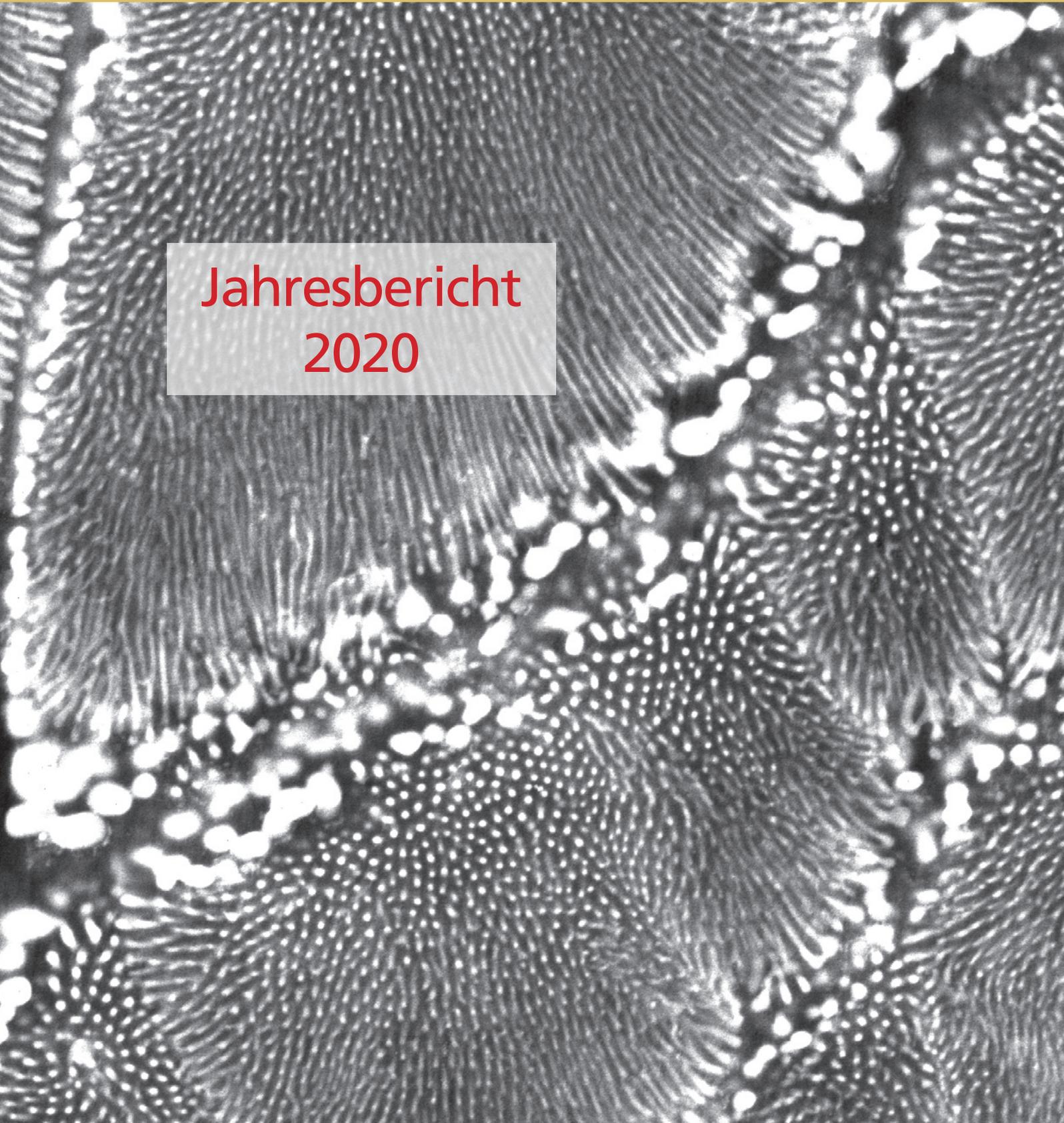




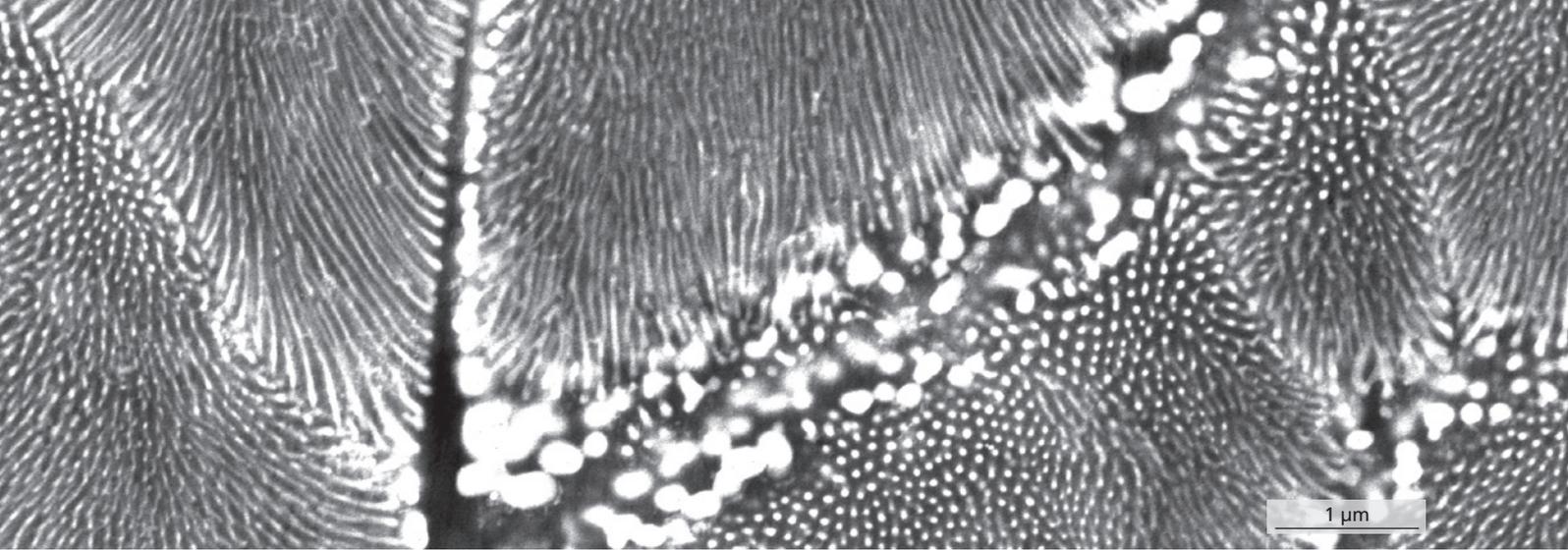
# Fraunhofer

IWM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM



## Jahresbericht 2020



*Mikrostruktur einer additiv gefertigten Aluminium-Nickel-Legierung im Rasterelektronenmikroskop. Aktuell sind keine kostengünstigen, hochfesten Aluminiumlegierungen für die additive Fertigung auf dem Markt verfügbar. Aus diesem Grund forscht das Fraunhofer IWM an neuen Legierungen, die dem konstruktiven Leichtbau zu einem Entwicklungsschub verhelfen sollen.*

---

## Die Fraunhofer-Gesellschaft

---

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Mit ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien sowie auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess. Sie ist Wegweiser und Impulsgeber für innovative Entwicklungen und wissenschaftliche Exzellenz. Mit inspirierenden Ideen und nachhaltigen wissenschaftlich-technologischen Lösungen fördert die Fraunhofer-Gesellschaft Wissenschaft und Wirtschaft und wirkt mit an der Gestaltung unserer Gesellschaft und unserer Zukunft.

