



### **Tribologische Schichtsysteme**

Wir entwickeln maßgeschneiderte PECVD-Beschichtungslösungen und -verfahren: Wir bewerten und produzieren glatte und strukturierte diamantähnliche Kohlenstoffbeschichtungen (DLC) für hohe Gleit- und Wälzbelastungen und entwickeln kristalline Diamantschichten für Sonderanwendungen.

*Bernhard Blug | [bernhard.blug@iwf.fraunhofer.de](mailto:bernhard.blug@iwf.fraunhofer.de)*



### **Angewandte Nanotribologie**

Tribologische Fragestellungen lösen wir durch Kombination von mikrostrukturellen und energetischen Ansätzen mit kontinuierlichen hochauflösenden Reibungs- und Verschleißmessungen sowie mit modernsten Methoden der Oberflächenanalytik.

*Dr. Martin Dienwiebel | [martin.dienwiebel@iwf.fraunhofer.de](mailto:martin.dienwiebel@iwf.fraunhofer.de)*

» Wir erarbeiten Lösungen auf Basis tiefgreifender und ganzheitlicher Ansätze. Da die tribologischen Leistungsdichten weiter wachsen, steigt der Bedarf an nachhaltigen Lösungen. Unser Wissen sowie unsere Ausrüstung stellen sicher, dass wir diesen Anforderungen gewachsen sind.«



## GESCHÄFTSFELDLEITER

Prof. Dr. Matthias Scherge | Telefon +49 761 5142-206 | [matthias.scherge@iwf.fraunhofer.de](mailto:matthias.scherge@iwf.fraunhofer.de)

### Fokus

Die wirtschaftliche Entwicklung zeigt, dass die Leistungsdichten, die ein modernes tribologisches System zu verarbeiten hat, weiter steigen. Damit sind fortlaufend weiter verbesserte Problemlösungen gefragt: Dazu entschlüsseln wir die Mechanismen von Reibung und Verschleiß und setzen diese in Simulationsmodellen um. Auf deren Grundlage optimieren wir tribologische Systeme und entwickeln Lösungen für Reibungsminderung und Verschleißschutz bei technischer Keramik, mit neuartigen Schmierstoffen, bei tribologischen Schichtsystemen, Polymeren und Elastomeren sowie durch fertigungstechnisch konditionierte Tribowerkstoffe.

Wir klären Einlaufvorgänge auf und untersuchen die Tribochemie von Maschinenelementen wie Wälz- und Gleitlager, Schneid- und Umformwerkzeuge und Motor- und Getriebeelemente. Wir kombinieren dazu experimentelle Untersuchungen mit Multiskalenmodellierung und numerischer Simulation.

### Bemerkenswertes aus 2015

Mit unserem neuen Prüfstand für Ventile von Großdieselmotoren testen wir Ventile und Sitze unter verschiedenen Belastungen, bei Gasangriff und hohen Temperaturen. Zudem steht seit dem Sommer ein Gleitlagerprüfstand für Wellendurchmesser bis zu 10 cm zur Verfügung. Dieser Prüfstand kann mit Radionuklidtechnik betrieben werden, um Verschleiß kontinuierlich mit hoher Auflösung zu messen. Als dritte Neuerung ist zu nennen, dass wir aus der Gasphase heraus Diamantschichten für industrielle Anwendungen abscheiden können.

Im vergangenen Jahr haben 5 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ihre Dissertationen teilweise mit Auszeichnung abschließen können. Die Arbeiten beschäftigten sich mit den Einlaufphänomenen von Stählen unterschiedlicher Endbearbeitung, der Wasserstoffversprödung und Tribochemie, der Reibung zwischen Langlaufski und Schnee, der Plasmaanalytik zur DLC-Abscheidung und der atomistischen Simulation von  $\text{SiO}_2$ . Die Ergebnisse sind in referierten wissenschaftlichen Journalen sowie auf Fachkonferenzen vorgestellt worden. Unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind zudem auf vielen nationalen und internationalen Konferenzen als gefragte Vortragende aufgetreten. Über weitere Neuigkeiten unserer tribologischen Forschung berichten wir seit Frühjahr auf unserem Blog – besuchen Sie uns gerne:  
<http://blog.fraunhofer.de/MikroTribologieCentrum>

# INTELLIGENTE TRIBOLOGISCHE SYSTEME

Gruppe

**Verschleißschutz, Technische Keramik**

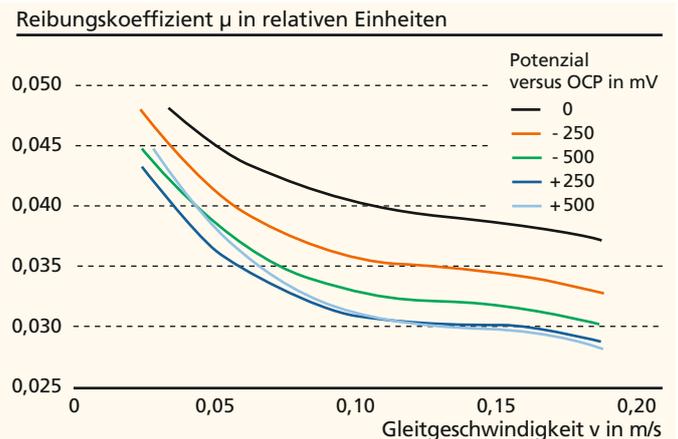
Dr. Andreas Kailer | Telefon +49 761 5142-247 | andreas.kailer@iwm.fraunhofer.de

Um die Reibungs- und Verschleißigenschaften tribologischer Systeme zu verbessern, werden Additive in Schmierstoffen verwendet. Neuartige Ionische Flüssigkeiten (IL) sind für diese Zwecke sehr geeignet. Nicht zuletzt durch ihre außergewöhnlichen physikalisch-chemischen Eigenschaften wie niedriger Dampfdruck, hohe thermische und chemische Stabilität und Mischbarkeit mit Ölen ist den ILs ein hohes Einsatzpotenzial zuzuschreiben. Ihre elektrische Leitfähigkeit aufgrund des ionischen Charakters bietet die Möglichkeit einer aktiven externen elektrischen Beeinflussung, um ein intelligentes tribologisches System zu generieren. Anwendungen, in denen diese Eigenschaften vorteilhaft zum Einsatz kommen könnten, sind Wälz- oder Gleitlagerungen. So erzielte Reibungs- und Verschleißvorteile können zu einer erhöhten Lebensdauer der Systeme führen.

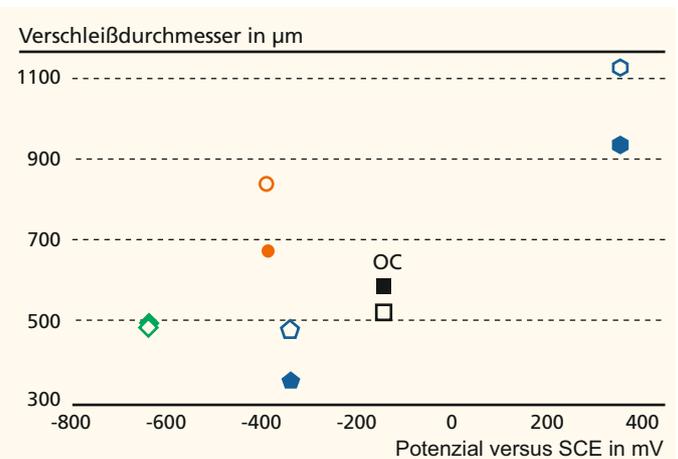
Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts »SchmiRmaL-Schaltbare, intelligente Tribosysteme mit minimalen Reibverlusten und maximaler Lebensdauer« wurden für diesen Ansatz elektrisch leitfähige Schmierstoffe entwickelt und die Möglichkeiten der elektrischen Beeinflussung von Reibung und Verschleiß untersucht.

## Chemische Reaktionen in Reibkontakten

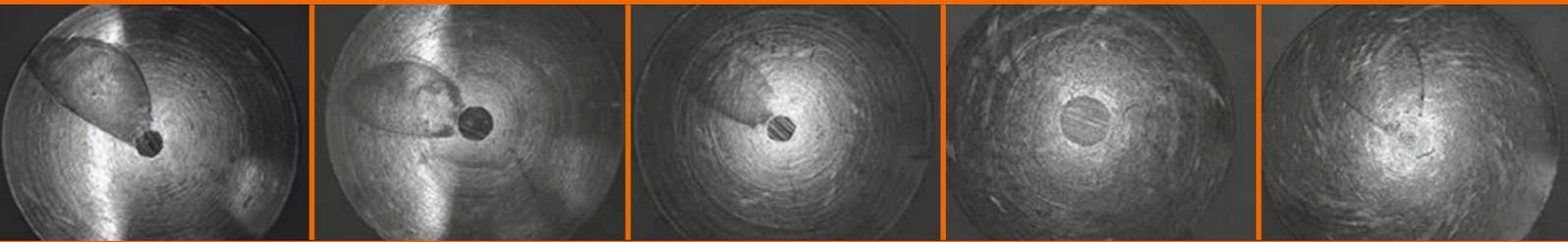
Reibung und Verschleiß werden auch in geschmierten Systemen maßgeblich durch die chemischen Veränderungen der Kontaktflächen verursacht. Tribochemische Reaktionen und die Anlagerung von oberflächenaktiven Substanzen an die Oberflächen werden gezielt eingesetzt, um Reibung und Verschleiß auch unter Mischreibung, das sind Reibkontakte, in denen die Kontaktflächen nicht vollständig durch einen Schmierfilm ge-



1 Reibungskoeffizient über der Geschwindigkeit der ionischen Flüssigkeit [P<sub>66614</sub>][Tf<sub>2</sub>N] gegen 100Cr6 mit unterschiedlichen externen elektrischen Potenzialen.



2 Verschleißdurchmesser der Kontaktpins bei unterschiedlichen externen elektrischen Potenzialen der ionischen Flüssigkeit [P<sub>66614</sub>][Tf<sub>2</sub>N] gegen 100Cr6 (jeweils 2 Versuche).



1 mm

*Lichtmikroskopische Aufnahmen der unterschiedlichen Verschleißspuren infolge unterschiedlicher Potenziale; von links, jeweils versus OCP: 0 mV, -250 mV, -500 mV, +250 mV und +500 mV.*

trennt sind, zu verbessern. Wenn die Schmierstoffe elektrisch leitfähig sind, können solche tribochemische Reaktionen mit elektrochemischen Methoden beeinflusst werden.

### **Elektrische Potenziale zur Verminderung von Reibung und Verschleiß**

Zur Untersuchung des Einflusses elektrischer Potenziale wurde am Fraunhofer IWM eine Versuchsmethodik entwickelt, mit der verschiedene Reibkontakte und -bewegungen unter definierten Potenzialen untersucht werden können. Somit besteht die Möglichkeit, chemische Reaktionen im Reibkontakt gezielt zu beeinflussen. Anhand eines experimentell bestimmten Ruhepotenzials im offenen Stromkreis, dem sogenannten Open Circuit Potential (OCP), wurden relativ zu diesem elektrotribologische Untersuchungen in einem Potenzialbereich von  $\pm 500$  mV durchgeführt (Abbildung 1). Für alle sich von OCP unterscheidenden Potenzialen ist eine Beeinflussung von Reibung und Verschleiß erreicht worden. Die Verwendung eines anodischen Potentials (+ 500 mV) kann gegenüber dem Referenzexperiment (OCP) die deutlichste Reibungsminimierung über dem gesamten untersuchten Geschwindigkeitsfenster von bis zu 35 Prozent erzielen. Für die Potenziale  $\pm 250$  mV ist der höchste Verschleiß zu erkennen. Das anodische Potenzial +500 mV führt zu der deutlichsten Verschleißverringerng (Abbildung 2).

### **Grenzflächeneffekte infolge elektrischer Potenziale**

Um die aus der tribochemischen Beanspruchung unter elektrischen Potenzialen resultierenden chemischen Reaktionen zu beschreiben, wurden chemische Oberflächenanalysen mit dem Röntgenphotoelektronenspektroskop (XPS) durchgeführt. Die

Ergebnisse weisen bei unterschiedlichen elektrischen Potenzialen und bei gleichbleibenden tribologischen Parametern auf verschiedene Reaktionsprodukte und deren unterschiedliche Ausprägungen hin. Für den OCP und die kathodischen Potenziale liegen nur geringfügige Veränderungen der chemischen Zusammensetzungen vor. Für das anodische Potenzial +500 zeigt sich eine deutliche Veränderung des karbidischen Kohlenstoffs und eine Härtezunahme von 35 Prozent.

### **Nutzen der Ergebnisse für technische Systeme**

Eine erhebliche Verbesserung von technischen Systemen wird in verschiedenen Anwendungen angestrebt. Durch geeignete elektrochemische Maßnahmen kann im Vergleich zum heutigen Stand der Technik eine weitere deutliche Verringerung von Reibung und Verschleiß in Systemen erreicht werden, die unter Mischreibungsbedingungen betrieben werden. Derzeit arbeiten wir an Konzepten zur Übertragung der im Labor erfolgreichen Methoden auf reale Anwendungen.

Christian Dold, Dr. Andreas Kailer

# POLAR UND HYDROPHOB: WIE PASST DAS ZUSAMMEN?

Gruppe

**Multiskalenmodellierung und Tribosimulation**

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

Unpolare Materialien sind generell hydrophob, da sie elektrostatisch nicht mit den polaren Wassermolekülen wechselwirken können. Aber auch perfluorierte Kohlenstoffmaterialien sind trotz der stark polaren C-F-Bindungen in der Regel hydrophob (polare Hydrophobizität). Wir haben die Adsorption von Wassermolekülen auf fluorierten Diamantoberflächen mit der Dichtefunktionaltheorie (DFT) simuliert, um der Ursache der polaren Hydrophobizität auf die Spur zu kommen.

## Adsorption von Wasser auf fluorierten Diamantoberflächen

Die Adsorptionsstärke einzelner Wassermoleküle haben wir für unterschiedlich fluorierte Oberflächen untersucht. Erwartungsgemäß wechselwirkte die perfluorierte Oberfläche am schwächsten mit Wasser. Eine etwas stärkere Anbindung von Wasser zeigte die komplett hydrierte Oberfläche. Überraschenderweise ergaben sich bei den gemischten H/F-Terminierungen stark erhöhte Adsorptionsenergien, welche vor allem auf eine erhöhte elektrostatische Wechselwirkung zurückgeführt werden konnten.

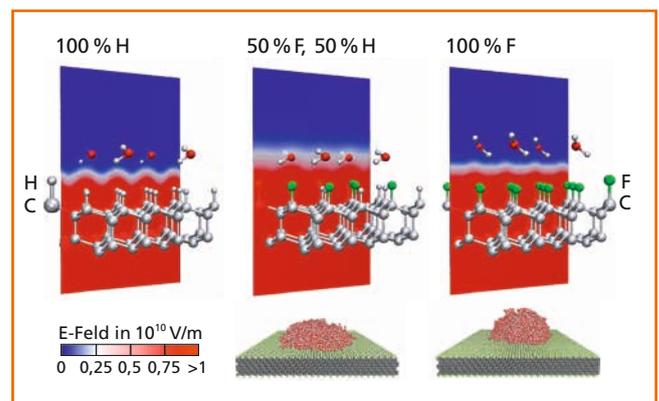
## Der Ursprung polarer Hydrophobizität

Woher kommt die Unterdrückung der elektrostatischen Wechselwirkung auf der äußerst polaren komplett fluorierten Oberfläche? Ein Artikel aus dem Jahr 1928 (*J.E. Lennard-Jones, B.M. Dent: Trans. Faraday Soc. 24, 92-108, 1928*) gibt den entscheidenden Hinweis: Das oberflächennahe Feld ebener Dipolgitter fällt exponentiell ab und zwar je schneller, umso dichter die Dipole gepackt sind. Der perfluorierte Fall stellt ein dichtgepacktes Dipolgitter dar, während durch die partielle Ersetzung von F-Atomen durch H-Atome in den gemischten Fällen das Dipolgitter »verdünnt« und somit das elektrische Feld langreichweitiger wird.

## Makroskopische Auswirkungen

Mit DFT-Simulationen konnten wir klassische Kraftfelder zur Berechnung makroskopischer Eigenschaften parametrisieren. So zeigt Abbildung 1, dass der Kontaktwinkel der perfluorierten Oberfläche wesentlich größer ist als im Fall einer gemischt H/F-terminierten Oberfläche. Diese Arbeit zeigt, wie ein grundlegendes mikroskopisches Verständnis für die Entwicklung von Multiskalenmodellen verwendet werden kann, um makroskopische Eigenschaften wie Benetzung oder Reibung vorhersagen zu können. Sie verdeutlicht außerdem, wie stark die Funktionalisierung auf molekularer Skala die Eigenschaften technischer Oberflächen bestimmt.

Dr. Leonhard Mayrhofer, Dr. Gianpietro Moras



1 Unterschiedliche Terminierungen einer Diamantoberfläche und elektrisches Feld (oben). Wassertropfen (unten) auf zu 50 Prozent fluorierten (Mitte) und perfluorierten (rechts) Diamantoberfläche.

# OPTIMALE AUSLEGUNG EINES KÜNSTLICHEN ADERSYSTEMS

Gruppe

**Polymertribologie und biomedizinische Materialien**

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

Die Verträglichkeit von chemischen Substanzen kann prinzipiell an im Labor gezüchteten Gewebemodellen untersucht werden, sodass die Anzahl notwendiger Tierversuche verringert werden kann. Hierzu ist es nötig, dass die Zellen des Gewebemodells durch ein Gefäßsystem mit Nährstoffen versorgt werden. Im EU-Projekt Artivasc3D haben Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer IWM die optimale Auslegung eines generativ gefertigten Hautmodell-Adersystems untersucht. Bei der Bewertung verschiedener Adersysteme wurde sowohl die Versorgung der Zellen als auch die Komplexität des Adersystems berücksichtigt. Einfacher strukturierte Aderbäume wurden wegen ihrer Robustheit und leichten Herstellung gegenüber komplexeren Strukturen bevorzugt, wenn diese die gleiche Leistungsfähigkeit zeigten.

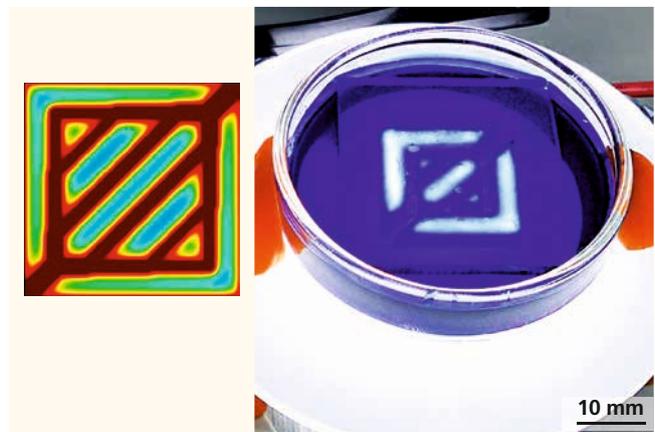
## Bestimmung der Nährstoffkonzentration

Bei der Ermittlung der Nährstoffkonzentration gingen wir von einem quadratischen Hydrogelsubstrat aus, in dem Zellen eingebettet sind. Durch die Diffusion der Nährstoffe aus dem Adersystem durch das Hydrogel und deren Verbrauch durch die Zellen stellt sich eine Gleichgewichtskonzentration der Nährstoffe ein. Die Gleichgewichtskonzentration wurde mit einem Finite-Differenzen-Verfahren berechnet (Abbildung 1). Die räumliche Verteilung der Nährstoffkonzentration hängt unter anderem von der Topologie des Adernetzwerks ab. Das Verhältnis der gut versorgten Fläche zur Gesamtfläche des Hydrogels beschreibt die Leistungsfähigkeit des Adersystems. Möchte man auf aufwändige Zellkulturversuche verzichten, kann die Leistungsfähigkeit verschiedener Adersysteme anhand der Diffusion eines Farbstoffs in ein unbesiedeltes Hydrogel experimentell verglichen werden. Die Färbung des Hydrogels, die durch das partielle Eindringen

des Farbstoffs zu einem geeignet gewählten, festen Zeitpunkt gemessen wird, beschreibt näherungsweise die Verteilung der Gleichgewichtskonzentration von Nährstoffen, die sich durch den Stoffwechsel von Zellen im Hydrogel einstellen würde.

Wir konnten zeigen, dass abhängig von der Diffusivität des Hydrogels und des Nährstoffverbrauchs der Zellen für ein Hydrogelsubstrat mit 5 mm Kantenlänge schon ein einfaches Adersystem mit einer Verzweigung zur Versorgung der Zellen ausreicht. Größere Substrate oder Zellen, die einen höheren Nährstoffverbrauch haben, erfordern jedoch Aderbäume mit mehr Verzweigungen. Das entwickelte Modell ermöglicht es uns, das optimale Adersystem für ein spezifisches Gewebemodell zu finden.

Julien Courseau



1 Verteilung der Nährstoffkonzentration in einem Hydrogel, das von einem dreifach verzweigten Adersystem versorgt wird (links).

# RADNABENMOTOR: REIBARME, VERSCHLEISSFESTE ELASTOMERDICHTUNGEN

Gruppe

## Tribologische Schichtsysteme

Bernhard Blug | Telefon +49 761 5142-180 | bernhard.blug@iwf.fraunhofer.de

Im Zuge der aktuellen Konzentration auf die Elektromobilität rückt die Entwicklung von Radnabenmotoren wieder in den Blickpunkt der Automobilindustrie. Das Fraunhofer IWM entwickelt zusammen mit mehreren Firmen und dem Fraunhofer IFAM im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes »Seri-el« einen serienfähigen Radnabenmotor mit integrierter Leistungselektronik und einem Drehmoment von 1 200 Nm. Ein solcher Radnabenmotor stellt dabei besondere Anforderungen an das Dichtungssystem. Durch den sehr großen Durchmesser der Dichtungen treten Geschwindigkeiten von mehr als 20 m/s an den Dichtflächen auf. Gleichzeitig müssen die Dichtungen auch bei einem Stopp in einer Pfütze noch absolut dicht sein, also auch eine »Tauchfahrt« mit dem Radnabenmotor überstehen. Gleichzeitig sollen die Dichtungen natürlich möglichst reibungsarm sein und eine hohe Lebensdauer aufweisen.

### Elastomerbeschichtung mit diamantähnlichem Kohlenstoff

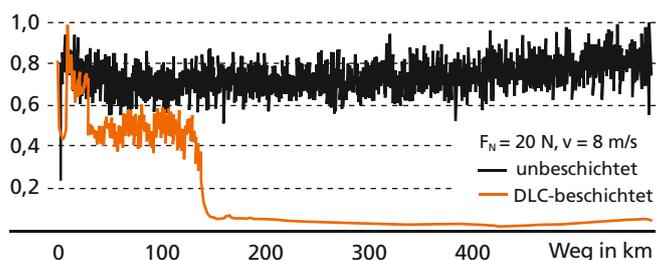
Zusammen mit der Firma Freudenberg Sealing Technologies entwickelt das Fraunhofer IWM Beschichtungen für Elastomerdichtungen, welche diesen hohen Anforderungen gerecht werden. Als Basis dienen hierzu diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC), die einerseits einen niedrigen Reibwert aufweisen, andererseits aber auch den Verschleiß des Elastomers deutlich herabsetzen können. In Versuchen konnte dabei der Reibwert durch Beschichtungen auch in geschmierten Systemen um bis zu 90 Prozent gesenkt werden. Die diamantähnliche Kohlenstoffschicht senkt dabei die hohe Adhäsion des Elastomers und kann so den Reibwert deutlich vermindern (Abbildung 1). Eine

zusätzliche Beschichtung kann dabei den Reibwert teilweise nochmals senken, vor allem aber den Verschleiß nochmals deutlich absenken. Auf den Elastomerdichtungen selbst kann die diamantähnliche Kohlenstoffschicht auch die Dehnungen von mehreren 100 Prozent des Elastomers mitmachen, ohne zu delaminieren. Allerdings können die diamantähnlichen Kohlenstoffschichten auch die Steifigkeiten des Elastomers verändern, sodass diese entsprechend den Beschichtungen angepasst oder speziell beschichtet werden müssen.

Bernhard Blug, Stefan Schnakenberg



Reibwert in relativen Einheiten



1 DLC-beschichtete Elastomerdichtung (oben), Vergleich der Reibwerte eines beschichteten und unbeschichteten Elastomers (unten).

# RANDZONENVERFORMUNG: CHARAKTERISIERUNG MITTELS FIB-ANALYSEN

Gruppe

**Angewandte Nanotribologie**

Dr. Martin Dienwiebel | Telefon +49 721 20432-777 | martin.dienwiebel@iwm.fraunhofer.de

Reibung und Verschleiß technischer Systeme sind mit komplexen Wechselwirkungen zwischen den oberflächennahen Bereichen der Reibpartner verknüpft. Unter tribologischer Belastung verformen sich die Randzonen der eingesetzten Werkstoffe plastisch und verändern sich chemisch. Aufgrund des feinen Gefüges, das die meisten technischen Werkstoffe unter der Oberfläche besitzen, ist die Darstellung dieser Verformung und damit ein Verständnis der Zusammenhänge schwierig, insbesondere, wenn bereits durch die Endbearbeitung eine Verformung vorhanden ist. Eine neue Methode, bei der Marker mit einer Ionenfeinstrahlanlage (FIB) in die Oberflächen einer technischen Aluminium-Silizium-Legierung eingebracht wurden, erlauben es, diese Verformung zu visualisieren (Abbildung 1).

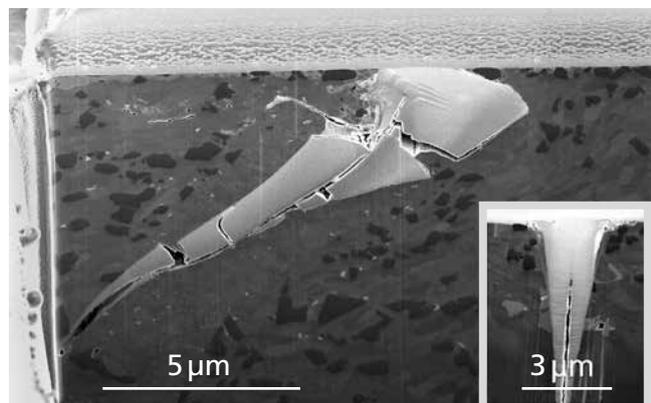
## **Einfluss der Endbearbeitung auf das tribologische Verhalten**

Endbearbeitungsparameter wie Vorschübe und Schnittgeschwindigkeiten beeinflussen nicht nur die Topographie der Oberfläche, sondern auch das Gefüge darunter. An mit unterschiedlichen Passivkräften endbearbeiteten Scheiben konnte ein deutlich unterschiedliches Verschleißverhalten gemessen werden. Diese Unterschiede konnten mithilfe der Marker auf die Ausbildung von Schergradienten zurückgeführt werden (*D. Linsler et al., Wear 332/333 (2015) 926*). Die Ausbildung dieser Schergradienten und damit das Verschleißverhalten der Werkstücke können durch die richtige Wahl der Endbearbeitungsparameter verbessert werden. Die Versuche wurden im Bereich niedrigster Verschleißraten von wenigen Nanometern pro Stunde gefahren und sind damit für Anwendungen im Maschinenbau relevant.

## **Mechanische Charakterisierung der Randzone**

Der Ionenstrahl der FIB erlaubt es außerdem, Proben zur Bestimmung von mechanischen Eigenschaften der verformten Randzone zu erzeugen. Dazu können beispielsweise Mikrodrucksäulen aus der Randzone geschnitten und anschließend in einem Nanoindenter getestet werden. Messungen in einer reinen Wolframprobe, aber auch in AlSi zeigten, dass die Randzone im Falle eines guten Einlaufs verformbarer wird und geringere Reibung entwickelt (*P. Stoyanov et al., ACS Nano 9 (2015) 1478*).

Dominic Linsler



1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen eines FIB-Querschnitts durch einen Marker nach tribologischer Belastung und im Ausgangszustand (rechts).

# BAUTEILSICHERHEIT UND LEICHTBAU

## Gruppen



### Ermüdungsverhalten, Bruchmechanik

Mit experimentellen und numerischen Methoden weisen wir die Strukturintegrität metallischer Bauteile und Schweißkonstruktionen unter statischer und zyklischer Belastung nach. Wir ermitteln Werkstoffkennwerte, validieren Modelle über Bauteilversuche und analysieren Schadensfälle.  
*Dr. Michael Luke | michael.luke@iwm.fraunhofer.de*



### Crashsicherheit, Schädigungsmechanik

Für die Crashsimulation entwickeln und implementieren wir Werkstoff- und Versagensmodelle und überprüfen Modelle mit Werkstoffcharakterisierungen und Bauteilprüfungen. Bei Komponentensimulationen berücksichtigen wir Fertigungsprozess-Einflüsse auf das Materialverhalten.  
*Dr. Dong-Zhi Sun | dong-zhi.sun@iwm.fraunhofer.de*



### Crashdynamik

Für CAE-unterstützte Entwicklung, insbesondere für die Crashsicherheit von Leichtbaukomponenten, bestimmen wir den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten mit innovativen Hochgeschwindigkeits-Messverfahren.  
*Frank Huberth | frank.huberth@iwm.fraunhofer.de*



### Fügeverbindungen

Wir charakterisieren die mechanischen Eigenschaften von Fügeverbindungen und bewerten ihr Verformungs- und Versagensverhalten zur Ersatzmodellierung für die Crashsimulation. Mit der rechnerischen Schweißsimulation sagen wir Verzug und Eigenspannungen voraus.  
*Dr. Silke Sommer | silke.sommer@iwm.fraunhofer.de*



### Verbundwerkstoffe

Wir charakterisieren und modellieren das Einsatz- und Versagensverhalten von Verbundwerkstoffen. Unsere Prüfkonzepte berücksichtigen die Mikrostruktur und die Belastung. Auf numerischem Weg simulieren wir das Verhalten von Materialien und Bauteilen.  
*Dr. Jörg Hohe | joerg.hohe@iwm.fraunhofer.de*

*» Unsere Aufgabe ist es, die Sicherheit und Lebensdauer von Bauteilen aus verschiedenen Werkstoffen nachzuweisen. Wir helfen unseren Kunden bei der Auslegung, Bewertung und Optimierung von Konstruktionen unter statischer Last, Ermüdung und Crash.«*



## **GESCHÄFTSFELDLEITER**

Dr. Dieter Siegele | Telefon +49 761 5142-116 | [dieter.siegele@iwmm.fraunhofer.de](mailto:dieter.siegele@iwmm.fraunhofer.de)

### **Fokus**

Die Bewertung der Sicherheit und der Gebrauchseignung von Bauteilen sowie die Qualifizierung neuer Leichtbauwerkstoffe stehen im Mittelpunkt unseres Aufgabenspektrums. Die Palette der Leichtbauwerkstoffe reicht von hochfesten Stählen über Aluminiumlegierungen bis zu Verbundwerkstoffen und Thermoplasten. Für moderne Hybridbauweisen sind Werkstoffverbunde und Fügeverbindungen von zunehmender Bedeutung.

Die Anwendungen umfassen die Crashbewertung von Fahrzeugkomponenten, die Weiterentwicklung von Konzepten zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Komponenten aus dem Fahrzeug-, Anlagen- und Maschinenbau sowie Sicherheitsnachweise hoch beanspruchter Bauteile, beispielsweise in der Energietechnik und der Raumfahrt. Zur Lösung der spezifischen Aufgaben setzen wir experimentelle Methoden in Verbindung mit rechnerischer Simulation und maßgeschneiderten Werkstoffmodellen ein.

### **Bemerkenswertes aus 2015**

Leichtbau und Ressourceneffizienz sind die zentralen Themen, die auch im Geschäftsjahr 2015 im Vordergrund standen. Die Weiterentwicklungen in der Automobilbranche im Hinblick auf Reduktion von Gewicht und Kraftstoffverbrauch sowie neue Antriebstechnologien erfordern den Einsatz neuer Werkstoffe und Verbindungstechnologien und die verbesserte Ausnutzung der jeweiligen Werkstoffe. Ein erfolgreiches Beispiel für den Einsatz von speziellen Messtechniken sowie zuverlässigen und effizienten Werkstoffmodellen ist die Charakterisierung und Modellierung der Einflüsse der Dehnrates und der Mehrachsigkeit auf das Versagen von verschiedenen hochfesten Stählen für die Crashsimulation. Die entwickelte Methodik ermöglicht eine verbesserte und zuverlässige Crashbewertung von Automobilkomponenten.

Weiterhin konnten wir unsere Versuchseinrichtungen im Rahmen einer strategischen Investition maßgeblich erweitern: Zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen und Fügeverbindungen unter komplexen Beanspruchungen (Zug-Druck, Torsion) wurden zwei Prüfeinrichtungen in Betrieb genommen, mit denen neben klassischen Festigkeitsversuchen insbesondere Untersuchungen zum Einfluss von Eigenspannungen, zum Beispiel in Schweißverbindungen, auf die Bauteillebensdauer durchgeführt werden und daraus verbesserte Werkstoffmodelle und Bewertungskonzepte abgeleitet werden sollen.

# LEBENSDAUERMODELLE FÜR OBERFLÄCHEN-BEHANDELTE BAUTEILE

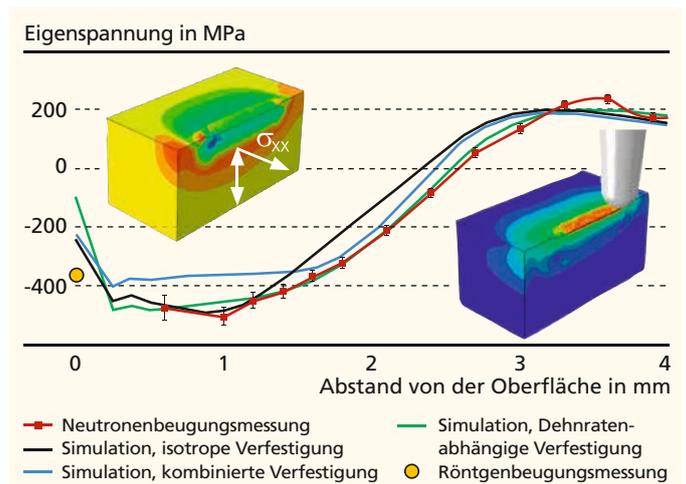
Gruppe

**Ermüdungsverhalten, Bruchmechanik**

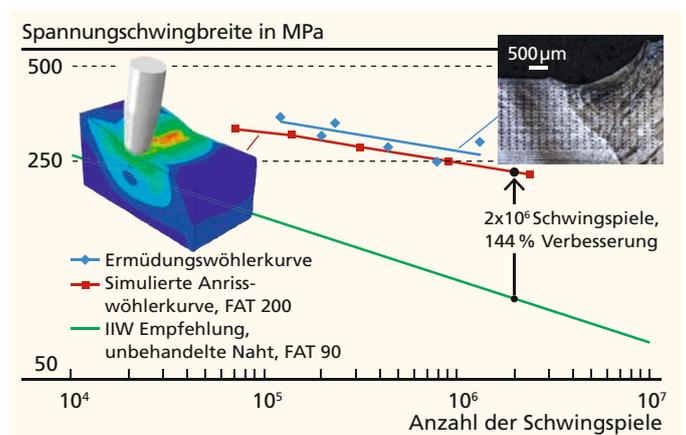
Dr. Michael Luke | Telefon +49 761 5142-338 | michael.luke@iwf.fraunhofer.de

Für die Lebensdauer von metallischen Bauteilen ist die Randschichtzone von ausschlaggebender Bedeutung, da die Werkstoffschädigung unter Betriebsbelastung in der Regel an der Oberfläche beginnt – beispielsweise an konstruktiven Kerben, Schweißnähten oder Oberflächendefekten. Bei Schweißnähten liegen zusätzlich Schweißeigenspannungen vor, die im Fall von Zugspannungen die Ermüdungsfestigkeit zusätzlich negativ beeinflussen. Eine gezielte mechanische Oberflächenbehandlung wie Kugelstrahlen, Festwalzen oder Hochfrequenzhämmern kann die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils wesentlich erhöhen. Kugelstrahlen ist ein industriell etabliertes Verfahren, das im Automobil-, Flugzeug- und Turbinenbau Anwendung findet. Ein neueres Verfahren ist das Hochfrequenzhämmern, das zur Lebensdauersteigerung beispielsweise von Schweißnähten eingesetzt wird. Dabei basiert der Nachweis der Lebensdauersteigerung bisher auf experimentellen Untersuchungen. Eine rechnerische Vorhersage des Lebensdauererfolgs ist heute noch nicht zuverlässig möglich. Daher werden Nachbehandlungsverfahren in vielen Fällen nicht eingesetzt, wodurch immense Leichtbaupotenziale durch Optimieren der Randschichteigenschaften ungenutzt bleiben.

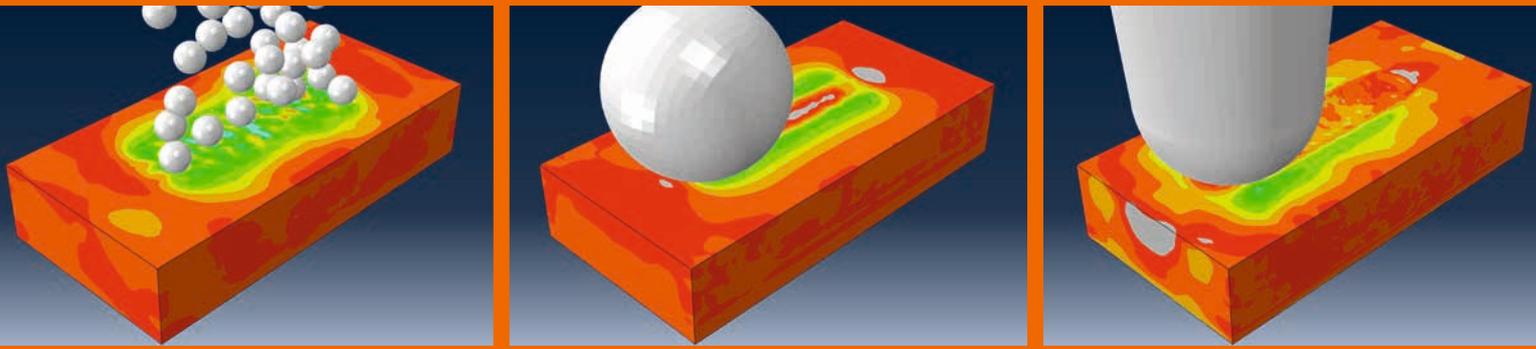
Um der Forderung nach leichten, ressourceneffizienten und sicheren Bauteilen nachgehen zu können, ist es erforderlich, die Randschichteigenschaften eines Bauteils in der Designphase einer Konstruktion zu berücksichtigen. Hierzu entwickeln wir Werkstoffmodelle und Simulationstools, mit deren Hilfe das Werkstoffverhalten und die Bauteillebensdauer durch eine maßgeschneiderte Oberflächenbehandlung optimiert werden kann. Durch die Kombination von Experiment, Werkstoff- und Prozesssimulation leiten wir die quantitativen



1 HFMI-induzierte Eigenstress: Simulation des Hochfrequenzhämmerns von Stahlplatten mit experimenteller Validierung.



2 Stumpfstoß S355J2H: Berechnung der Lebensdauer von hochfrequenzgehämmerten Schweißverbindungen und Darstellung des Leichtbaupotenzials.



*Prozesssimulation als Voraussetzung für Lebensdauerberechnung:  
Kugelstrahlen (links), Festwalzen (Mitte) und Hochfrequenzhämmern (rechts).*

Zusammenhänge zwischen Werkstoff, Bauteilgeometrie und verfahrensbedingten Einflussfaktoren von mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren im Hinblick auf das Eigenspannungsfeld und die Randschichtverfestigung ab. Zudem ermitteln wir den Gewinn an Lebensdauer zyklisch beanspruchter Bauteile in Abhängigkeit der Prozessparameter.

#### **Numerische Simulation der mechanischen Oberflächenbehandlung**

Die numerische Beschreibung des erzielten Druckeigenspannungsfelds ist ein wichtiger Schritt für die Prozessoptimierung. Durch Optimierung der Prozessparameter können hieraus Möglichkeiten für eine optimierte Einstellung der Randschichteigenschaften abgeleitet werden. Als Ergebnis zeigt Abbildung 1 die berechneten Eigenspannungs-Tiefenverläufe nach Hochfrequenzhämmern im Vergleich zu mit verschiedenen Verfahren experimentell ermittelten Werten. Mit geeigneten Werkstoffmodellen können wir die Eigenspannungen durch den Oberflächenbehandlungsprozess exakt beschreiben. Dies ist die Basis für eine zuverlässige Berechnung der Ermüdungsfestigkeit.

#### **Berechnung der Ermüdungsfestigkeit hochfrequenzgehämmerter Schweißnähte**

Für die Berechnung der Lebensdauer setzen wir ein lokales Rechenverfahren zur Beschreibung der zyklischen Werkstoffschädigung unter der Berücksichtigung des Einflusses von Eigenspannungen und Randschichtverfestigung ein. Basis für die Rechenkonzepte sind elastisch-plastische Werkstoffmodelle der Chaboche-Klasse. Damit beschreiben wir die zyklische Plastizität in Verbindung mit geeigneten Schädigungspara-

metern. Abbildung 2 zeigt die berechnete Wöhlerlinie (rot) und die experimentell ermittelte (blau) von hochfrequenzgehämmerten Stumpfschweißverbindungen. Berechnung und Experiment zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und eine Schwingfestigkeitssteigerung bei 2 Millionen Zyklen von mehr als 140 Prozent. Die am Fraunhofer IWM entwickelten Methoden bilden die Basis für weitere öffentliche geförderte Vorhaben sowie industrielle Projekte mit dem Ziel, Lebensdauerkonzepte weiter zu entwickeln und sie auf spezielle Einsatzgebiete anzuwenden. Dies können beispielsweise Sanierungen von Stahlbrücken, die Optimierung hochfester Schweißverbindungen oder die Erhöhung der Lebensdauer metallischer Komponenten sein.

Dr. Majid Farajian, Jan Föhrenbach

# EFFIZIENTE THERMOMECHANISCHE MODEL- LIERUNG DES CRASHVERHALTENS

Gruppe

**Crashsicherheit, Schädigungsmechanik**

Dr. Dong-Zhi Sun | Telefon +49 761 5142-193 | dong-zhi.sun@iwm.fraunhofer.de

Aufgrund der geringen Duktilität hochfester Stähle ist eine genauere Vorhersage des Versagens notwendig. Die dazu erforderlichen komplizierteren Material- und Versagensmodelle zur Beschreibung der Interaktionen zwischen Deformation, Dehnrates und Temperatur benötigen hohe Rechenzeiten. Gleichzeitig sollten die Rechenzeiten wegen des großen Detailreichtums der beim Crash simulierten Strukturen in Grenzen gehalten werden. Darum wird ein effizientes Materialmodell zur Simulation von Einflüssen der Dehnrates und adiabatischer Effekte für unterschiedlichste Belastungen gebraucht.

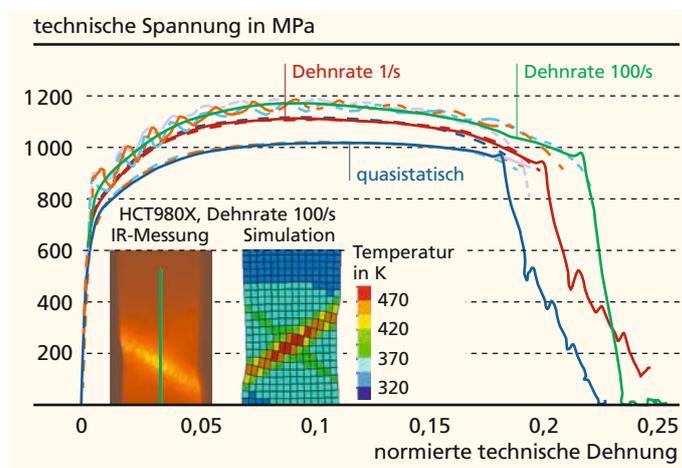
## Modellierung des Deformationsverhaltens

Für crashartige Belastungen spielt die lokale Temperaturentwicklung wegen des Einflusses auf die Entfestigung eine wichtige Rolle. Die Temperaturänderung wird durch die dissipierte plastische Deformationsenergie und die Wärmeleitung bestimmt, wobei diese Einflüsse stark dehnratesabhängig sind. Klassischerweise werden zur Modellierung vollgekoppelte thermo-mechanische Modelle herangezogen, die allerdings in der Crashsimulation aus Performancegründen nicht verwendbar sind. Deshalb haben wir einen Modellansatz verwendet, bei dem die lokale Erwärmung von der Dehnrates abhängt und dadurch auf die Berücksichtigung der Wärmeleitung vollständig verzichtet werden kann. Der wesentliche Schritt ist die Einführung des dehnratesabhängigen Taylor-Quinney-Koeffizienten in das Werkstoffmodell, der die lokale Erwärmung steuert. Dadurch steht ein effizientes Modell zur Verfügung, das die zentralen Einflussfaktoren genau berücksichtigt.

## Versagensmodellierung

Auch das Versagensverhalten hochfester Stähle hängt von der Dehnrates ab, da diese die Dehnungslokalisierung und den Spannungszustand beeinflusst. Auf der Basis der Ergebnisse von crashartigen mehrachsigen Experimenten der Gruppe Crashdynamik haben wir das Versagensverhalten verschiedener Stähle modelliert. Wir nutzten das neue Werkstoffmodell in Kombination mit einem Versagensmodell, das die Einflüsse der Mehrachsigkeit und der Dehnrates auf die Bruchdehnung beschreibt (Abbildung 1). Damit konnten wir die Experimente zuverlässig und effizient simulieren und einen Beitrag zur Verbesserung der virtuellen Fahrzeugentwicklung im Bereich Crashsicherheit und Insassenschutz leisten.

Dr. Andreas Trondl



1 Zugprobe: Dehnratesabhängigkeit aus Experiment und Simulation sowie Temperaturverteilung bei Dehnrates 100/s.

# CRASHANALYSE MIT SCHNELLEN INFRAROT-MESSUNGEN

Gruppe  
**Crashdynamik**

Frank Huberth | Telefon +49 761 5142-472 | frank.huberth@iw.fraunhofer.de

Moderne Leichtbaustrukturen müssen hohen Ansprüchen genügen, nicht nur in der Automobilbranche und in der Luft- und Raumfahrt. Geringes Gewicht, hohe Belastbarkeit und eine gute Energieabsorption sind Kriterien für effizienten Leichtbau. Verbundwerkstoffe und optimierte Werkstoffverbunde haben das größte Potenzial, diese Anforderungen zu erfüllen. Für die Auslegung von Leichtbau-Bauteilen unter schlagartigen Belastungen entwickeln wir spezifische Untersuchungsmethoden zur Werkstoffcharakterisierung und Bauteilbewertung. Die Hochgeschwindigkeits-Infrarotanalyse (HS-IR-Analyse) bietet hierfür neue Möglichkeiten, insbesondere bei crashrelevanten Anwendungen.

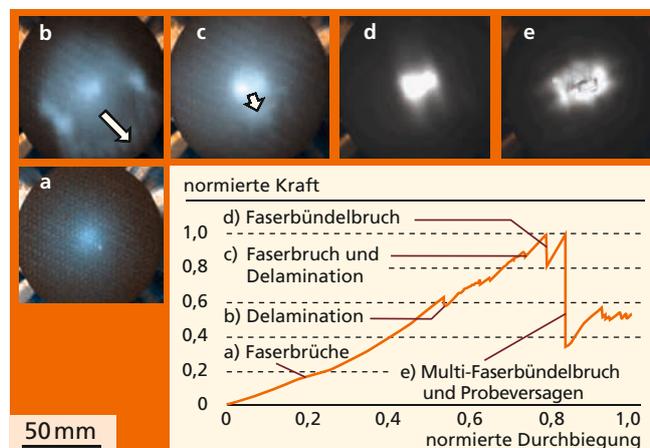
Die durch Verformung und Schädigung umgesetzte Energie hochbeanspruchter Bauteilbereiche bewirkt lokal eine Temperaturerhöhung. Diese kann in den wenigen Millisekunden einer Crash- oder Impactbelastung nicht schnell genug durch Wärmeleitung abfließen (adiabatische Bedingungen). Bei lokalen Schädigungsereignissen in Faserverbund-Werkstoffen, beispielsweise bei Faserbruch, entstehen lokal kurzzeitige Temperaturspitzen oder, durch die Delamination des Schichtaufbaus, sich sehr schnell flächig ausbreitende Temperaturerhöhungen.

Mit einer Dualband-Infrarot-Hochgeschwindigkeitskamera (20 kHz) haben wir Temperaturerhöhungen bei crashartigen Belastungen für ein breites Spektrum an Werkstoffen bestimmt und mit dem Beanspruchungsverlauf korreliert. Dafür wurden spezielle Methoden entwickelt und die Analysen kontinuierlich verbessert. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis eines Durchstoßversuchs an einem kohlefaserverstärkten

Verbundwerkstoff. Dargestellt sind die mit der HS-IR-Analyse detektierten Schädigungen in Korrelation zum Kraft-Wegverlauf des Impactors.

Diese Messungen liefern für unsere Kunden eine Fülle an Information der Verformungs- und Versagensmechanismen im Inneren des Werkstoffs zur physikalischen Beschreibung und Modellierung bei Crash- und Impactvorgängen. In diesem Bereich können wir aktuell eine einmalige Kompetenz anbieten. Die anwendungs- und kundenspezifisch aufbereiteten Daten leisten einen wertvollen Beitrag für den sicheren Einsatz von Leichtbauwerkstoffen für crash- und impactbeanspruchte Strukturen.

Jörg Lienhard, Dr. Wolfgang Böhme



1 Durchstoßversuch eines kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffs: Durchbiegung in Relation zur eingebrachten Kraft und entsprechende Schädigung, erfasst mit HS-IR-Analyse.

# ERMÜDUNG VON CFK IN EXPERIMENT UND SIMULATION

Gruppe

**Verbundwerkstoffe**

Dr. Jörg Hohe | Telefon +49 761 5142-340 | joerg.hohe@iwmm.fraunhofer.de

Carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) wird unter zyklischen Betriebslasten im Allgemeinen ein gutmütiges Verhalten zugesprochen. Anders als bei Metallen tritt jedoch bei CFK häufig schon nach relativ geringen Zyklenzahlen eine initiale Materialdegradation auf (Abbildung 1). Nach einem anschließenden lang andauernden Bereich mit relativ stabilem Tragverhalten tritt endgültiges Versagen erst nach hohen Zyklenzahlen ein. Besonders zu beachten ist eine starke Abhängigkeit der Ermüdung von der Reihenfolge und Art der Belastungsszenarien. Die materialtypische Steifigkeits- und Festigkeitsänderung wird am Fraunhofer IWM experimentell charakterisiert und geeignete Modelle zur Vorhersage des veränderlichen Tragverhaltens und der Lebensdauer entwickelt.

## Ermüdungsverhalten in Mikrozugtests

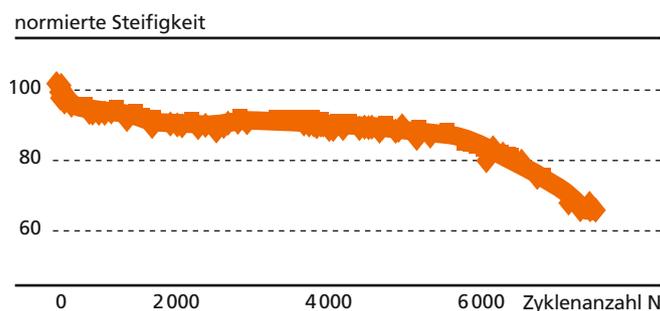
Zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von Composite-Materialien stehen Prüfmöglichkeiten vom zyklischen Mikrozugtest (Probenlänge wenige mm) über typische Coupon-Proben-Ermüdungstests (Abbildung 1) bis hin zum Dauerschwingversuch an großen Komponenten mit bis zu 500 kN Oberlast mit der Möglichkeit zur Einstellung spezieller Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen zur Verfügung. Im Rahmen eines aktuellen Projekts wird das Ermüdungsverhalten gewickelter CFK-Druckbehälter für Wasserstoff bei Tiefsttemperaturen untersucht.

## Lebensdauermodellierung

Je nach Anforderung kommen Lebensdauermodelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad zum Einsatz. Bei einem feststehenden Laminataufbau bieten auf experimentell ermittelten S-N-Kurven basierende Modelle eine Möglichkeit

zur direkten Abschätzung der Lebensdauer (Abbildung 1). Alternativ hierzu wurde am Fraunhofer IWM ein Ermüdungsdegradationsmodell in ein Finite-Elemente (FE) Programm implementiert. Dies erlaubt die mechanismenbasierte Analyse des Ermüdungsverhaltens für beliebige Laminatstrukturen mit der Akkumulation verschiedener Schädigungsparameter für die einzelnen Versagensmechanismen. Zur detaillierten Untersuchung des Zusammenhangs zwischen mikrostrukturbasierten Schädigungseffekten und makroskopischem Degradationsverhalten stehen spezielle Tools zur Mikrostrukturmodellierung zur Verfügung.

Dr. Monika Gall



1 Steifigkeitsänderung einer multidirektional verstärkten CFK-Probe unter zyklischer Zugbelastung und Probe nach Versagen.

# BEEINFLUSSUNG VON VERZUG UND EIGENS- SPANNUNGEN BEIM SCHWEISSEN

Gruppe  
**Fügeverbindungen**

Dr. Silke Sommer | Telefon +49 761 5142-266 | silke.sommer@iwf.fraunhofer.de

Verzug und Eigenspannungen entstehen beim Schweißen aufgrund der inhomogenen lokalen Erwärmung. Sie bedingen sich gegenseitig und hängen von vielen Faktoren ab. Die Qualität und Funktionalität eines geschweißten Bauteils kann dadurch beeinträchtigt werden. Eine Minimierung bzw. Beseitigung des Verzugs und der Eigenspannungen kann begleitend zum Schweißprozess oder danach stattfinden, allerdings sind dazu vor- oder nachgelagerte Prozesse wie thermisches Richten oder Wärmebehandlungen notwendig.

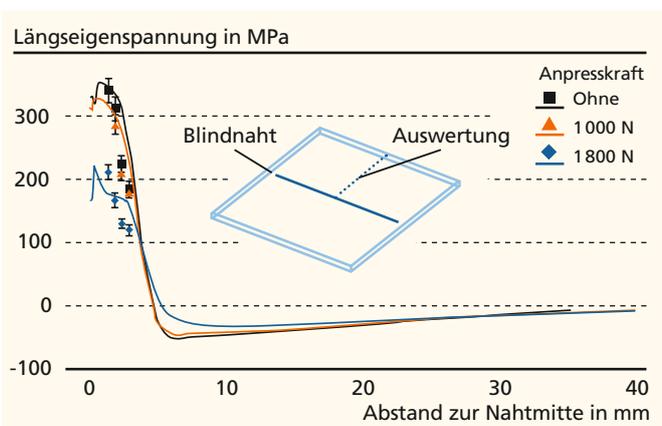
In dem AiF/DVS-Projekt 16857 N wurde zusammen mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TU München eine rechnergestützte Methode zur kombinierten Verzugs- und Eigenspannungsreduktion während des Schweißens entwickelt. Mittels einer nachlaufenden Anpressrolle oder nachgeschaltetem Stempeln wird eine Kompensationskraft lokal und zum richtigen Zeitpunkt nahe der Schweißverbindung aufgebracht. Die Kompensationsparameter, die die Randbedingung der Schweißung zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Abkühlphase beeinflussen, werden durch Schweißstruktursimulation bestimmt. Innerhalb dieses Projekts wurden die entwickelten Kompensationsmethoden an Laserstrahlschweißungen von X6CrNiTi 18 10 erfolgreich angewendet.

## Vorgehensweise der Kompensationsmethode

Ausgehend von einer Schweißstruktursimulation unter statischer Einspannung werden günstige Kompensationsparameter durch eine Optimierungsschleife numerisch bestimmt. Dabei werden der Wirkort, die Höhe der Kraft und der Eingriffszeitpunkt beziehungsweise die Temperatur am Wirkort bestimmt. Als Ergebnis stehen dem Anwender ein Parametersatz zum prozessbegleitenden dynamischen Spannen für die Verzugs-

und Eigenspannungsreduktion zur Verfügung. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die simulierten Längseigenspannungen einer Blindnaht im Vergleich zu Eigenspannungsmessungen an nahtnahem Bereich. Hierbei wurde der Winkelverzug mittels einer nachlaufenden Anpressrolle mit einer Anpresskraft von 1800 N kompensiert. Die Eigenspannung und der Verzug lassen sich während der Abkühlung einer Schweißnaht mittels dynamischem Spannen reduzieren. Eingriff bei hohen Temperaturen begünstigt die Kompensation von Verzug, allerdings ohne die Eigenspannungen zu beeinflussen. Bei fortgeschrittener Abkühlung können Eigenspannungen und Verzug reduziert werden. Dafür werden aber höhere Kompensationskräfte benötigt.

Dr. Ossama Dreibati



1 Längseigenspannungen in der Mitte einer Blindnaht als Funktion des Abstands zur Nahtmitte bei unterschiedlichen Anpresskräften: Verzugs-kompensation wurde bei 1800 N erreicht.

# WERKSTOFFBEWERTUNG, LEBENSDAUERKONZEPTE

## Gruppen



### **Mikrostruktur, Eigenspannungen**

Wir untersuchen den Einfluss von Herstellungsverfahren und Betriebsbedingungen auf Mikrostruktur, Eigenspannungszustand und Integrität von Werkstoffen und Bauteilen und unterstützen bei der Werkstoffauswahl und der Optimierung von Werkstoffen.

*Dr. Wulf Pfeiffer | [wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de](mailto:wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de)*



### **Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik**

Durch mechanismenbasierte Werkstoff- und Lebensdauermodelle für die thermomechanische Ermüdungsbelastung ermöglichen wir verlässliche Vorhersagen in Bauteilsimulationen, sodass unsere Kunden Entwicklungskosten und -zeit sparen können.

*Dr. Christoph Schweizer | [christoph.schweizer@iwf.fraunhofer.de](mailto:christoph.schweizer@iwf.fraunhofer.de)*

» Unsere Lebensdauerkonzepte für Anlagenkomponenten beruhen auf präzisen Mikrostruktur- und Eigenspannungsinformationen, die wir aus unseren Experimenten und numerischen Simulationen erhalten. Besonders Augenmerk richten wir auf die Hochtemperaturkorrosion und Wasserstoffversprödung.«



## GESCHÄFTSFELDLEITER

Dr. Wulf Pfeiffer | Telefon +49 761 5142-166 | [wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de](mailto:wulf.pfeiffer@iwf.fraunhofer.de)

### Fokus

Wir bewerten den Einfluss von Mikrostruktur, Eigenspannungen und Schädigung auf Funktionalität und Lebensdauer von Bauteilen. Besonderen Wert legen wir auf die Verknüpfung von Experimenten unter einsatznahen Belastungsbedingungen mit fortschrittlicher Werkstoffmodellierung. Hierbei spielt das Verständnis für die Anforderungen an die Bauteile unserer Kunden eine zentrale Rolle. Schwerpunkte unserer Arbeiten sind die Modellierung zyklischer thermomechanischer Beanspruchungen und die Aufklärung von Degradationsmechanismen der Korrosion, Spannungsrisskorrosion und Wasserstoffversprödung. Bei akuten Schadensfällen unterstützen wir unsere Kunden durch Gutachten.

### Bemerkenswertes aus 2015

Unseren Forschungsschwerpunkt »umgebungsbedingte Degradation von Werkstoffen« haben wir 2015 weiter ausgebaut. Das europäische Verbundvorhaben »MultiHy« konnten wir erfolgreich abschließen und damit skalenübergreifende Methoden zur Simulation sowie die experimentelle Validierung des Einflusses von Gefügemerkmalen auf die Diffusion und das Trapping (Speichern) von Wasserstoff in unterschiedlichen Legierungen etablieren. Damit haben wir wesentliche Voraussetzungen geschaffen, insbesondere hochfeste Legierungen gezielt zu entwickeln. Unterstützend haben wir begonnen, die Möglichkeiten zur experimentellen Bewertung des Einflusses von Wasserstoff auf die Festigkeitseigenschaften von Werkstoffen weiter auszubauen und erweitern derzeit unser bestehendes Wasserstofflabor.

Darüber hinaus etablierten wir spezielle optische Messmikroskope, um die wirksamen Schädigungsmechanismen unter thermomechanischer Ermüdungs- und Kriechermüdungsbelastung aufzuklären. Sie erlauben eine in situ-Beobachtung der Schädigungsentwicklung auch bei glühenden Proben.

# EIGENSPANNUNGSBEWERTUNG REIBRÜHRGESCHWEISSTER RAUMFAHRT-KOMPONENTEN

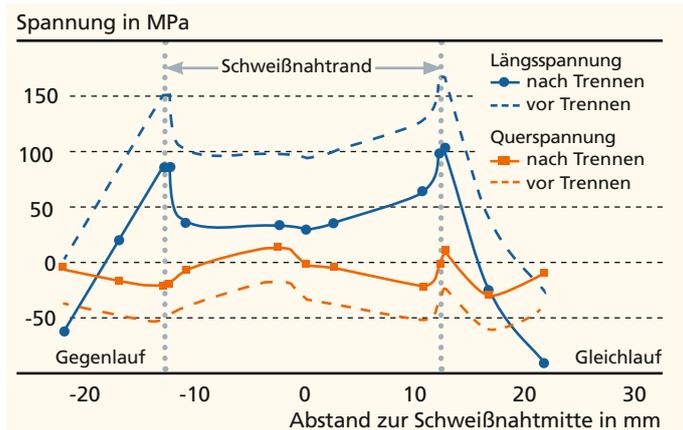
Gruppe

**Mikrostruktur, Eigenspannungen**

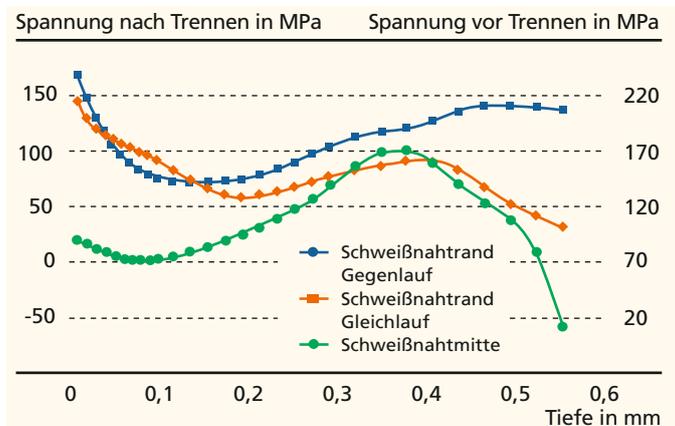
Dr. Wulf Pfeiffer | Telefon +49 761 5142-166 | wulf.pfeiffer@iwmm.fraunhofer.de

Reibrührschweißen (engl. friction stir welding, FSW) findet als Fügemethode für hochfeste Aluminiumlegierungen zunehmend Beachtung im Flugzeugbau und in der Raumfahrt. Geringere Verzüge und geringere thermisch bedingte Festigkeitsbeeinflussungen im Vergleich zum Schmelzbad-schweißen sind die wesentlichen Gründe dafür. Bei diesem Verfahren taucht ein rotierender Pin unter hoher Kraft in die zu verbindenden Komponenten ein. Dabei wird das Material durch Reibung erwärmt und zähplastisch verformt. Mit fortschreitendem lateralem Vorschub vermengt sich das Material der Fügepartner durch einen extrusionsähnlichen Prozess und bildet eine Naht. Obwohl die im Prozess entstehenden Temperaturen wesentlich geringer sind als beim Schmelzbad-schweißen, entstehen thermisch und verformungsbedingte Eigenspannungen im Material. Sie können sich ungünstig auf das Ermüdungsverhalten, das Risswachstum und den Widerstand gegen Spannungsrissskorrosion des Werkstoffs auswirken und müssen in der Auslegung der Bauteile berücksichtigt werden.

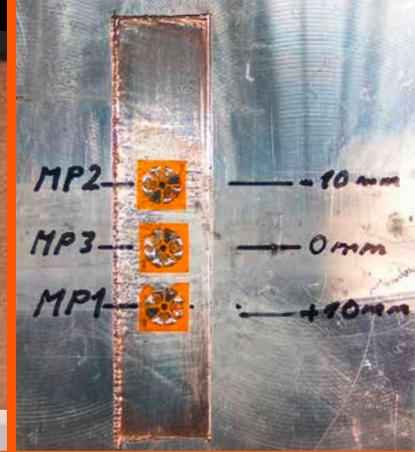
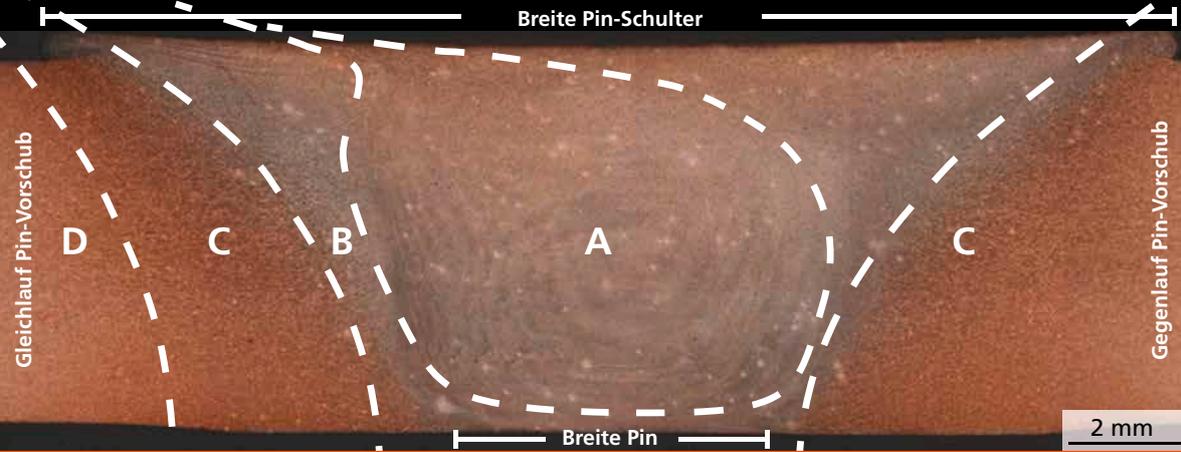
Für Eigenspannungs- und Festigkeitsanalysen werden verständlicherweise keine kompletten Bauteile herangezogen, sondern bevorzugt Probekörper, die wiederum aus größeren, bauteilnahen Komponenten entnommen werden. Für die Optimierung der Fertigungsprozesse werden bevorzugt Probeschweißungen an geometrisch einfacheren, ebenen Komponenten durchgeführt. Damit stellt sich die Frage, ob der Eigenspannungszustand in den Komponenten und Probekörpern dem Eigenspannungszustand im Bauteil nahe kommt, oder zumindest eine konservative Bewertung des Eigenspannungseinflusses ermöglicht.



1 Röntgenographisch ermittelte oberflächennahe Eigenspannungsverteilungen vor und nach Korrektur der Spannungsumlagerung durch Heraustrennen der Probe.



2 Mittels Bohrlochverfahren ermittelte Tiefenverteilungen der Längsspannungen in Schweißgutmitte und am Übergang zur Wärmeeinflusszone. Die rechte Ordinate berücksichtigt die Spannungsumlagerung beim Heraustrennen der Probe.



Querschliff durch eine FSW-Naht mit unterschiedlich beeinflussten Bereichen (8 mm-Blech, Legierung AA 2219)  
 © MT Aerospace (links). Probe mit elektrochemisch präparierter Messspur für die röntgenographische  
 Eigenspannungsermittlung und DMS-Rosetten für das Bohrlochverfahren (rechts).

### Ökonomische Ermittlung von Eigenspannungen

Das Fraunhofer IWM nutzt zur Eigenspannungsanalyse verschiedene zerstörungsfreie, teilzerstörende und zerstörende Verfahren. Beim Reibrührschweißen sind Eigenspannungen in Randschichtbereichen für die oben genannten Schädigungsprozesse relevant. Oberflächennahe Eigenspannungen werden bevorzugt mittels zerstörungsfreier röntgenographischer Beugungsanalysen bestimmt. Die Tiefenverteilungen in der Randschicht können jedoch ökonomischer mit dem inkrementellen Bohrlochverfahren ermittelt werden. Um mögliche laterale und zur Tiefe vorliegende Spannungsmaxima aufzudecken, wurden deshalb die Oberflächen-Eigenspannungsverteilungen röntgenographisch ermittelt und an den Orten maximaler Eigenspannungen zusätzlich Tiefenverteilungen per Bohrlochverfahren gemessen.

Die Entnahme von Probekörpern aus großvolumigen, bauteilnahen Komponenten kann zur Umlagerung weitreichender Eigenspannungsfelder führen. Um einen für das Bauteil relevanten Eigenspannungszustand angeben zu können, wurden mittels Dehnmessstreifen Eigenspannungsumlagerungen ermittelt, die bei der Entnahme der Komponenten und der weiteren Verkleinerung zu Probekörpern auftraten. Da ausschließlich elastische Dehnungen auftraten, konnten die an diesen Probekörpern ermittelten Eigenspannungsverteilungen um den Einfluss der Umlagerung korrigiert werden.

### Bewertung der Beanspruchungen quer und längs zur Schweißnaht

Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, führt das Heraustrennen von Proben aus größeren Komponenten zu nicht zu vernach-

lässigenden Eigenspannungsumlagerungen. Die Längseigenspannungen der Probe sind gegenüber dem Bauteil erheblich in Richtung Druckeigenspannungen, die Quereigenspannung geringfügig in Richtung Zugeigenspannungen verschoben. Die Tiefenverteilungen der Längseigenspannungen in Abbildung 2 zeigen, dass in der Schweißnahtmitte die maximalen Eigenspannungen unter der Oberfläche liegen. Sie können im nicht zerlegten Bauteil fast Streckgrenzhöhe erreichen. Die Kombination aus Bohrlochmethode und röntgenographischer Eigenspannungsermittlung bietet demnach eine ökonomische Methode zur Lokalisierung von Spannungsmaxima.

Hinsichtlich der Bewertung der Eigenspannungen auf beispielsweise das Risswachstumsverhalten in einem reibrührgeschweißten Bauteil ist festzuhalten, dass Eigenspannungsermittlungen an Probekörpern zu einer konservativeren Bewertung führen, wenn die Betriebsbeanspruchung quer zur Schweißnaht vorliegt. Aussagen zum Verhalten parallel zur Schweißnaht verlangen eine Berücksichtigung der Eigenspannungsumlagerung bei der Probenextraktion.

Dr. Wulf Pfeiffer

# DAS HOCHTEMPERATURVERHALTEN VON METALLEN BESSER VERSTEHEN

Gruppe

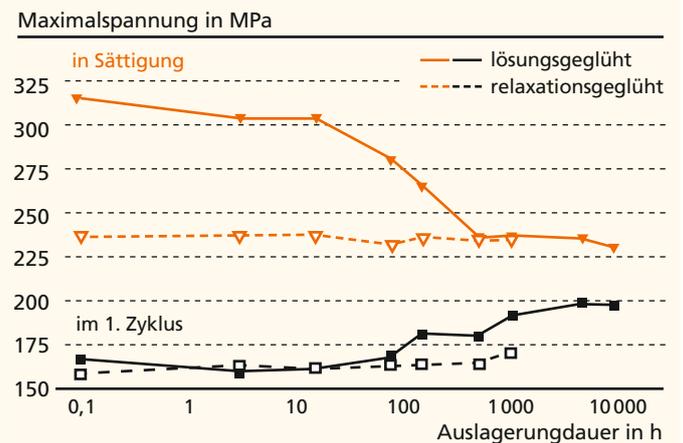
**Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik**

Dr. Christoph Schweizer | Telefon +49 761 5142-382 | christoph.schweizer@iwvm.fraunhofer.de

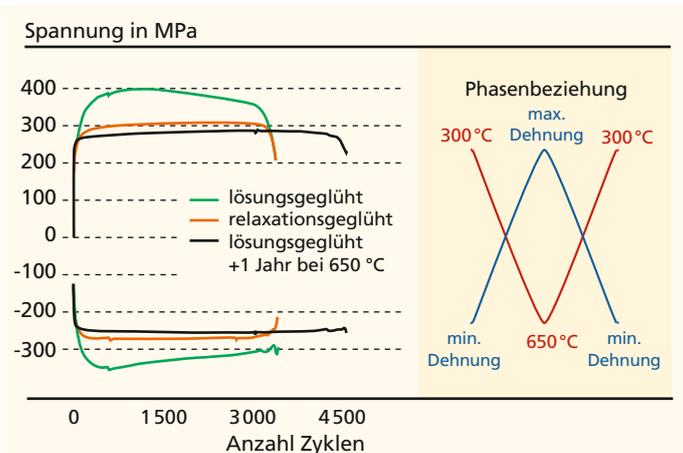
Kritische Komponenten in thermischen Kraftwerken oder der petrochemischen Industrie sind extremen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Die dafür verwendeten Werkstoffe sind meist hochwarmfeste und korrosionsbeständige Stähle und neuerdings auch Nickelbasislegierungen. Als Folge einer Wärmebehandlung oder im Hochtemperatureinsatz bilden sich Ausscheidungen, die sich positiv, aber auch negativ auf die Materialeigenschaften auswirken können. Für den zuverlässigen Einsatz der Komponenten müssen die Wechselwirkungen der Ausscheidungsmikrostruktur mit den mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe im Detail verstanden werden. In gemeinschaftlicher Projektarbeit mit der VDM Metals GmbH werden seit einigen Jahren Werkstoffe und deren Mikrostrukturen untersucht sowie Modelle entwickelt. Diese Modelle ermöglichen eine einheitliche Beschreibung der Hochtemperaturverformung und der Lebensdauer unter Berücksichtigung der mikrostrukturellen Veränderungen. Neben den Nickellegierungen Alloy 617B und Alloy C-263 wurden die Methoden anhand des Chrom-Nickel Stahls Alloy 800H erprobt.

## Mikrostrukturentwicklung

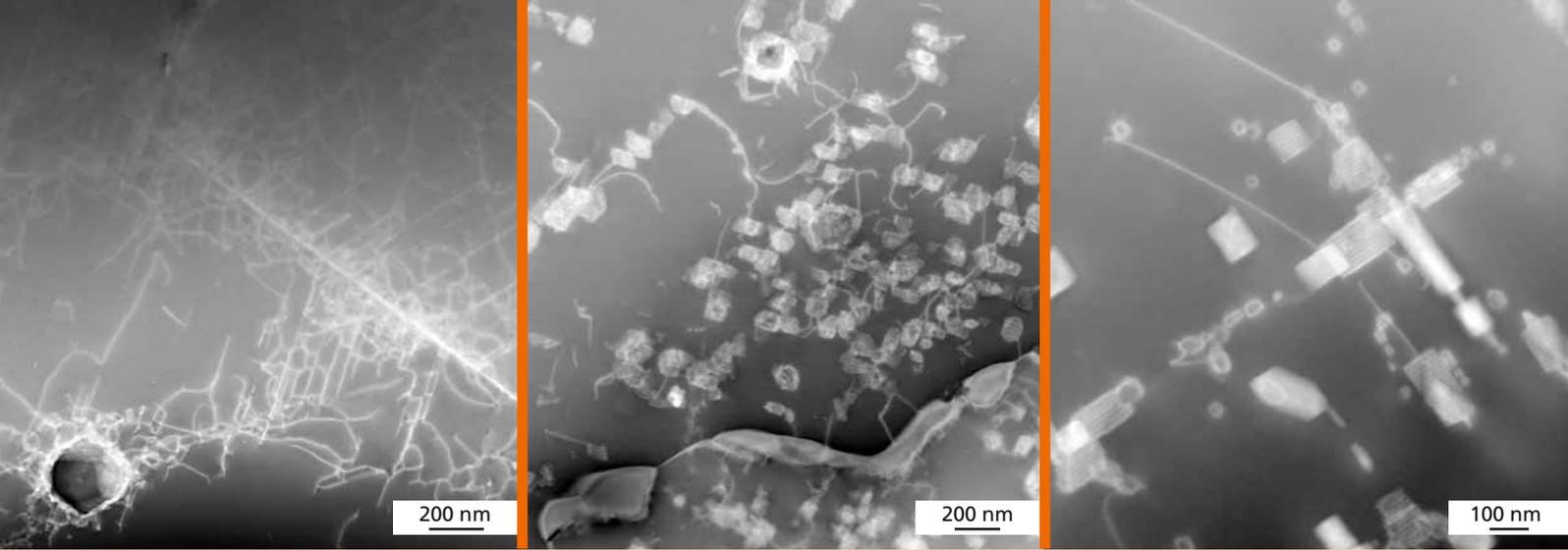
Der karbidhärtende Werkstoff Alloy 800H wird in der Regel im Temperaturbereich von 300 bis 850 °C eingesetzt. Durch seinen hohen Chromgehalt bilden sich bei mittleren Temperaturen chromreiche Karbide, bei höheren Temperaturen zusätzlich titanreiche Ausscheidungen. Üblicherweise wird das Material im lösungsgeglühten, das heißt im nahezu ausscheidungsfreien Zustand verwendet. Während der Komponentenherstellung widerfährt den Schweißnähten häufig eine kurzzeitige Relaxationsglühung bei 980 °C. Neben



1 Abhängigkeit der thermischen Vorbelastung (650 °C) auf die Maximalspannungen im isothermen Ermüdungsversuch bei 650 °C für beide Ausgangszustände des Werkstoffs Alloy 800H.



2 Verläufe der Spannungsumkehrpunkte bei 300 und 650 °C im thermo-mechanischen Ermüdungsversuch, Werkstoff Alloy 800H. Die Phasenlage zwischen Dehnung und Temperatur ist schematisch dargestellt.



*Mikrostrukturstadien Alloy 800H: lösungsgeglüht (links), für 1 000 h bei 650 °C ausgelagert (Mitte) und relaxationsgeglüht (rechts).*

der Reduzierung von Schweißspannungen führt diese Behandlung auch zu zahlreichen Karbidausscheidungen. Zur Charakterisierung des Werkstoffs innerhalb der ersten Betriebsstunden haben wir beide Ausgangszustände (lösungs-/relaxationsgeglüht) für unterschiedliche Zeiträume bei 650 °C thermisch vorbelastet. Wir konnten zeigen, dass sich im lösungsgeglühten Ausgangszustand nach zirka 75 Stunden sekundäre Karbide an den Korngrenzen und um primäre Karbide bilden. Im relaxationsgeglühten Zustand dominiert bei gleicher thermischer Belastung das Wachstum der bereits vorliegenden Ausscheidungen. Die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Ausscheidungsmikrostrukturen zeigt die Abbildung oben auf der Seite.

#### **Wechselwirkung der Mikrostruktur mit den mechanischen Eigenschaften**

Neben der kurzzeitigen isothermen Ermüdungsbelastung gewinnen für derartige Werkstoffe überlagerte thermische und mechanische sowie langzeitige Kriech-Ermüdungsbeanspruchungen zunehmend an Bedeutung. Mit innovativen Versuchen ermitteln wir detailliert die Auswirkungen der mikrostrukturellen Veränderungen auf die mechanischen Eigenschaften. Abbildung 1 verdeutlicht, wie die Mikrostruktur das Verfestigungsverhalten unter Ermüdungsbelastung beeinflusst. Während im lösungsgeglühten Zustand mit Beginn erster Karbidbildung das Verfestigungspotenzial stetig abnimmt, bleibt durch die Relaxationsglühung die Werkstoffantwort konstant. Dieses Niveau stellt sich im lösungsgeglühten Material erst nach 500 Stunden künstlicher Voralagerung ein. Auch unter überlagerter mechanischer und thermischer Belastung (Abbildung 2) werden die

Unterschiede verschiedener Mikrostrukturstadien deutlich. Aufgrund der bereits vorher ausgeschiedenen Karbide sinkt also das Potenzial zur verformungsinduzierten Bildung sehr feiner Ausscheidungen mit zunehmender thermischer Vorbeanspruchung.

#### **Gekoppelte Mikrostruktur- und Verformungsmodellierung**

Die bei uns vorliegenden Modelle zur Beschreibung der Hochtemperaturverformung unter Ermüdung, Kriechermüdung und Kriechen werden mit einem Ausscheidungsmodell gekoppelt. Somit können das experimentell beobachtete komplexe Verformungsverhalten und die Entwicklung der Ausscheidungsmikrostruktur gut abgebildet werden. Das Implementieren in die im Haus entwickelte Software »ThoMat« ermöglicht letztendlich eine (Rest)Lebensdauerbewertung von Komponenten mit Finite-Elemente Programmen. Folglich lassen sich Bauteile unter betriebsnahen Beanspruchungen am Computer simulieren und Entwicklungszeiten reduzieren.

Oliver Hübsch, Dr. Gerhard Maier

# VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM FREIBURG

## Fraunhofer-Verbund, -Allianzen und herausragende Projekte

### 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.

*Prof. Dr. Peter Gumbsch*

[www.materials.fraunhofer.de](http://www.materials.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz AdvanCer

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

*Dr. Andreas Kailer*

[www.advancer.fraunhofer.de](http://www.advancer.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Batterien

Die Allianz entwickelt für elektrochemische Energiespeicher (Batterien, Superkondensatoren) technische und konzeptionelle Lösungen mit den Kompetenzfeldern Material, System, Simulation und Testung.

*Dr. Leonhard Mayrhofer*

[www.batterien.fraunhofer.de](http://www.batterien.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung

Generative Fertigungstechniken sind konventionellen Techniken bei der Herstellung maßgeschneiderter, komplexer Bauteile 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](http://www.generativ.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Leichtbau

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

*Dr. Peter Michel, Dr. Michael Luke*

[www.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/verbuende-allianzen/Leichtbau.html](http://www.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/verbuende-allianzen/Leichtbau.html)

### Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

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

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

[www.nano.fraunhofer.de](http://www.nano.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Numerische Simulation von Produkten, Prozessen

Die Fraunhofer-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 Wissen aus der Oberflächen- und Produktionstechnik.

*Dr. Dirk Helm*

[www.nusim.fraunhofer.de](http://www.nusim.fraunhofer.de)



### **Fraunhofer-Projektgruppe Neue Antriebssysteme NAS**

Im Rahmen der Projektgruppe arbeitet das Fraunhofer IWM gemeinsam mit dem Fraunhofer ICT an der Entwicklung von neuen, effizienteren Antriebskonzepten für mobile und stationäre Anwendungen. Forschungsbereiche sind hybride Antriebe und Elektromobilität sowie konventionelle Antriebe. Schwerpunkte sind die Entwicklung von Lösungen zur dezentralen stationären Energieversorgung für Antriebe und Wärmenutzung sowie der Leichtbau im Antriebsstrang, um die Effizienz zu steigern. Das Fraunhofer IWM entwickelt in diesem Zusammenhang verbesserte, tribologische Konzepte für Antriebssysteme.

*Prof. Dr. Matthias Scherge*

[www.ict.fraunhofer.de/de/komp/nas.html](http://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/nas.html)

### **Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg**

Die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute und die Albert-Ludwigs-Universität bilden eine Allianz unter dem Dach des Leistungszentrums Nachhaltigkeit Freiburg. Sie haben das Ziel, zusammen mit Industriepartnern die fachübergreifenden Forschungsfragen für eine nachhaltige Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft zu beantworten und in konkrete Innovationen umzusetzen. Mit gemeinsamen Projekten, Veröffentlichungen und Patenten, durch eine Strategie für Innovation und Existenzgründung mit Industriepartnern, durch ein umfassendes Konzept für Lehre und Weiterbildung und das neugegründete Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) erschließt das Leistungszentrum die gemeinsamen Potenziale zu Themen der Nachhaltigkeit.

*Prof. Dr. Chris Eberl*

[www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de](http://www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de)

### **Fraunhofer-Leitprojekt Kritikalität Seltener Erden**

Sieben Fraunhofer-Institute entwickeln effizientere Herstellungsprozesse für Hochleistungsmagnete, optimieren deren Bauteilauslegung und erforschen Recyclingmöglichkeiten. Ziel ist es, den Primärbedarf an schweren Seltenerd-Elementen bei

zwei Demonstrator-Permanentmagneten zu halbieren. Das Fraunhofer IWM sucht Substitutionsmagnetmaterialien möglichst ohne Seltenerd-Elemente mit elektronentheoretischer Materialsimulation und elektronenmikroskopischer Materialcharakterisierung.

*Prof. Dr. Christian Elsässer*

[www.seltene-erden.fraunhofer.de](http://www.seltene-erden.fraunhofer.de)

### **Max-Planck – Fraunhofer Kooperationsprojekt HEUSLER**

Das Fraunhofer IWM in Halle und Freiburg erforscht gemeinsam mit zwei Max-Planck-Instituten in Dresden und Halle, welche strukturellen und chemischen Möglichkeiten es gibt, um auf der Basis von intermetallischen Heusler-Phasen neuartige Materialien zu erzeugen, die gute hartmagnetische Eigenschaften haben, aber keine Seltenerd-Elemente enthalten.

*Prof. Dr. Christian Elsässer*

[www.fraunhofer.de/delinstitute-einrichtungen/kooperationen/max-planck-kooperationen.html](http://www.fraunhofer.de/delinstitute-einrichtungen/kooperationen/max-planck-kooperationen.html)

### **Themenfeld »Transport-Speicherung« im zwanzig20 Verbundvorhaben HYPOS: Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany**

HYPOS hat zum Ziel, die partielle Grundlastfähigkeit von Wind- und Photovoltaikstrom durch Speicherung und Verteilung von elektrochemisch erzeugtem Wasserstoff zu erreichen. Das Fraunhofer IWM Halle gehört zu den Initiatoren des Vorhabens. Das Fraunhofer IWM Freiburg leitet eines von sechs Kern-Themenfeldern: Das Themenfeld »Transport, Speicherung« legt die Strategie zur Umnutzung von Ferngasleitungen und Salzkavernenspeichern für den Betrieb mit wasserstoffhaltigen Gasen fest und bewertet und koordiniert die dazu vorgelegten Forschungsanträge.