Interdisziplinäre Forschungsteams der Fraunhofer-Gesellschaft setzen gemeinsam mit Vertragspartnern aus Wirtschaft und öffentlicher Hand originäre Ideen in Innovationen um, koordinieren und realisieren systemrelevante, forschungspolitische Schlüsselprojekte und stärken mit wertorientierter Wertschöpfung die deutsche und europäische Wirtschaft. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 75 Institute und Forschungseinrichtungen. Rund 29 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,8 Milliarden Euro. Davon fallen 2,4 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel davon erwirtschaftet

Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund ein Drittel steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

Die Wirkung der angewandten Forschung geht weit über den direkten Nutzen für die Auftraggeber hinaus: Fraunhofer-Institute stärken die Leistungsfähigkeit der Unternehmen, verbessern die Akzeptanz moderner Technik in der Gesellschaft und sorgen für die Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Hochmotivierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf dem Stand der aktuellen Spitzenforschung stellen für uns als Wissenschaftsorganisation den wichtigsten Erfolgsfaktor dar. Fraunhofer bietet daher die Möglichkeit zum selbstständigen, gestaltenden und zugleich zielorientierten Arbeiten und somit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung, die zu anspruchsvollen Positionen in den Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft befähigt. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und des frühzeitigen Kontakts mit Auftraggebern 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 2020

---

## Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

---

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

[info@iwf.fraunhofer.de](mailto:info@iwf.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



Der Institutsleiter des Fraunhofer IWM:  
Prof. Dr. Peter Gumbsch.

# VORWORT

Liebe Leserinnen und Leser,

die Corona-Krise 2020 hat uns in vielen Bereichen immens herausgefordert: auf politischer, industrieller, gesellschaftlicher und nicht zuletzt auf persönlicher Ebene. Es hat uns sehr geholfen, dass wir als Mitarbeitende eines Forschungsinstituts gewohnt sind, bei Herausforderungen schnell Ideen zu entwickeln und gangbare Lösungswege zu finden. Ich bin sehr stolz auf unsere gesamte Belegschaft, die sich mit Engagement, Kreativität und der Bereitschaft, die nötigen Regelungen mitzutragen, auf die Einschränkungen und veränderten Arbeitsbedingungen eingelassen hat. So konnte unser Betrieb ohne Unterbrechung weiter funktionieren, trotzdem der Großteil unserer Mitarbeitenden seit März 2020 aus dem Home-Office agiert. Die virtuelle Zusammenarbeit hat die ohnehin stattfindende Digitalisierung unseres Instituts beschleunigt und unseren wissenschaftlichen Veranstaltungen durch online- und hybride Formate neue Möglichkeiten eröffnet. Auch unsere gute Zusammenarbeit mit Industrie, Wissenschaft und Politik konnten wir nahezu ununterbrochen fortsetzen.

Unsere starken Netzwerke und guten Kooperationsbeziehungen sind häufig Schlüssel zu effizienten Lösungen komplexer Probleme. In diesem Sinne interagieren wir langjährig mit mehreren Universitäten, neben der Lehre auch in den Fraunhofer-Leistungszentren Nachhaltigkeit Freiburg und Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe. Gemeinsam mit Industriepartnern werden hier fachübergreifende Forschungsfragen in konkrete Innovationen umgesetzt: zum Beispiel eine emissionsneutrale Antriebslösung auf Basis regenerativ erzeugter, aromatenfreier Kraftstoffe. Das Fraunhofer IWM, Mikrotribologie Centrum  $\mu$ TC, testet in diesem Fall die Kraftstoff-Kandidaten auf ihre tribologischen Auswirkungen hin. Weitere interessante Forschungsergebnisse finden Sie wie gewohnt ab Seite 18.

Unsere Zusammenarbeit mit einem breiten Spektrum von Industrieunternehmen entsteht ganz natürlich durch unser Thema Werkstoffmechanik: Intelligente Werkstofflösungen sind in Produkten und Produktion von Lebensmittel-, Medizin-, Automobil-, Bau- bis hin zu Energiebranchen gleichermaßen gefragt. Aus diesem Grund sind wir auch in acht von dreizehn Zukunftsprojekten des »Fraunhofer-Innovationsprogramms« aktiv, die zuzeiten der aktuellen wirtschaftlichen Krise einen signifikanten Erneuerungsschub zur Unterstützung des Wiederanfahrens der Wirtschaft leisten

sollen. Technologien zum Aufbau und Erhalt der technologischen Souveränität in global verflochtenen Liefer- und Wertschöpfungsketten als auch Klimaneutralität, Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung stehen dabei im Fokus. Die Seiten 10 bis 12 liefern Ihnen dazu weitere Informationen. Das Projekt unter unserer Leitung, DMD4Future – Digitalisierte Material- und Datenwertschöpfungsketten, steht auch ganz im Zeichen unseres strategischen Institutsthemas »Digitalisierung in der Werkstofftechnik«.

Mit unseren Aktivitäten gestalten wir deutschlandweit maßgeblich dieses Digitalisierungs-Thema: beispielsweise im 2020 abgeschlossenen Landesprojekt MaterialDigital, der Plattform MaterialDigital des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF, dem Konsortium Machine Learning for Production ML4P und mit unserem kontinuierlich wachsenden Workshop MaterialDigital. Wir veröffentlichen jetzt auch einen Newsletter MaterialDigital INSIGHTS, um Industrie und Wissenschaft zu informieren und zum Thema zu befähigen. Weiterführende Informationen zu diesem und anderen strategischen Themen für die Wirtschaft Deutschlands wie die Wasserstoff-Energiewirtschaft und die Quantentechnologie finden Sie auf den Seiten 6 und 7.

Bei aller Zukunftsorientierung bleiben wir gleichzeitig den Fragen der Bruchmechanik, Ermüdung, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Werkstoffen und Komponenten treu. Diese unsere Expertise hat uns 50 Jahre Fraunhofer IWM ermöglicht mit unzähligen spannenden Projekten, die Materialleistung an die Spitze treiben. Wir begreifen dabei Materialien als veränderliche Systeme, deren Eigenschaften wir beschreiben, bewerten und auf Basis von Simulationsmodellen intelligent einstellen.

Auf dieser Basis freue ich mich, noch viele Jahre weiter mit Ihnen Forschung und Entwicklung voranzutreiben. Lassen Sie sich gerne von unseren Themen in unserem Jubiläumsjahr 2021 faszinieren und zu Projekten mit uns inspirieren.

Ihr

Prof. Dr. Peter Gumbsch

# INHALT

## INSTITUTSPROFIL

- 6 Zukunft gestalten
- 8 2021: 50 Jahre Fraunhofer IWM
- 10 Fraunhofer IWM. What's next?  
Während der Krise den industriellen Strukturwandel pushen
- 13 Das Kuratorium des Fraunhofer IWM
- 14 Das Institut in Zahlen
- 16 Organisation des Fraunhofer IWM

## AUSGEWÄHLTE FORSCHUNGSERGEBNISSE

### 18 Geschäftsfeld Fertigungsprozesse

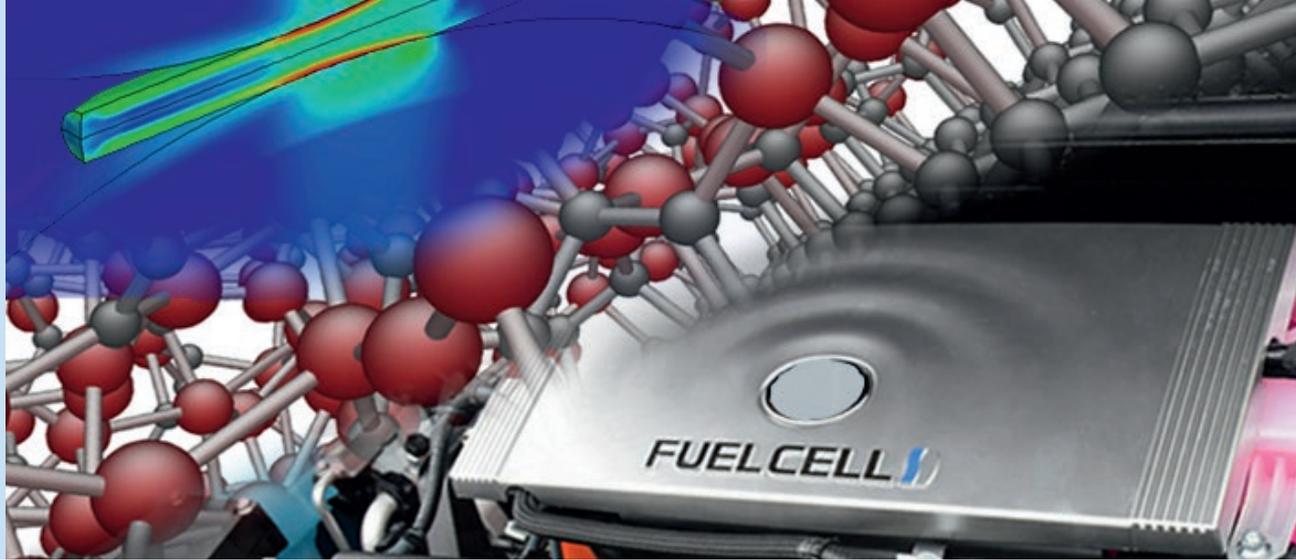
- 20 Machine Learning for Production: Digitale Transformation der Glasbiegemaschine
- 22 Vorhersage des Extrusionsverhaltens beim Robocasting
- 23 »Virtuelles Labor«: Eine App für die Auswertung virtueller Versuche

### 24 Geschäftsfeld Tribologie

- 26 Programmierung des Reibwerts durch elektrochemische Potenziale
- 28 Hervorragende Tribosysteme unter hoher Last: geschmierte W-Diamant-Kontakte
- 29 Einfluss der Schmierstoffe auf Reib- und Verschleißverhalten von Thermoplasten
- 30 60 GPa harte DLC-Schichten mit hohen Abscheideraten im PE-CVD-Verfahren
- 31 Hochauflösende Tribomessungen mit einem RNT-unterstützten Verzahnungsprüfstand

### 32 Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau

- 34 Bewertung des Einflusses von Überlasten auf die Lebensdauer von Strukturbauteilen
- 36 Charakterisierung und Modellierung anisotroper Schäume
- 38 Ermüdungsmechanismen auf mikromechanischer Ebene verstehen
- 40 Automatisierte Defektauswertung mittels Künstlicher Neuronaler Netze
- 41 Werkstoffdatenfusion auf dem Weg zum »Digitalen Zwilling«



#### 42 Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte

- 44 Entwicklung neuer, hochfester Kupferlegierungen
- 46 Quantifizierung des Umgebungseinflusses auf die Hochtemperaturermüdung
- 48 Maßgeschneiderte Materialgrenzflächen für optimale Bauteileigenschaften

#### KERNKOMPETENZEN

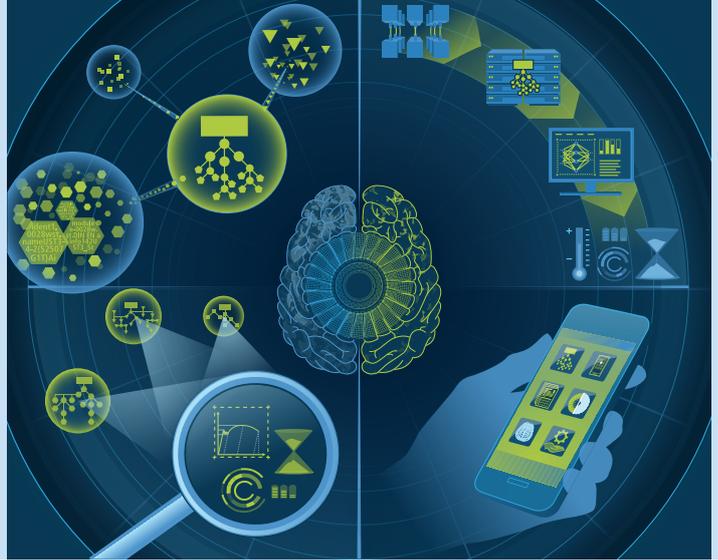
##### VERNETZUNG

- 50 Kernkompetenzen des Fraunhofer IWM, Mess- und Analysemöglichkeiten
- 56 Mitarbeit in Instituts-Kooperationen innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft

#### ANHANG

- 59 Abschlussberichte öffentlich geförderter Projekte
- 60 Personen, Ausbildung, Ereignisse
- 63 Veröffentlichungen
- 68 Impressum

## ZUKUNFT GESTALTEN



*Die Zukunft der Werkstoffe: Funktionalitäten der Struktur können Systeme wie Sensoren oder Aktoren ersetzen.*

In der sehr besonderen Situation der Coronavirus-Pandemie erhalten wir keinesfalls nur unseren Status quo, sondern agieren hochmotiviert für zukunftsfördernde Lösungen zur optimierten Nutzung von Materialeigenschaften und neuen Materialfunktionen. Denn moderne Werkstoffe spielen eine Schlüsselrolle bei der Bewältigung anstehender Herausforderungen wie nachhaltige Energiewirtschaft, emissionsarme Mobilität, ressourcenschonende Produktion und Digitalisierung.

Gesellschaftliche Themen durchdringen zunehmend unsere werkstoffmechanischen Projekte. Das zeigt sich deutlich in unseren Beiträgen zu Ressourceneffizienz, Leichtbau und Digitalisierung sowie unserem Engagement in den strategischen Bereichen Wasserstoff-Energiewirtschaft und Quantentechnologie, die weiter unten beschrieben sind. Unsere Verantwortung äußert sich aber eben auch im eigenen Haus: Wir etablieren zurzeit Ladestationen für Elektrofahrzeuge, haben die Wertstofftrennung am Institut verfeinert und beziehen seit Jahren Ökostrom für den Betrieb unserer Maschinen und Einrichtungen. Im aktuellen Neubau in Freiburg werden wir vollständig auf fossile Brennstoffe zur Wärmeerzeugung verzichten: Die Abwärme der Kälteerzeugung für Versuchsaufbauten, Werkstattmaschinen und Klimatisierung übernimmt das Heizen.