*Dr. Wulf Pfeiffer*

[www.hypos-eastgermany.de](http://www.hypos-eastgermany.de)

# VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM FREIBURG

## Fraunhofer-Innovationscluster und Spitzencluster

### **Innovationscluster Regional Eco Mobility 2030, Karlsruhe**

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

*Dr. Michael Luke*

[www.rem2030.de](http://www.rem2030.de)

### **Innovationscluster Technologien für den hybriden Leichtbau KITE hyLITE, Karlsruhe**

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

*Dr. Michael Luke*

[www.fahrzeugleichtbau.de](http://www.fahrzeugleichtbau.de)

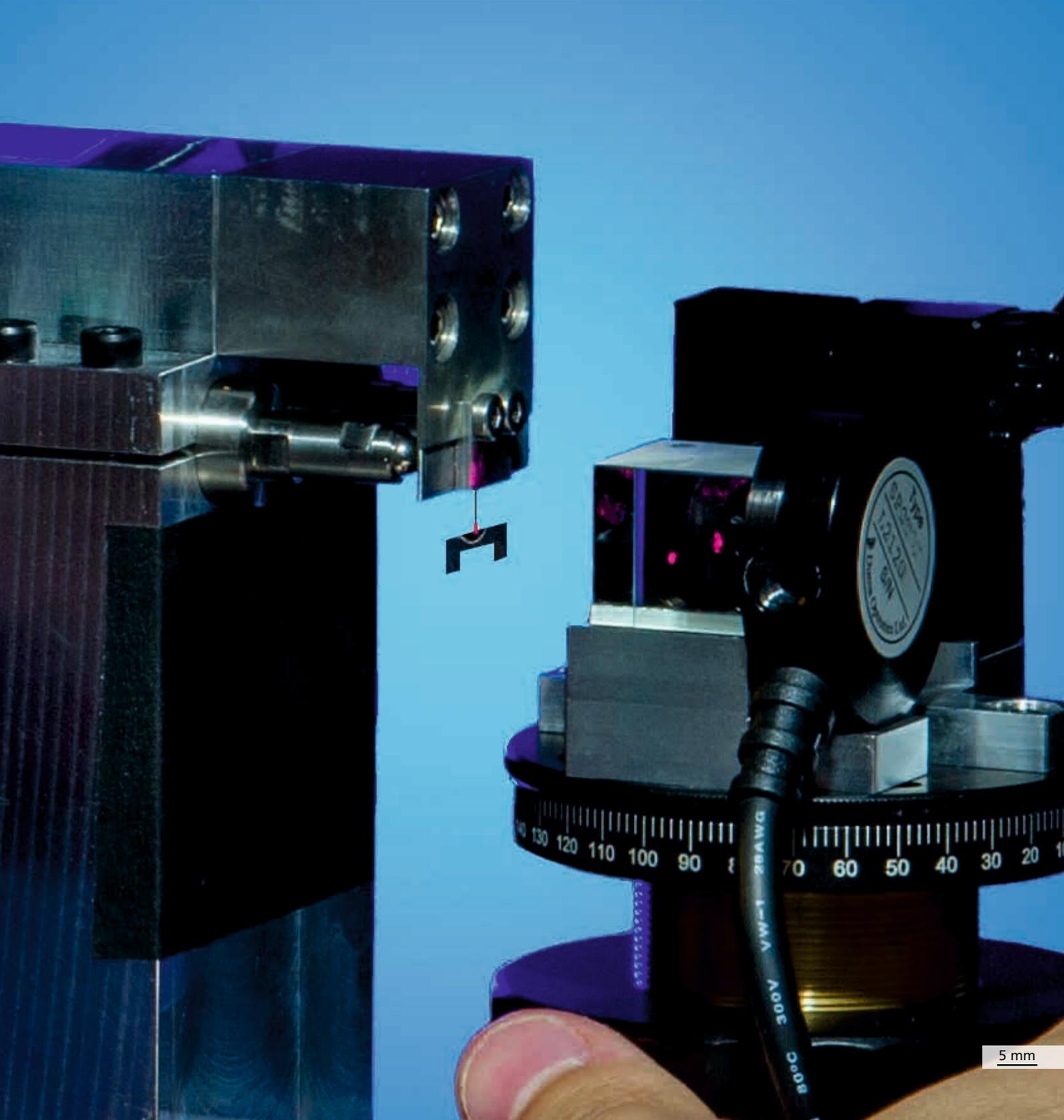
### **Spitzencluster microTEC Südwest**

Im Anwendungsfeld Smart Mobility unter dem Leitthema robuste und effiziente Sensorik erarbeitet der Cluster neue Technologieschritte und innovative Produkte der Mikrosystemtechnik. Für Wärmebildkameras mit hoher Auflösung auf Basis von ungekühlten mikromechanischen Far-Infrared-Bildsensoren hat der Cluster im Projekt RTFIR eine Technologieplattform für neue, wirtschaftliche Fertigungstechniken zur Erschließung von Massen Anwendungen entwickelt. Dabei hat das Fraunhofer IWM neue Prozessschritte für die Realisierung eines kostengünstigen Fertigungsprozesses für die teuren FIR-Optiken erarbeitet. Mit diesem nicht-isothermen Heißprägeverfahren können optische Linsen mit asphärischen Flächen aus speziellen IR-Gläsern (Chalkogenidgläser) in hoher Güte in Serienfertigung hergestellt werden.

*Dr. Günter Kleer*

[www.microtec-suedwest.de](http://www.microtec-suedwest.de)

*Resonanzprüfung von Mikrobautteilen  
und kleinen Probenvolumina zur  
Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit.*



5 mm

## Mechanische Prüfung und Bewertung

### Werkstoffprüfung und Extensometrie

- Servohydraulische, elektrodynamische und elektromechanische Prüfmaschinen für Prüfkräfte von 10 mN bis 8 MN mit Prüfkammern von 80 bis 2 500 K zur statischen, dynamischen und zyklischen Prüfung
- Servohydraulische Torsionsprüfanlage bis  $\pm 4$  kNm und  $\pm 50$  Grad
- Versuchsstände zur thermomechanischen Ermüdung bis 1 800 °C
- Klimatisierte Shakerprüfanlage für Vibrations- und Schocktests
- 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
- Autoklav zur Wasserstoff-Beladung bei bis zu 350 °C und 500 bar im Aufbau
- Wasserstoffgehaltsmessung mit der Trägergasheißeextraktion und der thermischen Desorptionsspektroskopie
- Permeationszellen zur Messung des Wasserstoff-Diffusionskoeffizienten
- Prüfstände für die Werkstoffcharakterisierung mit elektrochemischer in situ-Beladung mit Wasserstoff

### Werkstoffcharakterisierung für crashartige Belastungen

- Hochgeschwindigkeitsprüfeinrichtungen für stoß- und crashartige Belastungen bis 100 m/s (Druckgasbeschleunigungsanlage)
- Schnellzerreißmaschinen bis 500 kN und Abzugsgeschwindigkeiten bis 20 m/s
- Pendelschlagwerke von 1 bis 750 J
- Fallgewichtsanlagen bis 7 000 J
- Hochgeschwindigkeits-Videokameras mit bis zu 1 Million Bilder/s in Verbindung mit optischer ARAMIS-Dehnungsfeldanalyse
- Hochgeschwindigkeits-IR-Kamera zur Analyse adiabatischer Temperaturerhöhungen bei Crashbelastungen

### Bauteilprüfung

- 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

- Bauteil-Crashtests mit 3D-ARAMIS-Dehnungsfeldanalyse mit Hochgeschwindigkeits-Videokameras
- Mechanischer Solarmodulprüfstand
- Scannendes Laser-Doppler-Vibrometer

### Bewertung des Einsatzverhaltens bei Temperatur- und Medienbelastung

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

### Prüfung von Mikrokomponenten

- 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

### Prüfung von Mikroproben

- Piezogetriebene Prüfmaschinen für Zug-, Druck- und Dreipunktbiegeversuche sowie für Ermüdungsversuche von Mikroproben bis zu 100 Hz (typische Probendicken im Bereich von 20 bis 500  $\mu\text{m}$ )
- Resonanzapparaturen zur Ermüdung von Mikroproben unter Biege-, Torsions- und multiaxialer Belastung im Frequenzbereich von einigen 100 Hz bis in den kHz-Bereich
- Dunkelfeld- und Hellfeld-Mikroskope sowie vergrößernde Objektive mit Kameras zur berührungslosen Dehnungsmessung von Mikroproben unter Verwendung von digitaler Bildkorrelation
- 2-Photonen-Lithographiesystem (Nanoscribe) zur Erzeugung dreidimensionaler Polymerstrukturen mit Detailgenauigkeiten  $< 1 \mu\text{m}$ ; durch metallische Beschichtungen können somit auch mechanisch stärker beanspruchbare Metamaterialien erzeugt werden

## Material- und Oberflächencharakterisierung

### Ionen-/Elektronenmikroskopie

- Rasterelektronenmikroskope (REM) mit Röntgenanalyse (EDX, WDX) und Beugungsanalyse (EBSD)
- REM mit elektronenstrahlinduzierter Strommessung (EBIC) und Nadel-Manipulatorsystem-Präparationstechniken: Präzisionsdrahtsägen, diverse Schleif-/Poliermaschinen und Ar-Ionenätzenanlagen, Präzisionsschleif-anlagen für Zielpräparation, Plasma-Cleaner, C-Bedampfung und Platin Sputter-Coating

### Physikalisch/chemische Oberflächenanalytik

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

### Topografie- und Konturmessung

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

### Lichtoptische und spektrometrische Verfahren IR-UV

- Lichtmikroskope, Dunkelfeld- und DIK-Modus
- Quantitative Bildanalyse-systeme
- UV/VIS/NIR-Spektrometer
- FTIR-Spektroskopie und -Mikroskopie mit ATR-Messzellen
- Konfokales Raman-Mikroskop und Raman-Spektrometer mit Temperatur-Messzelle
- IR-Spannungsoptik-Messungen

### Röntgenografische Verfahren, Mikrostruktur- und Spannungsanalyse

- Röntgendiffraktometer für Spannungsmessung, Textur- und Phasenanalyse mit Hochtemperatureinrichtung bis 2300 K und Dünnschichtanalyseeinrichtung
- Mobile Diffraktometer und Roboterdiffraktometer für Eigenspannungsanalysen an Bauteilen
- Mikrodiffraktometer (laterale Auflösung von 100 µm)
- Bohrlochverfahren für tiefenauflösende Eigenspannungsanalysen

- Aktive Thermographieverfahren (Puls-Phasen-Thermographie PPT, Lock-in-Thermographie, Thermoelastische Spannungsanalyse TSA)

### Thermophysikalische Messverfahren

- Dynamische Differenzkalorimetrie bis 1600 °C
- Thermogravimetrische Analyse
- Differential-Thermoanalyse
- Thermomechanischer Analysator/Dilatometer für Messungen bis 1550 °C
- Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsmessung (Light-Flash-Methode) bis 2000 °C
- Lock-in-Thermographie mit elektrischer und optischer Anregung

### Charakterisierung von Schichten und Oberflächen, Tribologie

- 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 1500 Hz
- Nanoindenter mit Temperierung
- Scratch-Tester mit Scanning-Option
- Mikro- und Makrohärteprüfer (vollautomatisch und manuell), mobile Härtemessung
- Registrierender Eindruckversuch bis 600 °C
- Rücksprunghärtemessgerät
- Schichtdickenmessung (Wirbelstrom/Magnetinduktion)

### Material- und Spurenanalyse

- Massenspektroskopie mit induktions-gekoppeltem Plasma (ICP-MS) mit Laserablation, chemische Extraktion und elektrothermische Vaporisation
- Wasserstoffanalysator inkl. Auslagerungs-Ofen
- Stickstoff- und Sauerstoffanalysator
- Dichte- und Porositätsmesseinrichtungen
- Wasserstoffpermeationsprüfstand mit Zug- und Temperiereinrichtung
- Restgasanalysator
- Gaspermeationsmessgerät
- Thermische Desorptionsspektrometer zur Wasserstoffanalyse

## Berechnungswerkzeuge

### Software

- Aiiida, ANSYS, JYULB, MathCAD, Mathematica, MATLAB, Octave, Palabos, Quantum Espresso, Scilab, SimuFact, Tecplot, Thermocalc, VMD
- ABAQUS für Finite Elemente, Topologieoptimierung, Pre- und Postprocessor
- Calculix für FE-Berechnungen
- MSC PATRAN, Hypermesh: Vernetzungstool um FE-Netze zu erstellen
- Ls-Opt: Optimierungstool für die Ermittlung von Materialparameter, geometrische Formoptimierung, probabilistische Analysen etc.
- Fitit® zur Parameteridentifikation
- OOF2 für die Erstellung von 2D Finite-Elemente Netzen anhand von Mikrostrukturbildern
- optiSLang für multidisziplinäre Optimierung, Sensitivitätsstudien, Robustheitsbewertungen, Zuverlässigkeitsanalysen sowie Robust-Design-Optimierung
- FE-Postprocessing-Tools: Schädigungssimulation und Festigkeitsvorhersage in Faserverbundlaminaten mit Bohrungen und Kerben
- PAM-CRASH: Crashsimulation mit Material-Modellen für Deformations- und Versagensverhalten von Klebstoffen für Detail und Ersatzmodelle (mit Kalibrierung über Dicke)
- LS-DYNA: Crashsimulation mit Material-Modellen für Deformations- und Versagensverhalten von metallischen Werkstoffen (isotrop, anisotrop, poröse, Gusseisen mit Mapping der Porosität), von LFT (mit Mapping der Faserorientierung und Homogenisierung) und von Klebstoffen (für Detail und Ersatzmodelle)
- RADIOSS für die Crashsimulation
- SYSWELD: Schweißsimulation und Wärmebehandlungssimulation unter Berücksichtigung von metallurgischen Vorgängen. Wichtige Outputs: Eigenspannungsfeld, Verzug, Mikrostruktur
- ThoMat zur Lebensdauervorhersage von Hochtemperaturbauteilen mit Finite-Elemente Programmen
- CARES/Life: probabilistische Festigkeitsbewertung spröder Werkstoffe in Verbindung mit numerischen Simulationen
- VERB® zur Beurteilung von Komponenten mit rissartigen Defekten
- ATHENE, OREAS: Algorithmen zur Simulation von Mikrorissfeldern, zur Anwendung der Randelementmethode (REM)
- Programme für quantenmechanische Berechnungen und atomistische Simulationen von Werkstoffeigenschaften: Ab-initio-Dichtefunktionaltheorie, semiempirische Tight-Binding-Elektronenstrukturmethoden, Molekularstatistik- und Molekuldynamik-Methoden mit Bond-Order-Potenzialen und mit klassischen Mehrkörper-Kraftfeldern
- MatCalc zur Berechnung physikalischer und chemischer Vorgänge
- Thermokinetik-Software: Berechnung physikalischer und chemischer Vorgänge
- OpenFOAM für die Strömungsmechanik, Mehrphasenströmungen und Strömungsprozesse in der Tribologie
- SimPARTIX®: partikelbasierte Simulation auf Basis der Diskrete-Elemente Methode und der Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Methode
- ParaView: Visualisierung von Partikelsimulationen und Strömungssimulationen
- LIGGGHTS: partikelbasierte Simulation auf Basis der Diskrete-Elemente Methode
- DualSPHysics: partikelbasierte Simulation auf Basis der Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Methode
- Mayavi: Visualisierung von Partikelsimulationen und Strömungssimulationen
- SimPhoNy: integrierte Plattform für Multiscale Materials Modelling. Beinhaltet coupling and linking Models (concurrent and sequential), DFT, Atomistic, Coarse-Grained MD, FEM, CFD, CUDS
- LAMMPS: beinhaltet Grobkornzonen und Atomistik, mit OpenKIM
- GULP: atomistische molekulare Simulationen
- Kratos-FEM: FEM für CFD und strukturelle Mechanik, Partikel-Netz-Methoden
- AViz: atomistische Visualisierung
- Sqmpy: Client-Server und HPC-Job Management System
- Canopy: Python distribution

### Hardware

- High Performance Computing (HPC) Cluster mit Intel und AMD-Rechenknoten

**Preise und Ehrungen**

Emmy Noether-Nachwuchsgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG an Dr. Lars Pastewka zum Thema »Korrelation von Reibung und Verschleiß amorpher Materialien«  
01.10.14, Karlsruhe

Silberne Ehrennadel des Deutschen Verbands für Materialforschung und -prüfung DVM an Dr. Christoph Schweizer für »Modellierung thermomechanischer Wechselbelastungen metallischer Werkstoffe«  
27.04.15, Berlin

Werkstoffmechanikpreis 2015 des Kuratoriums des Fraunhofer IWM an Dr. Michael Schlesinger für »Experimentelle Untersuchung des zeitabhängigen Rissfortschritts unter thermomechanischer Ermüdung in Nickellegierungen und mechanismbasierte Modelle zur Lebensdauerbewertung«  
27.05.15, Halle (Saale)

Innovationspreis 2015 des Deutschen Kupferinstituts e.V. an Dr. Matthias Weber, Dr. Johannes Preußner und Dr. Dirk Helm für die »Mechanismenbasierte Modellierung des zeitabhängigen mechanischen Verhaltens von Kupferlegierungen zur numerischen Bauteilanalyse und -optimierung«  
04.11.2015, Berlin

**Dissertationen**

Carla Beckmann  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Probabilistische Methode zur Vorhersage des effektiven Materialverhaltens fester Schäume mit ungeordneter Mikrostruktur

Nils Beckmann  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Atomistische Simulation tribologischer Elementarprozesse bei nanokristallinen Übergangsmetallen

Roman Böttcher  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Zur Tribologie von strukturierten Ski-belägen auf Eis und Schnee

Daniel Braun \*  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Größeneffekte bei strukturierten tribologischen Wirkflächen

Thomas Breinlinger  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Simulation des Trocknens von Suspensionen

Angelika Brink  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Einlaufverhalten von geschmierten Stahl-Stahl-Paarungen unter Berücksichtigung der Mikrostruktur

Tiemo Kurt Bückmann \*  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Fabrication of Mechanical Metamaterials

Sascha Fliegner  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Micromechanical finite element modeling of long fiber reinforced thermoplastics

Tobias Grotjahn  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
PECVD Prozessüberwachung Wiederholbare Nutzung technischer Plasmen

Volker Hardenacke  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Verbesserung lokaler Spaltbruchmodelle unter Berücksichtigung mikromechanischer Vorgänge

Andreas Klemenz  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Atomistische Simulation der Materialmodifikation durch die Kohlenstoffallotrope Graphen und Kohlenstoffnanoröhren

Dominik Kürten  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Einfluss der tribochemischen Schmierstoffoxidation auf die wasserstoffinduzierte Wälzkontakttermüdung

Michael Mahler \*  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Entwicklung einer Auswertemethode für bruchmechanische Versuche an kleinen Proben auf der Basis eines Kohäsivzonenmodells

Anke Peguiron  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Atomistic Simulations of Silica by Sequential and Concurrent Multiscale Coupling. Applications to solid/liquid and solid/solid interfaces

Tobias Rasp  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Modellierung von Anisotropieentwicklung und Rissausbreitung beim Sintern dünner keramischer Schichten

Xinyi Zhang \*  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
TEM and STEM/EELS Studies of Diamond-Like Carbon (DLC) Films and Diamond Films

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

Dominik Dreja  
Hochschule Offenburg  
Optimierung eines Eigenspannungsmesssystems und Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Prozessparameter auf das Messergebnis (B)

Christian Eichheimer  
FernUniversität in Hagen  
Das LSQR-Verfahren zur Lösung linearer Gleichungssysteme (M)

Carl Fischer  
Hochschule Offenburg  
Einfluss der zyklischen, thermischen und mechanischen Belastungsgeschichte auf das Risschweißen und die Lebensdauer der Nickelbasisgusslegierung (M)

Lukas Fisel  
Hochschule Offenburg  
Entwicklung intelligenter wasserbasierter Schmierstoffe mit ionischen Flüssigkeiten (B)

Philipp Günther  
Hochschule Offenburg  
Einheitliche Modellierung der viskoplastischen Verformung von Alloy 617B in verschiedenen Zuständen durch Berücksichtigung der Mikrostruktur (M)

Sharif Hossain  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Development of T-stress solutions for applications to cracked components with secondary stresses (M)

Dennis Lüdecke  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Entwicklung und Konstruktion eines neuartigen Hochgeschwindigkeits-tribometers für die Gleitpaarungen Stahl und Polymer auf Asphalt oder Eis (M)

Simon Müller  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Analytische und numerische Untersuchungen zum Einfluss von Eigenspannungen und plastizitätsinduziertem Risschließen auf die Rissfortschrittskurve (M)

Madhan Murugesan  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Simulation of industrial forming process using the mechanism based damage model (M)

Christian Quintus  
Hochschule Offenburg  
Berechnung der Lebensdauer eines Rohrprüfkörpers unter thermomechanischer Belastung mit fortschrittlichen und herkömmlichen Methoden (M)

Axel Reichenbacher  
Hochschule Offenburg  
Generierung bruchmechanischer Lösungen zur Lebensdauerbewertung von gelochten Flachproben (B)

Thomas Reiser \*  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Experimentelle Untersuchung des Tribosystems Kolbenring-Zylinderlaufbuchse auf dem SRV-Tribometer (D)

Medhi Sadeghi  
Hochschule Offenburg  
Distributed Flow Control and Intelligent Data Transfer in High Performance Computing Networks (M)

Felix Schröckert  
Karlsruher Institut für Technologie KIT  
Scherung und Tiefenwirkung während des Einlaufs (M)

Lilia Schuster  
Technische Universität Kaiserslautern  
Validierung von bruchmechanischen Ansätzen für die Anwendung auf Bauteile unter thermischer Belastung (D)

Jannik Vatter  
Hochschule Offenburg  
Restlebensdauerbewertung eines Endüberhitzer-Sammlers und Identifikation dessen Streubandlage (B)

Stefan Vorndran  
Hochschule Offenburg  
Fraktographische Untersuchung der niederzyklischen Ermüdungsschädigung bei tiefen Temperaturen von EN AW 6061 T6 und EN 1.4435 (M)

Steffen Waidele  
Hochschule Offenburg  
Tribologische Charakterisierung mesogener und ionischer Schmierstoffe (B)

Julia Zimmermann de Assunção  
Federal University of Santa Catarina, Brasilien  
Influence of substrate roughness and film thickness on the structure and adhesion of DLC coatings (a-C:H) (B)

**(\*) vom Fraunhofer IWM Freiburg betreute Arbeit, Autorin/Autor jedoch nicht am Fraunhofer IWM**

**Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftler**

Daniel Mihaly Antok  
Hungarian Academy of Sciences,  
Ungarn  
13.04.-24.04.15

Georg Bahr  
ZAE Würzburg  
15.01.-31.08.15

Francesca de Gregorio  
Universita degli Studi Roma Tre,  
Italien  
01.03.-31.03.15

Oliver Lehmann  
Märkisches Werk GmbH  
01.01.-28.02.15

Kai Meng  
Chinesische Akademie für  
Wissenschaften Shenyang, China  
15.10.-31.12.15

Dr. Daniel Mihaly Mutter  
Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg – Materialforschungszentrum  
01.-31.12.15

Prof. Tony Paxton  
Queen's University Belfast – School  
of Mathematics and Physics, Irland  
01.01.-30.04.15

Dariush Seif  
Humboldt-Stipendium, University of  
California, LA, USA  
01.01.-30.11.15

Dr. Hongwu Song  
Chinesische Akademie für  
Wissenschaften Shenyang, China  
01.03.-31.12.15

Alberto Spagni  
Universita degli Studi di Modena  
e Reggio, Italien  
15.04.-15.07.15

Zilin Yan  
Johnson Matthey Technology  
Centre in Cleveland, England  
16.04.-09.05.15

**Vorlesungen  
WS 2014/2015**

**Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg**

Superconductivity I  
Prof. Dr. Christian Elsässer

**Hochschule Offenburg**

Konstruktionselemente  
Dr. Raimund Jaeger

**Karlsruher Institut für  
Technologie KIT**

Nanotechnologie für Ingenieure  
und Naturwissenschaftler  
Dr. Martin Dienwiebel, Dr. Hendrik  
Hölscher, Dr. Stefan Walheim

Bewertung von Schweißver-  
bindungen  
Dr. Majid Farajian

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

Prozesssimulation in der Um-  
formtechnik  
Dr. Dirk Helm

Tribologie  
Prof. Dr. Matthias Scherge,  
Dr. Martin Dienwiebel

**Vorlesungen SS 2015**

**Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg**

Mechanische Eigenschaften  
Prof. Dr. Chris Eberl

Werkstofftechnologien  
Prof. Dr. Chris Eberl

Superconductivity II  
Prof. Dr. Christian Elsässer

Computational Materials Physics I:  
Density Functional Theory  
Prof. Dr. Michael Moseler

**Karlsruher Institut für  
Technologie KIT**

Angewandte Werkstoffsimulation  
Prof. Dr. Peter Gumbsch, Dr. Silke  
Sommer, Dr. Dirk Helm, Dr. Matthias  
Weber, Dr. Anastasia August

Mechanik heterogener Festkörper  
Dr. Ingo Schmidt

**Hochschule Offenburg**

Schadenskunde  
Rolf Zeller

**Universität Siegen**

Composites II - Werkstoffverbunde  
Dr. Jörg Hohe

**Vom Fraunhofer IWM  
organisierte Fachveranstaltungen**

7th International Conference on  
Multiscale Materials Modelling  
MMM 2014  
Symposium A: Multiscale simula-  
tions and modeling for integrated  
materials engineering  
06.-10.10.14, Berkeley,  
CA, USA

Expertenkreissitzung Werkstoff-  
und Oberflächentechnik  
03.11.15, Freiburg

Symposium »Additive Fertigung  
in der Medizintechnik«  
Teil einer Seminarreihe der  
Fraunhofer-Allianz Generative  
Fertigung  
10.-11.11.15, Freiburg

Workshop Hochleistungskeramik:  
Fraunhofer Allianz AdvanCer –  
Schulungsprogramm Hochleis-  
tungskeramik Teil III: Konstruktion,  
Prüfung  
12.-13.11.15, Freiburg

**Weitere öffentlichkeits-  
wirksame Veranstaltungen**

Girls' Day  
23.04.15, Freiburg

Wissenschaftsmarkt  
10.-11.07.15, Freiburg

**Messen mit Fraunhofer IWM-  
Beteiligung**

12. Blechexpo – Internationale  
Fachmesse für Blechbearbeitung  
und Schweisstec-Internationale  
Fachmesse für Fügetechnologien  
03.-06.11.15, Stuttgart

Schaeffler Open Inspiration 2015  
04.11.15, Herzogenaurach

**Erteilte Patente 2015**

Jaeger, R.; Bierwisch, C.; Borchers, K.;  
Bremus Koebberling, E.; Dettling, M.;  
Engelhardt, S.; Graf, C.; Kluger, P.;  
Wegener, M.; Meyer W.; Krueger, H.;  
Tovar, G.; Novosel, E.; Refle, O.;  
Schuh, CH.; Seiler, N.; Riester, D.  
Photovernetzende Elastomere für  
Rapid Prototyping  
Patent-Nr. EP2621713

- Amann, T.; Kailer, A.; Herrmann, M.  
**Influence of electrochemical potentials on the tribological behavior of silicon carbide and diamond-coated silicon carbide**  
Journal of Bio- and Tribo-Corrosion 1/4 (2015) Art.30, 14 Seiten
- Baiker, M.; Helm, D.; Butz, A.  
**Determination of mechanical properties of polycrystals by using crystal plasticity and numerical homogenization schemes**  
Steel Research International 85/6 (2014) 988-998
- Baumeister, J.; Weise, J.; Hirtz, E.; Höhne, K.; Hohe, J.  
**Applications of aluminium hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles**  
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Special Issue: Composites, Compounds and Hybrid Structures (LightMat 2013) 45/12 (2014) 1099-1107
- Beckmann, N.; Romero, P.A.; Linsler, D.; Dienwiebel, M.; Stolz, U.; Moseler, M.; Gumbsch, P.  
**Origins of folding instabilities on polycrystalline metal surfaces**  
Physical Review Applied 2/6 (2014) 064004 1-7
- Bitzek, E.; Kermode, J.R.; Gumbsch, P.  
**Atomistic aspects of fracture**  
International Journal of Fracture 191/1-2 (2015) 13-30
- Böhme, W.; Reissig, L.  
**Capability of new high strength ADI-materials for automotive components under crash loading**  
Advanced Engineering Materials 17/8 (2015) 1189-1196
- Breinlinger, T.; Hashibon, A.; Kraft, T.  
**Simulation of the influence of surface tension on granule morphology during spray drying using a simple apillary force model**  
Powder Technology 283 (2015) 1-8
- Breinlinger, T.; Hashibon, A.; Kraft, T.  
**Simulation of the spray drying of single granules: the correlation between microscopic forces and granule morphology**  
Journal of the American Ceramic Society 98/6 (2015) 1778-1786
- Carraro, G.; Maccato, C.; Gasparotto, A.; Barreca, D.; Walter, M.; Mayrhofer, L.; Moseler, M.; Venzo, A.; Seraglia, R.; Marega, C.  
**An old workhorse for new applications: Fe(dpm)3 as a precursor for low-temperature PECVD of iron(III) oxide**  
Physical Chemistry Chemical Physics PCCP 17 (2015) 11174-11181
- Casajús, P.; Winzer, N.  
**Electrochemical noise analysis of the corrosion of high-purity Mg-Al alloys**  
Corrosion Science 94 (2015) 316-326
- De Barros Bouchet, M.I.; Matta, C.; Vacher, B.; Le-Mogne, Th.; Martin, J.M.; von Lautz, J.C.; Ma, T.; Pastewka, L.; Otschik, J.; Gumbsch, P.; Moseler, M.  
**Energy filtering transmission electron microscopy and atomistic simulations of tribo-induced hybridization change of nanocrystalline diamond coating**  
Carbon 87 (2015) 317-329
- Di Stefano, D.; Mrovec, M.; Elsässer, C.  
**First-principles investigation of hydrogen trapping and diffusion at grain boundaries in nickel**  
Acta Materialia 98 (2015) 306-312
- Dold, C.; Amann, T.; Kailer, A.  
**Influence of electric potentials on friction of sliding contacts lubricated by an ionic liquid**  
Physical Chemistry Chemical Physics PCCP 17/16 (2015) 10339-10342
- Erhart, A.; Haufe, A.; Butz, A.; Zapara, M.; Helm, D.  
**Implementation of a constitutive model for the mechanical behavior of TWIP steels and validation simulations**  
Key Engineering Materials 651-653 (2015) 539-544
- Fakih, B.; Dienwiebel, M.  
**The structure of tribolayers at the commutator and brush interface: A case study of failed and non-failed DC motors**  
Tribology International 92 (2015) 21-28
- Farajian, M.; Nitschke-Pagel, T.  
**Residual stress relaxation in welded large components**  
Materials Testing 57/9 (2015) 750-754
- Fischer, C.; Schweizer, C.; Seifert, T.  
**Assessment of fatigue crack closure under in-phase and out-of-phase thermomechanical fatigue loading using a temperature dependent strip yield model**  
International Journal of Fatigue 78 (2015) 22-30
- Fleischmann, E.; Konrad, C.; Preußner, J.; Völkl, R.; Affeldt, E.; Glatzel, U.  
**Influence of solid solution hardening on creep properties of single crystal nickel-based superalloys**  
Metallurgical and Materials Transactions A 46/3 (2015) 1125-1130
- Fu, Z.; Polfer, P.; Kraft, T.; Roosen, A.  
**Correlation between anisotropic green microstructure of spherical-shaped alumina particles and their shrinkage behavior**  
Journal of the American Ceramic Society 98/11 (2015) 3438-3444
- Fu, Z.; Polfer, P.; Kraft, T.; Roosen, A.  
**Three-dimensional shrinkage behavior of green tapes derived from spherical-shaped powders: experimental studies and numerical simulations**  
Journal of the European Ceramic Society 35/8 (2015) 2413-2425
- Gehrmann, J.; Pettifor, D.G.; Kolmogorov, A.N.; Reese, M.; Mrovec, M.; Elsässer, C.; Drautz, R.  
**Reduced tight-binding models for elemental Si and N, and ordered binary Si-N systems**  
Physical Review B 91 (2015) 054109 1-18
- Gurr, M.; Bau, S.; Burmeister, F.; Wirth, M.; Piedra-Gonzales, E.; Krebs, K.; Preußner, J.; Pfeiffer, W.  
**Investigation of the corrosion behavior of Ni/Al multilayer coatings in hot salt melts**  
Surface and Coatings Technology 279 (2015) 101-111
- Hassan, M.; Walter, M.; Moseler, M.  
**Interactions of polymers with reduced graphene oxide: van der Waals binding energies of benzene on graphene with physical chemistry**  
Chemical Physics PCCP 16/1 (2014) 33-37
- Haufe, A.; Erhart, A.; Butz, A.  
**A constitutive model for the simulation of the deformation behavior of TWIP steels**  
Key Engineering Materials 639 (2015) 411-418
- Held, A.; Walter, M.  
**Simplified continuum solvent model with a smooth cavity based on volumetric data**  
The Journal of Chemical Physics 141/17 (2014) 174108 1-13
- Hemmes, K.; Farajian, M.; Siegele, D.  
**Numerical investigation of welding residual stress field and its behaviour under multi-axial loading in tubular joints advanced materials research, residual stresses IX.**  
Selected, peer reviewed papers from the 9th European Conference on Residual Stresses, ECRS 2014 996 (2014) 788-793
- Hoffmann, M.W.G.; Mayrhofer, L.; Casals, O.; Caccamo, L.; Hernandez-Ramirez, F.; Lilienkamp, G.; Daum, W.; Moseler, M.; Waag, A.; Shen, H.; Prades, J.D.  
**A highly selective and self-powered gas sensor via organic surface functionalization of p-Si/n-ZnO diodes**  
Advanced Materials 26/47 (2014) 8017-8022
- Hohe, J.  
**Load and frequency interaction effects in dynamic buckling of soft core sandwich structures**  
Composite Structures 132 (2015) 1006-1018
- Hohe, J.; Beckmann, C.; Paul, H.  
**Modeling of uncertainties in long fiber reinforced thermoplastics**  
Materials and Design 66/Part B (2015) 390-399

- Hohe, J.; Siegele, D.; Bechler, E.; Nagel, G.  
**Standard and customized correlation of crack resistance curves and Charpy upper shelf energy for German reactor pressure vessel steels**  
International Journal of Pressure Vessels and Piping 134 (2015) 101-111
- Kadic, M.; Bückmann, T.; Schittny, R.; Gumbsch, P.; Wegener, M.  
**Pentamode metamaterials with independently tailored bulk modulus and mass density**  
Physical Review Applied 2/5 (2014) 054007 1-7
- Klemenz, A.; Pastewka, L.; Balakrishna, S.G.; Caron, A.; Bennewitz, R.; Moseler, M.  
**Atomic scale mechanisms of friction reduction and wear protection by graphene**  
NANO Letters 14/12 (2014) 7145-7152
- Körner, W.; Urban, D.F.; Elsässer, C.  
**Generic origin of subgap states in transparent amorphous semiconductor oxides illustrated for the cases of In-Zn-O and In-Sn-O**  
Physica Status Solidi A 212 (2015) 1476-1481
- Körner, W.; Urban, D.F.; Ramo, D.M.; Bristowe, P.D.; Elsässer, C.  
**Prediction of subgap states in Zn- and Sn-based oxides using various exchange-correlation functionals**  
Physical Review B 90/19 (2014) 195142 1-8
- Lagger, H.; Breinlinger, T.; Di Renzo, A.; Di Maio, F.P.; Korvink, J.; Moseler, M.; Bierwisch, C.  
**Influence of hydrodynamic drag model on shear stress in the simulation of magnetorheological fluids**  
Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 218 (2015) 16-26
- Lang, B.; Ziebarth, B.; Elsässer, C.  
**Lithium ion conduction in LiTi<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> and related compounds based on the NASICON structure: a first-principles study**  
Chemistry of Materials 27/14 (2015) 5040-5048
- Lenthe, W.C.; Echlin, M.P.; Trenkle, A.; Syha, M.; Gumbsch, P.; Pollock, T.M.  
**Quantitative voxel-to-voxel comparison of TriBeam and DCT strontium titanate three-dimensional data sets**  
Journal of Applied Crystallography 48/Part 4 (2015) 1034-1046
- Lepcha, A.; Maccato, C.; Mettenbörger, A.; Andreu, T.; Mayrhofer, L.; Walter, M.; Olthof, S.; Ruoko, T.-P.; Klein, A.; Moseler, M.; Meerholz, K.; Morante, J.R.; Barreca, D.; Mathur, S.  
**Electrospun black titania nanofibers: influence of hydrogen plasma-induced disorder on the electronic structure and photo-electrochemical performance**  
The Journal of Physical Chemistry C 119/33 (2015) 18835-18842
- Li, K.; Amann, T.; List, M.; Walter, M.; Moseler, M.; Kailer, A.; Rühle, J.  
**Ultralow friction of steel surfaces using a 1,3-diketone lubricant in the thin film lubrication regime**  
Langmuir 31/40 (2015) 11033-11039
- Li, S.; Li, Y.; Lo, Y.; Neeraj, T.; Srinivasan, R.; Ding, X.; Sun, J.; Qi, L.; Gumbsch, P.; Li, J.  
**The interaction of dislocations and hydrogen-vacancy complexes and its importance for deformation-induced proto nano-voids formation in alpha-Fe**  
International Journal of Plasticity 74 (2015) 175-191
- Linsler, D.; Schlarb, T.; Weingärtner, T.; Scherge, M.  
**Influence of subsurface microstructure on the running-in of an AlSi alloy**  
Wear, 20th International Conference on Wear Materials 332-333 (2015) 926-931
- Marchetto, D.; Feser, T.; Dienwiebel, M.  
**Microscale study of frictional properties of graphene in ultra high vacuum**  
Friction 3/2 (2015) 1-9
- May, M.; Hesebeck, O.; Marzi, S.; Böhme, W.; Lienhard, L.; Kilchert, S.; Brede, M.; Hiermaier, S.  
**Rate dependent behavior of crash-optimized adhesives – experimental characterization, model development, and simulation**  
Engineering Fracture Mechanics 133 (2015) 112-137
- Metzger, M.; Seifert, T.  
**Computational assessment of the microstructure-dependent plasticity of lamellar gray cast iron – part I: methods and microstructure-based models**  
International Journal of Solids and Structures 66 (2015) 184-193
- Metzger, M.; Seifert, T.  
**Computational assessment of the microstructure-dependent plasticity of lamellar gray cast iron – part II: Initial yield surfaces and directions**  
International Journal of Solids and Structures 66 (2015) 194-206
- Metzger, M.; Seifert, T.; Schweizer, C.  
**Does the cyclic J-integral delta J describe the crack-tip opening displacement in the presence of crack closure?**  
Engineering Fracture Mechanics 134 (2015) 459-473
- Noethe, M.; Rasp, T.; Kraft, T.; Kieback, B.  
**Theory of sintering in presence of pressure and torque**  
Journal of the American Ceramic Society 98/11 (2015) 3453-3459
- Oesterlin, H.; Maier, G.  
**Numerical assessment of thick walled power plant components under creep fatigue load with advanced models for deformation and lifetime**  
Materials at High Temperatures 31/4 (2014) 364-369
- Paul, H.; Luke, M.; Henning, F.  
**Combining mechanical interlocking, force fit and direct adhesion in polymer-metal-hybrid structures – evaluation of the deformation and damage behavior**  
Composites Part B: Engineering 73 (2015) 158-165
- Peguiron, A.; Colombi Ciacchi, L.; De Vita, A.; Kermode, J.R.; Moras, G.  
**Accuracy of buffered-force QM/MM simulations of silica**  
The Journal of Chemical Physics 142/6 (2015) 064116 1-12
- Pfeiffer, W.; Reisacher, E.; Windisch, M.; Kahnert, M.  
**The effect of specimen size on residual stresses in friction stir welded aluminum components**  
Advanced Materials Research, Residual Stresses IX; Selected peer reviewed papers from the 9th European Conference on Residual Stresses ECRS 2014; 996 (2014) 445-450
- Pinneker, V.; Eberl, C.; Sozinov, A.; Ezer, Y.; Kohl, M.  
**Evolution of local strain bands of different orientation in single crystalline Ni-Mn-Ga foils under tension**  
Journal of Alloys and Compounds 577/Supplement 1 (2013) 358-361
- Polfer, P.; Breinlinger, T.; Kraft, T.  
**Simulation of tape casting: Capabilities and potentials**  
CFI Ceramic Forum International, Berichte der deutschen Keramischen Gesellschaft DKG 92/10-11 (2015) E181-E186
- Preußner, J.; Oeser, S.; Pfeiffer, W.; Temmler, A.; Willenborg, E.  
**Microstructure and residual stresses of laser structured surfaces**  
Advanced Materials Research, Residual stresses IX; Selected, peer reviewed papers from the 9th European Conference on Residual Stresses ECRS 2014; 996 (2014) 568-573
- Rehl, A.; Klimesch, C.; Scherge, M.  
**Reibungsarme und verschleissfeste Aluminium-Silizium-Zylinder-lauflächen**  
MTZ Motortechnische Zeitschrift 74/12 (2013) 972-977
- Romero, A.P.; Pastewka, L.; von Lautz, J.; Moseler, M.  
**Surface passivation and boundary lubrication of self-mated tetrahedral amorphous carbon asperities under extreme tribological conditions**  
Friction 2/2 (2014) 193-208
- Salje, E.K.H.; Li, S.; Zhao, Z.; Gumbsch, P.; Ding, X.  
**Polar twin boundaries and nonconventional ferroelectric switching**  
Applied Physics Letters 106/21 (2015) 212907 1-4
- Scherge, M.; Linsler, D.; Schlarb, T.  
**The running-in corridor of lubricated metal-metal contacts**  
Wear 342-343 (2015) 60-64

- Schlesinger, M.; Schweizer, C.; Brontfeyn, Y.  
**Influences on the thermomechanical fatigue crack growth of the nickel Alloy 617**  
Materials Testing 57/2 (2015) 131-135
- Schweizer, F.; Asperheim, J.-I.; Stiele, H.-J.  
**Simulation und experimentelle Validierung von Temperaturen, Härtegut und Eigenspannungen bei der induktiven Wärmebehandlung**  
HTM Journal of Heat Treatment and Materials 70/2 (2015) 89-95
- Sebastiani, M.; Korsunsky, A.M.; Eberl, C.; Bemporad, E.; Pharr, G.M.  
**Discussion on »interfacial residual stress analysis of thermal spray coatings by miniature rind-core cutting combined with DIC method« by Zhu et al.**  
Experimental Mechanics 54/7 (2014) 1305-1306
- Seif, D.; Ghoniem, N.M.  
**A stochastic differential equations approach for the description of helium bubble size distributions in irradiated metals**  
Journal of Nuclear Materials, Proc. of 16th International Conference on Fusion Reactor Materials (ICFRM-16) 455/1-3 (2014) 516-521
- Seif, D.; Po, G.; Mrovec, M.; Lazar, M.; Elsässer, C.; Gumbsch, P.  
**Atomistically enabled nonsingular anisotropic elastic representation of near-core dislocation stress fields in  $\alpha$ -iron**  
Physical Review B 91 (2015) 184102 1-11
- Senn, M.; Schweizer, F.; Pfeiffer, W.  
**Universal concept for the optimization of step sizes in manufacturing processes**  
Procedia CIRP, in Proc. of 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations 31 (2015) 53-57
- Shi, Y.; Koch, D.; Hausherr, J.-M.; Neubrand, A.  
**Influence of specimen geometry and surface quality on the bending strength of short fiber-reinforced C/SiC**  
Materials Science Forum 825-826 (2015) 249-255
- Shimada, T.; Wang, J.; Araki, Y.; Mrovec, M.; Elsässer, C.; Kitamura, T.  
**Multiferroic vacancies at ferroelectric PbTiO<sub>3</sub> surfaces**  
Physical Review Letters 115/10 (2015) 107202 1-5
- Shimada, T.; Wang, J.; Ueda, T.; Uratani, Y.; Arisue, K.; Mrovec, M.; Elsässer, C.; Kitamura, T.  
**Multiferroic grain boundaries in oxygen-deficient ferroelectric lead titanate**  
NANO Letters 15 (2014) 27-33
- Stoyanov, P.; Linsler, D.; Schlarb, T.; Scherge, M.; Schwaiger, R.  
**Dependence of tribofilm characteristics on the running-in behavior of aluminum-silicon alloys**  
Journal of Materials Science 50/16 (2015) 5524-5532
- Stoyanov, P.; Merz, R.; Romero, P.; Wählich, F.C.; Torrents Abad, O.; Gralla, R.; Stemmer, P.; Kopnarski, M.; Moseler, M.; Bennewitz, R.; Dienwiebel, M.  
**Surface softening in metal-ceramic sliding contacts: an experimental and numerical investigation**  
ACS Nano 9/2 (2015) 1478-1491
- Straub, T.; Berwind, M.F.; Kennerknecht, T.; Lapusta, Y.; Eberl, C.  
**Small-scale multi-axial setup for damage detection into the very high cycle fatigue regime**  
Experimental Mechanics 55/7 (2015) 1285-1299
- Sun, D.-Z.; Ma, Y.; Andrieux, F.  
**Modeling of the influence of pore morphology on damage behavior of an aluminum die casting alloy**  
Materials Science Forum 794-796 (2015) 319-324
- Titus, M.S.; Echlin, M.P.; Gumbsch, P.; Pollock, T.M.  
**Dislocation injection in strontium titanate by femtosecond laser pulses**  
Journal of Applied Physics 118/7 (2015) 075901 1-7
- Ulas, S.; Bundschuh, S.; Jester, S.-S.; Eberl, C.; Kraft, O.; Hölscher, H.; Böttcher, A.; Kappes, M.M.  
**Mechanical properties of C58 materials and their dependence on thermal treatment**  
Carbon 68 (2014) 125-137
- Vondrous, A.; Bienger, P.; Schreijag, S.; Selzer, M.; Schneider, D.; Nestler, B.; Helm, D.; Mönig, R.  
**Combined crystal plasticity and phase-field method for recrystallization in a process chain of sheet metal production**  
Computational Mechanics 55/2 (2015) 439-452
- Weber, M.; Preußner, J.; Helm, D.  
**Numerische Analysen zur Ausscheidungskinetik und zum viskoplastischen Verformungsverhalten von Cu-Ni-Si-Legierungen**  
Metall: Fachzeitschrift für Metallurgie 69/3 (2015) 76-81
- Weygand, D.; Mrovec, M.; Hochrainer, T.; Gumbsch, P.  
**Multiscale simulation of plasticity in bcc metals**  
Annual Reviews of Material Research 45 (2015) 369-390
- Würdemann, R.; Kristoffersen, H.H.; Moseler, M.; Walter, M.  
**Density functional theory and chromium: insights from the dimers**  
The Journal of Chemical Physics 142/12 (2015) 124316
- Yoo, B.-G.; Boles, S.T.; Liu, Y.; Zhang, X.; Schwaiger, R.; Eberl, C.; Kraft, O.  
**Quantitative damage and detwinning analysis of nanotwinned copper foil under cyclic loading**  
Acta Materialia 81 (2014) 184-193
- Zheng, L.; Zhang, S.-H.; Helm, D.; Song, H.-W.; Song, G.-S.; Ye, N.-Y.  
**Twinning and detwinning during compression-tension loading measured by quasi in situ electron backscatter diffraction tracing in Mg-3Al-Zn rolled sheet**  
Rare Metals 34/10 (2015) 698-705
- Ziebarth, B.; Mrovec, M.; Elsässer, C.; Gumbsch, P.  
**Influence of dislocation strain fields on the diffusion of interstitial iron impurities in silicon**  
Physical Review B 92 (2015) 115309 1-11
- Ziebarth, B.; Mrovec, M.; Elsässer, C.; Gumbsch, P.  
**Interstitial iron impurities at grain boundaries in silicon: a first-principles study**  
Physical Review B 91 (2015) 035309 1-7

ZEITSCHRIFTEN

Bonk, C.; Scherge, M.