### Strategisches Thema Digitalisierung

#### Neue, schnelle Erkenntnisse durch die Digitalisierung von Werkstoffinformationen

Unsere Digitalisierungs-Projekte sind Booster für viele Bereiche unserer Geschäftsfelder, da wir jeweils Demonstratoren entwickeln, die nützlich für die Industrie sind und unser Know-how weiter steigern.

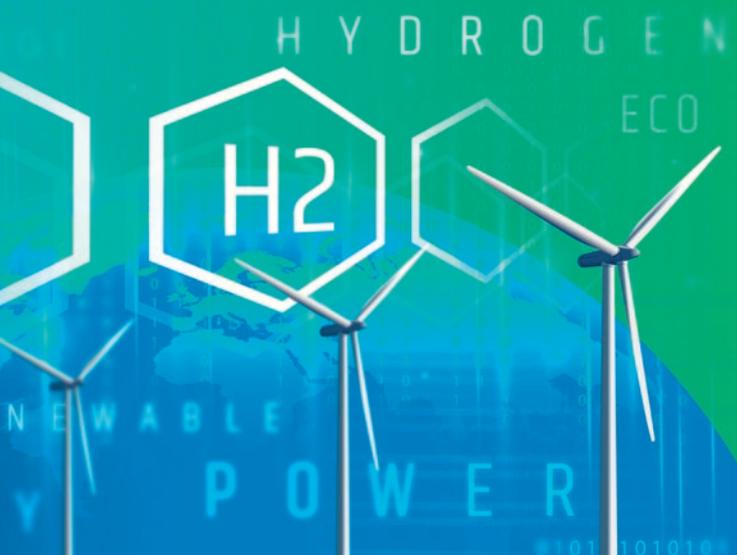
Im Konsortium Machine Learning for Production ML4P entwickeln wir für unseren Herstellungsprototypen »Lasergestütztes

Glasbiegeverfahren« eine Produktions-Optimierung mithilfe Maschinellem Lernen (ML). Daten der Laser, Thermolemente und die Auswertung von Wärmebildern werden kombiniert und Verbesserungsvorschläge für das Programm des Lasers errechnet.

Mit Beendigung des Landes-Forschungsprojekts MaterialDigital unter unserer Leitung konnten wir große Fortschritte bei der Strukturierung von Materialdaten zu einem durchgängigen Datenraum erzielen. Der von uns erstellte Demonstrator bildet einen beispielhaften Materialdatenraum ab: für den Kokillenguss von Aluminiumteilen der Automobilindustrie und des Maschinenbaus. Dazu wurden Software-Werkzeuge zur Strukturierung der Daten sowie zur Automatisierung der Workflows entwickelt. Der Materialdatenraum dient als Grundlage für schnellere, präzisere Entscheidungen in materialintensiven Produktionen und kann problemlos auf andere Materialprozesse übertragen werden.

Im BMBF-Verbundprojekt »Innovationsplattform Material Digital PMD« erarbeiten wir gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung, den Leibniz-Instituten für Werkstofforientierte Technologien und für Informationsinfrastruktur, der Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung BAM, dem Karlsruher Institut für Technologie KIT sowie Fraunhofer AISEC die Grundbausteine für eine digital zugängliche und systematisch nutzbare Infrastruktur für Werkstoffdaten. Hierbei gilt es, diese grundlegenden aber auch priorisierenden Fragen zu lösen: Wie kann die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Material- und Informationswissenschaften organisiert werden? Wie gewährleisten wir Datensouveränität der Beteiligten und regeln Zugangsberechtigungen? Wie kann ein Daten-Framework für Abfragen, Vergleiche und Zusammenführen ausgewerteter Metadaten aussehen? Wie können verschiedene Ontologien zusammengeführt werden?

Im Rahmen des Fraunhofer-Innovationsprogramms koordinieren wir das Projekt »Digitalisierte Material- und Datenwertschöpfungsketten DMD4Future«: Die 13 Fraunhofer-Institute erarbeiten zu-



*Werkstoff-Lösungen für Bauteile, die H<sub>2</sub> ausgesetzt sind, oder bei innerem Wasserstoff.*

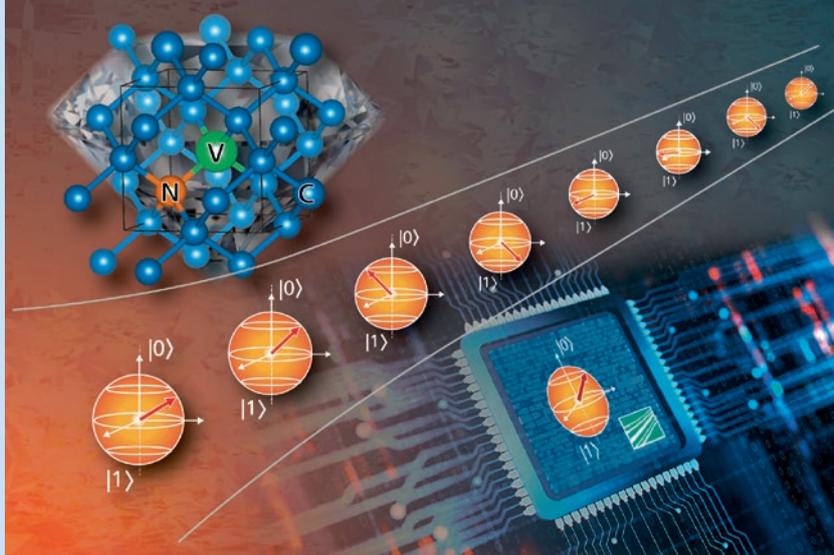
nächst für die Luftfahrt- und Automobilindustrie Datenangebote im Material-Bereich, die Materialdatenökonomie, -bewertung und -recycling betrachten.

Unseren geplanten Workshop MaterialDigital 2020 mussten wir Corona-bedingt ins Folgejahr verschieben, in dem er sehr erfolgreich virtuell stattfand. Teilnehmende aus Industrie und Wissenschaft diskutierten, wie Daten anwendungsorientiert strukturiert und integriert und in einen Mehrwert bringenden Prozess überführt werden können. In den letzten beiden Jahren haben wir als Fraunhofer IWM, aber auch etliche Unternehmen, einiges an Lehrgeld bezahlt, um Werkstoffe und Werkstoffprozesse zu digitalisieren. So wissen wir heute besser, wo Fallstricke liegen und woran man Sackgassen erkennen kann. Diese Erkenntnisse teilen wir im Workshop und in den MaterialDigital INSIGHTS auf unserer Webseite.