**Der Skibelag. Das unbekannte Wesen**  
SkiMAGAZIN 4 (2015) 65-67

Butz, A.; Zapara, M.; Helm, D.

**Modellierung von hochfesten und hochduktilen Blechwerkstoffen aus TWIP-Stahl**  
Wt Werkstatttechnik online 105 (2015) 047-048

BÜCHER, BUCHBEITRÄGE

Hashibon, A.; Elsässer, C.

**Density-functional theory study of point defects in Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>**  
Thermoelectric Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Nanomaterials; Eibl, O.; Nielsch, K.; Peranio, N.; Völklein, F. (Eds.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2015) 167-186

Liewald, M.; Schmid, P.; Helm, D.; Koch, A.; Tritschler, M.

**Kompensation des Rückfederungsverhaltens beim Prägen plattenförmiger Bauteile aus nichtrostenden Blechwerkstoffen**  
EFB-Forschungsbericht Nr. 399; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB), Hannover (2014) 1-128

VERÖFFENTLICHTE KONFERENZBEITRÄGE

Baumeister, J.; Weise, J.; Hirtz, E.; Höhne, K.; Hohe, J.

**Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles**  
Procedia Materials Science 4, in Proc. of 8th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams Metfoam 2013; Rabiei, A. (Ed.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande (2014) 317-321

Beckmann, C.; Farajian, M.; Hohe, J.; Siegele, D.

**Schädigungsmechanische Modellierung der Rissinitiierungsphase in Schweißverbindungen**  
in Tagungsband DVS-Congress 2015, DVS-Berichte Band 315; DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Düsseldorf (2015) 288-293

Beckmann, C.; Farajian, M.; Siegele, D.; Hohe, J.

**Modelling and simulation of fatigue crack initiation in welded joints based on crystal plasticity**  
in Proc. of 67th IIW Annual Assembly & International Conference 2014; International Institute of Welding (Ed.); International Institute of Welding, Paris, Frankreich (2014) paper XIII-2535-14 1-8

Bentele, R.; Burget, S.; Sommer, S.

**Rissfortschrittmessungen mittels Potentialsondenverfahren an Punktschweißverbindungen in hochfesten Stählen**  
in Tagungsband Werkstoffprüfung 2014; Grellmann, W.; Frenz, H. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM), Berlin (2014) 193-198

Bier, M.; Sommer, S.

**Modeling of self-piercing riveted joints for crash simulation - state of the art and future topics**  
10th European LS-DYNA Conference 2015; DYNAmore GmbH (Ed.); DYNAmore GmbH, Stuttgart (2015) 10 Seiten digital

Burget, S.; Sommer, S.

**Ermittlung der Festigkeitsbeeinflussung von pressgehärteten Stählen durch Punktschweißverbindungen**  
in Tagungsband Werkstoffprüfung 2014; Grellmann, W.; Frenz, H. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM), Berlin (2014) 111-116

Butz, A.; Zapara, M.; Helm, D.; Haufe, A.; Erhard, A.; Schneider, M.; Kampczyk, M.; Stenberg, N.; Hagstrom, J.; Croizet, D.; Biasutti, M.

**On the constitutive modelling of twip steels and its application to sheet metal forming simulations**  
in Proc. of 8th Forming Technology Forum Zurich 2015; Hora, P. (Ed.); ETH Zürich, Institute of Virtual Manufacturing, Zürich, Schweiz (2015) 35-40

Dehning, C.; Bierwisch, C.; Kraft, T.

**Co-simulations of discrete and finite element codes**  
Meshfree Methods for Partial Differential Equations VII; Lecture notes in computational science and engineering 100; Griebel, M.; Schweitzer, M.A. (Eds.); Springer International Publishing, Cham, Schweiz (2015) 61-79

Dittmann, F.; Varfolomeev, I.; Schuster, L.; Kaffenberger, M.

**Untersuchungen zur Berücksichtigung des Constraint-Einflusses in der analytischen Fehlerbewertung**  
in Tagungsband 47. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge und Bauteilsicherheit; Hübner, P. (Ed.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM), Berlin (2015) 189-198

Farajian, M.; Hardenacke, V.; Klaus, M.; Schweizer, F.; Pfeiffer, W.; Siegele, D.

**Numerical studies of shot peening of high strength steels and the related experimental investigations by means of hole drilling, x-ray and synchrotron diffraction analysis**  
in Proc. of 12th International Conference on Shot Peening ICSP12; Wagner, L. (Ed.); Drukarnia GS, Krakau, Polen (2014) 317-323

Farajian, M.; Hardenacke, V.; Preußner, J.; Pfeiffer, W.; Siegele, D.

**Description of the surface and subsurface material conditions after applying high frequency mechanical impact (HFMI) treatment, shot peening and deep rolling**  
in Proc. of 67th IIW Annual Assembly & International Conference 2014; International Institute of Welding (Ed.); International Institute of Welding, Paris, Frankreich (2014) paper XIII-2532-14 1-11

Fliegner, S.; Hohe, J.; Haspel, B.; Weidenmann, K.A.

**Micromechanical modeling of the nonlinear deformation of LFTS under consideration of the effects of interface damage**  
in Proc. of 20th International Conference on Composite Materials; International Committee on Composite Materials (ICCM) (Ed.); International Committee on Composite Materials (ICCM), Surrey, England (2015) 11 Seiten

Fromm, A.; Trondl, A.; Strecker, H.; Krappitz, M.; Thissen, D.; Kübler R.

**Aging-effects of polymeric encapsulation on the mechanical characteristics of solar panels and embedded components**  
in Proc. of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EU PVSEC 2014; Bokhoven, T.P.; Jäger-Waldau, A.; Helm, P. (Eds.); WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co. Planungs KG, München (2014) 3121-3125

Gall, M.; Hohe, J.

**Simulation of adhesive joints in composite structures with efficient virtual determination of cohesive zone parameters**  
in Tagungsband NAFEMS-Seminar »Simulation von Composites – eine geschlossene Prozesskette?«; NAFEMS Deutschland GmbH (Ed.); NAFEMS Deutschland GmbH, Bernau am Chiemsee (2014) 324-332

Gall, M.; Luke, M.; Gauch, H.; Hohe, J.

**Ermüdungsverhalten gewickelter CFK Werkstoffe für den Einsatz im Kryodruck-Wasserstoffspeicher**  
in Tagungsband 42. Tagung DVM-Arbeitskreis Betriebsfestigkeit »Betriebsfestigkeit – Bauteile und Systeme unter komplexer Belastung«; Brune, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2015) 91-104

Haarman, C.J.W.; Hekman, E.E.G.; Augenstein, E.; Helm, D.; Sketchley, P.; Koopman, H.F.J.M.

**Design of a crevice-free bi-metallic intramedullary reamer**  
in Proc. of Design of Medical Devices Conference DCM Europe 2014; University of Twente, Twente, Niederlande (2015) 2 Seiten

Hardenacke, V.; Farajian, M.; Siegele, D.

**Modelling and simulation of the high frequency mechanical impact (HFMI) treatment of welded joints**  
in Proc. of 67th IIW Annual Assembly & International Conference 2014; International Institute of Welding (Ed.); International Institute of Welding, Paris, Frankreich (2014) paper XIII-2533-14 1-10

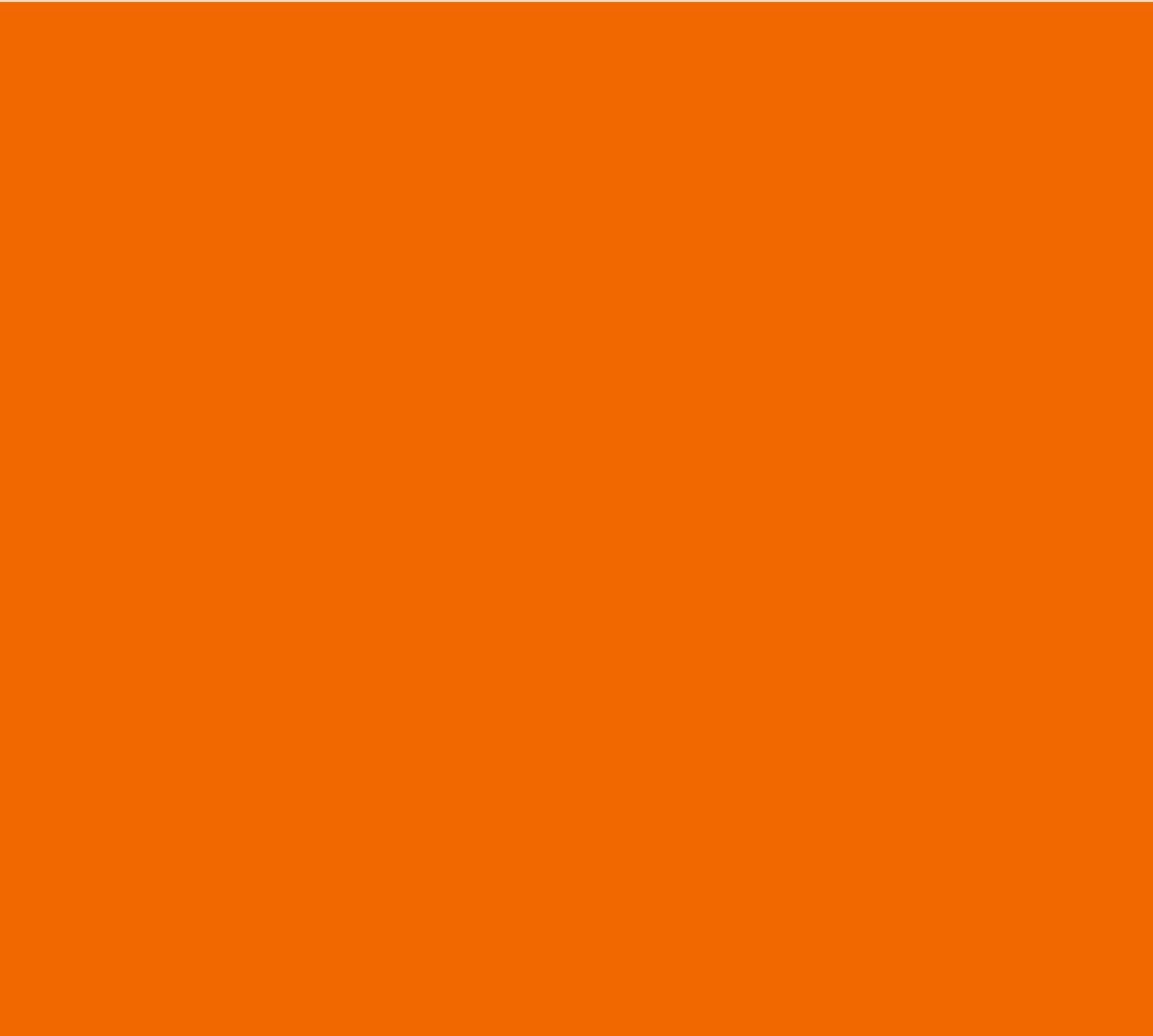
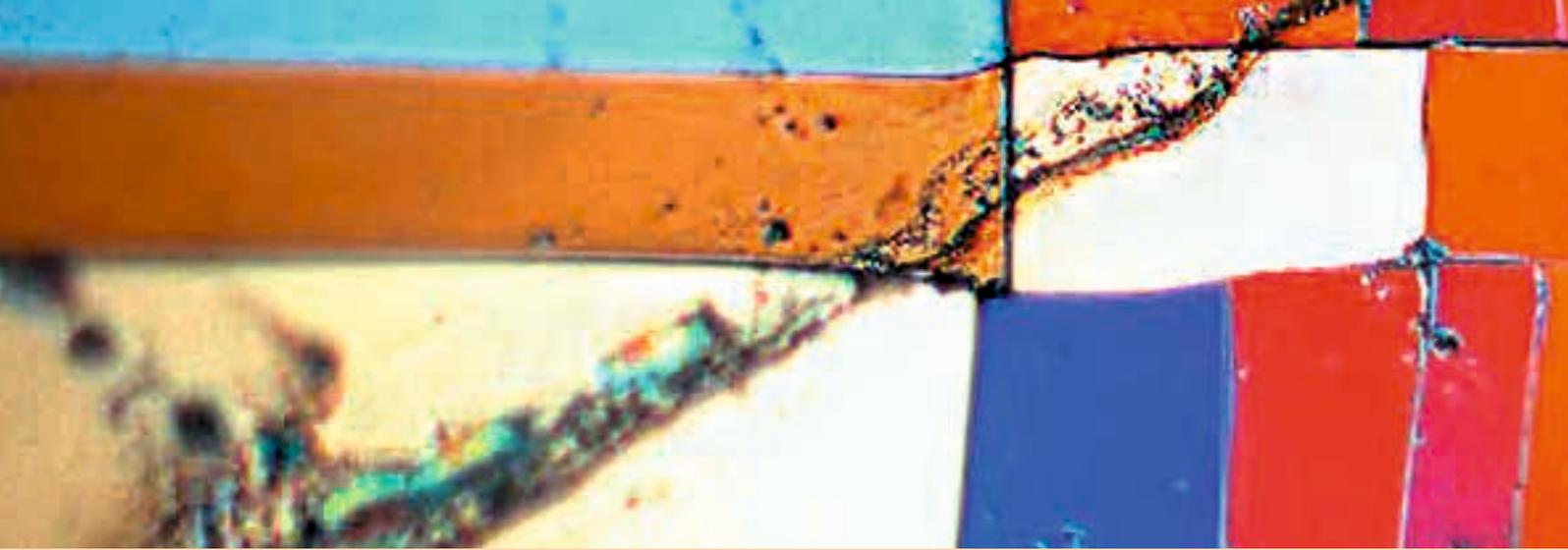
Hardenacke, V.; Farajian, M.; Siegele, D.

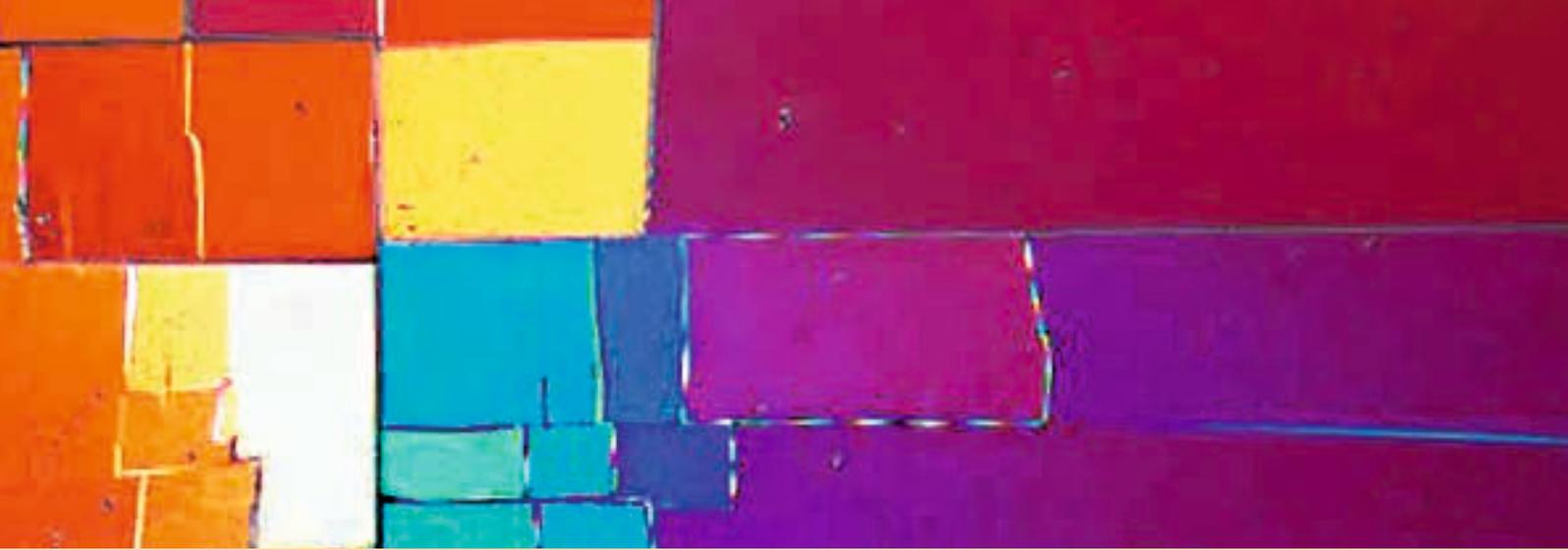
**Simulation of the high frequency hammer peening process for improving the fatigue performance of welded joints**  
in Proc. of 12th International Conference on Shot Peening ICSP12; Wagner, L. (Ed.); Drukarnia GS, Krakau, Polen (2014) 359-364

Hartmann, P.; Kleer, G.; Rist, T.

**ZERODUR®: new stress corrosion data improve strength fatigue prediction**  
in Proc. of International Society for Optics and Photonics SPIE Vol. 9573, Optomechanical Engineering 2015; Hatheway, A.E. (Ed.); SPIE, Bellingham WA, USA (2015) 957304 1-12

- Hashibon, A.; Gurr, M.; Polfer, P.; Burmeister, F.; Kraft, T.  
**Computational design of wetting and spreading behaviour for enhanced in-vitro-diagnostic applications**  
 in Proc. of 2nd International Conference on MicroFluidic Handling Systems MFHS 2014; Koltay, P.; Lötters, J.; Urban, G. (Hrsg.); University of Freiburg, Freiburg (2014) 176-180
- Hashibon, A.; Rasp, N.; Franklin, N.; Tziakos, I.; Pinte, D.; Dadvand, P.; Roig, C.; Mattila, K.; Puurtinen, T.; Hiltunen, K.; Roman-Perez, G.; Garcia, G.; Adler, J.  
**Common universal data structures (CUDS) and vocabulary in the SimPhoNy integrated framework**  
 in Proc. of INTOP 2015, the 3rd Workshop of the European Multiscale Modelling Cluster: Interoperability in Multiscale Modelling of Nano-enabled Materials; Kilappa, V.; Mattila, K. (Eds.); University of Jyväskylä, Department of Physics, Jyväskylä, Finland (2015) 21-22
- Hemmes, K.; Farajian, M.; Siegele, D.  
**Numerical investigation of welding residual stress field and its behaviour under multiaxial loading in tubular joints**  
 in Proc. of 67th IAWQ Annual Assembly & International Conference 2014; International Institute of Welding (Ed.); International Institute of Welding, Paris, Frankreich (2014) paper XIII-2534-14 1-8
- Hohe, J.; Beckmann, C.; Paul, H.  
**A probabilistic elasticity model for long fiber reinforced materials with uncertain local fiber orientation**  
 PAMM Special Issue: 85th Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM) 14/1; Steinmann, P.; Leugering, G. (Hrsg.); Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2014) 551-552
- Hübsch, O.; Maier, G.; Riedel, H.; Somsen, C.; Klöwer, J.; Maas, P.  
**Einfluss der Mikrostruktur der Legierung Alloy 800H auf die viskoplastische Verformung unter Ermüdungsbeanspruchung**  
 in Tagungsband 37. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe; Stahlinstitut VDEh (Hrsg.); Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2014) 133 1-12
- Hüggenberg, D.; Speicher, M.; Klenk, A.; Zickler, M.; Schwienheer, M.; Wang, Y.; Oesterlin, H.; Maier, G.  
**Hochtemperatur-Werkstoffteststrecke HWT II – Begleitende experimentelle und numerische Untersuchungen an Werkstoffen und Komponenten**  
 in Tagungsband 37. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe; Stahlinstitut VDEh; Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2014) 64-82
- Klitschke, S.; Böhme, W.  
**Crashverhalten von Stählen im Automobilbau bei unterschiedlichen mehrachsigen Belastungen**  
 in Tagungsband Werkstoffprüfung 2014; Grellmann, W.; Frenz, H. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM), Berlin (2014) 213-218
- Maier, G.; Günther, P.; Oesterlin, H.  
**Comparison of superheater header designs made of P91 and Alloy 617B under creep-fatigue loading using standard EN 12952 and advanced models**  
 in Proc. of 40th MPA-Seminar: Fit for the Future? – Problems in Material Technology, Design and Life Time Evaluation of Existing and Future Power Plants; MPA Universität Stuttgart (Hrsg.); Materialprüfungsanstalt Universität, Stuttgart (2014) 20 Seiten digital
- Müller-Köhn, A.; Janik, J.; Neubrand, A.; Klemm, H.; Moritz, T.; Michaelis, A.  
**Fabrication of short fiber reinforced SiCN by injection molding of preceramic polymers**  
 High Temperature Ceramic Matrix Composites 8: Ceramic Transactions, Volume 248; Proc. of 8th International Conference on High temperature ceramic matrix composites HTCCM; Zhang, L.; Jiang, D. (Eds.); John Wiley Sons Inc., Hoboken, NJ, USA (2014) 381-389
- Pagenkopf, J.; Baiker, M.; Helm, D.  
**On physics-based crystal plasticity models: application to process chain simulation of steel metals**  
 PAMM 14/1 Special Issue: 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Steinmann, P.; Leugering, G. (Eds.); Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2014) 333-334
- Paul, H.; Schweizer, F.; Hangs, B.  
**Evaluation of process induced residual stresses in continuous fiber-reinforced hybrid thermoplastics composites**  
 in Proc. of 16th European Conference on Composite Materials 2014 ECCM 16; European Society Composite Materials (2014) 8 Seiten digital
- Pfeiffer, W.; Höpfel, H.  
**Peen forming of ceramics – a new chipless shaping technique**  
 a collection of Papers Presented at the 38th International Conference on Advanced Ceramics and Composites January 27-31, 2014 Daytona Beach, Florida Developments in Strategic Materials and Computational Design V: Kriven, W.M.; Zhu, D.; Moon, K.I.; Hwang, T.; Wang, J.; Lewinsohn, C.; Zhou, Y. (Eds.), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA (2015) 229-236
- Reißig, L.; Nofal, A.; Böhme, W.; Reichert, T.; Al Masry, H.  
**Crash behavior of ADI steering knuckles**  
 in Proc. of 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron SPCI 10; Boeri, R.; Massone, J.M.; Rivera, G. (Eds.); INTEMA – UNMdP-CONICET, Mar del Plata, Bs. As.; Argentinien (2014) 15-19
- Ruck, J.; Othmani, Y.; Lube, T.; Khader, I.; Kailer, A.; Böhlke, T.  
**Macroscopic damage modeling for silicon nitride**  
 PAMM 15/1 Special Issue: 86th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Zavarise, G.; Cinnella, P.; Campiti, M. (Eds.); Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2015) 147-148
- Schmitt, P.; Maier, G.; Schwienheer, M.; Oechner, M.; Oesterlin, H.; Riedel, H.; Mohrmann, R.  
**Methoden zur Lebensdauerbewertung von Kraftwerkskomponenten unter flexibler Betriebsweise – Experimente zur Kriechermüdungsbelastung**  
 in Tagungsband 37. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe; Stahlinstitut VDEh; Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2014) 35-52
- Senn, M.  
**An integrated surrogate modeling approach for materials and process design**  
 in Proc. of 3rd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering ICME 2015; Poole, W.; Christensen, S.; Kalidindi, S.; Luo, A.; Madison, J.; Raabe, D.; Sun, X. (Eds.); John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA (2015) 331-338
- Sommer, S.; Burget, S.  
**Characterization and modeling of the fracture behavior of spot welded joints in press hardened steels for crash simulation**  
 in Proc. of METEC and 2nd European Steel Technology and Application Days ESTAD Conference 2015; Stahlinstitut VDEh (Hrsg.); Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2015) 9 Seiten
- Sun, D.-Z.; Trondl, A.; Klitschke, S.; Böhme, W.  
**Deformation and damage behavior of different steels for automotive application under multiaxial crash loading**  
 in Proc. of METEC and 2nd European Steel Technology and Application Days ESTAD Conference 2015; Stahlinstitut VDEh (Hrsg.); Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2015) 10 Seiten
- Varfolomeev, I.; Windisch, M.; Sinnema, G.  
**Anwendung des dehnungsbasierten Versagensbewertungsdiagramms auf Strukturen mit Oberflächenfehlern**  
 in Tagungsband 47. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge und Bauteilsicherheit; Hübner, P. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM), Berlin (2015) 179-188
- Weber, M.; Helm, D.; Preußner, J.; Pfeffer, K.; Eisenbart, M.; Klotz, U.E.  
**Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steckkontakten aus Cu-Ni-Si-Legierungen unter Berücksichtigung der Mikrostruktur**  
 in Proc. of 5th Connectors Symposium 2015 Electrical and Optical Connectors; Song, J. (Hrsg.); Hochschule Westfalen-Lippe, Lemgo (2015) 151-195
- Zapara, M.; Augenstein, E.; Helm, D.  
**Prediction of damage in cold bulk forming processes**  
 PAMM Special Issue: 85th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM), 14/1; Steinmann, P.; Leugering, G. (Hrsg.); Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2014) 1037-1040





**AUSGEWÄHLTE  
FORSCHUNGSERGEBNISSE  
STANDORT HALLE**

## Gruppen



### Thermoplastbasierte Faserverbund-Halbzeuge

Die Gruppe entwickelt anwendungsspezifische kurz-, lang- und endlosfaserverstärkte Thermoplastverbunde sowie prototypische Halbzeuge. Besondere Berücksichtigung finden die Verarbeitungseinflüsse auf die resultierenden Materialeigenschaften. Die Umsetzung prozesstechnischer Aufgabenstellungen erfolgt vom Labor- bis in den Pilotmaßstab.

*Ivonne Jahn | [ivonne.jahn@iwmh.fraunhofer.de](mailto:ivonne.jahn@iwmh.fraunhofer.de)*



### Faserverbundstrukturen

In der Gruppe steht die Bewertung des Einsatzes von polymerbasierten Faserverbundwerkstoffen in hochbelasteten Leichtbaustrukturen im Fokus. Zur Charakterisierung des mechanischen Verhaltens sowohl unter einsatz- als auch prozessbedingten Belastungen wenden wir speziell angepasste experimentelle und numerische Methoden an.

*Dr. Ralf Schlimper | [ralf.schlimper@iwmh.fraunhofer.de](mailto:ralf.schlimper@iwmh.fraunhofer.de)*



### Polymerbasiertes Materialdesign

Die Gruppe arbeitet an Fragestellungen im Bereich Kautschuk und Nanopartikel-Komposite sowie der Optimierung von thermoplastischen Matrices. Die Materialforschungsaktivitäten widmen sich dabei der gezielten Einstellung von Verstärkung, Dissipation, Kristallisationszustand und Matrix-Füller-Wechselwirkung.

*Prof. Dr. Mario Beiner | [mario.beiner@iwmh.fraunhofer.de](mailto:mario.beiner@iwmh.fraunhofer.de)*



### Hochleistungsthermoplaste

Der Schwerpunkt der Gruppe liegt in der Bauteil- und Technologieentwicklung für thermoplastische Leichtbaustrukturen auf Basis von endlosfaserverstärkten Halbzeugen. Die Entwicklung startet bei der virtuellen Prozess- und Strukturauslegung und vollzieht sich bis zur prototypischen Bauteilfertigung.

*Dr. Matthias Zscheck | [matthias.zscheck@iwmh.fraunhofer.de](mailto:matthias.zscheck@iwmh.fraunhofer.de)*

» Das Leichtbaupotenzial von Faserverbundkunststoffen haben viele Industriekunden erkannt. Unser Ziel ist es nachzuweisen, dass sich faserverstärkte Kunststoffe auch in Großserie kosteneffizient fertigen lassen. Mit unseren Anlagen im Pilotmaßstab bieten wir dafür ideale Möglichkeiten.«



## GESCHÄFTSFELDLEITER

Prof. Dr. Peter Michel | Telefon +49 345 5589-203 | peter.michel@iwmmh.fraunhofer.de

### Fokus

Das Geschäftsfeld Polymeranwendungen ist Material- und Prozess-Spezialist für faserverstärkte Hochleistungsthermoplaste und innovative Kautschuk-Komposite für den Einsatz in Großserien. Unter dem Motto »das richtige Material in die richtige Anwendung« beschäftigen wir uns mit Fragestellungen von der Auswahl der Rohstoffe über die Verarbeitungstechnologie, die daraus resultierende Verarbeitungs-Struktur- und Struktur-Eigenschaftsbeziehung bis hin zu den angestrebten Bauteileigenschaften. Die betrachteten Materialgruppen werden in einem skalenübergreifenden Ansatz untersucht und charakterisiert. Wir bedienen Kunden im Umfeld der Mobilitätsanwendungen Automobil, Flugzeug und Schienenfahrzeug und bieten die komplette Entwicklungskette vom Materialdesign bis zum geprüften prototypischen Bauteil in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Pilotanlagenzentrum (PAZ) in Schkopau an.

### Bemerkenswertes aus 2015

Das Jahr 2015 war geprägt durch die Umstrukturierung des Geschäftsfeldes, das sich seit Mai in einer neuen Gruppenstruktur präsentiert. Neben der bereits etablierten Gruppe Polymerbasiertes Materialdesign setzt sich das Geschäftsfeld aus den drei neu gebildeten Gruppen Thermoplastbasierte Faserverbund-Halbzeuge, Hochleistungsthermoplaste und der Gruppe Faserverbundstrukturen zusammen.

In Zusammenarbeit mit den Fraunhofer-Instituten IAP, IME und ISC starteten wir das marktorientierte strategische Vorlaufforschungsprojekt BISYKA, die sich mit der Optimierung und Entwicklung synthetischen Kautschuks befasst. Das Material soll ein Eigenschaftsprofil bekommen, das sich dem des Naturkautschuks annähert. Außerdem haben wir die ersten Projekte im neuen Themenschwerpunkt thermoplastische Komposite begonnen. In engem Kundenkontakt wurden zahlreiche Bauteilabmusterungen auf den Großmaschinen im Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum für Polymersynthese und Polymerverarbeitung PAZ vorgenommen. Zudem konnten wir mit BioFrame ein weiteres Projekt im Rahmen des Spitzenclusters BioEconomy gewinnen.

Mit einem feierlichen Festakt würdigten wir gemeinsam mit der Bundesministerin für Bildung und Forschung, Prof. Dr. Johanna Wanka, und dem Ministerpräsidenten des Landes Sachsen-Anhalt, Dr. Reiner Haseloff, das 10-jährige Bestehen des Fraunhofer PAZ in Schkopau.

# ENTWICKLUNG VON BIOBASIERTEN UNIDIREKTIONALEN TAPES

Gruppe

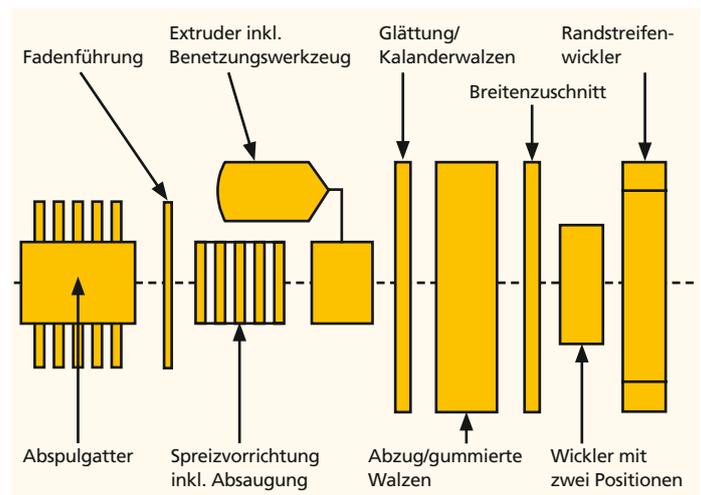
**Thermoplastbasierte Faserverbund-Halbzeuge**

Ivonne Jahn | Telefon +49 345 5589-474 | ivonne.jahn@iwmh.fraunhofer.de

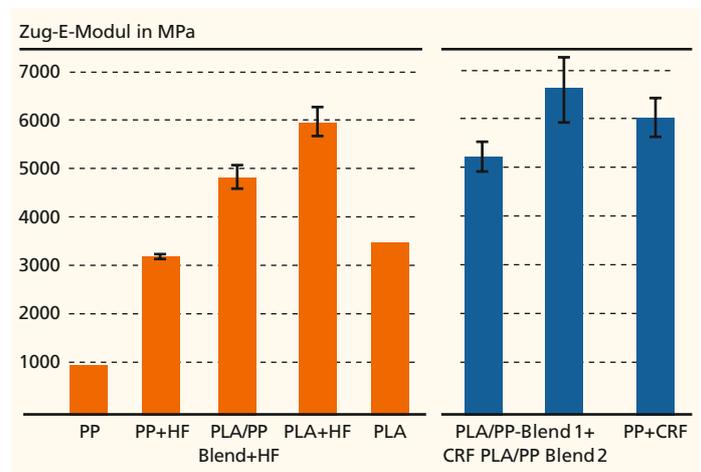
Durch gesetzliche Vorgaben muss der Schadstoffausstoß aus dem Autoverkehr bis zum Jahr 2020 deutlich gesenkt werden. Die Industrie ist deshalb auf der Suche nach kreativen Lösungen, etwa für Gewichtseinsparungen. Ein wichtiger Trend dabei: Metallische Werkstoffe werden durch Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) ersetzt. Diese weisen durch ihre hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte ein hohes Leichtbaupotenzial auf. Weitere positive Charakteristika sind ihr erhebliches Energieaufnahmevermögen, ihre guten Dämpfungseigenschaften sowie ihre Korrosions- und Witterungsbeständigkeit. Als Materialklasse mit dem größten Potenzial sind hierbei endlosfaserverstärkte Thermoplast-Systeme anzusehen, deren Faserorientierung direkt an den Lastverlauf im Einsatzfall angepasst werden kann. Die Entwicklung nachhaltiger und leistungsfähiger Materialkonzepte ist eine entscheidende Voraussetzung, um wirtschaftliche Verfahren und Anwendungen in zukünftigen Schlüsseltechnologiebereichen wie der Elektromobilität umsetzen zu können.

## Werkstoffe und Verfahren

Die nachhaltige und leistungsfähige Materialbasis für die biobasierten Verbundwerkstoffe mit unidirektional ausgerichteten Fasern bilden Cellulose regeneratfasern als Verstärkungsfasern und Polymilchsäuren als Polymermatrix. Ein Überblick zur Verfahrenstechnik ist in Abbildung 1 zu sehen. Hierbei werden Faserrovings mittels Direktimpregnierung zu einem UD-Tape verarbeitet. Die Fasern werden durch eine statische und dynamische Spreizeinrichtung so abgelegt, dass sie gleichmäßig in das Werkzeug einlaufen können, wo die Benetzung erfolgt. Ein Wellenprofil ermöglicht die Imprägnierung der Fasern, wodurch sich Druckgradienten innerhalb der Rovings ausbil-



1 Herstellungsverfahren für unidirektional verstärkte Verbundwerkstoffe.



2 Charakterisierung der Polymilchsäure-Blend-Eigenschaften (links Holz-Polymerwerkstoff mit 30 % Buchenholzfasern, rechts BioUD-Laminat mit 25 % Cellulose regeneratfasern).



*Bio-UD-Tape aus einem Polymilchsäure (PLA)-Blend und Celluloseregeneratfasern (CRF).*

den und somit die Schmelze zwischen die Fasern eingebracht werden kann. Das verwendete Werkzeug ermöglicht eine im Industriemaßstab einzigartige Wirtschaftlichkeit, da die Tapes bis zu einer Breite von 500 mm mit einer Produktionsgeschwindigkeit von bis zu 20 m/min hergestellt werden können. Die Weiterverarbeitung erfolgt über die Konsolidierung zu lastgerecht ausgelegten Bio-Laminaten, die zum Beispiel als Verstärkungselemente in Leichtbaustrukturen Anwendung finden. Spritzgussbauteile können durch diese Verstärkungen höhere Belastungen aufnehmen. Derzeit wird beispielsweise an biobasierten Lösungen für spezielle Baugruppen gearbeitet, die künftig im Interieur von Autos eingesetzt werden könnten. Am Fraunhofer IWM werden innovative Verfahren, Werkzeuge und Materialkombinationen entwickelt sowie Spritzgusswerkzeuge optimiert und angepasst, um das Potenzial für Leichtbau und damit den Klimaschutz durch biobasierte Verbundwerkstoffe zu heben. Die Entwicklungen setzen beginnend mit der Materialentwicklung im Labormaßstab ein und werden schrittweise in den Pilotmaßstab übertragen.

### **Charakterisierung von Bio-Laminaten**

Gegenwärtig wird materialseitig an der Entwicklung eines Polymilchsäure-Blends gearbeitet. Hier gilt es, die komplexen Wechselwirkungen, die sich zwischen den Grenzflächen des Blends und der Celluloseregeneratfaser ausbilden, aufzuklären und aufeinander abzustimmen. Das Modellsystem hierfür sind Holz-Polymer-Werkstoff-Formulierungen, zu denen eine umfangreiche Wissensbasis vorliegt. In Abbildung 2 links sind die Ergebnisse aus Zugversuchen der neuen Blendsysteme vergleichend mit herkömmlichen Holz-Polymer-Werkstoffen dargestellt. Es zeigt sich kein signifikanter Einfluss des gekop-

pelten PLA/PP Blends auf das E-Modul. Weiterhin ordnen sich alle Werte im Bereich des Erwartungswertes der einfachen Mischungsregel an.

Neben der Analyse und dem Design neuer Materialien ist auch die Weiterentwicklung der Verarbeitungstechnologie nötig. Herkömmliche Systeme zum Erzeugen unidirektionaler Verbundwerkstoffe sind für die Verarbeitung von Standardkunststoffen, wie Polypropylen, und Standardfasern, zum Beispiel auf Basis von Glas, ausgelegt. Mit den ersten Entwicklungen konnte die technologische Verarbeitung von biobasierten unidirektionalen Tapes realisiert werden. Abbildung 2 (rechts) zeigt auf Basis des Standes der aktuellen Materialentwicklung die mechanischen Kennwerte in Faserrichtung. Es ist ein deutlicher Effekt des Kopplers im PLA/PP Blend 2 zu erkennen, und für die lineare Mischungsregel liegen alle Verbundsysteme über den zu erwartenden Werten.

Dr. Andre Rappthel, Stephan Lehmann

# RÖNTGEN-CT AN THERMOPLASTISCHEN FASERVERBUNDSTRUKTUREN

Gruppe

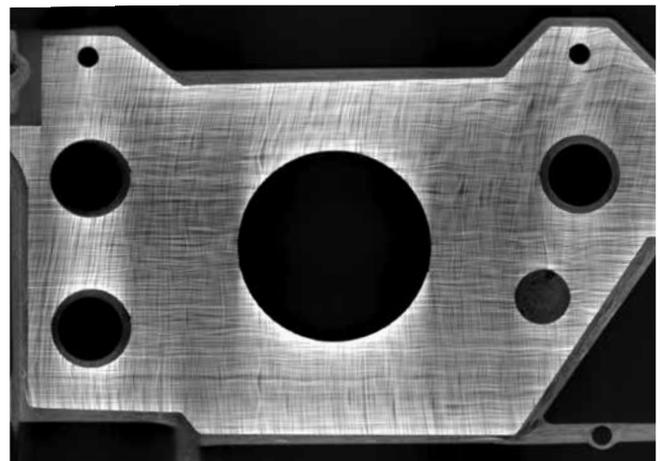
**Faserverbundstrukturen**

Dr. Ralf Schlimper | Telefon +49 345 5589-263 | ralf.schlimper@iwmh.fraunhofer.de

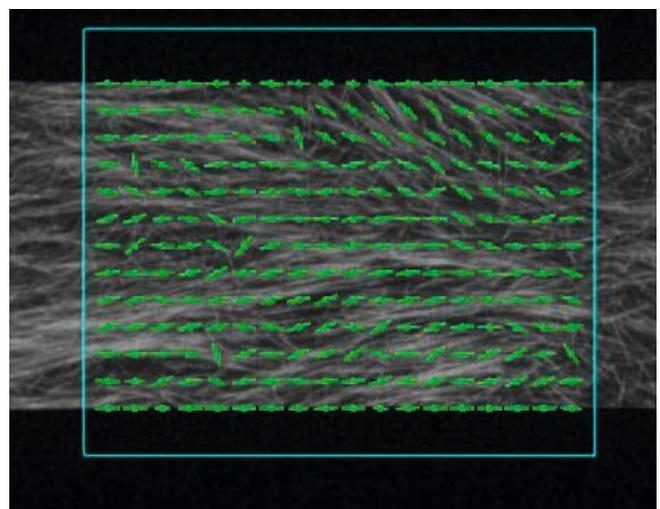
Leichtbau in Fahrzeugstrukturen wird durch Klimaschutzbestimmungen und Ressourcenknappheit immer bedeutender. Metallische Werkstoffe werden in Automobilkomponenten zunehmend durch faserverstärkte Kunststoffe (FVK) ersetzt. In aktuellen FuE-Projekten geht es darum, deren Einsatzgebiet auf mechanisch hochbelastete, tragende Bauteilstrukturen zu erweitern. Insbesondere thermoplastische Faserverbundwerkstoffe mit Endlosfaserverstärkung gewinnen aufgrund ihrer schnellen Verarbeitbarkeit sowie ihrer hohen Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte an Bedeutung. Die Verstärkungsfasern werden in Form vorimprägnierter und vorkonsolidierter Halbzeuge mit unidirektionaler Faserausrichtung (UD-Tapes) in das Bauteil eingearbeitet und der mechanischen Beanspruchung optimal angepasst. Mit dieser lastgerechten Auslegung wird das Leichtbaupotenzial des Werkstoffs bestmöglich ausgenutzt. Dies führt jedoch dazu, dass bereits bei geringen Abweichungen von der vorgegebenen Orientierung der Verstärkungsfasern eine Verminderung der mechanischen Performance auftritt.

## Röntgen-Computertomographie

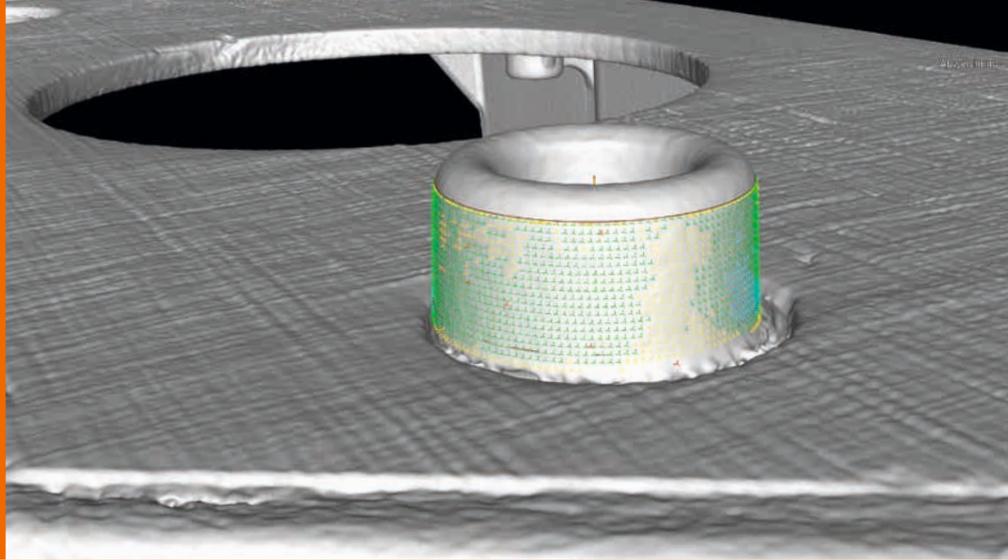
Mittels Röntgen-Computertomographie, bei der die innere Struktur eines Materials dreidimensional und zerstörungsfrei abgebildet und anschließend analysiert werden kann, lassen sich sowohl der Faserverlauf als auch weitere fertigungsbedingte Fehlstellen in den Bauteilen identifizieren. Mit der Anlage RayScan 200E können auf diese Weise Objekte mit der Größe eines Pkw-Frontendträgers gescannt werden (Bild Seite 71 links). Der Frontendträger im Auto fungiert als Aufnahme für Scheinwerfer, Kühler, Haubenschloss und gegebenenfalls Sensorik (zum Beispiel Abstandssensoren). Damit



1 UD-Tape-verstärktes (90°/0°) Bauteil.



2 Vektorielle Darstellung der Faserorientierung eines UD-Tape-verstärkten Bauteils.



*Röntgen-CT-Anlage RayScan 200E mit UD-Tape-verstärktem (schwarz eingefärbt) Frontendträger (links). Geometrische Vermessung eines Anschraubdoms (Durchmesser 11 mm, rechts).*

er im Betrieb den Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen gerecht wird, sind unter anderem die Einhaltung der vorgegebenen Faserorientierung, die weitgehende Porenfreiheit des spritzgegossenen Bauteils sowie dessen geometrische Maßhaltigkeit und Verzugsfreiheit entscheidend. Anhand von Röntgen-CT-Aufnahmen der am Fraunhofer-Pilotanlagencentrum für Polymersynthese und Polymerverarbeitung PAZ hergestellten Technologie-Demonstratoren wurden diese Parameter sowohl qualitativ als auch quantitativ untersucht, um entwicklungsbegleitend Rückschlüsse auf die optimalen Fertigungsparameter gewinnen zu können.

#### **Analyse eines UD-Tape-verstärkten Frontend-Trägers**

Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch den 3D-Bilddatensatz eines Ausschnitts des Frontendträgers (roter Bereich im Bild oben, links). Dabei handelt es sich um einen Bereich des Bauteils aus Langglasfaser-verstärktem Thermoplast (LFT), der durch vorkonfektionierte Lamine aus mehreren UD-Tape-Einzellagen verstärkt ist. Zur Bewertung der Qualitätsmerkmale wurde zunächst die Geometrie des Bauteils anhand des 3D-Bilddatensatzes vermessen. Mithilfe von idealisierten, geometrischen Körpern, die an die 3D-Bilddaten angefügt wurden, konnte die Einhaltung der Soll-Geometrie, wie zum Beispiel der Formtoleranzen, überprüft werden. Das Bild oben rechts zeigt die geometrische Vermessung eines Anschraubdoms.

Erheblichen Einfluss auf die mechanische Performance des Bauteils hat die Ausrichtung der Verstärkungsfasern. Durch Schnittbilder lassen sich die Ausrichtungen der UD-Tape-Einzellagen (hier im 0°/90°-Laminataufbau) lagenweise analysieren. Außerdem konnten abhängig von den Fertigungs-

parametern bei der Herstellung der UD-Tapes Faserwelligkeiten in der Lagenebene festgestellt werden. In den LFT-Bereichen des Bauteils stellt sich abhängig von der Bauteilgeometrie und den Fertigungsparametern im Spritzgussprozess eine lokale Faserorientierungsverteilung ein. Mittels 3D-Bildanalyse konnten die Langfaserbündel in einem Bildausschnitt eines LFT-Bereichs segmentiert und deren Orientierungen in Bezug auf ein vorgegebenes Bauteil-Koordinatensystem automatisiert vermessen werden. Abbildung 2 zeigt die im Bildausschnitt ermittelten Faserorientierungen in einer anschaulichen, vektoriellen Darstellung. Auf diese Weise konnte die sich einstellende Faserorientierungsverteilung mit den Fertigungsparametern korreliert werden, um insbesondere an geometrisch komplexen Stellen durch eine Optimierung der Prozessparameter eine optimale Faserverteilung zu gewährleisten. Für die weiterführende Analyse des strukturellen mechanischen Verhaltens des Bauteils lassen sich die ermittelten lokalen Faserorientierungen in Finite-Elemente Programmen weiterverarbeiten.

Durch den Einsatz von Röntgen-CT in Verbindung mit 3D-Bildanalyse lassen sich demnach die komplexen Korrelationen zwischen den Prozessbedingungen bei der Verarbeitung von faserverstärkten Kunststoffen und der resultierenden Mikrostruktur des Werkstoffs einerseits sowie zwischen der Mikrostruktur und dem daraus resultierenden Werkstoffverhalten andererseits effektiv untersuchen. Dies führt insbesondere bei der Entwicklung neuer FVK-Fertigungstechnologien zu einer signifikanten Effizienzsteigerung und trägt zu einem verbesserten Verständnis des Werkstoffverhaltens bei.

Thomas Wagner

# KAUTSCHUKBASIERTE KOMPOSITE FÜR REIFENANWENDUNGEN

Gruppe

**Polymerbasiertes Materialdesign**

Prof. Dr. Mario Beiner | Telefon +49 345 5589-247 | mario.beiner@iwmh.fraunhofer.de

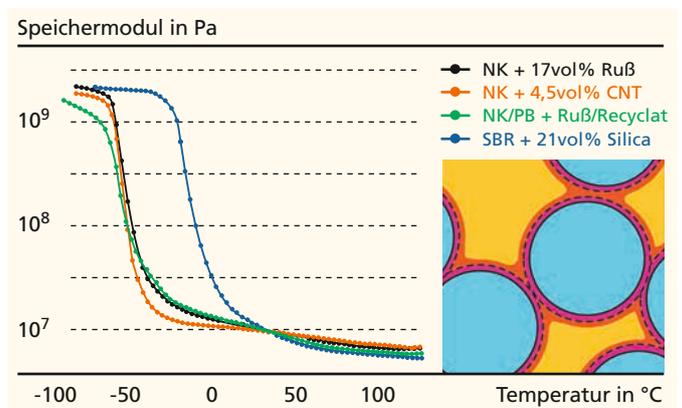
Kautschukbasierte Komposite, wie sie für Reifenlaufflächen eingesetzt werden, sind komplexe Materialien, die neben dem während der Reifenherstellung vernetzten Kautschuk viele Zuschlagstoffe und Additive enthalten. Während die Kautschukkomponente dem Material gummitypische Eigenschaften wie die reversible Verformbarkeit verleiht, ermöglicht es die Zugabe von nanoskaligen Füllstoffen wie Ruß oder Silica, andere mechanische Eigenschaften wie Härte, Modul oder Abriebfestigkeit zu beeinflussen. Diese Kenngrößen können über Füllstoffart und -anteil eingestellt werden. In Kompositen für Reifen ist der Füllstoffanteil so hoch, dass sich ein durchgehendes »Füllstoffnetzwerk« ausbildet, das die mechanischen Eigenschaften dominiert. Detailliertes Verständnis und gezielte Anpassung dieses Füllstoffnetzwerks sind deshalb von zentraler Bedeutung für die Entwicklung optimierter Komposite für Reifen und wichtiger Forschungsgegenstand am Fraunhofer IWM.

## Wege zur Optimierung des Füllstoffnetzwerks

Vergleichende Untersuchungen mittels dynamisch-mechanischer Analysemethoden an einer Vielzahl von etablierten und neuartigen kautschukbasierten Kompositen zeigen, dass das Füllstoffnetzwerk nicht nur die aggregierten Füllstoffpartikel selbst, sondern auch viskoelastische Elemente enthält, die von immobilisierten, glasartigen Kautschuksegmenten an der Oberfläche der Füllerpartikel gebildet werden (Schema in Abbildung 1). Obwohl die immobilisierte Fraktion der Kautschukmatrix sehr klein ist und wohl nur 1-3 Volumenprozent des gesamten Kautschuks im Komposit ausmacht, ist ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften dramatisch, da sich glasige Kautschukbrücken zwischen den Füllerpartikeln bilden. Wenn der glasige Kautschukanteil sukzessive erweicht

(zum Beispiel durch Temperaturerhöhung), kann sich der Modul des gesamten Kompositmaterials halbieren (Abbildung 1). Die enormen Auswirkungen der glasigen Kautschukbrücken auf die Festigkeit belegen deren Bedeutung für die anwendungsbezogene Optimierung von Kompositmaterialien. Die Eigenschaften der glasigen Kautschukbrücken hängen naturgemäß stark von Füllstoff-Matrix-Wechselwirkung ab und können basierend auf nicht-linearen Schermessungen quantifiziert werden. Derartige Aussagen helfen bei der anwendungsgerechten Auswahl von Kompositkomponenten und der Bewertung des Potenzials neuer Grundstoffe. Die Modifizierung des Füllstoffnetzwerks ist auch ein vielversprechender Weg zur Minimierung des Rollwiderstands und damit von Kraftstoffverbrauch und Emissionen.

Dr. Anas Mujtaba



1 Speichermodul  $G'(T)$  für vier Komposite mit ähnlicher Verstärkung bei ca. 30°C, aber unterschiedlichem Erweichungsverhalten (links). Schema eines Füllstoffnetzwerks mit glasigen Kautschukbrücken (rechts).

# LEICHTBAUSTRUKTUREN AUS FASERVERSTÄRKTEN THERMOPLASTEN

Gruppe

**Hochleistungsthermoplaste**

Dr. Matthias Zschoyge | Telefon +49 345 5589-475 | matthias.zschoyge@iwmm.fraunhofer.de

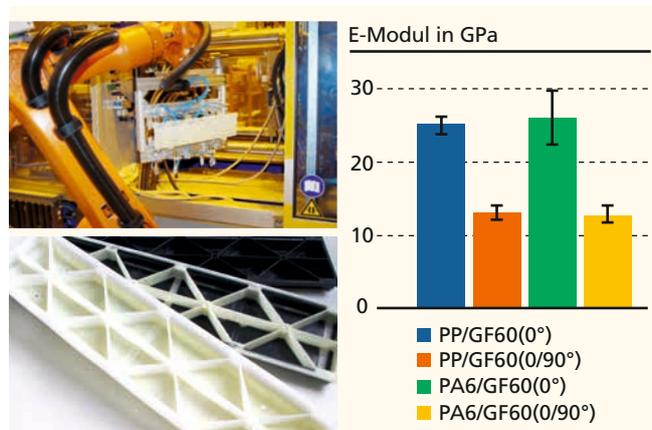
Endlosfaserverstärkte Thermoplaste verfügen über hervorragende mechanische Eigenschaften wie hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten sowie ein ausgezeichnetes Energieaufnahmevermögen. Durch die Kombination mit kurz- oder langfaserverstärkten Thermoplasten in einem neuartigen, am Fraunhofer IWM entwickelten Hybrid-Spritzgussprozess lassen sich geometrisch komplexe Bauteile und sehr kurze Fertigungszeiten realisieren. Das bietet deutliche Vorteile für die Herstellung von serientauglichen und hoch belastbaren Leichtbaustrukturen vor allem für Automobilanwendungen. Neben der Reduzierung des Fahrzeuggewichts lassen sich die faserverstärkten Thermoplaste zudem wesentlich einfacher wiederverwerten als herkömmliche duroplastische Faserkunststoffverbunde.

## Automatisierte Fertigungszelle

Für die Realisierung des Hybrid-Spritzgussprozesses wurde am Fraunhofer PAZ in Schkopau eine vollautomatisierte Fertigungszelle (Abbildung 1, links oben), bestehend aus einer Spritzgussanlage, einem Sechs-Achs-Roboter, einer Infrarot-Heizstation und einem Versuchswerkzeug im Technikumsmaßstab aufgebaut. Die verschiedenen Teilschritte umfassen die Entnahme des Faserverbund-Laminats durch den Roboter, die anschließende Erwärmung in der Infrarot-Vorheizstation, die automatisierte Laminatpositionierung in das Formgebungswerkzeug und das Warmumformen, das Umspritzen mit der Formmasse sowie das Auswerfen des finalen Hybridbauteils. Mithilfe dieser Automatisierungszelle wurden am Beispiel des hier dargestellten Biegeträgers (Abbildung 1, links unten) systematische Prozess- und Materialparameterstudien durchgeführt. Als wichtige Prozesseinflussgrößen wurden hierbei

beispielsweise die Laminat- und Werkzeugtemperatur sowie die Umformgeschwindigkeit identifiziert. Für die Strukturauslegung des Biegeträgers sind darüber hinaus mechanische Kennwerte erforderlich, welche beispielsweise im Zugversuch bestimmt werden. In Abbildung 1, rechts, sind die experimentell ermittelten E-Moduli für die untersuchten Materialsysteme Polypropylen/Glasfaser (PP/GF60) und Polyamid/Glasfaser (PA6/GF60) im unidirektionalen Aufbau (0°) und im Kreuzverbund (0/90°) dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich die E-Moduli der beiden unterschiedlichen Materialsysteme erwartungsgemäß nicht sehr stark unterscheiden, da die mechanischen Eigenschaften in dieser Materialrichtung im Wesentlichen durch die Glasfasern bestimmt werden.

Patrick Zierdt, Peter Stache



1 Automatisierte Fertigungszelle für die Herstellung von thermoplastbasierten Leichtbaustrukturen (links oben). Biegeträger in thermoplastischer Hybridbauweise (Länge 400 mm, links unten). Experimentell ermittelte E-Moduli von endlosfaserverstärkten Thermoplasten (rechts).

# BIOLOGISCHE UND MAKROMOLEKULARE MATERIALIEN

## Gruppen



### Technologien für Biofunktionale Oberflächen

Wir charakterisieren und optimieren die Oberflächeneigenschaften von Polymerbauteilen und -folien und entwickeln Verfahren zur inline-Diagnostik. Durch angepasste Beschichtungen steuern wir gezielt die Biofunktionalität und reduzieren beispielsweise die Biofilmbildung.

*Prof. Dr. Andreas Heilmann | [andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de](mailto:andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de)*



### Charakterisierung medizinischer und kosmetischer Pflegeprodukte

Mit maßgeschneiderter Analytik und effizienten Testmodellen für Wirkstoffe, Mundpflegeprodukte, Therapeutika und Dentalmaterialien entwickeln wir Lösungen für die Entwicklung zahnmedizinischer und kosmetischer Pflegeprodukte.

*Dr. Andreas Kiesow | [andreas.kiesow@iwmh.fraunhofer.de](mailto:andreas.kiesow@iwmh.fraunhofer.de)*



### Bewertung von Materialien der Medizintechnik

Wir untersuchen und bewerten die morphologischen und mikromechanischen Eigenschaften von biologischen und biomedizinischen Materialien und medizinisch relevanten Kunststoffen. Dafür nutzen wir spezielle Präparationstechniken sowie elektronenmikroskopische und röntgenographische Untersuchungsmethoden.

*Dr. Sven Henning | [sven.henning@iwmh.fraunhofer.de](mailto:sven.henning@iwmh.fraunhofer.de)*



### Naturstoffkomposite

Die Gruppe untersucht die Werkstoffeigenschaften duroplastischer Verbundsysteme mit Komponenten aus nachwachsenden Rohstoffen. Wir arbeiten an intelligenten, funktionsintegrierten Lösungen für die Fassadengestaltung und für den innovativen Membranleichtbau.

*Andreas Krombholz | [andreas.krombholz@iwmh.fraunhofer.de](mailto:andreas.krombholz@iwmh.fraunhofer.de)*

»Wiederum können wir auf ein wissenschaftlich und wirtschaftlich erfolgreiches Jahr zurückblicken. Die Eingliederung der Mitarbeiter der Gruppe Naturstoffkomposite in das Geschäftsfeld und die Einbindung von Andreas Krombholz in die Leitung des Geschäftsfeldes sind vollständig gelungen.«



## GESCHÄFTSFELDLEITER

Prof. Dr. Andreas Heilmann | Telefon +49 345 5589-180 | andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de

### Fokus

Für unsere Kunden aus der Medizintechnik, der Pharmazie, der Biotechnologie und der Kunststoffverarbeitung entwickeln wir Oberflächenmodifizierungs- und Beschichtungsverfahren zur Erzeugung von biofunktionalen Oberflächen. Wir bewerten die mechanischen, morphologischen und chemischen Eigenschaften von Naturstoffen und biomedizinischen Materialien und verwenden Nanotechnologien zu deren Funktionalisierung. Wir gestalten spezielle mechanische Messplätze, um einen Beitrag zur Verbesserung der Strukturbiokompatibilität von Implantatmaterialien zu leisten. Die Mikrostruktur von medizintechnisch relevanten Polymermaterialien untersuchen wir mithilfe von speziellen elektronenmikroskopischen Präparations- und Untersuchungsmethoden. Wir arbeiten an der Entwicklung von nachhaltigen und langlebigen Halbzeugen für die Bau- und Gebäudeausrüstungen.

### Bemerkenswertes aus 2015

Nach einer Analyse des wissenschaftlichen Profils der Gruppe »Naturstoffkomposite« und der durch diese Gruppe bedienten industriellen Märkte wurde entschieden, mit Beginn des Jahres 2015 diese Gruppe in das Geschäftsfeld »Biologische und makromolekulare Materialien« einzugliedern. Die erfolgreiche Integration der Gruppe führte zu einer wissenschaftlichen Bereicherung besonders auf dem Gebiet der mechanischen Bewertung von Werkstoffen und Bauteilen. Das gesamte Geschäftsfeld profitiert von der Erweiterung der Themen und Märkte, eine Reihe von Verbundprojekten auf dem Gebiet der Bioökonomie konnte akquiriert werden. Auch auf den bisherigen Märkten konnten wir wichtige Neukunden gewinnen, die Stammkunden sind weiterhin von unserer Leistungsfähigkeit überzeugt. Der Industrieertrag wurde erneut gesteigert und lag zum Jahresende bei rund 1,5 Millionen Euro und damit bei mehr als 40 Prozent des Gesamtaufwands.

Die Weichen für die Zukunft sind richtig gestellt. Die hauptsächlich von Annika Thormann erfundene und inzwischen patentgeschützte Technologie zur Oberflächenstrukturierung von Kunststoffen ist die Basis für ein sehr großes Forschungsprojekt. Im Rahmen des BMBF-Förderprogramms »Unternehmen Region« haben sich das Fraunhofer IWM Halle und fünf Unternehmen aus dem mitteldeutschen Chemiedreieck Halle-Bitterfeld-Merseburg zu einem Wachstumskern zusammengeschlossen. Gemeinsam soll im Verbundvorhaben »Kombinierte Mikro- und Nanostrukturierung von Kunststoffen KoMiNaKu« diese Technologie industrienah weiterentwickelt werden.

# NANOFASER-VLIESE FÜR MEDIZINISCHE ANWENDUNGEN

Gruppe

## Bewertung von Materialien der Medizintechnik

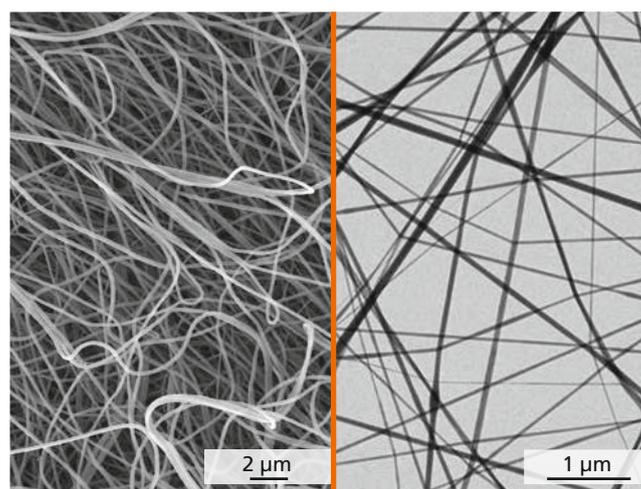
Dr. Sven Henning | Telefon +49 345 5589-292 | sven.henning@iwmh.fraunhofer.de

Elektrospinnen ist ein effektives, kostengünstiges und vielseitig einsetzbares Verfahren zur Herstellung sehr dünner Polymerfasern mit Durchmessern im Bereich von 10  $\mu\text{m}$  bis 10 nm. Solche Vliese aus Nanofasern zeigen außergewöhnliche Eigenschaften wie eine große spezifische Oberfläche, eine einstellbare Porosität und die Möglichkeit zur Ausrüstung mit therapeutisch wirksamen Substanzen. Nachdem die Verfahren zur Nanofaser-Herstellung etabliert sind, richtet sich die Forschung auf neue Möglichkeiten, die Vliese zu stabilisieren, zu funktionalisieren und zu konfektionieren.

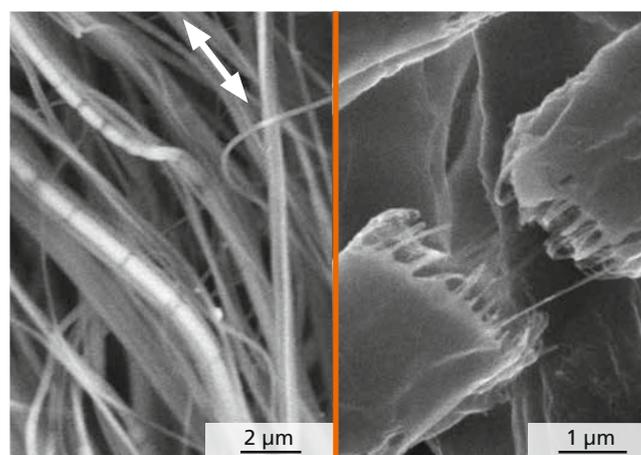
### Morphologie und Mikromechanik hybrider Nanofasern

Neben der Auswahl der geeigneten Komponenten (Kombination aus Polymer, Lösungsmittel und Zuschlagstoff) hat die Morphologie der erzeugten Fasern einen entscheidenden Einfluss auf die strukturelle und biologische Kompatibilität der Nanofaservliese und -konstrukte. Die Wirksamkeit bioaktiver Substanzen, pharmazeutischer Wirkstoffe und antimikrobieller Additive ist abhängig von der Art der Einlagerung im Faserinneren oder an den Faseroberflächen. Die Freisetzung von Medikamenten wird in ähnlicher Weise durch die Morphologie der Nanofasern gesteuert: Durch die Verwendung von Polymeren mit unterschiedlichen Resorptionsraten kann die Freisetzungskinetik gesteuert werden. Durch die Kombination von Polymeren und Wirkstoffen in verschiedenen Schichten der Nanofasern oder durch Spinnen von Vliesen, die aus unterschiedlichen Fasertypen bestehen, kann so eine zeitversetzte Freisetzung von Substanzen erfolgen.

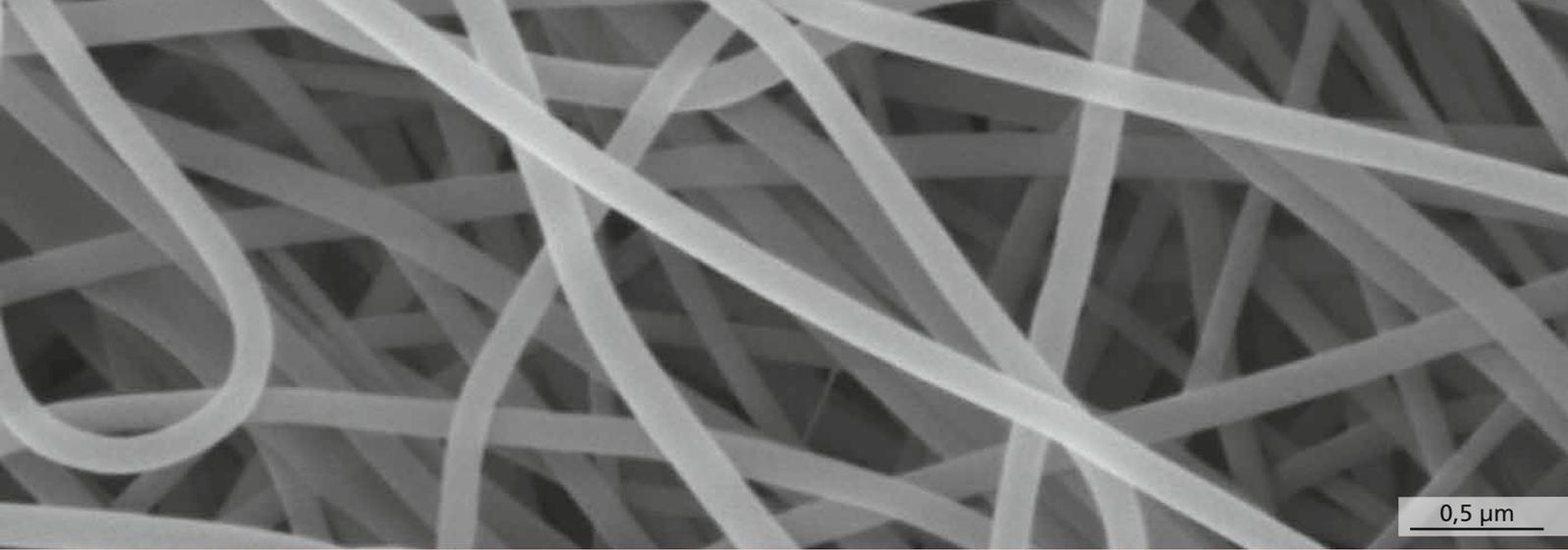
Zur Analyse der Morphologie werden am Fraunhofer IWM verschiedene elektronenmikroskopische Techniken eingesetzt. Die



1 Kollagen-Nanofasern ESEM (links) und TEM (rechts).



2 Mikromechanische Prozesse in hybriden Nanofasern bei Zugversuch im REM: duktiles Verhalten mit Einschnürungen (links) und sprödes Verhalten mit Crazebildung (rechts).



0,5  $\mu\text{m}$

*Elektronenmikroskopische Aufnahme einer hybriden Nanofaser.*

Bewertung der strukturellen Kompatibilität, beispielsweise der für den medizinischen Einsatz wichtigen Steifigkeit, Festigkeit und Duktilität der Fasern, erfolgt durch mikromechanische Experimente.

#### **Einsatz von Nanofaservliesen und -Produkten in der regenerativen Medizin**

Elektrogesponnene Nanofasern aus biokompatiblen und resorbierbaren synthetischen Polymeren oder aus aufbereiteten biologischen Materialien (Kollagen, Chitosan) sind im Körper abbaubar. Sie können die extrazelluläre Matrix einer Zelle nachbilden und die Haftung von Zellen an Implantaten verstärken. Durch die Porosität der elektrogesponnenen Vliese wird den Zellen ausreichend Raum für Wachstum und Sauerstoffversorgung geboten. Diese Komponenten führen zu einer Verbesserung und Förderung von Heilungsprozessen sowie zu einer Wiederherstellung der Funktion von geschädigtem Gewebe. Die Vliese können je nach Zielstellung zusätzlich modifiziert und funktionalisiert werden. So kann man zum Beispiel durch die Zugabe von Hydroxylapatit-Nanopartikeln das Knochenwachstum stimulieren, die Fasern antimikrobiell ausrüsten oder als Wirkstoffträger für die gezielte Freisetzung von Medikamenten nutzen. Die aus Nanofaservliesen abgeleiteten Produkte sollen zum Beispiel für den Wiederaufbau geschädigter Bandscheiben, zur Regeneration von Knochen oder der Haut nutzbar gemacht werden. Dabei eignen sich kleine Vliesabschnitte insbesondere als Zellträgerstrukturen, die in Suspension mit Zellen besiedelt und an den Implantationsort injiziert werden können. Das Elektrospinnverfahren ermöglicht darüber hinaus eine effiziente Beschichtung von Materialoberflächen, wodurch eine nachträgliche

Kompatibilisierung beziehungsweise Funktionalisierung von Biomaterialoberflächen möglich ist. Weitere Projekte zielen auf die Erzeugung dreidimensionaler Nanofaser-Konstrukte, wobei zunächst röhrenförmige Produkte als Stents, Leitschienen und Katheterkomponenten eingesetzt werden sollen.

Tobias Kürbitz

# ANTIFOULING-BESCHICHTUNG VON UMKEHROSMOSE-MEMBRANEN

Gruppe

**Technologien für Biofunktionale Oberflächen**

Prof. Dr. Andreas Heilmann | Telefon +49 345 5589-180 | andreas.heilmann@iwmh.fraunhofer.de

Die Gewinnung von Trinkwasser aus Meer- oder Brackwasser durch Umkehrosmose ist im Vergleich zu anderen Entsalzungsverfahren sehr energieeffizient. Die dafür verwendeten Polymermembranen sind jedoch für die Ablagerung löslicher Schwebstoffe und Mikroorganismen (Biofouling) anfällig, wodurch die Effizienz der Umkehrosmose deutlich beeinträchtigt wird. In Zusammenarbeit mit der IAB Ionenaustauscher Bitterfeld GmbH (LANXESS AG) werden am Fraunhofer IWM Konzepte und Methoden zur Reduzierung dieses Membranfouling entwickelt.

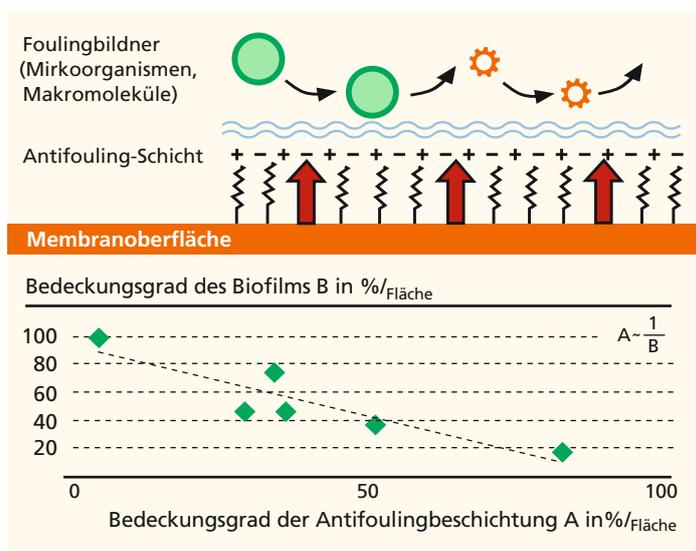
## Beschichtungssystem

Mehrere plasma- und nasschemische Technologien werden miteinander kombiniert, um eine dünne, hydrophile und ladungsneutrale Oligomerschicht auf die Oberfläche der Umkehrosmose-Membrane abzuscheiden. Dabei wird zuerst die Oberfläche mit einem Plasma behandelt und mit Sauerstoffatomen funktionalisiert. Danach werden, ebenfalls durch ein Plasmaverfahren, Brominitiatoren auf der Membranoberfläche immobilisiert. Diese bilden Anknüpfungspunkte für die nachfolgende nasschemische radikalische Polymerisation von Monomeren mit hydrophilen und teilweise zwitterionischen Kopfgruppen. In einem wässrigen System bildet sich durch Hydratation derselben eine hydrogelartige Barrierschicht aus, auf der aufgrund der Unterdrückung physikalisch-chemischer Wechselwirkungen die Makromoleküle und Mikroorganismen nur schwer adhären können (Antifouling-Effekt, Abbildung 1 oben). Da das Wirkprinzip der Beschichtung unspezifisch ist, kann es auch auf andere Materialien übertragen werden, die im Kontakt mit einem wässrigen Medium stehen.

## Antifouling-Wirksamkeit

In Bewuchsversuchen mit dem Mikroorganismus *Pseudomonas fluorescens* wurde die Wirksamkeit der Antifouling-Beschichtung nachgewiesen. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad der Beschichtung auf der Membranoberfläche verringert sich der Biofilmbewuchs. Bei einer annähernd vollständigen Bedeckung der Beschichtung beträgt der Biofilmbewuchs im Vergleich zur unbeschichteten Referenz nur noch etwa 20 Prozent (Abbildung 1 unten). Zusätzlich wurde ein positiver Effekt der Antifouling-Beschichtung auf die Trenneigenschaften der Umkehrosmose-Membran festgestellt.

Ulrike Hirsch



1 Schematische Darstellung des Antifouling-Effekts (oben). Reduzierter Biofilmbewuchs in Anwesenheit der Antifouling-Beschichtung (auf Membranen) (unten).

# MITTELGESICHTSIMPLANTATE MIT NANOSTRUKTURIERTEN OBERFLÄCHEN

Gruppe

**Technologien für Biofunktionale Oberflächen**

Prof. Dr. Andreas Heilmann | Telefon +49 345 5589-180 | andreas.heilmann@iwmm.fraunhofer.de

Die Fallzahlen von Frakturen im Bereich des Mittelgesichtes sind in den vergangenen Jahren stark gestiegen. Bei der Behandlung geht es neben der Heilung komplizierter Brüche auch um die ästhetische Wiederherstellung des Gesichts. Das gegenwärtig übliche Verfahren der Osteosynthese im Mittelgesicht erfolgt vorwiegend mit Mini- bzw. Mikroplatten aus Titan. Sind großflächige Bereiche der Gesichtsknochen zertrümmert, können diese mit den herkömmlichen Osteosyntheseverfahren oftmals nur unzureichend behandelt werden. Das am Fraunhofer IWM entwickelte, neue Implantatsystem setzt deshalb auf die Kombination eines lasttragenden Kunststoffkerns mit einem umhüllenden nanostrukturierten Polymer.

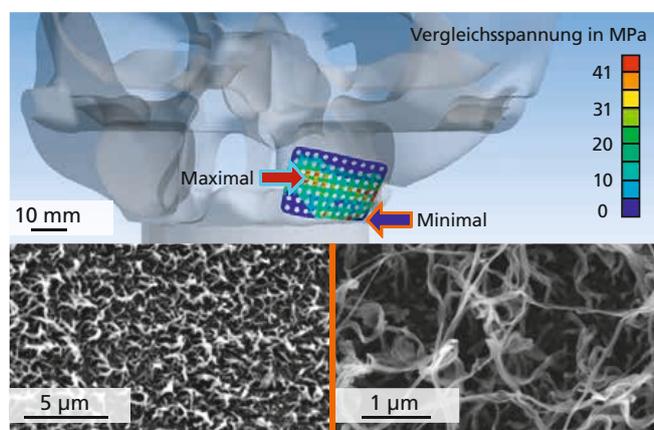
## Design und Materialauswahl

Unter Berücksichtigung einer retrospektiven Analyse der Defektregeneration des Mittelgesichtes wird dabei ein anatomisch repräsentatives Finite-Elemente Modell des Mittelgesichtes realisiert. Das Implantatdesign wird basierend auf der Frakturgröße und -position sowie der Belastungs-, Muskel- und Gelenkkräfte festgelegt (Abbildung 1, oben). Die Auswahl der thermoplastischen, biokompatiblen Kunststoffe des Implantats orientiert sich an den natürlichen Steifigkeiten und Festigkeiten des umgebenden Knochen- und Weichteilgewebes ( $E_{\text{Corticalis}}$ : 15000 N/mm<sup>2</sup>,  $E_{\text{Spongiosa}}$ : 1000 N/mm<sup>2</sup>) der Defektstelle. Für den Kern wurde mechanisch stabiles ultrahochmolekulares Polyethylen (PE-UHMW,  $E$ : 2700 N/mm<sup>2</sup>) und für die Außenhaut weiches, flexibles Polyethylen mit hoher bzw. niedriger Dichte (PE-HD,  $E$ : 1000 N/mm<sup>2</sup>, PE-LD,  $E$ : 200 N/mm<sup>2</sup>) ausgewählt. Die festigkeitsoptimierte Schichtverbindung erfolgte mittels Vakuum laminierung.

## Texturierung

Damit sich das Implantat optimal ins Weichgewebe integriert, wird zudem die Implantatoberfläche speziell angepasst. Hierzu wurde durch Abformung von nanoporösen Aluminiumoxid-templaten die Implantatoberfläche mit einer Nano- bzw. Mikrofaserstruktur texturiert, um die Anbindung der Zellen des umgebenden Weichgewebes zu fördern und die Bildung von fibrösem Gewebe auszuschließen (Abbildung 1, unten). So soll sichergestellt werden, dass das Implantat nicht verrutscht, sondern dauerhaft an der vorgesehenen Stelle verbleibt. Die Entwicklung dieser neuen Gesichtsimplantate wurde 2014 mit dem Hugo-Junkers-Preis des Landes Sachsen-Anhalt ausgezeichnet.

Maik Rudolph, Annika Thormann



1 Modellierung des neuen Implantatsystems mithilfe der Finite-Elemente Methode (oben). Nanostrukturierte Oberfläche des Implantatmaterials aus Polyethylen (unten). Bilder © Hochschule Merseburg

# MIKROSTRUKTURANALYTIK AN INFILTRIERTEN KARIESLÄSIONEN

Gruppe

**Charakterisierung medizinischer und kosmetischer Pflegeprodukte**

Dr. Andreas Kiesow | Telefon +49 345 5589-118 | andreas.kiesow@iwmh.fraunhofer.de

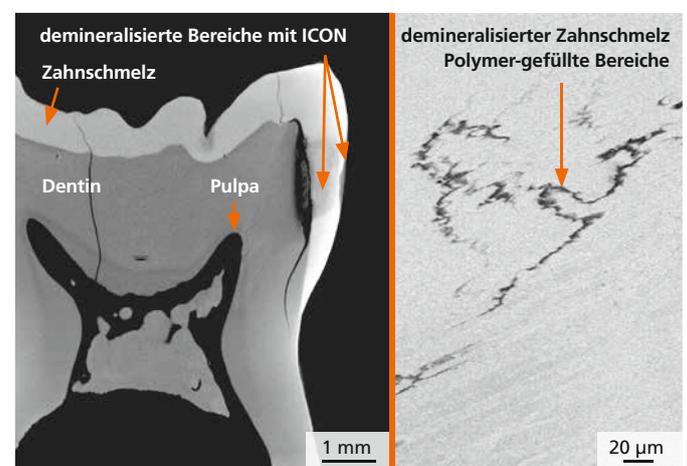
Karies zählt zu den häufigsten chronischen Zahnkrankheiten. Initiale Karies ist durch einen zunächst lokal begrenzten Mineralmangel des Zahnschmelzes charakterisiert. Diese Demineralisation kann durch Remineralisierungsmaßnahmen behandelt werden. Schreitet die Demineralisation jedoch fort, bricht die Struktur des Zahnschmelzes zusammen und ein Griff zum Bohrer wird notwendig. Eine mikroinvasive, technische Alternative, entwickelt und vorangetrieben durch die Dental-Material-Gesellschaft mbH (DMG Hamburg), ist die Kariesinfiltration mit ICON. Dabei wird die so genannte pseudointakte Oberfläche mittels Ätzen entfernt, bevor das niedrigviskose Polymer ICON appliziert wird. Dieses füllt die Porositäten und wird in der Läsion ausgehärtet. So wird eine mechanische Stabilisierung der Schmelzstruktur erreicht und eine weitere Demineralisation verhindert. Obwohl eine Reihe klinischer und in vitro-Studien den Behandlungserfolg bestätigen, bestehen noch Fragen zur Lebensdauer, Zuverlässigkeit und zum grundlegenden mikrostrukturbasierten Verständnis der Infiltration.

## Vorgehensweise und Ergebnisse

In einem Kooperationsprojekt zwischen der DMG, dem Fraunhofer IWM sowie der Faculty of Dentistry der Universität Otago, Neuseeland, als klinischem Partner wurden Läsionen an Milchzähnen mit ICON behandelt und nach Exfoliation materialwissenschaftlich analysiert. Erstmals liegen damit Zähne mit infiltrierten Läsionen, die dem oralen Milieu über Monate ausgesetzt waren, für eine ex vivo-Studie vor. Dabei gilt es, klinische Daten mit denen der Mikrostrukturanalyse in Korrelation zu bringen und zu überprüfen, ob und in welcher Form ICON im demineralisierten Zahnhartgewebe vorhanden ist und wie bei einer intakten, das heißt die Kariesprogression

verhindernden Infiltration, die Grenzflächen ausgebildet sind. Durch Mikro-Röntgen-Computertomographie (Abbildung 1, links) wird zunächst die infiltrierte Läsion lokalisiert. Am daraus generierten Probenquerschnitt wird eine höheraufgelöste rasterelektronenmikroskopische Analyse durchgeführt, das Ergebnis ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Mineral-defizitären Regionen sind durch den dunkleren Kontrast charakterisiert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das ICON-Polymer einige hundert Mikrometer tief in die Läsion eingedrungen ist und dort auch während mehrerer Monate verblieben ist. Dies konnte an in vivo-infiltrierten Zähnen nachgewiesen werden.

Dr. Vanessa Sternitzke



1 Mikro-Röntgen-Computertomographische Aufnahme eines infiltrierte Zahnes im Querschnitt (links). Rasterelektronenmikroskopische Abbildung (rechts).

# LIGNINBASIERTE MULTIFUNKTIONALE NATURSTOFFKOMPOSITE

Gruppe

## Naturstoffkomposite

Andreas Krombholz | Telefon +49 345 5589-153 | andreas.krombholz@iwmh.fraunhofer.de

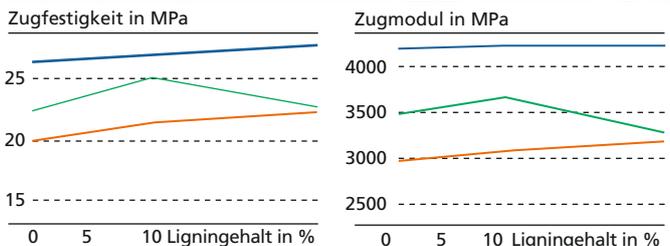
Mithilfe des Organosolv-Verfahrens kann Buchenholz in Einzelkomponenten wie zum Beispiel Fasern und schwefelfreies, niedermolekulares Lignin aufgeschlossen werden. Dieses Organosolv-Lignin lässt sich in phenolische Harzsysteme integrieren – mit Ligninanteilen bis zu 40 Prozent. Durch die variierenden Anteile des Lignins können unterschiedliche Stufen eines biobasierten Duromers generiert werden. Dabei wirkt das Lignin nicht nur als Füllstoff, sondern wird aufgrund seiner aromatischen Struktur kovalent eingebunden. Die modifizierten Resole lassen sich etwa als Bindemittel für Naturfaser-Lamine oder für Schaumsysteme variierender Dichte verwenden. Kombiniert man diese Produkte, können hochdämmende Konstruktionselemente in Form einer modular verwendbaren Sandwichstruktur generiert werden, die in Bauwesen und Architektur genutzt werden.

### Mechanische Analyse

Mit diesem Verbundwerkstoff, hergestellt aus Buchenholzfasern und imprägniert mit einem ligninbasierten duroplastischen Harzsystem, lassen sich je nach Anforderungsprofil hochfeste Lamine in Standardverfahren der Holzindustrie herstellen (Abbildung 1). Es wurde eine ausführliche Charakterisierung an Laminaten durchgeführt. Als Faserstoff wurden Buchenfasern verwendet und als Bindemittel die folgenden drei Harzsysteme: P00 (Kein Lignin), P10 (10 Prozent Lignin vorvernetzt), P20 (20 Prozent Lignin vorvernetzt). Es wurden Lamine mit variierendem Matrix-Feststoffanteil von 10, 20 und 30 Prozent hergestellt und geprüft. Somit wurde die mechanische Charakterisierung an neun Laminatvarianten durchgeführt. Die Prüfung erfolgte bei Raumtemperatur (RT), -30°C und 80°C mittels Zugversuchen, Biegeversuchen und Schlagzähigkeitsmessung. Zudem wurden

Brandtests und Bewitterungsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Abhängigkeit des Ligningehalts ausgewertet und sind in Abbildung 1 unten dargestellt. Bei einem Harz-Anteil von 20 Gewichtsprozent ergaben sich die besten mechanischen Kennwerte. Weiterhin fallen die Kennwerte mit steigender Prüftemperatur ab. Der Ligningehalt zeigt keinen eindeutigen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte. Bis zu einer Beimischung von 20 Gewichtsprozent Organosolv-Lignin weist das Phenolharzsystem keine veränderten Eigenschaften gegenüber dem unmodifizierten Grundsystem auf und kann daher analog verarbeitet und eingesetzt werden.