### Strategisches Thema Wasserstoff

#### Werkstoffe im Kontakt mit Wasserstoff

Im Zukunftsmarkt Wasserstoffwirtschaft finden wir Werkstoff-Lösungen im Bereich Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer bei der Erzeugung, Verteilung und Nutzung des Energieträgers Wasserstoff. Im Rahmen des Innovationsprojekts HYPOS der BMBF-Förderinitiative »Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation« sind wir in drei Projekten rund um Herstellung, Speicherung, Verteilung und breite Anwendung von Grünem Wasserstoff aktiv. Im Projekt »Pipeline Integrity Management System PIMS« qualifizieren wir Stähle für Rohrfernleitungen und arbeiten an deren Lebensdauervorhersage. Das Projekt UGS beschäftigt sich mit der Errichtung und Umrüstung von Salzkavernen für die Wasserstoffspeicherung. Hier bewerten wir die Integrität von Schweißnähten beispielsweise in Stahl-Förderrohren. Auch karbonfaserverstärkte Kunststoffe sind im Blick der Wasserstoffwirtschaft – das Projekt H<sub>2</sub>-HD legt Kunststoffwickeltanks für Druckwasserstoff bis zu 1 000 bar aus.



*Farbzentren im Diamant für den Aufbau zukünftiger Quantenregister.*

Die werkstoffmechanischen Fragestellungen unabhängig von der Wasserstoffwirtschaft rund um Wasserstoffversprödung sind selbstverständlich Thema am Fraunhofer IWM. Neben tribologischen Analysen von Schmierstoffen hinsichtlich ihrer Affinität zur Wasserstofffreisetzung und in-situ Messungen der Wasserstoffpermeation im Reibversuch in einer elektrochemischen Zelle entwickeln wir beispielsweise im Projekt OptiHeat ein flexibles Computersimulationswerkzeug: Es unterstützt die schnelle und fundierte Auslegung von Wärmebehandlungsverfahren zum Austreiben von Wasserstoff aus Bauteilen mit galvanischer Beschichtung, um Wasserstoffversprödung zu vermeiden.

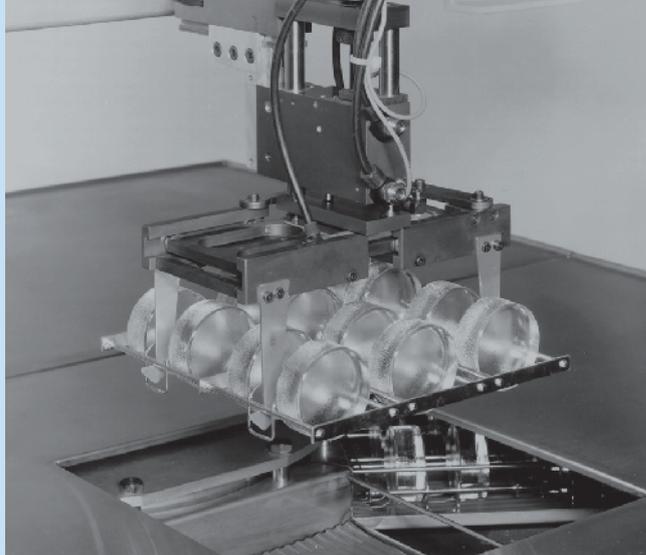
### Strategisches Thema Quantentechnologie

#### Quantentechnik für Sensoren und Simulationen

Quantenkommunikation und Quantencomputing sind für Deutschland wichtige Themen, um technologisch souverän zu bleiben. Zahlreiche Bundes- und Landesinitiativen unterstreichen die Bedeutung des Themas und gestalten die sogenannte zweite Quantenrevolution Deutschlands mit. Über die nächsten Jahre soll ein eigener nationaler Quantencomputer entwickelt werden. Fraunhofer will der Quantentechnologie den Weg in die Verwertbarkeit ebnen und ihre Möglichkeiten breit erschließen.

Wir erforschen im Fraunhofer-Leitprojekt Quantenmagnetometrie QMag die Anwendung neuartiger Quantenmagnetsensoren mit höchster Signalempfindlichkeit oder höchster Ortsauflösung. Sie sollen helfen, Schädigungsvorgänge in Bauteilen frühzeitig zu erkennen und aufzuspüren. Wir beschreiben quantentheoretisch die atomaren Elektronen- und Spinzustände in Magnetfeldern und bewerten sie. Im Fraunhofer Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg nutzen wir einen neuartigen Quantencomputer für theoretische, multiskalige Werkstoffsimulationen. Es geht darum, bestimmte physikalische, chemische oder mechanische Werkstofffragen zu behandeln, die mit klassischen Computern bisher nur sehr aufwendig oder gar nicht lösbar sind.

## 2021: 50 JAHRE FRAUNHOFER IWM



*Automatische Herstellung von Brillenglasrohlingen (1980).*

Das Fraunhofer IWM entwickelte sich aus der Forschungsgruppe »Festkörpermechanik« des Fraunhofer-Instituts für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI. Die Geschichte dahinter liest sich recht turbulent: Prof. Dr. Frank Kerkhof, Experte für Bruchvorgänge in Gläsern und aus dem Institut für Theoretische Physik der Universität Freiburg ans Fraunhofer EMI gewechselt, machte keinen Hehl aus seiner Abneigung, an anwendungsorientierten Militäraufgaben zu forschen. Er eröffnete eine kleine Außen-Abteilung in Weil am Rhein mit dem Ziel, neben Glas auch die Versagenseigenschaften von Metallen zu untersuchen: die Forschungsgruppe »Festkörpermechanik«. 1968 stieß Prof. Dr. Erwin Sommer hinzu, inspiriert durch Erfahrungen in den USA und überzeugt vom Anwendungspotenzial der in Deutschland wenig bekannten Methoden der Bruchmechanik. Er begann, dieses für Deutschland neue Fachgebiet aufzubauen.

### Bruchmechanik-Pioniere in Deutschland

Durch zähe Teilungsverhandlungen war dann zum 1. Januar 1971 die technische Grundausrüstung für das damalige Fraunhofer-Institut für Festkörpermechanik IFKM unter der Leitung von Prof. Dr. Frank Kerkhof gesichert. Viereinhalb Monate später konnten die rund 20 Mitarbeitenden aus dem Mutterhaus aus- und in die Freiburger Innenstadt, Rosastraße, einziehen. Dieses Provisorium sollte mehr als 10 Jahre bestehen, bevor 1983 die ersten Gebäude des jetzigen Standorts in der Wöhlerstraße bezogen werden konnten. Zu dieser Zeit war das Institut bereits in »Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM« umgetauft: Der Begriff »Festkörper« kam in mehreren Institutsnamen der Fraunhofer-Gesellschaft vor und sorgte für Verwirrung.