Andreas Krombholz, Nicole Eversmann



1 Gestaltungsmöglichkeiten der Lamine im Fertigungsprozess (oben). Mechanische Zug- und Biegeprüfung von Buchenfaser-Phenolharz-Laminaten mit variierendem Ligningehalt (unten).

# KOMPONENTEN DER MIKROELEKTRONIK UND MIKROSYSTEMTECHNIK

## Gruppen



### **Bewertung elektronischer Systemintegration**

Um die Fertigungsqualität im Packaging und die Zuverlässigkeit im Einsatz zu sichern, analysieren wir Fehlermechanismen in Werkstoffen und Komponenten der Aufbau- und Verbindungstechnik mikroelektronischer Automobil- und Leistungselektronik.

*Sandy Klengel | [sandy.klengel@iwmh.fraunhofer.de](mailto:sandy.klengel@iwmh.fraunhofer.de)*



### **Nanomaterialien und Nanoanalytik**

Wir charakterisieren die Mikro- und Nanostruktur von Materialien und Systemen glaskeramischer, optischer und magnetischer Werkstoffe sowie Materialien der Nanotechnologie. Zudem entwickeln wir artefaktfreie Hochdurchsatz-Präparationsverfahren für die Mikrostrukturdiagnostik.

*Prof. Dr. Thomas Höche | [thomas.hoeche@iwmh.fraunhofer.de](mailto:thomas.hoeche@iwmh.fraunhofer.de)*



### **Diagnostik Halbleitertechnologien**

Wir betreiben Ursachenforschung für Materialwechselwirkungen, Defekte und funktionale Fehlerursachen in mikroelektronischen integrierten Schaltkreisen und Halbleiter-Bauelementen und setzen dafür sehr leistungsfähige, hochauflösende Analysetechniken ein.

*Frank Altmann | [frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de](mailto:frank.altmann@iwmh.fraunhofer.de)*

» Die Sicherung von Zuverlässigkeit und Robustheit moderner Elektronikbauelemente sowie die Entwicklung neuer Funktionswerkstoffe erfordert eine detaillierte Beherrschung des Materialverhaltens – eine leistungsfähige mikrostrukturelle Diagnostik ist dafür heute unabdingbar.«



## GESCHÄFTSFELDLEITER

Prof. Dr. Matthias Petzold | Telefon +49 345 5589-130 | [matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de](mailto:matthias.petzold@iwmh.fraunhofer.de)

### Fokus

Wir beschäftigen uns mit der Materialdiagnostik von Bauelementen, Komponenten und Werkstoffen der Elektronik, Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie. Ziel ist es, die Mikrostruktur, Materialwechselwirkungen oder Defektbildungen in Korrelation zu Technologie und Design sowie den Einsatzbedingungen im Detail zu beherrschen. Für unsere Kooperationspartner tragen diese Ergebnisse dazu bei, Fertigungsprozesse weiter zu entwickeln und innovative, in der Anwendung zuverlässige Bauelemente und Systeme mit hoher Qualität in den Markt zu bringen. Dafür führen wir Forschungsarbeiten zur Werkstoffcharakterisierung, mikrostrukturellen Analytik, physikalischen Fehlerdiagnostik sowie zur mechanischen Bewertung durch. Gleichzeitig entwickeln wir die auch dafür erforderlichen Tests, Diagnostik- und Modellierungsverfahren sowie die zugehörige Technik weiter.

### Bemerkenswertes aus 2015

2015 können wir auf einen erfolgreichen Start von zwei größeren europäischen Verbundvorhaben zurückblicken: Im ECSEL-Projekt Powerbase werden wir unsere Kenntnisse zu den Zuverlässigkeitseigenschaften von GaN als Halbleitermaterial für die Leistungselektronik erweitern. Im CATRENE-Projekt SAM 3 entwickeln wir in den nächsten drei Jahren neue Fehleranalytikverfahren für 3D-integrierte »System in Package«-Technologien und ermöglichen damit einen strategischen Ausbau unserer Kernkompetenzen.

Im Verbundvorhaben von Fraunhofer- und Max-Planck-Gesellschaft HEUSLER zur Erforschung neuer Magnetmaterialien wurde der zentrale Meilenstein erreicht und die Fortsetzung des Vorhabens freigegeben. Vor allem aber war das vergangene Jahr durch eine vielfach erweiterte Auftragsforschung mit Industriepartnern geprägt, insbesondere im Bereich der Zuverlässigkeit elektronischer Anwendungen im Automobil. Unser CAM-Workshop konzentrierte sich daher auch auf innovative Fehlerdiagnostiken für die Automobilelektronik. Wir konnten 200 Teilnehmer begrüßen, circa 150 davon aus der Industrie. In Erweiterung dessen werden wir 2016 das Europäische Symposium für Zuverlässigkeit elektronischer Bauelemente, Fehlerphysik und -analyse (ESREF) in Halle organisieren, die Vorbereitungen dafür laufen auf Hochtouren.

# MICROPREP™ – LASERBASIERTE PROBENPRÄPARATIONSPLATTFORM

Gruppe

**Nanomaterialien und Nanoanalytik**

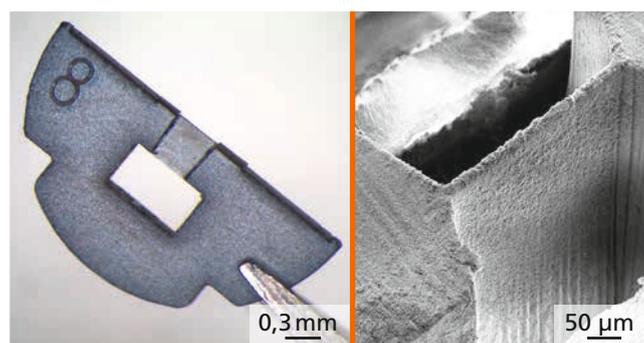
Prof. Dr. Thomas Höche | Telefon +49 345 5589-197 | thomas.hoeche@iwmh.fraunhofer.de

Ungeachtet der zahlreichen Neuerungen im Bereich der Gerätetechnik für die hochauflösende Mikrostrukturanalytik hat die Maxime, dass jede Analyse nur so gut sein kann wie die zugrundeliegende Probe, unverändert Bestand. Dementsprechend intensiv wird in der Gruppe Nanomaterialien und Nanoanalytik an neuartigen Methoden zur artefaktfreien und effizienten Zielpräparation geforscht. Der Trend hin zu dreidimensional integrierten Funktionsstrukturen einerseits und zur Hochdurchsatzmaterialentwicklung andererseits bringt dabei neue Erfordernisse mit sich, denen mit evolutionärer Weiterentwicklung etablierter Verfahren kaum entsprochen werden kann. Besonders augenscheinlich ist dieser Umstand, wenn große Volumina mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Mikrometer freigelegt werden sollen.

So kann zwar beispielsweise mit der weit verbreiteten Präparation von Lamellen für die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) mittels fokussierter Ionenstrahltechnik (FIB) eine Zielpräparation auf der 10 nm-Skala genau erfolgen, die Lamellen sind aber aufgrund der vergleichsweise geringen Ablationsraten der Ga<sup>+</sup>-Ionen in der Regel nicht größer als 20 x 5 x 0,1 µm<sup>3</sup>. Ein sehr vielversprechendes alternatives Verfahren stellt die Lasermikrobearbeitung dar. Deren Potenzial für die Präparation von Proben für die Mikrostrukturdiagnostik wurde zunächst im Rahmen des Fraunhofer-internen Attract-Projekts NanoAssess und später in direkter Kooperation mit der 3D-Micromac AG Chemnitz als Spezialmaschinenbauer für Lasermikrobearbeitungsanlagen validiert.

## Paradigmenwechsel für die TEM-Präparation

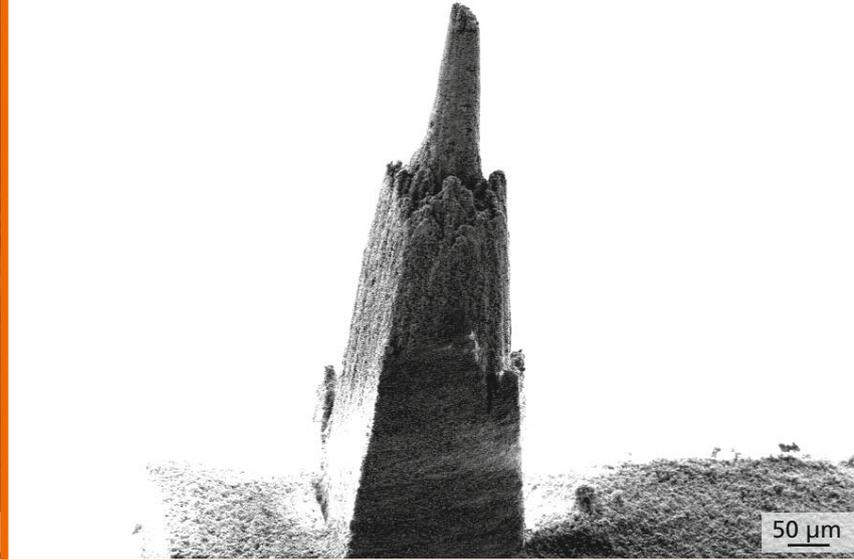
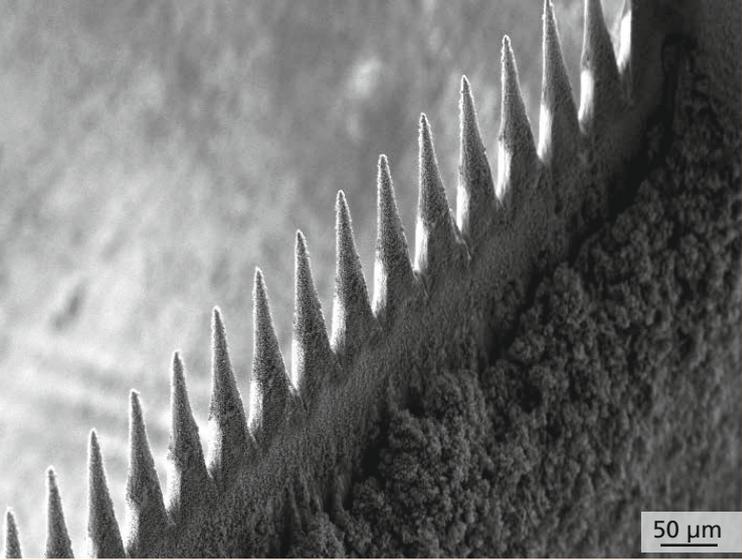
Laserstrahlung weist als Instrument für die Probenpräparation viele offensichtliche Vorteile auf: Sie ist frei von Elementkon-



1 Lichtmikroskopische Aufnahme eines 3 mm-Durchmesser-Halbringes mit bereits abgedünnter Zielstelle für die TEM-Untersuchung (links). Rasterelektronenmikroskopische Abbildung eines 400 µm breiten Zielbereichs in Saphir (rechts).



2 microPREP™, Laser-Klasse1-Gerät mit Touchscreen-Steuerung.



*Lasergeschnittene Reihe von Spitzen in Si (links). Auf einige 10 μm kegelstumpfförmig abgedünnte Ölschiefer-Probe für die Röntgenmikroskopie (rechts).*

taminationen, reproduzierbar erzeugbar, kosteneffizient und auf der einstelligen Mikrometerskala positionierbar. Das Risiko einer thermischen Schädigung ist beherrschbar: Bei der Wahl eines geeigneten UltrakurzpulsLasers und einer optimierten Bearbeitungsstrategie kann die Wärmeeinflusszone unabhängig vom Materialsystem auf wenige hundert Nanometer reduziert werden. Durch eine Kombination von Lasermikrobearbeitung und finaler Ionenstrahlpolitur können demnach sowohl große Volumina entfernt als auch schädigungsfreie Oberflächen schnell und reproduzierbar bereitgestellt werden. Für die Präparation von Volumenmaterialien hat sich dabei folgende Route als besonders günstig herausgestellt:

1. Ausschneiden einer Grundstruktur mittels Laser,
2. lokales Abdünnen des Zielbereichs mittels Laser sowie
3. Polieren des Zielbereichs mittels Edelgas-Ionenstrahl oder Fokussierter Ionenstrahltechnik zur Erzielung der Elektronentransparenz.

In Abbildung 1 links ist eine TEM-Probe nach dem planparallelen Abdünnen des Zielbereichs, jedoch vor dem Polieren dieser Zielstelle mit einem Ionenbreitstrahl gezeigt. Proben können zur besseren Nachverfolgbarkeit individuell beschriftet, mit einem »data matrix code« oder einem Strichcode versehen werden. In Abbildung 1 rechts ist belegt, dass auch nichtleitende oder magnetische Materialien sowie Dielektrika (die bei der Wellenlänge des Lasers transparent sind) aufgrund der durch die hohen Leistungsdichten erzielten Multiphotonenabsorption problemlos mittels Laser konfektionierte und abgedünnt werden können. Die Zielgenauigkeit der Bearbeitung liegt dabei unter 3 μm, typische Laserbearbeitungszeiten (beide Prozessschritte inklusive des Umspannens)

bei deutlich unter 30 Minuten. Die oben geschilderte Funktionalität wurde im dedizierten microPREP™-Präparationstool des Entwicklungspartners 3D-Micromac AG realisiert, siehe Abbildung 2.

Konnten zunächst nur »plane view«-Volumenpräparate erzeugt werden, wurde unlängst eine Erweiterung hin zur Entnahme von Querschnittsproben zum Schutzrecht angemeldet. Sie wird gegenwärtig in das Maschinenkonzept eingepflegt.

#### **Vielseitiges Werkzeug, nicht nur für TEM**

Auch für die Röntgenmikroskopie sowie Massivproben-Geometrien für die Atomsondentomographie wurde microPREP™ bereits erfolgreich erprobt. Weitere Entwicklungen mit Bezug zur Herstellung von Proben für die Mikro- und Nanomechanik, TEM-Tomographie, Querschnittsrasterelektronenmikroskopie sowie korrelative Mikroskopie werden angegangen.

Damit hat microPREP™ sämtliche Voraussetzungen, um zukünftig die Arbeitsabläufe in der Mikrostrukturdiagnostik noch weiter zu optimieren und im bereits sehr umfangreichen Präparationsinstrumentarium am Fraunhofer IWM einen zentralen Platz einzunehmen.

Dr. Michael Krause

# LOKALISIERUNG VON SCHWACHSTELLEN IN DÜNNEN ISOLATIONSSCHICHTEN

Gruppe

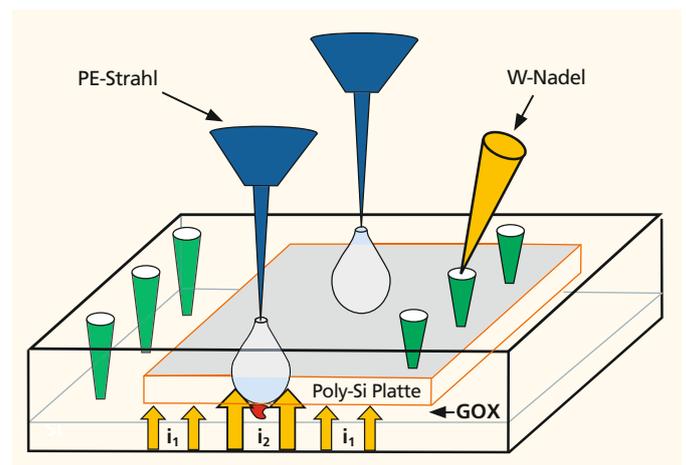
**Diagnostik Halbleitertechnologien**

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

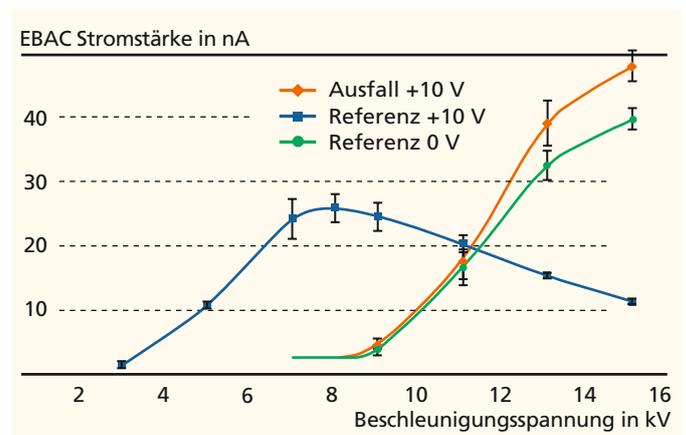
Defekte in sehr dünnen funktionalen Isolationsschichten begrenzen die Leistung und die Lebensdauer von Transistor- und Kondensatorstrukturen auf integrierten Schaltkreisen (IC). Häufig sind sie verantwortlich für den Ausfall ganzer elektronischer Baugruppen. Ursache der strukturellen Schwachstellen sind oft Verunreinigungen oder lokale Dickenschwankungen im Nanometerbereich der Isolationsschichten. Strukturelle Analysen können prozessbedingte Schwachstellen aufzeigen und sie von Fehlern durch elektrische Überbeanspruchung, wie zum Beispiel ESD-Schäden, unterscheiden. Von besonderer Bedeutung für die Ursacheninterpretation ist dabei die Erhaltung der originalen Defektsignatur, auch während die Probe zur Fehlerlokalisierung elektrisch betrieben wird. Mittels neu entwickelter Electron Beam Absorbed Current-Techniken (EBAC) im Rasterelektronenmikroskop können Defekte und Schwachstellen in dünnen Isolationsschichten nm-präzise lokalisiert und anschließend im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) detailliert untersucht werden.

## Lokalisierungsprinzip in dünnen Isolationsschichten mittels EBAC

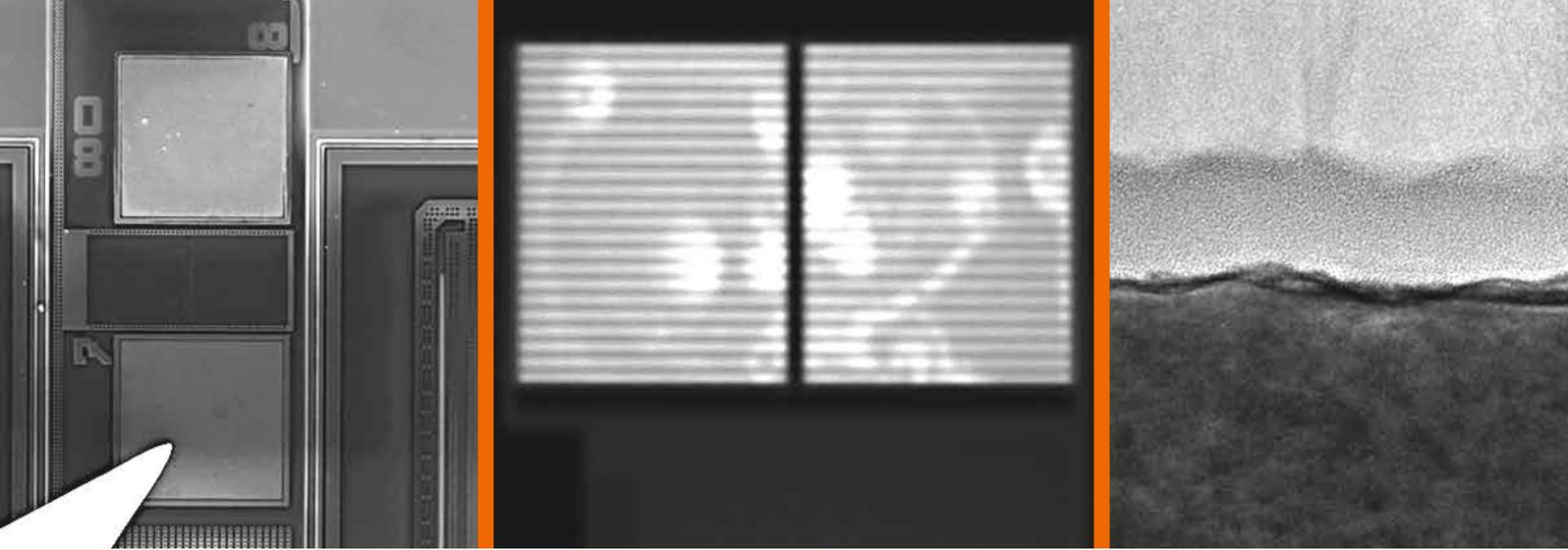
Zur Lokalisierung von Schwachstellen ohne elektrischen Durchbruch werden zusätzliche Ladungsträger innerhalb des Halbleitersubstrats, aber unterhalb der Isolationsschicht mit einem fokussierten Elektronenstrahl erzeugt (Abbildung 1). Sobald eine zusätzliche Vorspannung anliegt, wird durch die Isolationsschicht innerhalb der Transistor- oder Kondensatorstruktur ein erhöhter Tunnelstrom, vergleichbar der Hot Carrier Injection eines Transistors, messbar und mit dem Bild des Rasterelektronenmikroskops überlagert. Bereiche mit unterschiedlichen Stromstärken entstehen dabei durch Schwan-



1 Messprinzip zur Lokalisierung von Oxidschwachstellen ohne elektrischen Durchbruch durch Nutzung einer lokalen Vorspannung.



2 Abhängigkeit der messbaren EBAC-Stromstärke von der Beschleunigungsspannung des Rasterelektronenmikroskops mit unterschiedlichen Vorspannungen.



*Elektronenmikroskopische Aufnahmen einer kontaktierten Oxidstruktur (links) mit lokalisierten Schwachstellen (Mitte) durch Substratrauigkeiten (rechts).*

kungen der Oxiddicke, Verunreinigungen oder beispielsweise Substrat-Unebenheiten. Unter realen Betriebsbedingungen führen sie zu einer Verringerung der Durchbruchspannung der dielektrischen Schicht und damit zu einer reduzierten Bauteillebensdauer.

#### **Parameteroptimierung zur Defekt- und Schwachstellenlokalisierung**

Zum optimalen Nachweis der sehr geringen Stromstärkeunterschiede des EBAC-Verfahrens müssen die Parameter des Rasterelektronenmikroskops an die jeweils zu untersuchende IC-Struktur und den zu untersuchenden Fehlermodus angepasst werden. Für harte Durchbrüche wird ein Signalmaximum bei definierter Beschleunigungsspannung für das Eindringen der Elektronen oberhalb der Isolationsschicht erreicht. Um Schwachstellen ohne harten Durchbruch lokalisieren zu können, sind eine definierte Beschleunigungsspannung zum Erreichen der Halbleitersubstratebene (Abbildung 2) und eine Vorspannung zur Generation des Tunnelstromes notwendig. Eine möglichst hohe Auflösung wird durch die Nutzung einer geringen Beschleunigungsspannung des Rasterelektronenmikroskops bei ausreichender Intensität des gemessenen Tunnelstroms realisiert. Dies erlaubt anschließend eine exakte Zielprobenpräparation der Defektstelle mittels fokussierter Ionenstrahltechnik für die nachfolgende Fehleranalyse im Transmissionselektronenmikroskop.

#### **Physikalische Fehleranalyse an einer geschwächten Isolationsschicht**

Beispielhaft ist im Bild oben die Untersuchung einer 17 nm dicken Gateoxid-Struktur mit zu geringer Durchbruchspan-

nung gezeigt. Ungestresste Proben derselben Charge wurden mittels piezogetriebenen Nadelmanipulatoren im Rasterelektronenmikroskop kontaktiert und mit definierten Vorspannungen beaufschlagt und die Struktur mittels EBAC-Verfahren untersucht. Im Ergebnis konnten Unregelmäßigkeiten in der Stromverteilung nachgewiesen werden. Eine anschließende TEM-Untersuchung verdeutlichte eine erhöhte Substratrauigkeit, die zur Inhomogenität der Gateoxidschicht führt. Die resultierenden lokalen Feldüberhöhungen verursachen die geringere Durchbruchsspannung.

Jörg Jatzkowski

# MIKROSTRUKTURELLE BEWERTUNG FÜR DIE AUTOMOBILELEKTRONIK

Gruppe

## Bewertung elektronischer Systemintegration

Sandy Klengel | Telefon +49 345 5589-125 | sandy.klengel@iwmh.fraunhofer.de

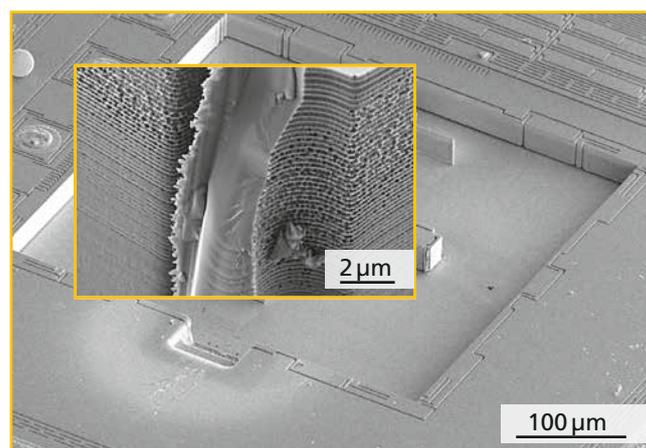
Die Insassensicherheit im Auto hängt wesentlich von der implementierten Elektronik ab. In allen Funktionsbereichen messen, steuern und regeln elektronische Komponenten Drücke, Temperaturen, Beschleunigungen, Füllstände und vieles mehr. Zunehmend kontrollieren Assistenzsysteme die Aktionen des Fahrers und greifen im Notfall aktiv ein oder unterstützen – wie beispielsweise beim Notbremsassistenten und der automatischen Einparkhilfe. Das pilotierte Fahren ist längst keine Vision mehr, sondern absehbare Zukunft. Die größte Herausforderung dabei wird sein, die Verlässlichkeit sämtlicher elektronischer Bauteile und ihrer Kommunikation untereinander unter allen erdenklichen Belastungsszenarien zu gewährleisten. Das tiefe Wissen um das Verhalten und die Wechselwirkungen der elektronischen Komponenten und Systeme unter diesen Bedingungen ist von essentieller Bedeutung für die Sicherheit der Technologien und damit letztlich auch für die der Fahrzeuginsassen.

### Bewertung von Ausfallmechanismen während der Qualifikation

Dabei werden moderne Sensor-Systeme zur Drehraten- oder Beschleunigungsmessung, wie sie beispielsweise in Fahrassistenzsystemen oder Airbags eingesetzt werden, mit mikromechanischen Verfahren hergestellt. Hier gilt es, die Ausfallursachen dieser Bauteile während ihrer Qualifikation unter extremen Umwelt- und Betriebsbedingungen sicher zu bewerten. Diese Strukturen mit Dimensionen von wenigen Mikrometern, zehnmal kleiner als ein Haar im Durchmesser, werden bewusst zum Versagen gebracht und anschließend fraktographisch bewertet (Abbildung 1). Dabei sind die typischerweise sehr robusten Packages eine Herausforderung, um den Zugang

zur Ausfallstelle zu bekommen. Durch spezialisierte Präparationstechniken wie zum Beispiel Plasma-FIB-Bearbeitung oder Mikromanipulation ist es möglich, auf das Bauteil abgestimmte Access-Strategien zu entwickeln, einen Artefakt-freien Zugang zur Ausfallursache zu ermöglichen und diese zu bewerten. Die gewonnenen Erkenntnisse helfen, kritische Designs zu isolieren, beziehungsweise ermöglichen eine Beurteilung der Lebensdauer unter extremen Einsatzbedingungen.

Jan Schischka, Robert Klengel



1 Beschleunigungssensor eines Airbags nach Schockbelastung: Die fraktographische Analyse der Versagensstelle zeigt den Einfluss von Materialinhomogenitäten auf die Belastbarkeit der Baugruppe unter extremen Bedingungen. Hier wurde die primäre Versagensursache in einem Bereich mit Ätzfehlern/Poren detektiert, die die Festigkeit derart schwächen, dass ein initialer Bruch entsteht und anschließend das Gesamtsystem kollabiert.

# BEWERTUNG VON HALBLEITERBAUELEMENTEN MIT OBERFLÄCHENDEFEKTEN

Gruppe

**Bewertung elektronischer Systemintegration**

Sandy Klengel | Telefon +49 345 5589-125 | sandy.klengel@iwmh.fraunhofer.de

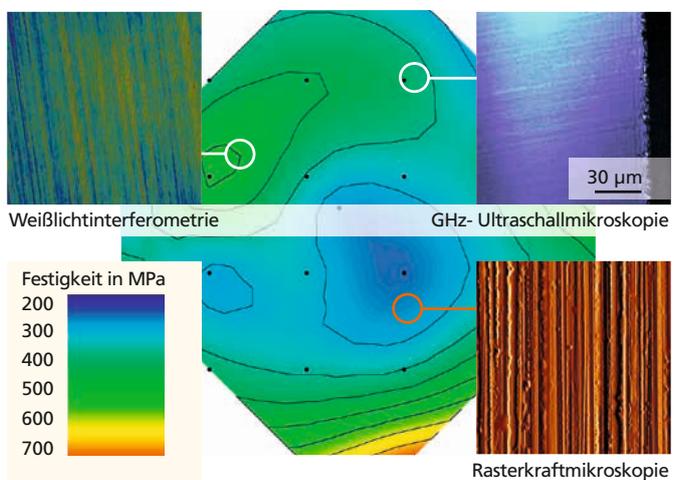
Halbleiterbauelemente werden während der Verarbeitung im Bereich Handling und Packaging sowie während ihrer Anwendung mechanischen und thermo-mechanischen Belastungen ausgesetzt. Weil typische Halbleitermaterialien wie Si, Ge, GaN und SiC ein empfindliches Spröbruchverhalten aufweisen, können eingebrachte Spannungen in Kombination mit Mikrodefekten zum elektrischen Ausfall bis hin zum Bruch des Halbleiters führen. Neben Schädigungen der Chip-Kanten durch Vereinzlungsprozesse verringern Oberflächendefekte durch Abdünn- oder Pick-and-Place-Anwendungen die Festigkeit. Zusätzlich wird die Festigkeit der Chip-Oberfläche durch mögliche intrinsische Eigenspannungen beeinflusst, die zum Beispiel durch Beschichtungen (Metallisierung oder Passivierung) entstehen. Am Fraunhofer IWM werden dabei eingebrachte Schädigungen bewertet und prozessoptimierende Maßnahmen abgeleitet. Dazu werden mikrostrukturelle Analysen der Oberflächenstruktur mit probabilistischen Methoden der experimentellen Festigkeitscharakterisierung sowie der numerischen Modellierung kombiniert.

## Charakterisierung der Oberflächentopologie und Oberflächenschädigung

Um den Einfluss von Kantendefekten auszuschließen, erfolgt die Bewertung der Halbleitermaterialien mit oberflächensensitiven Experimenten wie Kugel-Ring- oder Ring-Ring-Versuchen. In Ergänzung zur Festigkeitsbewertung findet eine systematische Korrelation der charakteristischen Festigkeitskenngrößen mit der morphologischen Oberflächenbeschaffenheit der Proben statt. Hierfür sind analytische Verfahren wie Rasterelektronenmikroskopie, GHz-Ultraschallmikroskopie,

Rasterkraftmikroskopie oder Weißlichtinterferometrie zur Oberflächenbewertung geeignet. Im Ergebnis liegen die Einflussgrößen verschiedener Prozessparameter oder Prozessschritte in Kombination mit den Oberflächeneigenschaften vor. Abbildung 1 zeigt die ermittelte lokale Festigkeitsverteilung eines abgedünnten Si-Wafers in Kombination verschiedener Methoden zur Oberflächenbewertung. In Verbindung mit geeigneter Modellierung können industrielle Anwender somit kritische festigkeitsrelevante Prozessschritte identifizieren, optimieren und entsprechende festigkeitsfördernde Maßnahmen einleiten. Das trägt dazu bei, chipbruchbedingte Ausfälle zu vermeiden.

Falk Naumann, Marcel Mittag



1 Ermittelte Festigkeitsverteilung eines Si-Wafers nach dem Abdünnen in Kombination zur Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit.

# FRAUNHOFER-CENTER FÜR SILIZIUM-PHOTOVOLTAIK CSP

Zuverlässigkeit und Technologien für die Netzparität ZTN

## Gruppen



### Diagnostik Solarzellen

Wir charakterisieren Solarzellen elektrisch, analysieren Spurenelemente der Materialien und Prozessstoffe und diagnostizieren Mikrostrukturdefekte im Modul. Zudem entwickeln und charakterisieren wir Schichtsysteme und Laserstrukturen für Solarzellen der nächsten Generation.

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



### Zuverlässigkeit von Solarmodulen und Systemen

Wir untersuchen Solarmodule hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit, optimieren sie und entwickeln technologische Prozesse weiter, auch mithilfe mechanischer Finite-Elemente Simulation von Modulen. Wir bieten umfassende, einzigartige Modulcharakterisierungen aus einer Hand.

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



### Siliziumwafer

Um die Ausbeute zu erhöhen, bewerten und entwickeln wir Verfahren zur Herstellung dünner Siliziumwafer und bewerten die Eigenschaften von Wafern und Solarzellen. Wir betrachten die gesamte Prozesskette: von Vereinzeln von Ingots über das Wafersägen bis zur Messung und Sortierung der Wafer sowie der anschließenden Texturierungsprozesse.

*Prof. Dr. Stephan Schönfelder | stephan.schoenfelder@csp.fraunhofer.de*



### Modultechnologie

Wir entwickeln Herstellungsprozesse, neuartige Solarmodule und Materialien vom Labormaßstab bis zur industriellen Größe mit Analytik zu elektrischen Verbindungen, Polymerkomponenten und optischen Eigenschaften sowie mit optischen und elektrischen Simulationen.

*Prof. Dr. Jens Schneider | jens.schneider@csp.fraunhofer.de*

» Wir untersuchen die Zuverlässigkeit von Materialien und Komponenten von Solarzellen und -modulen, führen Ertragsanalysen von Solarmodulen durch und entwickeln darüber hinaus Verfahren zur Herstellung von Siliziumwafern und Solarmodulen.«



## LEITER FRAUNHOFER CSP UND ABTEILUNGSLEITER ZTN

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

### Fokus

Das Fraunhofer CSP betreibt angewandte Forschung in den Themengebieten der Siliziumkristallisation, Waferfertigung, Solarzellencharakterisierung und der Modultechnologie. Es entwickelt neue Technologien, Herstellungsprozesse und Produktkonzepte entlang der gesamten photovoltaischen Wertschöpfungskette. Schwerpunkte sind die Zuverlässigkeitsbewertung von Solarzellen und Modulen unter Labor- und Einsatzbedingungen sowie die elektrische, optische, mechanische und mikrostrukturelle Material- und Bauteilcharakterisierung. Basierend auf dem Verständnis von Ausfallmechanismen werden dadurch Messmethoden, Geräte und Fertigungsprozesse für Komponenten und Materialien mit erhöhter Zuverlässigkeit entwickelt.

### Bemerkenswertes aus 2015

Erste Elemente des Ende 2014 entwickelten und von fünf externen Auditoren begutachteten Strategiekonzepts wurden erfolgreich umgesetzt, darunter die Stärkung des Themenbereiches Modulzuverlässigkeit und Schadensuntersuchungen, Test- und Geräteentwicklung, Entwicklung von Modulen für extreme Klimate und Sonderanwendungen. Im neuen Themenschwerpunkt »Wasserelektrolyse« wurde in einem Verbund mit fünf Industriepartnern und einer Universität das erste Teilprojekt innerhalb des Vorhabens »HYPOS« gestartet. Dabei wird eine dezentrale Kopplung einer PV-Anlage mit einer Elektrolyseanlage erprobt.

Das Modultechnologiezentrum wurde um einen Tabber-Stringer erweitert, der die Verarbeitung von 4- und 5-Busbarzellen und Halbzellen ermöglicht. Die zum zweiten Mal von uns veranstaltete Fachkonferenz »PV Days« war mit mehr als 150 Teilnehmern aus zwölf Ländern wiederum sehr gut besucht.

Die Kooperation mit der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK Leipzig) konnte durch die erfolgreiche Einrichtung einer Stiftungsprofessur »Mechanik von Werkstoffen der Photovoltaik« gestärkt werden. Auf die ausschließlich industriefinanzierte Stiftungsprofessur an der Fakultät Maschinenbau und Energietechnik wurde Prof. Dr. Jens Schneider berufen, der damit gleichzeitig die BMBF-geförderte Nachwuchsgruppe des InnoProfile-Transfer-Vorhabens »MechSi – Modellierung des mechanischen Verhaltens dünner Siliziumsubstrate und -solarzellen« am Fraunhofer CSP leitet.

# ZUVERLÄSSIGE SOLARMODULE FÜR JEDES KLIMA

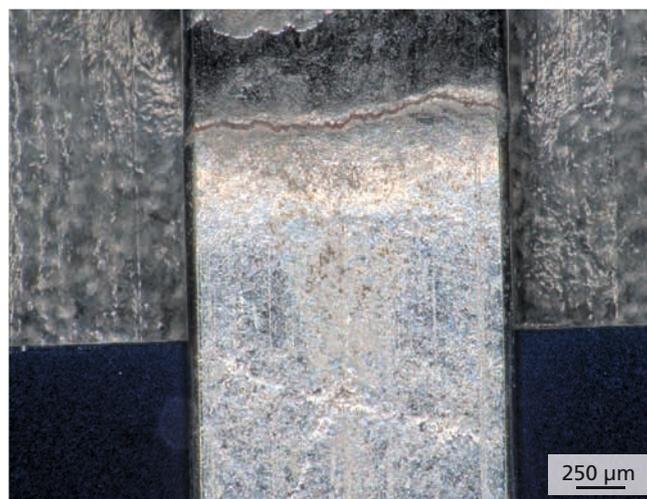
## Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP

Prof. Dr. Jörg Bagdahn | Telefon +49 345 5589-5100 | joerg.bagdahn@csp.fraunhofer.de

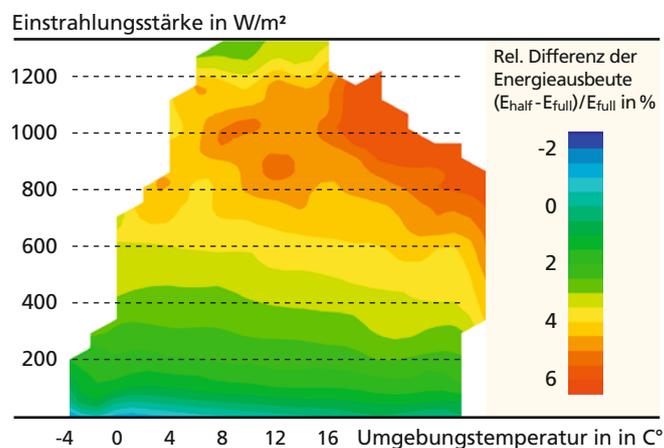
Die Zuverlässigkeit von Solarmodulen ist ein wichtiger Hebel zur Senkung der Kosten von Solarstrom. Die Stromgestehungskosten berechnen sich aus dem Quotienten der Kosten des Systems und der über die Lebensdauer des Moduls erzeugten Energie. Ein besonders zuverlässiges Modul mit einer höheren Lebensdauer erzeugt dabei mehr Energie und senkt die Kosten. Um die Zuverlässigkeit von Solarmodulen zu ermitteln, werden Module beschleunigten Alterungstests zum Beispiel mit erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit unterzogen. Dabei ist ein Vergleich zu Modulen, die sich im normalen Betrieb befinden, wichtig. Bei zu starker Belastung der Module in der beschleunigten Alterung können Ausfallmechanismen induziert werden, die unter realen Witterungsbedingungen keine Rolle spielen. Das Fraunhofer CSP nutzt seine mikrostrukturdiagnostischen Kompetenzen, um Ausfallmechanismen zu verstehen und gezielt Gegenmaßnahmen bei Material- und Technologieauswahl zu ergreifen.

### Beschleunigte Alterung und Freiflächentests

Standardisierte Zertifizierungstests zur beschleunigten Alterung von Solarmodulen sind in Normen definiert und befinden sich in ständiger Diskussion. Die aktuell gültige Norm bezieht sich dabei auf eine Belastung in gemäßigten Klimazonen. Jedoch sind die Umwelteinflüsse in verschiedenen Teilen der Erde durchaus sehr unterschiedlich. Belastungen durch Temperatur, Temperaturwechsel, Feuchtigkeit, UV-Strahlung und mechanische Faktoren wie Wind und Schnee sind in verschiedenen Teilen der Erde sehr unterschiedlich. Während Solarmodule in gemäßigten Breitengraden durch Regen gereinigt werden, sind Module in der Wüste Staub und Sand ohne solche Selbstreinigungsmechanismen ausgesetzt. Sandstürme



1 Lichtmikroskopische Aufnahme eines Verbinderberisses zwischen zwei Solarzellen im Modul.



2 Ermittelter Mehrertrag in einer Freiflächenanlage eines neuartigen Halbzellenmoduls im Vergleich zu einem Vollzellenmodul.



*Im Green Energy Park in Ben Guerir (Marokko) werden Module unter extremen klimatischen Bedingungen getestet – in interinstitutioneller Zusammenarbeit zwischen IRESEN (Marokko) und Fraunhofer CSP.  
Foto © IRESEN/Green Energy Park.*

führen zur Abrasion an allen Oberflächen. Die erhöhte UV-Einstrahlung in Äquatornähe lässt Polymere verspröden und kann damit zu Ausfällen führen. Am Fraunhofer CSP werden Solarmodule in verschiedenen beschleunigten Alterungstests auf ihre Eignung in unterschiedlichen Klimaten untersucht. Dies wird durch Weiterentwicklung von experimentellen Tests und Simulationen der unterschiedlichen Belastungen unterstützt. Um den Vergleich mit realen Belastungen zu ermöglichen, betreibt das Fraunhofer CSP eigene Outdoor-Tests auf dem Modultestfeld auf dem Dach des Institutsgebäudes sowie im Freifeld. Außerdem bestehen weltweite Kooperationen zur Untersuchungen in anderen Klimazonen, zum Beispiel in Marokko und Singapur.

#### **Mit Mikrostrukturdiagnostik Defektmechanismen verstehen**

Beschleunigte Alterungstests sind oft sehr kosten- und zeitaufwändig. Daher ist die Anzahl der Module, die getestet werden, häufig sehr begrenzt. Um trotzdem Ausfallmechanismen und deren Ursache zu verstehen, werden am Fraunhofer CSP die Ausfälle zerstörungsfrei lokalisiert und mithilfe der Mikrostrukturdiagnostik wenn nötig bis auf die atomare Ebene untersucht. Zusammen mit dem Verständnis der optoelektronischen und thermomechanischen Eigenschaften der Solarmodule und ihrer Komponenten können den makroskopischen Ausfällen mikroskopische Ursachen zugeordnet werden. So konnte das Fraunhofer CSP wichtige Beiträge leisten, die zum verbesserten Verständnis von Zell- und Verbinderbruch unter thermomechanischen Lasten (Abbildung 1), Potenzial induzierter Degradation (PID) unter elektrischer Belastung sowie Kontaktfingerverfärbungen (»Schnecken Spuren«)

unter Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur beigetragen haben. Mit dem mikrostrukturellen Verständnis ist es möglich, Aussagen zur Zuverlässigkeit von Modulen in jedem Klima zu treffen und entsprechende Anpassungen vorzunehmen.

#### **Mit mikrostrukturbasierter Technologieentwicklung zuverlässige Module herstellen**

Die Ergebnisse aus beschleunigter Alterung und Freiflächentest sowie der mikrostrukturellen Diagnostik von Defekten ermöglichen es dem Fraunhofer CSP, die Technologien zur Herstellung von Solarmodulen für jedes Klima zu optimieren. Dabei werden zum Beispiel Polymerkomponenten so ausgewählt, dass sie hohen UV-Bestrahlungen im Sonnengürtel der Erde standhalten. Gläser mit selbstreinigenden Oberflächen und Anti-Abrasionsbeschichtungen werden auf ihre Eignung für den Einsatz in Wüstengebieten hin untersucht. Außerdem wird der Ertrag der Module unter den jeweiligen klimatischen Bedingungen optimiert. Häufige, hohe Einstrahlungen führen zu hohen Strömen im Modul. Die elektrischen Leitungen werden entsprechend angepasst, um Verluste zu minimieren und die Energieausbeute zu maximieren.

Prof. Dr. Jörg Bagdahn, Prof. Dr. Jens Schneider

# DEFEKTFREIE HALBZELLEN DURCH OPTIMIERTE LASERPROZESSE

Gruppe

## Diagnostik Solarzellen

Dr. Christian Hagendorf | Telefon +49 345 5589-5100 | christian.hagendorf@csp.fraunhofer.de

Eine bedeutende Innovation in der Solarmoduletechnologie ist die Verwendung von halbierten Solarzellen mit modifizierter Verschaltung. Dabei werden die Zellen am Ende des Solarzellprozesses durch einen zusätzlichen Schritt halbiert. Hierdurch kann eine Leistungssteigerung des Moduls erreicht werden, weil die Serienwiderstandsverluste sinken. Allerdings wird die Leistungssteigerung der Module nur erreicht, wenn der Zelltrennprozess die Zelle nicht signifikant in ihren elektrischen und mechanischen Eigenschaften schädigt. Die Gruppe »Diagnostik Solarzellen« begleitet diese Entwicklung durch Optimierung der erforderlichen Laserprozesse, elektrische Simulationen und Verlustanalysen der Halbzellen. In Kooperation mit den Gruppen »Modulzuverlässigkeit« und »Modultechnologie« werden Halbzellmodule entwickelt und hinsichtlich ihrer mechanischen und elektrischen Zuverlässigkeit bewertet.

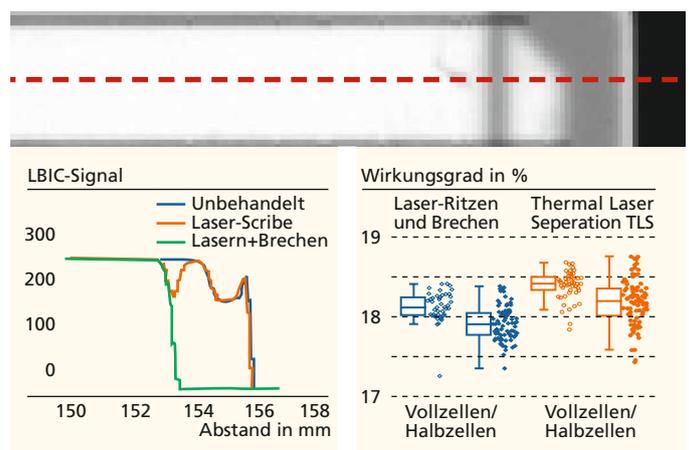
### Elektrische Verlustanalyse an Halbzellen

Das etablierte Verfahren zum Halbieren von Solarzellen besteht aus zwei Schritten: 1. Einbringen eines Lasergrabens auf der Zellrückseite als Sollbruchstelle, 2. Teilen der Zellen durch mechanisches Brechen. Die elektrische Bewertung der Halbzellen ermöglicht Rückschlüsse auf Verluste, die durch die Zellhalbierung verursacht werden. Vorrangig ist dabei eine Bewertung der Zelleistung. Zusätzlich erlaubt eine detaillierte Analyse der Verlustströme, zum Beispiel über Kurzschlüsse oder durch Rekombination, eine gezielte Optimierung des Trennprozesses. Darüber hinaus werden bildgebende und scannende Verfahren zur Charakterisierung der Lasergrabenprofile angewendet, siehe Abbildung 1 links. Durch diese systematischen Untersuchungen wurde am Fraunhofer CSP ein optimierter Laser-Zelltrennprozess entwickelt.

### Evaluierung von Zelltrenntechnologien

Gegenüber dem etablierten Verfahren stellt das thermische Laserseparieren (TLS) eine vielversprechende Alternative dar. Hierbei werden durch einen Laser kombiniert mit einer Abkühlung thermo-mechanische Spannungen erzeugt, die einen Riss durch die Zelle treiben. Am Fraunhofer CSP wurde gezeigt, dass mit dem TLS-Verfahren Halbzellen mit vergleichbaren elektrischen Eigenschaften erzeugt werden wie mit dem etablierten Verfahren, siehe Abbildung 1 rechts.

Dr. Marko Turek



1 Querschnittsprofil (rot gestrichelte Linie) durch einen Lasergraben mittels LBIC (light beam induced current)-Methode (oben und unten links). Vergleich zweier Zelltrennverfahren: Das thermische Laserseparieren und der Standard-Laserprozess liefern vergleichbare, minimale Einbußen im Zellwirkungsgrad (unten rechts).

# SIMULATIONSBASIERTE OPTIMIERUNG VON LÖTPROZESSEN

Gruppe

## Zuverlässigkeit von Solarmodulen und Systemen

Dr. Matthias Ebert | Telefon +49 345 5589-5200 | matthias.ebert@csp.fraunhofer.de

Die Verschaltung der Solarzellen in einem kristallinen Solar- modul erfolgt in der Regel mithilfe von Kupferverbindern. Diese sind mit einem Weichlot versehen und werden auf die Silberbusbars der Solarzellen gelötet. Während des Prozesses entstehen durch die thermische Ausdehnung der Einzelmaterialien Spannungen im Silizium der Solarzelle. Diese Spannungen und somit das Bruchrisiko müssen in der Produktion minimiert werden, um eine gute Ausbeute und die nötige Zuverlässigkeit des Moduls zu gewährleisten. Die Gruppe Modulzuverlässigkeit hat Modelle für die numerische Simulation von Lötprozessen in der Photovoltaik entwickelt, um die Temperatur- und Eigenspannungsverteilung zu ermitteln. Diese Modelle ermöglichen Parameterstudien zum Beispiel für Fließspannung oder Geometrie der Ver- binder sowie der Prozessführung. Anhand der Ergebnisse können die Lötprozesse in der Fertigung optimiert werden.

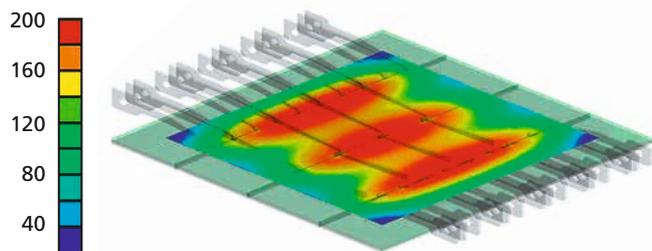
### Temperatursimulation

Es wurde eine Finite-Elemente Simulation des Tabber-Stringer-Prozesses für drei Lötprozessvarianten durchge- führt: dem Infrarotlöten sowie dem Induktionslöten mit und ohne Heizplatte. Übereinstimmend mit Messungen zeigte sich in der Simulation die inhomogene Temperatur- verteilung über die Solarzelle beim Löten (Abbildung 1 oben). Im Vergleich mit den Varianten des Induktionslöten ist dabei ein wesentlich breiterer Temperaturbereich über die Abkühlzeit erkennbar (Abbildung 1 unten). Die Abkühlung er- folgt bei den Induktionsvarianten relativ schnell, während die eingebrachte Wärme beim Infrarotlöten sehr viel langsamer wieder abgegeben wird.

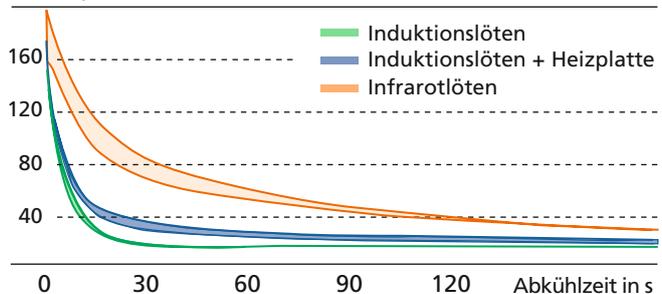
Auf Basis der Temperaturverläufe kann die Ausbildung des Lotgefüges gesteuert werden, sodass möglichst geringe Spannungen in die Zelle eingebracht werden und die Verbin- dung stabil ist. Die Simulation ist erweiterbar im Hinblick auf veränderte Prozessbedingungen (Heizleistung/-zeit, Lampen- positionierung etc.), alternative Aufbauten sowie Zelllayouts, sodass ein umfassendes virtuelles Prototyping möglich ist.

Matthias Pander, Ulli Zeller

Zelltemperatur in °C



Lottemperatur in °C



1 Zelltemperatur bei Infrarotlöten zum Ende der Aufheizzeit (oben). Lot- temperaturen mit zunehmender Abkühlzeit der drei untersuchten Lötmodelle (unten).

# HERSTELLUNG UND CHARAKTERISIERUNG DIAMANTDRAHTGESÄGTER WAFER

Gruppe  
Siliziumwafer

Prof. Dr. Stephan Schönfelder | Telefon +49 345 5589-5310 | stephan.schoenfelder@csp.fraunhofer.de

Siliziumwafer für die Photovoltaik werden konventionell mit glattem Stahldraht und Abrasivpartikeln in einer Slurry gesägt. Das Sägen mit diamantbesetztem Draht bietet im Vergleich dazu ein großes Potenzial für Kostenersparnis: Der Schnitvorschub ist höher, damit sind die Prozesszeiten kürzer. Die größten Herausforderungen bestehen dabei in der veränderten Schädigung im Wafer und dem Sägen von multikristallinem Material. Diesen geht die Gruppe »Siliziumwafer« in der eigenen Pilotlinie zum Drahtsägen und mittels mikrostruktureller Charakterisierung des gesägten Substrates nach.

## Instrumentierte Sägeversuche

In einem instrumentierten Sägeversuch können Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie die am Brick herrschenden Kräfte in alle drei Raumrichtungen über die gesamte Prozesszeit aufgezeichnet werden. Wie in Abbildung 1 oben dargestellt, kann so zum Beispiel für verschiedene Kühlschmiermittel das »Reibverhalten« als Maß des Sägewiderstands während des Sägens bewertet werden. Mit mikrostrukturellen Charakterisierungen der Siliziumwafer wird danach die Waferqualität überprüft und mit dem verwendeten Kühlschmiermittel in Beziehung gesetzt.

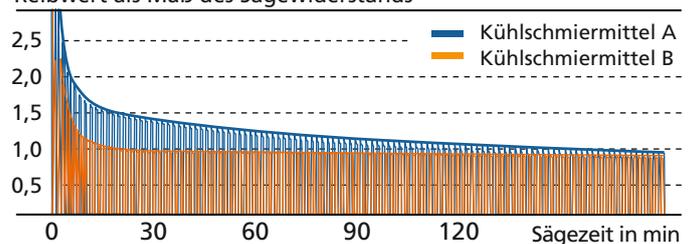
## Einfluss der Texturierung auf die Festigkeit

Die Festigkeit der Wafer wird durch die im Sägeprozess eingebrachten Risse auf der Oberfläche definiert. Mithilfe des 4-Punkt-Biegeversuches wurde ermittelt, dass die diamantdrahtgesägten Wafer besonders bei der Belastung längs zu den Sägeriefen eine stark verringerte Festigkeit gegenüber slurrygesägten Wafern aufweisen. In Abbildung 1 unten ist dies anhand der charakteristischen Bruchspannung zu sehen,

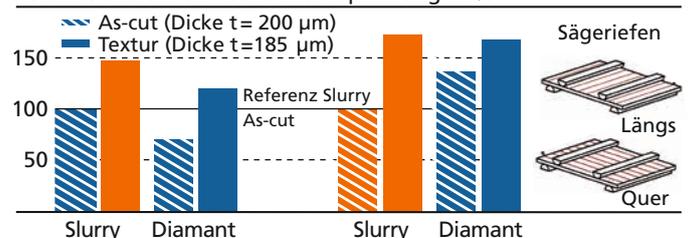
welche die Spannung angibt, bei der 63,2 Prozent aller Proben im Experiment brechen. Im Texturierungsprozess werden die Wafer nasschemisch geätzt und es ändert sich die Oberflächenstruktur und somit die Festigkeit. Weichen die diamantdrahtgesägten Wafer vor der Textur noch um 33 Prozent von den slurrygesägten Wafern ab, so verringert sich der Unterschied nach der Textur auf 20 Prozent. Das stark anisotrope Festigkeitsverhalten der diamantdrahtgesägten Wafer bleibt jedoch auch nach der Textur erhalten.

Felix Kaule, Ringo Köpge

Reibwert als Maß des Sägewiderstands



Relative charakteristische Bruchspannung in %



1 Vergleich der Schmiereigenschaften zweier Kühlschmiermittel durch die Bestimmung des Reibwerts während des Sägeprozesses (oben). Beispiel für Festigkeiten von Slurry/Diamant-gesägten monokristallinen Si-Wafern vor/nach der Textur in der 4-Punkt-Biegung (unten).

# ZUVERLÄSSIGE TECHNOLOGIEN FÜR GEWÖLBTE SOLARMODULE

Gruppe  
**Modultechnologie**

Prof. Dr. Jens Schneider | Telefon +49 345 5589-5500 | jens.schneider@csp.fraunhofer.de

Zur Erschließung neuer Einsatzgebiete müssen Solarmodule neben der Stromerzeugung und möglichst geringen Kosten in Cent/kWh weitere Eigenschaften erfüllen: In mobilen Anwendungen sowohl im Fahrzeugbau als auch im Freizeitbereich müssen Solarmodule leicht sein. Ein wichtiges Kriterium ist die Leistung pro Masse in W/kg. In der Gebäudeintegration sollten Solarmodule zudem ästhetische Ansprüche von Architekten und Bauherren erfüllen, mit entsprechenden Anforderungen an Farb- und Formwahl für flexible Gestaltungsmöglichkeiten. Gewölbte Solarmodule sind für diese Anwendungsgebiete gut geeignet. Um sie mit der nötigen Zuverlässigkeit herzustellen, müssen allerdings besondere Maßnahmen bei der mechanischen und elektrischen Auslegung getroffen werden.

## **Mechanische Auslegung – Sandwich**

Bei der Integration von Photovoltaik in Gebäude, Überdachungen oder Fahrzeuge ist höchste mechanische Stabilität der Solarmodule eine absolute Notwendigkeit. Im Gegensatz dazu gelten aber meist Gewichtsrestriktionen, die mit klassischen Glas/Glas-Modulen, wie sie vorrangig in der Gebäudeintegration eingesetzt werden, nicht eingehalten werden können. Die mechanische Auslegung von Sandwich-Verbunden als Träger für gewölbte Solarmodule und die gezielte Materialauswahl für die Prozesse der Solarzellverkapselung sind Herausforderungen, die in der Gruppe Modultechnologie bearbeitet werden. Der Einsatz von Wabenkernen, Verrippungen und Verbundstrukturen führt zu neuartigen Modulkonzepten mit herausragendem Steifigkeits-Gewichts-Verhältnis und integrierten Befestigungs- und Anchlusselementen (Abbildung 1).

## **Elektrische Auslegung – Verschaltung**

In Solarmodulen, die inhomogen beleuchtet werden, richtet sich die elektrische Leistung im günstigen Fall nach der am geringsten beleuchteten Zelle. Im ungünstigen Fall kann das Modul Schaden nehmen und dauerhaft Leistung verlieren oder sogar zerstört werden. Inhomogene Beleuchtung kann durch Schattenwurf oder Verunreinigungen auftreten und ist im Fall von gewölbten Solarmodulen immer gegeben, da die Zellen in unterschiedlichen Winkeln zur Sonne ausgerichtet sind. Durch optimierte elektrische Verschaltung der Zellen im Modul mit passiven und aktiven Bauelementen kann der Leistungsverlust minimiert und Schaden verhindert werden. In der Gruppe Modultechnologie werden Solarmodule für jeden Anwendungsfall simuliert und optimiert. Die Module können in Größen bis 2,2 x 2,6 Meter hergestellt und getestet werden. Die Verschaltung wird dabei jeweils auf Form und Einsatz optimiert.

Christian Ehrich



1 Gewölbtes Leichtbaumodul auf Basis von faserverstärkten Kunststoffen mit thermoplastischem Wabenkern.

# FRAUNHOFER-ANWENDUNGSZENTRUM FÜR ANORGANISCHE LEUCHTSTOFFE

## LEITER

Prof. Dr. Stefan Schweizer | Telefon +49 2921 378-410 | stefan.schweizer@iwmh.fraunhofer.de

### Fokus

Das Fraunhofer-Anwendungszentrum AWZ für Anorganische Leuchtstoffe arbeitet an der Charakterisierung und Entwicklung von Leuchtstoffen und Leuchtstoffsystemen, speziell auf den Gebieten der Leuchtstoffeffizienz, Zuverlässigkeit und Farbstabilität. Im Fokus stehen dabei umfassende optische und spektroskopische Analysen, thermische und mikrostrukturelle Charakterisierung sowie Untersuchungen zur Langzeitstabilität von Leuchtdioden und Beleuchtungselementen.

### Bemerkenswertes aus 2015

In Zusammenarbeit mit der IHK Arnsberg, Hellweg-Sauerland veranstaltete das Fraunhofer-Anwendungszentrum für Anorganische Leuchtstoffe im Rahmen eines IHK-Technologietages eine Vortragsreihe zum Thema »LEDs und deren zukünftige Anforderungen«. Die Veranstaltung bot der regionalen Industrie Einblick in die Entwicklung des Themenfeldes sowie den aktiven Austausch zu aktuellen Ansätzen des Anwendungszentrums.

Prof. Dr. Stefan Schweizer betreute als Gasteditor eine Sonderausgabe der international renommierten Zeitschrift »Advanced Optical Materials«. Diverse Beiträge internationaler Experten, die vom Fraunhofer AWZ und dem Fraunhofer IWM in Halle für die Sonderausgabe »Optical Materials for Spectral Management« ausgewählt wurden, stellen unter anderem neue Ideen für Weißlicht-LEDs vor. Der Sonderband fasst aussichtsreiche Forschungsansätze und eine Bewertung ihrer Potenziale für modernes Lichtmanagement zusammen. Insbesondere die Effizienz von LED-Leuchtstoffen kann materialwissenschaftlich noch verbessert werden und so einer energieeffizienten Beleuchtung den Weg ebnen.

Mit der Fertigstellung eines Neubaus der Fachhochschule Südwestfalen im Herbst 2015 konnten dem AWZ weitere Räumlichkeiten für Labore und Büros zur Verfügung gestellt werden. Die feierliche Eröffnung des Gebäudes fand am 25. November 2015 statt.



*»Die durch die Lichtumwandlung entstehende Wärmeentwicklung innerhalb des Leuchtstoffes ist eine zusätzliche Herausforderung für Weißlicht-LEDs. Dies ist ein meist nicht beachteter Aspekt. Glasbasierte Leuchtstoffe zeigen eine gegenüber konventionellen Materialien verbesserte thermische Stabilität und stellen somit eine vielversprechende Alternative dar.«*

# ENTWICKLUNG VON TEMPERATURSTABILEN LEUCHTSTOFFEN FÜR WEISSE LEDS

Leuchtdioden (LEDs) gehört die Zukunft in der Beleuchtungstechnik. Moderne Hochleistungs-LEDs bieten gegenüber konventionellen Glüh- und Energiesparlampen Vorteile im Hinblick auf Effizienz, Kompaktheit, Lebensdauer und Umweltschutz. Bei einem Teil der kommerziell erhältlichen weißen LEDs tritt durch von hohen Betriebsströmen generierte Wärme jedoch eine schrittweise Schädigung des Leuchtstoffs auf.

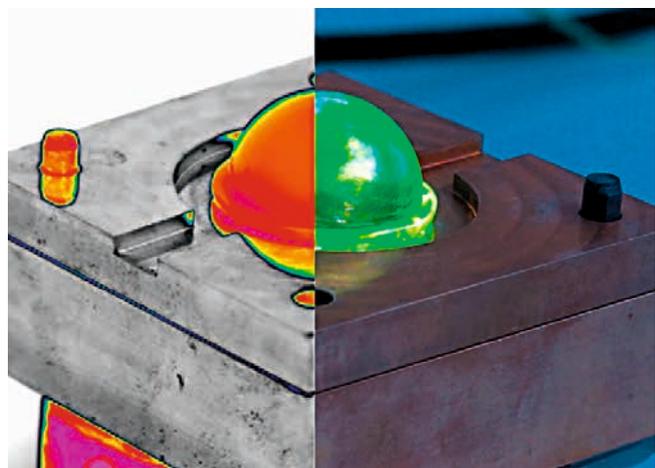
Leuchtstoffe auf Basis mit Seltenen Erden dotierter Gläser sollen die Lebensdauer von weißen Leuchtdioden erhöhen und einen langzeitstabilen Farbeindruck sicherstellen. Diese lumineszierenden Gläser zeichnen sich durch eine erhöhte chemische und thermische Widerstandsfähigkeit aus. Um Weißlicht-LEDs weiter zu optimieren, ist die richtige Kombination von LED und Leuchtstoff entscheidend. Vor allem Terbium und Europium eignen sich sehr gut für einen Einsatz in der Beleuchtungstechnik. Beide weisen unter ultravioletter oder Blaulichtanregung eine intensive Emission im grünen (Tb) beziehungsweise im roten (Eu) Spektralbereich auf. In richtiger Kombination einer LED lässt sich so ein weißer Lichteindruck einstellen. Auch bei hohen Temperaturen von 150 °C, die im Betrieb einer LED auftreten, tritt eine intensive Emission auf. Abbildung 1 zeigt dies am Beispiel eines Tb<sup>3+</sup>-dotierten Glases unter UV-Anregung. Die thermische Stabilität der am Anwendungszentrum entwickelten glasbasierten Leuchtstoffe liegt oberhalb der des konventionellen gelben Leuchtstoffs von Weißlicht-LEDs, Ce:YAG.

## Thermografie an Leuchtstoffen

Ein oft nicht beachteter Aspekt der Temperaturbelastung von LED-Leuchtstoffen ist die Wärmeentwicklung innerhalb des

Leuchtstoffs selbst. Beim Lichtkonversionsprozess wird blaues energiereiches Licht der primären LED in energieärmeres (zum Beispiel gelbes) Licht umgewandelt. Die sich daraus ergebende Energiedifferenz (Stokes-Shift) wandelt sich in Wärme um. Die Wärmeleistung bei der Umwandlung von blauem (450 nm) zu gelbem (570 nm) Licht beträgt mehr als 20 Prozent der eingestrahelten Lichtleistung. Die Erwärmung der Leuchtstoffoberfläche kann orts- und zeitaufgelöst mit einer Infrarotkamera aufgenommen werden (Abbildung 1). Aus der Wärmeleistungsdichte im Glas lässt sich anhand von Thermografieaufnahmen die im Glas freigesetzte Gesamtwärmeleistung berechnen.

Dr. Franziska Steudel, Peter Nolte



1 Thermografieaufnahme (links) und Fotografie unter UV-Anregung (rechts) einer Tb<sup>3+</sup>-dotierten Glaskuppel (Durchmesser 30 mm) bei 150 °C.

# VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM HALLE

## Fraunhofer-Verbund, -Allianzen und herausragende Projekte

### Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile

Fraunhofer-Materialforschung umfasst die gesamte Kette von der Entwicklung und Verbesserung von Materialien über die Herstellertechnologie 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.

*Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn*

[www.materials.fraunhofer.de](http://www.materials.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie

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

*Prof. Dr. Andreas Heilmann*

[www.nano.fraunhofer.de](http://www.nano.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Batterien

Die Fraunhofer-Allianz Batterien entwickelt rund um das Thema elektrochemische Energiespeicher (Batterien, Superkondensatoren) technische und konzeptionelle Lösungen. Die Kompetenzen der Allianz umfassen dabei die Felder Material, System, Simulation und Testung.

*Dr. Nadine Menzel*

[www.batterien.fraunhofer.de](http://www.batterien.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Bau

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

*Andreas Kromholz*

[www.bau.fraunhofer.de](http://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 Speicherung und Mikroenergie-technik.

*Prof. Dr. Jörg Bagdahn*

[www.energie.fraunhofer.de](http://www.energie.fraunhofer.de)

### Fraunhofer-Allianz Leichtbau

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

*Prof. Dr. Peter Michel*

[www.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/verbuende-allianzen/Leichtbau.html](http://www.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/verbuende-allianzen/Leichtbau.html)

### **Fraunhofer-Allianz Numerische Simulation von Produkten, Prozessen**

In dieser Fraunhofer-Allianz bündeln 18 Fraunhofer-Institute ihre Kompetenzen, die sich mit der Entwicklung und Verbesserung von Simulationsverfahren beschäftigen. Insbesondere die Bündelung der Kompetenzen aus dem IuK-Bereich mit dem Werkstoff- und Bauteil-Know-how sowie mit der Oberflächen- und Produktionstechnik verspricht innovative Ergebnisse.

*Dr. Matthias Ebert*

[www.simulation.fraunhofer.de](http://www.simulation.fraunhofer.de)

### **Fraunhofer-Allianz »Textil« (im Aufbau)**

Um das Potenzial von Hochleistungsfasern für textilverstärkte Leichtbaustrukturen voll auszuschöpfen, sollen Innovationen durch anwendungsnahe und produktspezifische Entwicklungen von textilbasierten Technologien und Anlagensystemen in direkter Verknüpfung mit der Preform- und Bauteilfertigung hervorgebracht werden. Die gesamte textile Fertigungskette wird dazu ausgehend von der Faserherstellung und -funktionalisierung in der Allianz abgebildet.

*Prof. Dr. Peter Michel*

### **Fraunhofer-Leitprojekt Kritikalität Seltener Erden**

Fraunhofer-Institute entwickeln effizientere Herstellungsprozesse für Hochleistungsmagnete, optimieren deren Bauteilauslegung und erforschen Recyclingmöglichkeiten. Ziel ist es, den Primärbedarf an schweren Seltenerd-Elementen bei zwei Demonstrator-Permanentmagneten zu halbieren. Das Fraunhofer IWM in Halle sucht Substitutionsmagnetmaterialien möglichst ohne Seltenerd-Elemente mit elektronentheoretischer Materialsimulation und elektronenmikroskopischer Materialcharakterisierung.

*Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn (Koordinator)*

[www.seltene-erden.fraunhofer.de](http://www.seltene-erden.fraunhofer.de)

### **Max-Planck – Fraunhofer Kooperationsprojekt HEUSLER**

Das Fraunhofer IWM erforscht gemeinsam mit zwei Max-Planck-Instituten in Dresden und Halle, welche strukturellen und chemischen Möglichkeiten es gibt, um auf der Basis von intermetallischen Heusler-Phasen neuartige Materialien zu erzeugen, die gute hartmagnetische Eigenschaften haben, aber keine Seltenerd-Elemente enthalten.

*Prof. Dr. Thomas Höche | [www.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/kooperationen/max-planck-kooperationen.html](http://www.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/kooperationen/max-planck-kooperationen.html)*

# VERNETZUNG DES FRAUNHOFER IWM HALLE

Aktivitäten in Sonderforschungsbereichen, Fraunhofer-internen Programmen und Spitzenclustern

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

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

*Prof. Dr. Matthias Petzold*

## Biomimetischer Synthesekautschuk in innovativen Elastomerkompositen (BISYKA), MAVO

Gemeinsam mit den Fraunhofer-Instituten IAP, IME und ISC erforscht das Fraunhofer IWM Halle die Ursachen für die einzigartigen mechanischen Eigenschaften des Naturkautschuks und deren Übertragung auf Synthesekautschuk, um mit einem »biomimetischen Synthesekautschuk« als Resultat ein innovatives Produkt mit hohem Wertschöpfungspotenzial hervorzubringen.

*Prof. Dr. Mario Beiner*

## Sonderforschungsbereich Polymere unter Zwangsbedingungen

In diesem von der DFG seit 2011 geförderten Verbundprojekt forscht das Fraunhofer IWM Halle gemeinsam mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und der Universität Leipzig an grundlegenden Fragestellungen im Bereich der Struktur und Dynamik weicher Materie. Schwerpunktmäßig wird der Einfluss von Zwangsbedingungen auf Strukturbildungsprozesse in synthetischen und biologischen Polymersystemen und Kompositen untersucht.

*Prof. Dr. Mario Beiner*

[www.natfak2.uni-halle.de/sfbtrr102](http://www.natfak2.uni-halle.de/sfbtrr102)

## Innovationscluster Kunststoffe und Kunststofftechnologie für die Solarindustrie

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

*Dr. Michael Busch (Koordinator)*

[www.solarkunststoffe.de](http://www.solarkunststoffe.de)

## Spitzencluster BioEconomy

Das Cluster verbindet die für die Bioökonomie relevanten Forschungs- und Industriebereiche in Mitteldeutschland mit dem Ziel, die Entwicklung, Skalierung und Anwendung von innovativen technischen Prozessen voranzutreiben. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der nachhaltigen stofflichen Nutzung biobasierter, nachwachsender Rohstoffe aus dem Non-Food-Bereich (insbesondere von Holz) sowie auf der Herstellung werthaltiger Produkte für verschiedene Industriebereiche, verbunden mit der energetischen Nutzung von Reststoffen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg.

*Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn (Stellv. Vorsitzender),*

*Andreas Kromholz (Themengebietsleiter Biokunststoffe)*

[www.bioeconomy.de](http://www.bioeconomy.de)

### **Spitzencluster SolarValley Mitteldeutschland**

Im Zentrum der Arbeit des Clusters steht das Ziel, Solarstrom wettbewerbsfähig zu machen. Dies gelingt in der Umsetzung eines Strategiekonzepts, in dem Wirtschaft, Wissenschaft und Bildung eng verzahnt zusammenarbeiten, um Strom für Generationen erneuerbar und dezentral bereitzustellen. Dabei soll die Photovoltaik als bedeutendste Energietechnologie dieses Jahrhunderts etabliert werden.

*Prof. Dr. Jörg Bagdahn (Stellv. Vorsitzender)*

[www.solarvalley.org](http://www.solarvalley.org)

### **HYPOS**

Mit dem Projekt HYPOS Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany soll »grüner« Wasserstoff aus erneuerbarem Strom im großtechnischen Maßstab für energietechnische Anwendungen hergestellt werden – als effizienter Energieträger mit hervorragender Transport- und Speicherfähigkeit. Das HYPOS-Projekt wird im Rahmen des Programms »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation« durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

*Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn (Stellv. Vorsitzender),*

*Prof. Dr. Jörg Bagdahn (Themenfeldleiter Stromerzeugung)*

[www.hypos-eastgermany.de](http://www.hypos-eastgermany.de)

## Ausstattung der Kernkompetenz Mikrostrukturdiagnostik

### Ionen-/Elektronenmikroskopie

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

### Röntgenografische und akustische Verfahren

- 3D-Röntgen-CT-Inspektionsanlagen (185 kV Nanofokus, 225 kV Mikrofokus) mit in situ-Verformungseinrichtungen
- Röntgendiffraktometer für Spannungsmessung, Textur- und Phasenanalyse mit Hochtemperatureinrichtung bis 2 300 K und Dünnschichtanalyseeinrichtung
- Luftgekoppelter Ultraschall (Scanfläche 1 500 x 1 000 mm<sup>2</sup>)
- Akustische Rasterelektronenmikroskopie (MHz bis GHz)

### Physikalisch und chemische Oberflächenanalytik

- Time-of-Flight-Sekundärionen-Massenspektroskopie (ToF-SIMS)
- Photoelektronenspektroskopie mit Abtragsmodus, Tiefenprofil (XPS, UPS) sowie Auger-Elektronenspektroskopie (AES)
- Tiefenprofil-Glimmentladungsspektrometer (GDOES)
- Kontaktwinkelmessung
- Plasmaanalytiksystem (OES, VI-Probe, SEERS)

### Topografie- und Konturmessung

- Rasterkraftmikroskope (AFM) in Kombination mit Licht- und Fluoreszenzmikroskopie
- Weißlichtinterferometer
- Konfokal-Laserscanningmikroskope (CLSM)

- Profilometer und Rauheitsmesseinrichtungen
- Interferometrische Eigenspannungsmessung
- Bestimmung Wafergeometrie (Dicke, Dickenvariation, etc.)
- Interferometer mit Phasenschieber für Konturmessung von Asphären

### Lichtoptische und spektrometrische Verfahren IR-UV

- Lichtmikroskope, Dunkelfeld- und DIK-Modus
- Quantitative Bildanalysesysteme
- UV/VIS/NIR-Spektrometer und Spektralellipsometer
- Elektrolumineszenz- und Photolumineszenz-Spektroskopie
- Infrarot-Mikroskopie
- FTIR-Spektroskopie und -Mikroskopie mit ATR-Messzellen
- Konfokales Ramanmikroskop und Raman-Spektrometer
- IR-Spannungsoptik-Messungen
- Verfahren zur Messung der Ladungsträgerlebensdauer (Mikrowellen-Photoconductance-Decay, quasistatische Photoleitfähigkeit)
- Farbanalysator
- Zeitaufgelöste Fluoreszenz und ortsaufgelöste Elektrolumineszenz im UV-VIS-NIR-Bereich
- Nano- und Femtosekunden-Lasersysteme
- Photolumineszenz-Messplatz zur ortsaufgelösten Charakterisierung von Si-Blöcken, Wafer und Zelle

### Elektrische Charakterisierung

- Messplätze zur Ladungsträgerlebensdauerermessung (Si-Block, Wafer)
- 4-Punkt-Methode und Wirbelstrommethode zur Leitfähigkeitsmessung
- Elektrolumineszenz-Messplatz zur Zellen-Charakterisierung
- Messplatz zur Bestimmung der internen und externen Quanteneffizienz von Zellen
- Sonnensimulator für Solarzellen

### Thermophysikalische Messverfahren

- Dynamische Differentialkalorimetrie bis 1 500 °C
- Thermogravimetrische Analyse (TGA)
- Differential-Thermoanalyse
- Dilatometer für Messungen bis 1 400 °C
- Lock-in-Thermographie mit elektrischer und optischer Anregung
- Klimaprüfkammern

### Material- und Spurenanalyse

- Massenspektroskopie mit induktions-gekoppeltem Plasma (ICP-MS) mit Laserablation, chemische Extraktion und elektrothermische Vaporisation
- Wasserstoffanalysator inkl. Auslagerungssofen
- Stickstoff- und Sauerstoffanalysator
- Dichte- und Porositätsmesseinrichtungen
- Restgasanalysator
- Gaspermeationsmessgerät

### Polymeranalytik

- Dynamische Differentialkalorimetrie (DSC)
- Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)
- Thermomechanische Analyse (TMA)
- Hochdruckkapillarviskosimeter
- Schmelzindexmessgeräte (MFI)
- HDT-Wärmeformbeständigkeits- und Vicat-Erweichungstemperaturmessung
- Dielektrische Analyse (DEA)
- TGA mit FT/IR-Kopplung
- Karl-Fischer-Titration zur Feuchtebestimmung in Kunststoffen
- Licht-Klimaprüfschrank und Klimaprüfschrank
- Rotationsrheometer
- Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsmessung (Light-Flash-Methode) bis 300 °C
- Soxhlet-Extraktor

### Prüfung von Mikrokomponenten

- 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

### Ausstattung der Kernkompetenz Mikrostrukturdesign

#### Oberflächen- und Grenzflächentechnologien

- Mehrkammerbeschichtungsanlage für Multilagen- und Compositbeschichtungen
- Plasma-CVD-Beschichtungsanlagen
- Hochfrequenz-Magnetron-Beschichtungsanlagen
- Coronabehandlungsanlagen für Polymerfolien
- Plasmaätzenanlagen
- Nasschemische Beschichtungsanlagen (Spin-Coating, Raketbeschichtung, Tauchbeschichtung)
- Elektrostatische Spinneinrichtung
- Ionenätzenanlage zur Probenpräparation und Oberflächenbearbeitung
- Waferbondanlage mit Plasmaaktivierung
- Drahtbondtechnik zur Kontaktierung von mikroelektronischen Bauelementen
- Anlage zum Laserschweißen von Polymerfolien

#### Waferfertigung

- 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 (slurrybasiertes Sägen, Diamantdrahtsägen)
- Vorreinigungsanlage zum Ablösen der Wafer nach Sägen
- Inline-Feinreinigungsanlage zur Endreinigung der Wafer
- Inline-Messanlage mit Sortiereinheit zur Waferendkontrolle und Klassifizierung

### Solarmodulfertigung

- 3D-Vakuumlaminator
- Automatisches Dispenssystem für Leitkleber
- Variable Zellstring-Layup-Station
- Halbbautomatische Zellverlötungsanlage
- Laborglasreinigungsautomat
- Labor- und Großmodullaminator
- Präzisionsprüfmaschinen für Verbindungs- und Lotmaterial
- RTP-Ofen
- Siebdrucker
- Thermoschockprüfschrank
- Universalprüfmaschinen von 1N bis 400kN, uni- und multiaxial
- UV-Vernetzungseinheit
- Vakuumlaminator
- Tension / Torsion-Prüfmaschine 10 kN

### Polymerverarbeitung

- Minicompounder mit konischen Doppelschnecken
- Messknetzer mit 60 bzw. 300 ml Kammervolumen für Thermoplast- und Elastomerverarbeitung, Drehmoment bis 300 Nm, elektrisch und flüssig temperiert
- Minispritzgussanlage
- Injection Molding Compounder KM 1 300 bis 14 000 IMC, Schließkraft 1 300 Tonnen, max. Schussgewicht 5 300 g (PS)
- Injection Molding Compounder KM 3 200 bis 24 500 MX IMC, Schließkraft 3 200 Tonnen, max. Schussgewicht 20 000 g (PS)
- Spritzgießmaschine KM 200 bis 1000 C2, Schließkraft 200 Tonnen, max. Schussgewicht 476 g (PS), Werkzeug-Temperatur bis 140 °C, separate zweite Spritzeinheit SP 160, vertikal, max. Schussgewicht 68 g (PS)
- Vollautomatisierte Verarbeitungszelle mit Infrarot-Heizstation für die Verarbeitung von kontinuierlich-faserverstärkten Thermoplasten im Hybridspritzguss
- Parallele, gleichlaufende, frei konfigurierbare Doppelschneckenextruder vom Labor- bis in den Pilotmaßstab (5 bis 400 kg/h), austragsseitig mit Strang-, Unterwassergranulierung sowie Heißabschlag ausgerüstet
- Einschneckenextruder
- Downstream-Equipment für Profilextrusion
- Polyurethan-Anlage für Clear-Coat-Molding im Pilotmaßstab

## TECHNISCHE AUSSTATTUNG AM FRAUNHOFER IWM HALLE

- Faserschneide, Stapellängen 1,5 bis 98 mm
- Trockenlufttrockner, Trocknungstemperatur-Einstellung bis 160 °C
- Polymer-Pulvermühle, Shredderanlage
- Laminat-Pressen (400 x 400 mm), temperierbar bis 400 °C
- Doppelbandpresse (Breite 1000 mm) temperierbar bis 250 °C
- Pulverstreuer für Kunststoffmahlgut
- Roving-Abspulgatter
- Faserspreizsystem statisch und dynamisch

**Preise und Ehrungen**

Best Paper Award ESRF 2014 for paper exchange with ISTFA 2015 an Michél Simon-Najasek, Frank Altmann, Susanne Hübner und Andreas Graff für »Advanced FIB sample preparation techniques for high resolution TEM investigations of HEMT device structures« 02.10.14, Berlin

Best Paper Award der imaps-Deutschland Herbsttagung an Falk Naumann für »Mechanische und mikrostrukturelle Bewertung von Halbleiterbauelementen mit Oberflächendefekten« 24.10.14, München

Outstanding Paper at 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis 2014 an Frank Altmann, Jörg Jatzkowski und Michél Simon-Najasek für »Localization of weak points in thin dielectric layers by electron beam absorbed current (EBAC) imaging« 13.11.14, Houston, Texas, USA

Rehau-Preis Technik 2014, Kategorie Dissertation an Ralf Schlimper für »Verformungs- und Versagensverhalten geschlossenzelliger Polymerhartschaumstoffe« 02.12.14, Rehau

Hugo-Junkers-Preis 2014, Sonderpreis Ressourceneffizienz an Ralf Schlimper für »Lagerfähiges Prepreg PD-120 EPO« 15.12.14, Magdeburg

Hugo-Junkers-Preis 2014, 2. Platz Kategorie Innovativste Allianz an Andreas Heilmann, Maik Rudolph, Annika Thormann, Stefan Schwan für »Innovative Zusammenarbeit im Bereich Medizintechnik – Neue Implantate für die Mittelgesichtsrekonstruktion« 15.12.14, Magdeburg

SiliconPV Award 2015 an Susanne Richter für »High-resolution structural investigation of passivated interfaces of silicon solar cells« 25.03.15, Konstanz

Nachwuchspreis Green Photonics an Torsten Büchner für »Charakterisierung von mit Femtosekundenlasern erzeugten Mikrostrukturen im Glasvolumen für das Lichtmanagement in Solarmodulen« 22.06.15, München

Luther-Urkunde der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg an Volker Naumann für »Ursachenanalyse und physikalische Modellbildung für Potential-induzierte Degradation von Silizium-Solarzellen« 03.07.15, Halle (Saale)

Anerkennungspreis der Stadt Halle beim IQ-Innovationspreis Mitteldeutschland an Volker Naumann für »Entwicklung eines Prüfgeräts zur Qualitätskontrolle von Solarzellen und Solarmodulen PIDcon« 07.07.15, Halle (Saale)

**Dissertationen**

Jana Fiedler  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Verarbeitungsverhalten von Cellulosegeneratfaser verstärktem Polypropylen

Andrea Friedmann  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Mikromorphologische Untersuchungen an humanem Bandscheibengewebe mittels Rasterelektronenmikroskopie zur Bewertung der Bandscheidendegeneration

Ulrike Hirsch  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Antifouling-Funktionalisierung von Kompositmembranen zur Reversosmose durch Plasmaprozesse und radikalische Polymerisation

Marianne John  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Untersuchungen zu Eigenspannungen in CFK-Schaum-Sandwichstrukturen

Volker Naumann  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Ursachenanalyse und physikalische Modellbildung für Potentialinduzierte Degradation von Silizium-Solarzellen

Sandra Richter  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Korrelationen von Plasmaparametern und Materialeigenschaften zur Kontrolle des industriellen Atmosphärendruck-Plasmaprozesses

Susanne Richter  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Entstehung und Charakterisierung von nichtmetallischen Fremdphasen bei Siliziumkristallisationsprozessen für die Photovoltaik

Franziska Steudel  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Lumineszierende Gläser für Photovoltaik und Leuchtdioden

Katrin Unterhofer \*  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Charakterisierung von makro- und mikroskaligen thermo-mechanischen Materialeigenschaften dünner Polymerfilme

Matthias Zschebye  
Technische Universität Dresden  
Zum temperatur- und dehnraten-abhängigen Deformations- und Schädigungsverhalten von Textil-Thermoplast-Verbunden

**(\* vom Fraunhofer IWM Halle betreute Arbeit, Autorin/Autor jedoch nicht am Fraunhofer IWM Halle**

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

Rodrigo Álvarez Monterroso  
Hochschule Offenburg  
Development and construction of specific test samples for the investigation of PV module defects (M)

Niklas Bönninghoff  
Hochschule Anhalt  
Untersuchung des elektrischen Verhaltens von Modulwechselrichtern nach bestehenden Normen mit Fokus auf den Wirkungsgrad bei Extremtemperaturen (B)

Carlo Brzuka  
Hochschule Anhalt  
Zerstörungsfreie Untersuchung am c-Si Modul zur statistischen Auswertung von Rissen mit Shunts (B)

Mohamed Khammoussi Flahi  
Universität de Carthage, National Institut of Applied Sciences and Technology (INSAT), Tunesien  
Dielectric thermal analysis of encapsulation polymers for photovoltaic modules (M)

Daniel Friedrich  
Hochschule Anhalt  
Evaluierung eines mobilen Messstandes zur Aufnahme von Lichteinfallswinkel-abhängigen Strom-/Spannungskennlinien von Solarmodulen bei natürlichem Sonnenlicht (B)