Die bis zu diesem Zeitpunkt 62 Mitarbeitenden erforschten das Bruchverhalten von Stählen und Gläsern bei dynamischen Belastungen, Sprödbbruchvorgängen, plastischen Deformationen und unterschiedlichen Rissformen. Speziell das am



*Die drei Institutsleitergenerationen des Fraunhofer IWM bei der Festveranstaltung zum 90. Geburtstag von Prof. Dr. Frank Kerkhof.*

*Von links: Prof. Dr. Erwin Sommer, Prof. Dr. Frank Kerkhof und Prof. Dr. Peter Gumbsch.*



*Institutsleiter und Leiter Institutsteil Halle.*

*Von links: Prof. Dr. Ralf B. Wehrspohn und Prof. Dr. Dieter Katzer.*



*Große Beschichtungsanlage, beispielsweise für diamantähnliche Kohlenstoffschichten DLC (2006).*



*Röntgendiffraktometer: Zerstörungsfreie Ermittlung von oberflächennahen Eigenspannungen, Phasenanteilen und Texturen (2015).*

Institut entwickelte Verfahren, Flachglas mittels thermisch induzierter, lokal eng begrenzter Spannungsfelder sauber zu trennen, sorgte in der Glasindustrie für kostengünstigere Herstellungsschritte, beispielsweise für Brillenglasrohlinge. Ab 1979 wurden im neuen Schwerpunkt »Oberflächenfestigkeit« Verfahren zur Oberflächenbehandlung optimiert und die entsprechenden Veränderungen mikrostruktureller Eigenschaften und Eigenspannungen erforscht, speziell für Bauteile aus Hochleistungs- und Strukturkeramik. In diesem Zusammenhang entstanden sieben Jahre später größere Forschungsprojekte mit der Automobil-Industrie, beispielsweise für Katalysatoren und Elektroniksubstrate.

### Versuchs- und Simulationsexpertise aus einer Hand

Vor dem Hintergrund der äußerst dynamischen Entwicklung der Computer-Hard- und -Software in den siebziger Jahren gewannen die Numerik und Simulation und damit Großinvestitionen in Rechnersysteme zunehmend an Bedeutung für das Fraunhofer IWM. Bis heute bildet die Kombination von Experiment und Simulation »aus einer Hand« das methodische Rückgrat des Instituts, um nachhaltige, intelligente Lösungen für die optimierte Nutzung von Materialeigenschaften und für neue Materialfunktionen zu entwickeln.

Heute reicht die Expertise des Instituts von Verschleißschutz und Tribologie über Fertigungsprozesse der Pulvertechnologie, Umformung und Glasformgebung, Bauteil- und Crashesicherheit, Leichtbau bis hin zu Werkstoffbewertung, Hochtemperaturverhalten und Lebensdauerkonzepten. Als Querschnittsinstitut agiert das Fraunhofer IWM unabhängig von spezifischen Branchen flexibel auf Marktveränderungen wie Digitalisierung oder Biologisierung, erschließt relevante Zukunftsmärkte wie die Quantenmechanik und erarbeitet gemeinsam mit Industriepartnern Lösungen für wirtschaftliche und gesellschaftliche Herausforderungen wie die neue Mobilität oder die Nutzung regenerativer Energien.

### Fraunhofer IWM Forschungsstätten

Prof. Dr. Erwin Sommer leitete von 1977 bis 2001 das Fraunhofer IWM. Nach der deutschen Wiedervereinigung bekam das Fraunhofer IWM 1991 einen Tochter-Standort mit der Außenstelle »Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen« in Halle an der Saale. 2001 berief die Fraunhofer-Gesellschaft den Metallforschungsexperten Prof. Dr. Peter Gumbsch als Institutsleiter. Von 2006 bis 2015 leitete er das Institut gemeinsam mit Prof. Dr. Ralf Wehrspohn, der den Standort in Halle zum 1. Januar 2016 in das eigenständige Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS überführte.

Das Fraunhofer IWM ist seit seiner Gründung vor 50 Jahren kontinuierlich gewachsen und konnte 2011 in der Freiburger Wöhlerstraße ein neues Gebäude mit Büroräumen und einem Beschichtungs- und Simulationszentrum einweihen. In Karlsruhe entstanden für das MikroTribologie Centrum  $\mu$ TC des Fraunhofer IWM gleich zwei Neubauten: Auf dem Campus Süd wurde 2016 das  $\mu$ TC-Gebäude gemeinsam mit dem benachbarten Materialwissenschaftlichen Zentrum für Energiesysteme des KIT eingeweiht, 2017 kam das Gebäude auf dem Campus Ost hinzu. 2019 eröffnete das Fraunhofer IWM ein modernes Wasserstofflabor in Freiburg und jetzt, 2021, kann der Erweiterungsbau bezogen werden, der die bestehenden Gebäude der Wöhlerstraße miteinander verbindet und neben Büros den Raum für ein Großprobenlabor und eine neue Werkstatt bietet.

## FRAUNHOFER IWM. WHAT'S NEXT?

### WÄHREND DER KRISE DEN INDUSTRIELLEN STRUKTURWANDEL PUSHEN

#### »Fraunhofer-Innovationsprogramm« 2020 Innovationspush für das Wiederaufahren der Wirtschaft

In einer wirtschaftlich angespannten Situation ist Fraunhofer als Innovationstreiber noch mehr als sonst gefordert, der Gesellschaft und insbesondere den Unternehmen gezielt mit Produkt- und Markimpulsen neuen Schub zu geben. Das Fraunhofer-Innovationsprogramm fördert institutsübergreifend Kompetenzen in Themen, die durch das Zusammenwirken einen Mehrwert zur Unterstützung des Wiederauffahrens der Wirtschaft leisten. Im Fokus stehen dabei Technologien in global verflochtenen Liefer- und Wertschöpfungsketten, die Klimaneutralität, Kreislaufwirtschaft und die Digitalisierung.

Das Fraunhofer IWM ist maßgeblich an den kurz laufenden Innovationspush-Projekten beteiligt und leitet das Projekt DMD4Future. Damit leistet es einen großen Beitrag zu dem hochinnovativen Modernisierungsschub, der Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft gleichermaßen in den Blick nimmt und den Strukturwandel der Industrie in Richtung resilienter, zukunftsfähiger Wertschöpfungsketten begleitet.

#### Digitalisierte Material- und Datenwertschöpfungsketten – DMD4Future

Unter der Leitung des Fraunhofer IWM sind neue datenbasierte Technologiekompetenzen zur Beschreibung und Optimierung in und entlang der unterschiedlichen Phasen des Material- und Produktlebenszyklus erarbeitet worden. Die Basis für datengetriebene Geschäftsmodelle sowie für digitale Mehrwertangebote in der Materialwirtschaft wurden vorbereitet: Es wurde ein Materialdatenraum entwickelt, der den Datenaustausch zwischen Partnern über die Grenzen eines Produktionsstandortes oder eines Unternehmens hinweg erleichtern soll.

Laufzeit: Juli 2020 – Dezember 2020 | Dr. Christoph Schweizer

#### Decarbonisation of Buildings and Operation – DECABO2030

Im Projekt wurden Konzepte für klimaneutrale Bundesgebäude entwickelt, die bis 2030 realisiert werden könnten. Das Fraunhofer IWM hat sich mit Beiträgen zu speziellen klimaneutralen Fenstern beteiligt und charakterisierte und simulierte dazu den Randverbund, also das Glaslot und die Fensterprofile, des genutzten Vakuumisolierglases VIG. Laufzeit: Aug. 2020 – Dez. 2020 | Tobias Rist

#### Evolutionäre bioökonomische Prozesse – EvoBio

Trotz erheblicher Anstrengungen führt die Wertschöpfung vieler Produkte zu schädlichen Emissionen, nicht verwertbaren Abfällen und Ausbeutung globaler Ressourcen. Dies hat massive negative Folgen für viele Menschen wie verschmutztes Trinkwasser, Konkurrenz um essenzielle Rohstoffe, Lebensmittel- und Produktkriminalität sowie Verfälschung und qualitativ minderwertige Produktion. Im Projekt wurden Konzepte entwickelt, die an Beispielen den Übergang zu vollständig integrierter Nutzung von Stoffströmen zeigen.

Das Fraunhofer IWM hat sich im Bereich multifunktionaler Werkstoffe an Forschungsfragen zu adaptiven Elastomerdichtungen, Beschichtungen, tribologischen Tests und Lebensdauervorhersagen beteiligt.

Laufzeit: Aug. 2020 – Dez. 2020 | Dr. Frank Burmeister

#### Wasserstoffwirtschaft für Deutschland – H2D

Deutschland plant den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Um diesen Prozess nachhaltig, sicher und international zu gestalten, werden Pfade zur künftigen Nutzung der Wasserstofftechnologien für Politik und Industrie aufgezeigt, speziell in den Bereichen Digitalisierung der Wasserstoffwirtschaft, Elektrolyseur-Komponenten und Sicherheitsaspekte.

Das Fraunhofer IWM bearbeitete das Thema Werkstoffe für die sichere Infrastruktur.

Laufzeit: Juli 2020 – Dez. 2020 | Prof. Dr. Christoph Elsässer



### **Hocheffizienter Antriebsstrang für Nutzfahrzeuge unter Berücksichtigung der nationalen Mobilitäts- und Wasserstoffstrategie – HANNAe**

Für eine ressourcenschonende Defossilisierung des Straßen-güterverkehrs, speziell für Nutzfahrzeuge, wurde ein generator-elektrischer Powerpack für den Antriebsstrang entwickelt, mit der Zielsetzung optimierter Lebenszykluskosten. Das Fraunhofer IWM beteiligte sich an Konzepten, um ressourcenkritische Elemente in den magnetischen Werkstoffen zu reduzieren, als auch mit der Optimierung der Verschleißfestigkeit und der Schmiermittelauswahl zur Bauteiloptimierung.

Laufzeit: Aug. 2020 – Dez. 2020 | Dr. Daniel Urban

### **Light Materials 4 Mobility – LM4M**

Für Elektromobilitätsanwendungen wurden Leichtbaustrukturen identifiziert, Entwicklungsprozesse für vollständig kreislauffähige Verbundmaterialien beschleunigt, neue Leichtmetalllegierungen für additive und hybride Prozesse erforscht und neuartige Verknüpfungen digitaler Tools und Workflows entwickelt. Das Ziel: ressourceneffiziente Bauteile mit verbesserter Leistungsfähigkeit. Das Fraunhofer IWM bewertete und optimierte Verbundsysteme aus Biopolymer-Tapes und Basaltfaser-verstärkung sowie ein sortenreines Sandwichkonzept auf Polypropylen-(PP-)Basis. Mithilfe unterschiedlicher Additive und Fasermaterialien in den Tapes gelang es, die Mechanik, den Flammenschutz und die EMV-Eigenschaften eines potenziellen Batteriegehäuses zu verbessern.

Laufzeit: Juli 2020 – Dez. 2020 | Frank Huberth, Dr. Michael Luke

### **Resiliente Wertschöpfungssysteme – RESYST**

An den Wirtschaftsstandort Deutschland werden zunehmend Anforderungen gestellt, resiliente und flexible Wertschöpfungssysteme bei gleichbleibend hoher Produktivität und Individualisierung zu entwickeln. Aus Krisen, wie die aktuelle Covid-19-Pandemie, und Rückschlägen, resultierend aus internen und externen Störfaktoren, sollen Unternehmen gestärkt

und handlungsfähig hervorgehen. Das Fraunhofer IWM beteiligte sich in diesem Zusammenhang an der digitalen Repräsentation von Werkstoffen.

Laufzeit: Juli 2020 – Dez. 2020 | Dr. Dirk Helm

### **Smart und Resilient – SMILE**

Um den Energieverbrauch Deutschlands zu reduzieren, müssen industrielle Produkte und Prozesse energie- und ressourceneffizient gestrickt sein. Das Projekt entwickelte maßgeschneiderte multifunktionale Hochleistungsflächen für energieeffiziente und nachhaltige Bauteile und Werkzeuge. Dazu sind hochverschleißfeste und reibungsarme Oberflächenbeschichtungen entworfen worden.

Laufzeit: Aug. 2020 – Dez. 2020 | Bernhard Blug

### **Laufende Vorlauftorschungsprojekte**

#### **MAVO Hoch(warm)feste Aluminiumlegierungen für das Urformen im Leichtbau – HAIUr**

Um neue Leichtbauweisen zu ermöglichen, werden hochfeste Aluminiumlegierungen entwickelt, die mittels Guss und additiver Fertigungsverfahren herstellbar sind. Zur Berechnung von Mikrostruktur und Eigenschaften neuer Legierungen werden thermodynamische und atomistische Methoden angewendet. Der Fertigungsprozess wird mithilfe partikelbasierter Simulationen optimiert. Zudem werden Bauteildemonstratoren mechanisch validiert.

Laufzeit: März 2019 – Febr. 2022 | Dr. Johannes Preußner

#### **MAVO Mehrlagenkeramische Einbettung von SiC-Halbleiterbauelementen – MESiC**

Ziel ist eine vollkeramische Aufbau- und Verbindungstechnik im Miniaturformat, die hohe Leistungen, hohe Schaltgeschwindigkeiten und gesteigerte Zuverlässigkeit miteinander vereint. Das Fraunhofer IWM entwickelt mithilfe von Simulationsmodellen den optimalen Prozess, der Sinterverzug und

## FRAUNHOFER IWM. WHAT'S NEXT?

Defekte vermeidet. Zudem optimiert es die Grenzflächeneigenschaften und erfasst Input für die Bauteilsimulation, beispielsweise Diffusivitäten oder Grenzflächeneigenschaften.

Laufzeit: März 2019 – Febr. 2022 | Dr. Torsten Kraft

### **MAVO Akustisches Design von Kunststoff-Bauteilen – PolymerAkustik**

Aufgrund ihres geringen spezifischen Gewichts ist das akustische Verhalten von Bauteilen aus unverstärkten und faserverstärkten Kunststoffen oftmals problematisch. Es werden numerische Methoden entwickelt, die das gezielte Design der Mikrostruktur solcher Materialien im Hinblick auf die Optimierung ihrer akustischen Eigenschaften zulassen.

Laufzeit: April 2018 – Dez. 2021 | Dr. Jörg Hohe

### **MAVO Unternehmensspezifische Werkstoffdatenräume zur beschleunigten Produktentwicklung – UrWerk**

Ein Framework für maßgeschneiderte Werkstoffdatenräume wird entwickelt, das die komplexe Historie von Werkstoffen oder Werkstoffsystemen abbildet. Kern ist eine exemplarische ontologiebasierte Beschreibung, die bei Bedarf anwendungs- und unternehmensspezifisch erweitert werden kann. Im Ergebnis werden so durch datengetriebene Analyse-Werkzeuge wie Machine Learning aus der strukturierten Datenablage und Dokumentation zusätzliche Informationen zu verschiedenen Werkstoff- und Werkstoffsystemzuständen zugänglich.