Mathias Fromm  
Hochschule Anhalt  
Entwurf, Auslegung und Aufbau einer Elektrofahrrad-Garage mit kristallinen, gewölbten Leichtbau-Solarmodulen (B)

Felix Frühauf  
Otto von Guericke-Universität Magdeburg  
Messung und quantitative Auswertung von Elektrolumineszenzsignalen an Solarzellen und -modulen (M)

Patrick Funke  
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, University of the West of Scotland, Schottland  
Entwicklung von Lasteinleitungselementen für ein Leichtfahrzeug mit naturfaserverstärkter Sandwichstruktur (M)

Anne Geyer  
Technische Universität Dresden  
Untersuchung von Einflussgrößen beim Single Cantilever Beam Test (SCB) an Sandwichstrukturen mit Honigwabenkern (D)

Tina Gläsel  
Technische Universität Bergakademie Freiberg  
Oberflächenmodifizierung und Analytik von Polymerfolien (D)

Thomas Gläßer  
Hochschule Anhalt  
Entwicklung und konstruktive Umsetzung einer Apparatur zur statischen Vermessung druckluft-separierter Verstärkungsfasern (M)

Tino Jacob  
Technische Universität Dresden  
Experimentelle Untersuchungen zur Einbettung und Herausführung von Faser-Bragg-Gitter-Sensoren in Faserverbundstrukturen aus thermoplastischen unidirektionalen Tapes (D)

Han Jiale  
Hochschule Anhalt  
Elektrochemisch-analytische und konduktometrische Charakterisierung von leitfähigen Kompositlacken (B)

Julia Koppernock  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Untersuchung von Virenfiltern aus nanoporösem Aluminiumoxid für die Anwendung in der Sterilfiltration (M)

Gaurav Kulkarni  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Compatibilization of Wood Plastic Composites based on Polyamide 11 and Beech Wood Flour (M)

Ralf Lindau  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Kominierte Darstellung von Bild- und Messdaten (B)

Sriharish Malebennur Nagaraja  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Influence of filler network topology and immobilized rubber on reinforcement in natural rubber composites containing different nanoparticles (M)

Andriani Pelekanou  
Ernst-Abbe-Hochschule Jena  
Methodenentwicklung zur Kontaktwinkelmessung von nanostrukturierten Polymeroberflächen (M)

Tony Porsch  
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig  
Entwicklung eines bruchmechanischen Finite-Elemente-Modells zur Rissausbreitung im Silizium am Beispiel des Thermischen Laserstrahl-Separierens (TLS) (M)

Sara Jane Portmann  
Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin  
Oberflächenmodifizierung von Trägermatrices durch Nanostrukturierung für die Anwendung im Tissue Engineering (B)

Nicky Rank  
Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Leipzig  
Experimentelle Charakterisierung des Delaminationsverhaltens von Laminaten aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten (B)

Karl Riedrich  
Hochschule Merseburg  
Erweiterung einer Messeinrichtung zur magnetischen Stromflusskartierung in leistungselektronischen Bauelementen (B)

Heinrich Ruhland  
Fachhochschule Schmalkalden  
Entwicklung eines Spannrahmens für ETFE-Membran-Fassaden (M)

Anne Schaeme  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Oberflächenmodifizierung durch funktionelle Nassbeschichtung von biokompatiblen und pharmazeutischen Wirkstoffen auf nanostrukturierten Transportträgern (M)

Christian Schmidt  
Hochschule Anhalt  
Verschleißcharakterisierung an Diamantsägedrähten (B)

Markus Schmidt  
Hochschule Anhalt  
Erweiterung eines Messplatzes für Untersuchungen mit luftgekoppeltem Ultraschall (B)

René Schüler  
Hochschule Nordhausen  
Diagnostik an präparierten Halbleiterstrukturen mittels lock-in basierter Elektronenstrahl-induzierter Strommessung (M)

Fangfang Shen  
Hochschule Anhalt  
Entwicklung, Anpassung und Erprobung eines neuen Antragswerks für funktionelle Nassbeschichtung (B)

Thomas Skala  
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig  
In-situ-Röntgen-Computertomographie an bruchmechanischen SCB-Sanwichproben (M)

Mareike Stenglein  
Universität Bayreuth  
Herstellung und Charakterisierung von Verkapselungsfolien auf Basis von kristallinen Silizium-Solarzellen (M)

Tommy Tänzer  
Hochschule Mittweida  
Charakterisierung von Kurzschlüssen an Rissen: Entwicklung einer korrelativen Messroutine in Solarzellen und Modulen (M)

Luz Maria Tobar Subia Contento  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Lasergestützte Oberflächenstrukturierung von medizinischen Katheteroberflächen (M)

Holger Uhle  
Hochschule Mittweida  
Geometrische und mikrostrukturelle Bewertung von strukturierten Sägedrähten zur Herstellung von Siliziumwafern (M)

Florian Wallburg  
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, University of the West of Scotland, Schottland  
Bewertung der Festigkeit von polykristallinem Silizium im Bereich der Korngrenzen (M)

Christian Werner  
Hochschule Merseburg  
Ermüdungsverhalten von Leitklebern (M)

Sergei Wittchen  
Hochschule Merseburg  
Herstellung und Bewertung von Wood Plastic Composites aus biobasierten Polyamiden und Buchenholzfasern (M)

Sebastian Loos  
FH Südwestfalen, Soest  
01.01.-31.12.15

Christopher Ludtka  
University of Tennessee, Knoxville, TN, USA  
01.09.-31.12.15

Javorina Milosevic  
SpinPlant GmbH, Leipzig  
01.01.-31.12.15

Alan Mohr  
Massachusetts Institute of Technology, MA, USA  
01.06.-31.08.15

Stefan Oelting  
ANTEC Solar GmbH, Arnstadt  
01.01.-31.12.15

Dr. Vladimir Pankratov  
Universität Lettlands, Riga, Lettland  
03.08.-17.09.15

Charlotte Rimbach  
FH Südwestfalen, Soest  
01.02.-31.12.15

Prof. Dr. Uldis Rogulis  
Universität Lettlands, Riga, Lettland  
23.11.-04.12.15

Dr. Anatolijs Sarakovskis  
Universität Lettlands, Riga, Lettland  
23.11.-26.11.15

**Gastwissenschaftler**

Cecilia Aguiar da Silva  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
01.01.-31.12.15

Shashi Bahl  
FH Köthen  
01.01.-15.08.15

Ahmed Benlarabi  
Institut IRESEN, Rabat, Marokko  
17.08.-28.08.15

Mikael Broas  
Aalto University, Espoo, Finnland  
12.10.-31.12.15

Alessa Brossmer  
Kunsthochschule Burg Giebichenstein  
28.08.-30.11.15

Meixi Chen  
University of Delaware, DE, USA  
05.07.-07.09.15

Martin Fialik  
SKZ-KFE gGmbH  
13.07.-31.12.15

Annegret Jentsch  
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
01.01.-31.03.15

Ahmad Khaled  
Katholieke Universiteit Leuven, Belgien  
16.-27.11.15

Sebastian Loos  
FH Südwestfalen, Soest  
01.01.-31.12.15

Christopher Ludtka  
University of Tennessee, Knoxville, TN, USA  
01.09.-31.12.15

Javorina Milosevic  
SpinPlant GmbH, Leipzig  
01.01.-31.12.15

Alan Mohr  
Massachusetts Institute of Technology, MA, USA  
01.06.-31.08.15

Stefan Oelting  
ANTEC Solar GmbH, Arnstadt  
01.01.-31.12.15

Dr. Vladimir Pankratov  
Universität Lettlands, Riga, Lettland  
03.08.-17.09.15

Charlotte Rimbach  
FH Südwestfalen, Soest  
01.02.-31.12.15

Prof. Dr. Uldis Rogulis  
Universität Lettlands, Riga, Lettland  
23.11.-04.12.15

Dr. Anatolijs Sarakovskis  
Universität Lettlands, Riga, Lettland  
23.11.-26.11.15

Juliane Schuppich  
FH Südwestfalen, Soest  
01.07.-31.12.15

Tamara Shahmary  
SpinPlant GmbH, Leipzig  
01.01.-31.10.15

Wonshoup So  
Yeungnam University, Gyeongsan, Korea  
10.09.-09.10.15

Florian Wagner  
FH Südwestfalen, Soest  
01.01.-31.12.15

Michael Zwarg  
SKZ-KFE gGmbH  
13.07.-31.12.15

**Vorlesungen WS 2014/2015**

**Bauhaus-Universität Weimar**

Grundlagen nachhaltiges Bauen I  
Norman Klüber

**Fachhochschule Südwestfalen**

Photovoltaic, Energy efficiency  
Prof. Dr. Stefan Schweizer

Physik III  
Prof. Dr. Stefan Schweizer

Wind Generation and Energy Management  
Prof. Dr. Stefan Schweizer

**Hochschule Anhalt Köthen**

Microsystems Technology  
Prof. Dr. Andreas Heilmann

Sensor- und Aktortechnik  
Prof. Dr. Andreas Heilmann

**Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig HTWK**

Photovoltaik als Energiequelle  
Prof. Dr. Jens Schneider

Einführung in die Methoden der Finiten Elemente  
Prof. Dr. Stephan Schönfelder

Simulation und Projektierung in der Gebäudetechnik  
Prof. Dr. Stephan Schönfelder

**Hochschule Merseburg**

Polymerphysik  
Prof. Dr. Mario Beiner

MMIP Photovoltaik  
Dr. Christian Hagendorf

Modul Photovoltaik  
Dr. Christian Hagendorf, Dr. Matthias Ebert, Prof. Dr. Stephan Schönfelder, Dr. Sylke Meyer, Dr. Marko Turek, Prof. Dr. Jens Schneider

Kunststofftechnik/Verfahrenstechnik Prof. Dr. Peter Michel Einführung in die Mikrosystemtechnik Prof. Dr. Matthias Petzold, Frank Altmann, Michél Simon-Najasek	Processing of Polymerblends and Composites Prof. Dr. Peter Michel	14. Lange Nacht der Wissenschaften Halle 03.07.15, Halle (Saale)
<b>Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</b>	<b>Technische Universität Ilmenau</b>	Festveranstaltung »10 Jahre Fraunhofer-Pilotanlagenzentrum PAZ« 19.10.15, Schkopau Herbstfest mit kooperierenden Hochschulen 2015 29.10.15, Halle (Saale)
Halbleiter- und Dünnschichttechnologie, Siliziumchemie Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn	<b>Vom Fraunhofer IWM Halle organisierte Fachveranstaltungen</b>	<b>Messen mit Beteiligung des Fraunhofer IWM Halle</b>
<b>Vorlesungen SS 2015</b>	PV Days 2014 21.-22.10.14, Halle (Saale)	9. Europäische Fachmesse & Forum für Verbundwerkstoffe, Technologie und Anwendungen, COMPOSITES EUROPE 2014 07.-09.10.14, Düsseldorf
<b>Bauhaus-Universität Weimar</b>	SAM User Meeting 04.-05.12.14, Halle (Saale)	40th International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA) 09.-13.11.14, Houston, TX, USA
Grundlagen nachhaltiges Bauen II Norman Klüber	Fraunhofer-Allianz Bau – Mitgliederversammlung 25.03.15, Halle (Saale)	SMT Hybrid Packaging 2015 05.-07.05.15, Nürnberg
<b>Burg Giebichenstein Kunsthochschule, Halle</b>	4th CAM-Workshop 2015 »Advanced Failure Diagnostics for Automotive Electronics« 14.-15.04.15, Halle (Saale)	PCIM Europe 2015 10.-12.05.15, Nürnberg
Werkstoffe und Konstruktion Andreas Krombholz	1st European ELITE User Group Meeting 16.04.15, Halle (Saale)	65. Electronic Components and Technology Conference, ECTC 2015 26.-29.05.15, San Diego, CA, USA
<b>Fachhochschule Südwestfalen</b>	8. Sitzung des DGM Fachausschusses »Zellulare Werkstoffe« 28.-29.05.15, Halle (Saale)	Intersolar Europe 2015 08.-12.06.15, München
Fuel Cells and Energy Parks Prof. Dr. Stefan Schweizer	10. Dreiländer-FIB-Workshop »Focused Ion Beams in Forschung, Wissenschaft und Technologie« 29.-30.06.15, Halle (Saale)	Composite Europe 2015 22.-24.09.15, Stuttgart
Physik II Prof. Dr. Stefan Schweizer	DACH Mini-Workshops Cryo-Ultramicrotomy und Cryo-ESEM and Cryo-FIB 29.-30.06.15, Halle (Saale)	26th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, ESREF 2015 05.-09.10.15, Toulouse, Frankreich
Regenerative Energiequellen Prof. Dr. Stefan Schweizer	15 Jahre MAHREG 09.07.15, Magdeburg	<b>Erteilte Patente 2015</b>
<b>Hochschule Anhalt Köthen</b>	PV Days 2015 27.-28.10.15, Halle (Saale)	Busch, M.; Wüstenhagen, S. Batteriemodul für Li-Ionen Zellen mit integrierter Temperaturführung Patent-Nr. DE 10 2010 046 933
Sensor-und Aktortechnik Prof. Dr. Andreas Heilmann	<b>Weitere öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen</b>	Spoehn, U.; Schwan, S. Thermoelektrisch gesteuerter biomechanischer Reaktor Patent-Nr. DE 10 2009 004 336
<b>Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig HTWK</b>	Herbstfest für kooperierende Fachhochschulen 2014 06.11.14, Halle (Saale)	Schäfer, R.; Sander, M.; Dietrich, S.; Ebert, M. Belastungseinrichtung zur Erzeugung von Flächenlasten (Druck und Sog) auf plattenförmige Bauteile mittels elektromagnetischen Linearmotoren Patent-Nr. DE 10 2009 053 299
Photovoltaik als Energiequelle Prof. Dr. Jens Schneider	»Jugend forscht« Regionalwettbewerb 2015 27.02.15, Halle (Saale)	
Bauteilbewertung und -versagen Prof. Dr. Stephan Schönfelder	Tag der Berufe 11.03.15, Halle (Saale)	
Computational Mechanics Prof. Dr. Stephan Schönfelder	Hafenhinterlandkonferenz 11.-13.03.15, Halle (Saale)	
Einführung in die Finiten Elemente Prof. Dr. Stephan Schönfelder	Girls' Day/Boys' Day – Zukunftstag für Mädchen und Jungen 23.04.15, Halle (Saale)	
<b>Hochschule Merseburg</b>	1. Alumni-Fest 03.07.15, Halle (Saale)	
Werkstoffdiagnostik und Zuverlässigkeit von Mikrosystemen Prof. Dr. Matthias Petzold, Dr. Sebastian Brand, Frank Altmann, Dr. Andreas Graff, Dr. Michael Krause, Georg Lorenz, Michél Simon-Najasek, Christian Ehrich		
<b>Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</b>		
Structure and Morphology Prof. Dr. Mario Beiner		
Surface Science Prof. Dr. Andreas Heilmann		

- Allenstein, U.; Selle, S.; Tadsen, M.; Patzig, C.; Höche, T.; Zink, M.; Mayr, S.G.  
**Coupling of metals and biominerals: Characterizing the interface between ferromagnetic shape-memory alloys and hydroxyapatite**  
ACS Applied Material Interfaces 7/28 (2015) 15331-15338
- Babur, T.; Balko, J.; Budde, H.; Beiner, M.  
**Confined relaxation dynamics in long range ordered polyester with comb-like architecture**  
Polymer 55/26 (2014) 6844-6852
- Bagdahn J.; Naumann, V.; Lausch, D.; Hagendorf, C.  
**Prüfgerät erkennt den PID-Effekt bereits auf Zellenebene**  
Elektronikpraxis 2015 (2015) 10
- Berndt, S.; Gawronski, A.; Patzig, C.; Wisniewski, W.; Höche, T.; Rüssel, C.  
**Oriented crystallization of a  $\beta$ -quartz solid solution from a MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> glass in contact with tetragonal ZrO<sub>2</sub> ceramics**  
RSC Advance 2015/5 (2015) 15164-15171
- Böhm, R.; Stiller, J.; Behnisch, T.; Zschehye, M.; Protz, R.; Radloff, M.; Gude, M.; Hufenbach, W.  
**A quantitative comparison of the capabilities of in situ computed tomography and conventional computed tomography for damage analysis of composites**  
Composites Science and Technology 110 (2015) 62-68
- Brand, S.; Tismer, S.; Moe, S.T.; Schjolberg-Henriksen, K.  
**Non-destructive wafer-level bond defect identification by scanning acoustic microscopy**  
Microsystem Technologies 21/7 (2015) 1385-1394
- Chen, S.; Mahmood, N.; Beiner, M.; Binder, W.H.  
**Self-healing materials from V- and H-shaped supramolecular architectures**  
Angewandte Chemie International 2015/54 (2015) 10188-10192
- de Pablos-Martín, A.; Ebert, M.; Patzig, C.; Krause, M.; Dyrba, M.; Miclea, P.-T.; Lorenz, M.; Grundmann, M.; Höche, T.  
**Laser welding of sapphire wafers using a thin-film fresnoite glass solder**  
Microsystem Technologies 21/5 (2015) 1035-1045
- de Pablos-Martín, A.; Ferrari, M.; Pascual, M.J.; Righini, G.C.  
**Glass-ceramics: A class of nanostructured materials for photonics**  
La Rivista del Nuovo Cimento 38/7-8 (2015) 311-369
- de Pablos-Martín, A.; Méndez-Ramos, J.; del-Castillo, J.; Durán, A.; Rodríguez, V.D.; Pascual, M.J.  
**Crystallization and up-conversion luminescence properties of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-doped NaYF<sub>4</sub>-based nano-glass-ceramics**  
Journal of the European Ceramic Society 35/6 (2015) 1831-1840
- de Pablos-Martín, A.; Pascual, M.J.; Durán, A.  
**Transparent nano-glass-ceramic for photonic applications. Distribution of RE-doping elements in the fluoride nano-crystals analysed by XAS and HR-TEM**  
Advances in Science and Technology 90 (2014) 111-120
- de Pablos-Martín, A.; Tismer, S.; Höche, T.  
**Structural characterization of laser bonded sapphire wafers using a titanium absorber thin film**  
Journal of Materials Science & Technology 31 (2015) 484-488
- de Pablos Martín, A.; Tismer, S.; Naumann, F.; Krause, M.; Lorenz, M.; Grundmann, M.; Höche, T.  
**Evaluation of the bond quality of laser joined sapphire wafers using a fresnoite glass sealant**  
Microsystem Technologies 11.02.2015 (2015)
- Fuechsel, K.; Kroll, M.; Otto, M.; Steglich, M.; Bingel, A.; Kaesebier, T.; Wehrspohn, R.B.; Kley, E.-B.; Pertsch, T.; Tünnermann, A.  
**Black silicon photovoltaics**  
Photon Management in Solar Cells (2015) 117-151
- Gaudig, M.; Hirsch, J.; Schneider, T.; Sprafke, A.N.; Ziegler, J.; Bernhard, N.; Wehrspohn, R.B.  
**Properties of black silicon obtained at room-temperature by different plasma modes**  
Journal of Vacuum Science & Technology A 33/5 (2015) 05E132
- Gawronski, A.; Patzig, C.; Höche, T.; Rüssel, C.  
**Effect of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CeO<sub>2</sub> on the crystallisation behaviour and mechanical properties of glass-ceramics in the system MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub>**  
Journal of Materials Science 50/4 (2015) 1986-1995
- Großer, S.; Werner, M.; Hagendorf, C.  
**Microstructure of void formation stages at local rear contacts**  
Energy Procedia 2015/77 (2015) 701-706
- Johnson, J.A.; Leonard, R.L.; Lubinsky, A.R.; Schweizer, S.  
**Opportunities for fluorochlorozirconate and other glass-ceramic detectors in medical imaging devices**  
Journal of Biomedical Technology and Research 1 (2015) 102
- Jung, J.Y.; Park, M.J.; Li, X.; Kim, J.H.; Wehrspohn, R.B.; Lee, J.-H.  
**High performance H-2 evolution realized in 20  $\mu$ m-thin silicon nanostructured photocathodes**  
Journal of Materials Chemistry 3/18 (2015) 9456-9460
- Lausch, D.; Hagendorf, C.  
**Influence of different types of recombination active defects on the integral electrical properties of multicrystalline silicon solar cells**  
Journal of Solar Energy 2015 (2015) 9
- Lee, G.; Schweizer, S.L.; Wehrspohn, R.B.  
**Electrochemical characteristics of plasma-etched black silicon as anodes for Li-ion batteries**  
Journal of Vacuum Science & Technology A 32/6 (2014)
- Lee, G.; Schweizer, S.L.; Wehrspohn, R.B.  
**CMOS-compatible metal-stabilized nanostructured Si as anodes for lithium-ion microbatteries**  
Nanoscale Research Letters 9/613 (2014)
- Lee, G.; Schweizer, S.L.; Wehrspohn, R.B.  
**Microstructural characterization of Li insertion in individual silicon nanowires**  
Applied Physics A 117/3 (2014) 973-979
- Li, X.; Xiao, Y.; Zhou, K.; Wang, J.; Schweizer, S.L.; Sprafke, A.; Lee, J.-H.; Wehrspohn, R.B.  
**Photoelectrochemical hydrogen evolution of tapered silicon nanowires**  
Physical Chemistry Chemical Physics 17/2 (2014) 800-804
- Li, X.; Yan, C.; Wang, J.; Graff, A.; Schweizer, S.L.; Sprafke, A.; Schmidt, O.G.; Wehrspohn, R.B.  
**Stable silicon anodes for Lithium-Ion batteries using mesoporous metallurgical silicon**  
Advanced Energy Materials 5/4 (2015) 1401556
- Loos, S.; Steudel, F.; Ahrens, B.; Schweizer, S.  
**Optical properties of down-shifting barium borate glass for CdTe solar cells**  
Advanced Optical Materials 41 (2015) 143-145
- Martin, H.; Gutteck, N.; Matthies, J.-B.; Hanke, T.; Gradl, G.; Wohrab, D.; Mittlmeier, T.; Grabow, N.  
**Possible reasons for early artificial bone failure in biomechanical tests of ankle arthrodesis systems**  
Current Directions in Biomedical Engineering. Heft 1, Band 1 (2015) 507-509, ISSN Online 2364-5504
- Meitzner, R.; Schulze, S.  
**Method for determination of parameters for moisture simulations in photovoltaic modules and laminated glass**  
Solar Energy Materials and Solar Cells 2016/144 (2016) 23-28
- Naumann, V.; Lausch, D.; Hagendorf, C.  
**Sodium decoration of PID-s crystal defects after corona induced degradation of bare silicon solar cells**  
Energy Procedia 2015/ 77 (2015) 397-401
- Naumann, V.; Lausch, D.; Hähnel, A.; Breitenstein, O.; Hagendorf, C.  
**Nanosopic studies of 2D-extended defects in silicon that cause shunting of Si-solar cells**  
Physica Status Solidi C 12/8 (2015) 1103-1107

## VERÖFFENTLICHUNGEN IN REFERIERTEN ZEITSCHRIFTEN UND REFERIERTE VERÖFFENTLICHUNGEN AM FRAUNHOFER IWM HALLE

Otto, M.; Algasinger, M.; Branz, H.; Gesemann, B.; Gimpel, T.; Füchsel, K.; Kasebier, T.; Kontermann, S.; Koynov, S.; Li, X.; Naumann, V.; Oh, J.; Sprafke, A.; Ziegler, J.; Zilk, M.; Wehrspohn, R.B.  
**Black silicon photovoltaics**  
Advanced Optical Materials 3/2 (2015) 147-164

Purahong, W.; Schloter, M.; Pecyna, M.; Kapturska, D.; Däumlich, V.; Mital, S.; Buscot, F.; Hofrichter, M.; Gutknecht, J.; Krüger, D.  
**Uncoupling of microbial community structure and function in decomposing litter across beech forest ecosystems in Central Europe**  
Nature Materials 2014/7014 (2014) 959-964

Richter, S.; Kaufmann, K.; Naumann, V.; Werner, M.; Graff, A.; Großer, S.; Moldovan, A.; Zimmer, M.; Rentsch, J.; Bagdahn, J.; Hagendorf, C.  
**High-resolution structural investigation of passivated interfaces of silicon solar cells**  
Solar Energy Materials and Solar Cells 2015/142 (2015) 128-133

Schlegel, R.; Hanke, T.; Krombholz, A.  
**A camera-based strain measurement technique for elastomer tensile testing: Simulation and practical application to understand the strain dependent accuracy characteristics**  
ELSEVIER, Polymer Testing 44 (2015) 186-196

Schulze, S.; Apel, A.; Daßler, D.; Ehrich, C.  
**Cure state assessment of EVA-copolymers for PV-applications comparing dynamic-mechanical, dielectric and calorimetric properties**  
Solar Energy Materials and Solar Cells 143 (2015) 411-417

Schumann, M.F.; Wiesendanger, S.; Goldschmidt, J.C.; Bläsi, B.; Bittkau, K.; Paetzold, U.W.; Sprafke, A.; Wehrspohn, R.B.; Rockstuhl, C.; Wegener, M.  
**Cloaked contact grids on solar cells by coordinate transformations: designs and prototypes**  
Optica 2/10 (2015) 850-853

Seifert, G.; Schwedler, I.; Schneider, J.; Wehrspohn, R.B.  
**Light management in solar modules**  
Photon Management in Solar Cells 12 Chapter (2015) 323-346

Simon-Najasek, M.; Huebner, S.; Altmann, F.; Graff, A.  
**Advanced FIB sample preparation techniques for high resolution TEM investigations of HEMT structures**  
Microelectronics Reliability 9-10 (2014) 1785-1789

Skrzypczak U.; Seifert, G.; Schweizer, S.  
**Highly efficient and broadband upconversion of NIR sunlight with neodymium-doped glass Cceramics**  
Advanced Optical Materials 3/4 (2015) 541-545

Song, J. W.; Nam, Y.H.; Park, M.J.; Shin, S.M.; Wehrspohn, R.B.; Lee, J.-H.  
**Hydroxyl functionalization improves the surface passivation of nanostructured silicon solar cells degraded by epitaxial regrowth**  
RSC Advances 5/49 (2015) 39177-39181

Sprafke, A.N.; Wehrspohn, R.B.  
**Current concepts for optical path enhancement in solar cells**  
Photon Management in Solar Cells (2015) 1-20

Stedel, F.; Loos, S.; Ahrens, B.; Schweizer, S.  
**Luminescent borate glass for efficiency enhancement of CdTe solar cells**  
Journal of Luminescence 164 (2015) 76-80

Stedel, F.; Loos, S.; Ahrens, B.; Schweizer, S.  
**Multi-functionality of luminescent glasses for energy applications**  
Physica Scripta 90/9 (2015) 94004

Ulbrich, C.; Peters, M.; Fahr, S.; Uepping, J.; Kirchartz, T.; Rockstuhl, C.; Goldschmidt, J.C.; Gerber, A.; Lederer, F.; Wehrspohn, R.B.; Blaesi, B.; Rau, U.  
**Light trapping in solar cells by directionally selective filters**  
Photon Management in Solar Cells 7 Chapter (2015) 183-207

Wehrspohn, R.B.; Schweizer, S.  
**Optical materials for spectral management**  
Advanced Optical Materials 3/4 (2015) 422

Werner, P.; Blumtritt, H.; Zlotnikov, I.; Graff, A.; Dauphin, Y.; Fratzl, P.  
**Electron microscope analyses of the bio-silica basal spicule from the Monorhaphis chuni sponge**  
Journal of Structural Biology 191/2 (2015) 165-174

Yao, Y.; Patzig, C.; Hu, Y.; Scott, R.W.J.  
**In situ X-ray absorption spectroscopic study of Fe@FexOy/Pd and Fe@FexOy/Cu nanoparticle catalysts prepared by galvanic exchange reactions**  
Journal of Physical Chemistry C 119/36 (2015) 21209-21218

Ziegler, J.; Haschke, J.; Kasebier, T.; Korte, L.; Sprafke, A.N.; Wehrspohn, R.B.  
**Influence of black silicon surfaces on the performance of back-contacted back silicon heterojunction solar cells**  
Optics Express 22/21 (2014) A1469-A1476

Ziegler, J.; Mews, M.; Kaufmann, K.; Schneider, T.; Sprafke, A.N.; Korte, L.; Wehrspohn, R.B.  
**Plasma-enhanced atomic-layer-deposited MoO (x) emitters for silicon heterojunction solar cells**  
Applied Physics A 120/3 (2015) 811-816

Zierdt, P.; Theumer, T.; Weber, A.  
**Holz-Polymer-Verbundwerkstoffe aus biobasiertem Polyamid 11 und Buchenholzfasern**  
Holztechnologie (der IHD, Dresden) 56/3 (2015) 10-15

# VERÖFFENTLICHUNGEN IN ZEITSCHRIFTEN UND BÜCHERN, VERÖFFENTLICHTE KONFERENZBEITRÄGE AM FRAUNHOFER IWM HALLE

## ZEITSCHRIFTEN

de Pablos Martín, A.; Tismer, S.; Naumann, F.; Krause, M.; Lorenz, M.; Grundmann, M.; Höche, T.

**Evaluation of the bond quality of laser joined sapphire wafers using a fresnoite glass sealant**  
Microsystem Technologies 11.02.2015 (2015) 1-8

Lee, G.; Schweizer, S.L.; Wehrspohn, R.B.

**Electrochemical characteristics of plasma-etched black silicon as anodes for Li-ion batteries**  
Journal of Vacuum Science & Technology A 32/6 (2014) 061202

Lee, G.; Schweizer, S.L.; Wehrspohn, R.B.

**CMOS-compatible metal-stabilized nanostructured Si as anodes for lithium-ion microbatteries**  
Nanoscale Research Letters 9/613 (2014)

Li, X.; Lee, J.-H.; Sprafke, A.N.; Wehrspohn, R.B.

**Black metallurgical silicon for solar energy conversion**  
Semiconductor Science and Technology 31 (2015)

Stuedel, F.; Ahrens, B.; Nolte, P.W.; Schweizer, S.

**Forschung für ein leuchtendes Morgen. Entwicklung von Leuchtstoffen und Leuchtstoffsystemen für Weißlicht-LEDs**  
Elektronik Journal März 2015 (2015) 32-35

## BÜCHER, BUCHBEITRÄGE

Altmann, F.; Brand, S.; Höche, T.; Krause, M.; Petzold, M.

**Innovative material diagnostics methods for through silicon via technologies**  
Microelectronic Packaging in the 21st Century Honorary volume on the occasion of Klaus-Dieter Lang's 60th birthday; Fraunhofer IZM (Aschenbrenner, R.; Schneider-Ramelow, M. (Eds.); Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2014) 266-271

Goldschmidt, J.C.; Prönneke, L.; Büchtemann, A.; Gutmann, J.; Steidl, L.; Dyrba, M.; Wiegand, M.-C.; Ahrens, B.; Wedel, A.; Schweizer, S.; Bläsi, B.; Zentel, R.; Rau, U.

**Fluorescent concentrators for photovoltaic applications**  
Photon Management in Solar Cells; Wehrspohn, R.B.; Rau, U.; Gombert, A. (Eds.); Wiley-VCH, Weinheim (2015) 283-321

Goldschmidt, J. C.; Fischer, S.; Steinkemper, H.; Herter, B.; Wolf, S.; Hallermann, F.; von Plessen, G.; Johnson, J. A.; Ahrens, B.; Miclea, P.-T.; Schweizer, S.

**Up-conversion materials for enhanced efficiency of solar cells**  
Photon Management in Solar Cells; Wehrspohn, R.B.; Rau, U.; Gombert, A. (Eds.); Wiley-VCH, Weinheim (2015) 231-254

Niepel, M.; Kirchof, K.; Menzel, M.; Heilmann, A.; Groth, T.

**Controlling cell adhesion using pH-modified polyelectrolyte multilayer films**

Layer-by-Layer Films for Biomedical Applications; Picart, C.; Caruso, F.; Voegel, J.-C. (Eds.); Wiley-VCH, Weinheim (2015) 3-29

Schweizer, S.; Paßlick, C.; Stuedel, F.; Ahrens, B.; Miclea, P.-B.;

Johnson, J.A.; Baumgartner, K.; Carius, R.

**Down-conversion in rare-earth doped glasses and glass ceramics**  
Photon Management in Solar Cells; Wehrspohn, R.B.; Rau, U.; Gombert, A. (Eds.); Wiley-VCH, Weinheim (2015) 255-282

Wehrspohn, R.B.; Rau, U.; Gombert, A.

**Photon management in solar cells**  
Wiley-VCH, Weinheim (2015)

## VERÖFFENTLICHTE KONFERENZBEITRÄGE

Beiner, M.

**Neue Einsichten als Relaxationsuntersuchungen an Kautschukkompositen und neuartige Ansätze für energieeffiziente Reifenlaufflächen**

in Tagungsband Deutsche Kautschuk-Tagung DKT 2015; Deutsche Kautschuk-Gesellschaft e.V. (Hrsg.); Deutsche Kautschukgesellschaft e.V., Frankfurt/M. (2015) Lecture Program V\_61\_Beiner

Berthold, L.; Krause, M.; Ebert, M.; Höche, T.

**New methods of specimen preparation of pigment particles for investigations in transmission electron microscopy**  
in Proc. of European Technical Coatings Congress ETCC 2014 (2014) 176-177

Berthold, L.; Krause, M.; Höche, T.

**Novel specimen-preparation routes for individual micro-sized particles for investigation by transmission electron microscopy**  
in Proc. of Microscopy Conference MC 2015 (2015) 403-404

Brand, S.; Appenroth, T.; Naumann, F.; Steller, W.; Wolf, M.J.; Czurratis, P.; Altmann, F.; Petzold, M.

**Acoustic GHz-microscopy and its potential applications in 3D-integration technologies**

in Proc. of 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) 2015 IEEE; IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ, USA (2015) 46-53

Dammann, M.; Baeumler, M.; Brückner, P.; Bronner, W.; Maroldt, S.; Konstanzer, H.; Wespel, M.; Quay, R.; Mikulla, M.; Graff, A.; Lorenzini, M.; Fagerlind, M.; van der Welc, P.J. and Roedlec, T.

**Degradation of 0.25 µm GaN HEMTs under high temperature stress test**  
in Proc. of the 26th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis; Perdu, P.; Marc, F.; Baffleur, M.; Fremont, H.; Nolhier, N. (Eds.); Elsevier Ltd., Oxford (2015) 1667-1671

Gaudig, M.; Hirsch, J.; Ziegler, J.; Schneider, T.; Werner, M.; Sprafke, A.; Bernhard, N.; Wehrspohn, R.B.

**Investigation of the optoelectronic properties of crystalline silicon textured by maskless plasma etching at different ignition modes**

in Proc. of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition PVSEC 2014 (EU PVSEC Proceedings); Bokhoven, T.P.; Jäger-Waldau, A.; Helm, P. (Eds.); WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co Planungs-KG, München (2014) 885-888

Hirsch, J.; Lausch, D.; Bernhardt, N.

**Front- and rearside plasma texturing of crystalline silicon wafers for PV application**

in Proc. of the 14th International Conference on Plasma Surface Engineering; EFDS - Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V., München (2014)

Jatzkowski, J.; Simon-Najasek, M.; Altmann, F.

**Localization of weak points in thin dielectric layers by Electron Beam Absorbed Current (EBAC) imaging**

in Proc. of 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis ISTFA 2014; ASM International, Electronic Device Failure Analysis Society, Materials Park, OH, USA (2014) 500-504

John, M.; Geyer, A.; Schlimper, R.; Schäuble, R.

**Comparing unreinforced and pin-reinforced CFRP/PMI Foam Core Sandwich Structures regarding their Damage Tolerance Behaviour**

in Proc. of 20th International Conference on Composite Materials ICCM20; Scientific Committee of ICCM (Eds.); Scandinavian Scientific Committee of ICCM20, Stockholm (2015) 8

Klüber, N.; Hollberg, A.; Ruth, J.

**Life cycle optimized application of renewable raw materials for retrofitting measures**

in Proc. of World Sustainable Building 2014 Barcelona Conference, Volume 3; Cuchi, A.; Arcas-Abella, J.; Casals-Tres, M.; Fombella, G. (Eds.); Global Vision Area, Barcelona/Spain (2014) 635-641

- Klute, C.; Kaule, F.; Schoenfelder, S.  
**Breakage root cause analysis in as-cut monocrystalline silicon wafers**  
 in Proc. of 29th European Photovoltaic Energy Conference and Exhibition PVSEC 2014; Bokhoven, T.P.; Helm, P.; Jäger-Waldau, A. (Eds.); WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co. Planungs KG, München (2014) 753-756
- Krause, M.; Ebert, M.; Höche, T.  
**microPREP™ – A new laser tool for high-throughput sample preparation**  
 in Proc. of 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis ISTFA 2014; ASM International, Electronic Device Failure Analysis Society, Materials Park, OH, USA (2014) 261-267
- Krombholz, A.; Eversmann, N.; Werner, P.  
**Lignin based sandwich system for load bearing insulation**  
 in Proc. of World Sustainable Building 2014 Barcelona Conference, Documentation; Cuchi, A.; Arcas-Abella, J.; Casals-Tres, M.; Fombella, G. (Eds.); Global Vision Area, Barcelona/Spain (2014) documentation; pdf\_session; Session 48-no; 8-14
- Krombholz, A.; Werner, P.; Weber, A.  
**Sandwich elements from renewable resources as a structural component in the architecture**  
 in Proc. of 20th Symposium on Composites Part 2; Edtmaier, C.; Requena, G. (Eds.); TTP Trans Tech Publications Ltd, Pfaffikon/Schweiz (2015) 1071-1079
- Lausch, D.; Gläser, M.; Hagendorf, C.  
**Determination of crystal grain orientations by optical microscopy at textured surfaces and applications**  
 in Proc. of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition PVSEC 2014; Bokhoven, T. P.; Jäger-Waldau, A.; Helm, P. (Eds.); WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co Planungs-KG, München (2014) 567-572
- Möhl, C.; Krombholz, A.  
**Impact resistance bio compound**  
 in Proc. of 20. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde 2015 (20th Symposium on Composites); Edtmaier, C.; Requena, G. (Eds.); TTP Trans Tech Publications, Pfaffikon/Switzerland (2015) 1047-1054
- Mujtaba, A.; Beiner, M.; Keller, M.; Ilisch, S.; Radosch, H.-J.; Thurn-Albrecht, T.; Saalwächter, K.  
**Zum Verständnis der Viskoelastizität von Füllstoff Netzwerken in SBR-Silika Nanokompositen**  
 in Tagungsband Deutsche Kautschuk-Tagung DKT 2015; Deutsche Kautschuk-Gesellschaft e.V. Frankfurt (Hrsg.); Deutsche Kautschuk-Gesellschaft e.V., Frankfurt/M. (2015) University Session V\_04\_Mujtaba
- Naumann, F.; Altmann, F.; Grosse, C.; Herold, R.  
**Efficient non-destructive 3D defect localization by lock-in thermography utilizing multi harmonics analysis**  
 in Proc. of 40th International Symposium for Testing and Failure Analysis ISTFA 2014; ASM International (Ed.); Electronic Device Failure Analysis Society, Materials Park, OH, USA (2014) 130-135
- Pander, M.; Schulze S.-H.; Ebert, M.  
**Mechanical modeling of electrically conductive adhesives for photovoltaic applications**  
 in Proc. of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; Bokhoven, T.P.; Helm, P.; Jäger-Waldau, A. (Eds.); WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co Planungs KG, München (2014) 3399-3405
- Romstedt, D.; Richter, S.  
**Haftungsoptimierung von klebstoffbeschichteten Kunststoff-Schutzfolien**  
 in Tagungsband 12. Freiburger Polymertag 2015 – Anwendungsspezifische Beschichtungen auf flexiblen Substraten; Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen (FILK) gGmbH (Ed.); Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen (FILK) gGmbH, Freiberg (2015) 90-95
- Schlimper, R.; Vecchio, I.; Schladitz, K.; Schäuble, R.  
**RVE Modelling of deformation and failure behaviour of closed cell rigid polymer foams**  
 in Proc. of 20th International Conference on Composite Materials ICCM20; Scientific Committee of ICCM (Ed.); Scandinavian Scientific Committee of ICCM20, Stockholm (2015) 11, 2110-3
- Schneider, J.; Schoenfelder, S.; Dietrich, S.; Turek, M.  
**Solar module with half size solar cells**  
 in Proc. of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition PVSEC 2014; Bokhoven, T.P.; Jäger-Waldau, A.; Helm, P. (Eds.); WIP Wirtschaft und Infrastruktur GmbH & Co Planungs KG, München, München (2014) 185-189
- Schoenfelder, S.; Kaule, F.; Wallburg, F.  
**Mechanical strength of multicrystalline silicon wafers considering microstructural defects**  
 in Proc. of Freiberg Silicon Days/Freiberg Sawing Symposium 2015 (2015)
- Schumann, M.F.; Wiesendanger, S.; Goldschmidt, J.-C.; Bittkau, K.; Paetzold, U.W.; Sprafke, A.; Wehrspohn, R.B.; Rockstuhl, C.; Wegener, M.  
**Cloaking of metal contacts on solar cells**  
 in Proc. of conference on lasers and electro-optics (CLEO) 2015; IEEE, Piscataway, USA (2015) 10-15
- Stuedel, F.; Loos, S.; Ahrens, B.; Schweizer, S.  
**Luminescent glasses and glass ceramics for white LEDs**  
 in 5th International LED professional Symposium + Expo, LED Lighting Technologies, Trends & Technologies for Future Lighting, Bregenz, Österreich (2015), 146-153
- Wagner, F.; Nolte, P.W.; Stuedel, F.; Schweizer, S.  
**Thermographic investigation of luminescent barium borate glasses for white-LED applications**  
 in Proc. of SPIE 9485; Hsieh, S.-J. (T.); Zalameda, J. N.; SPIE/Conference Proceedings, Bellingham, USA (2015) 948516
- Wallburg, F.; Kaule, F.; Schönfelder, S.  
**Influence of grain boundaries on crack propagation in multicrystalline silicon wafers**  
 in Proc. of 8th International Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells CSSC-8; Fraunhofer Institute of Integrated Systems and Device Technology (IISB) (Eds.); (2015) 95
- Zeller, U.; Pander, M.; Dietrich, S.; Ebert, M.  
**Strömungssimulation an PV-Fassaden**  
 in Tagungsband 7. Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik; Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg (2015) 111-118
- Zierdt, P.; Weber, A.  
**Processing and characterization of wood plastic composites from biobased polyamide 11 and chemically modified beech fibers**  
 in Proc. of 20. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde 2015 (20th Symposium on Composites); Edtmaier, C.; Requena, G. (Eds.); TTP Trans Tech Publications, Pfaffikon/Switzerland (2015) 1039-104



---

## Impressum

---

### Redaktion

Katharina Hien  
Michael Kraft  
Thomas Götz  
Clemenz Homann

### Gestaltung und Produktion

Erika Hellstab  
Marianne Förderer

### Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut  
für Werkstoffmechanik IWM  
Öffentlichkeitsarbeit  
Wöhlerstraße 11  
79108 Freiburg  
Telefon +49 761 5142-154  
Fax +49 761 5142-510

[info@iwm.fraunhofer.de](mailto:info@iwm.fraunhofer.de)  
[www.iwm.fraunhofer.de](http://www.iwm.fraunhofer.de)

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

### Bildquellen

Seite 6, 18 3.v.o., 19, 24 2.v.o., 25,  
30 2.v.o., 38 3.v.o.: © Achim Käflein, Freiburg  
Seite 53: © Dirk Mahler  
Seite 3, 18 2.v.o., 24 1.v.o. und 3.v.o., 30 außer 2.v.o.,  
38 außer 3.v.o., 46 2.v.o., 55: © S.K.U.B. Fotostudio,  
Freiburg  
Seite 18 1.v.o.: © Bildtechnik Michael Spiegelhalter,  
Merdingen  
Seite 31, 39, 46 1.v.o., 47: © Alex Jung, Emmendingen  
Seite 68 3.v.o., 69, 76-77, 84-85, 92-93, 100:  
© Matthias Ritzmann, Halle  
Seite 68 außer 3. v.o.: © Markus Scholz, Halle  
Alle übrigen Abbildungen: © Fraunhofer IWM