Laufzeit: März 2019 – Febr. 2022 | Dr. Michael Luke

### **Fraunhofer-Leitprojekt Evolutionäre Selbstanpassung von komplexen Produktionsprozessen und Prozessen – EVOLOPRO**

Evolutionenbiologische Mechanismen werden zur Erzeugung einer neuen Generation von Produktionssystemen genutzt: Diese sogenannten »Biological Manufacturing Systems (BMS)« sollen sich analog biologischer Organismen selbstständig und in kurzer Zeit an neue Anforderungen und Umgebungsbedin-

gungen anpassen können. Das Fraunhofer IWM beteiligt sich an der digitalen Repräsentation von Werkstoffen und an der Prozess- und Bauteiloptimierung.

Laufzeit: Jan. 2019 – Dez. 2022 | Dr. Dirk Helm

### **Fraunhofer-Leitprojekt Materialien für Tandemsolarzellen mit höchster Umwandlungseffizienz – MaNiTu**

Nachhaltige, höchsteffiziente und kostengünstige Tandemsolarzellen werden auf Basis neuer Absorbermaterialien entwickelt. MaNiTu soll die PV-Produktionsindustrie Europas stärken, indem kritische, giftige Materialien vermieden, Ressourcenverbrauch gesenkt, Anwendungen erweitert und Stromentstehungskosten sowie Flächenverbrauch gesenkt werden.

Laufzeit: Dez. 2019 – Dez. 2023 | Prof. Dr. Christian Elsässer

### **Fraunhofer-Leitprojekt Machine Learning for Production – ML4P**

Maschinelle Lernverfahren haben für die optimale Gestaltung von Fertigungsprozessen ein großes Potenzial. Dafür soll ein toolgestütztes Vorgehensmodell entwickelt und an drei Anwendungs-Demonstratoren getestet werden.

Das Fraunhofer IWM wird das toolgestützte Vorgehensmodell anwenden, um eine kognitive Glasbiegemaschine zu entwickeln.

Laufzeit: Febr. 2015 – Jan. 2021 | Dr. Dirk Helm

### **Fraunhofer-Leitprojekt Quantenmagnetometer für industrielle Applikationen – QMag**

Die Quantenmagnetometrie soll aus dem universitären Forschungsumfeld in konkrete industrielle Anwendungen überführt werden. Das Forschungsteam entwickelt hochintegrierte und bildgebende Quantenmagnetometer mit höchster Ortsauflösung und optimierter Empfindlichkeit.

Laufzeit: April 2019 – Dez. 2024 | Prof. Dr. Christian Elsässer

# DAS KURATORIUM DES FRAUNHOFER IWM

## 2020 abgeschlossene Vorlaufforschungsprojekte

### MEF Inline-Umformvergüten von Leichtbauwerkstoffen – AlulnForm

Eine Technologie für große Stückzahlen: Zusammen mit dem Fraunhofer IWU wird ein kombinierter Wärmebehandlungs- und Kaltumformprozess für hochfeste Aluminium-Blechwerkstoffe entwickelt, der in den Prozessstakt integriert werden kann. Das Fraunhofer IWM arbeitet an der Charakterisierung, Bewertung und Modellierung der Werkstoffeigenschaften, die stark von der Prozessführung abhängen. Ziel ist die Ermittlung von günstigen Prozessfenstern für den jeweiligen Umformprozess.

Laufzeit: Jan. 2019 – Dez. 2020 | Dr. Alexander Butz

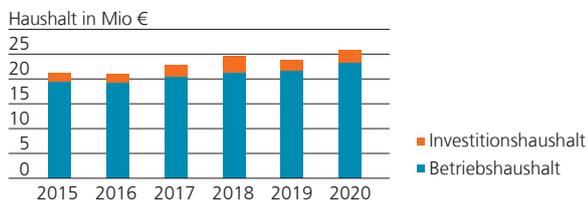
Dem Kuratorium gehören Persönlichkeiten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft an, die dem Fraunhofer IWM fachlich nahestehen. Gemeinsam mit dem Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft beraten und unterstützen sie das Institut mit ihrer Expertise bei strategischen Themen, Weichenstellungen im Institut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

- Dr. Markus Hermle  
Kuratoriumsvorsitzender, Daimler AG, Sindelfingen
- Dr. Nikolaus Blaes  
Saarschmiede GmbH,  
Völklingen
- Dr. Katrin Mädler  
Deutsche Bahn AG,  
Brandenburg
- Alexander Essig  
Rosswag GmbH, Pfinztal
- Prof. Dr. Matthias Petzold  
Fraunhofer IMWS,  
Halle (Saale)
- Dr. Jörg Eßlinger  
MTU Aero Engines AG,  
München
- Bruno Posset  
Märkisches Werk GmbH,  
Halver
- Dr. Martin Grönefeld  
Magnetfabrik Bonn GmbH,  
Bonn
- Dr. Heike Riel  
IBM Research, Zürich
- Dr. Jürgen Groß  
Robert Bosch GmbH,  
Renningen
- Dr. Silke Wagener  
Freudenberg Technology  
Innovation SE & Co. KG,  
Weinheim
- Dr. Roland Herzog  
MAN Diesel & Turbo SE,  
Oberhausen
- MinRat Dr. Joachim Wekerle  
Ministerium für Wirtschaft,  
Arbeit und Wohnungsbau,  
Baden-Württemberg,  
Stuttgart
- Bernhard Hötger  
HEGLA GmbH & Co. KG,  
Beverungen
- Prof. Dr. Oliver Kraft  
Karlsruher Institut für  
Technologie (KIT), Karlsruhe

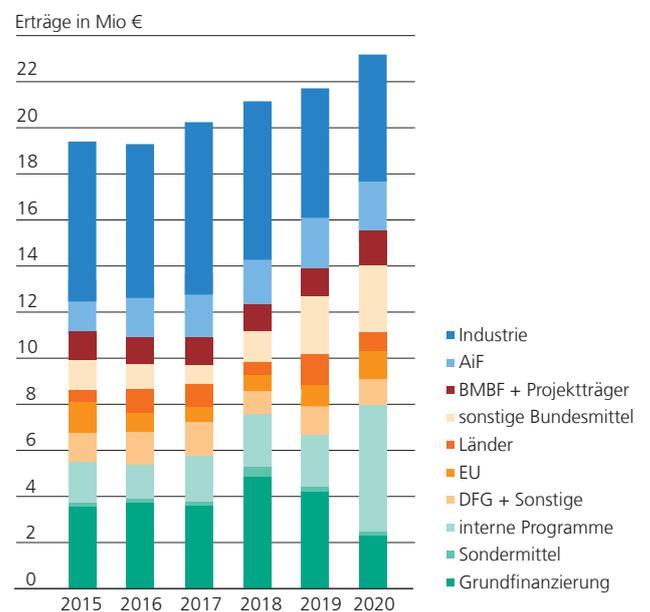
# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## Finanzielle Entwicklung

Der Haushalt des Fraunhofer IWM setzt sich zusammen aus einem Betriebshaushalt und einem Investitionshaushalt. Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist gegenüber dem Vorjahr gestiegen und beläuft sich auf 23,2 Millionen Euro. Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Er wird finanziert durch externe Erträge aus Industrie und öffentlicher Hand sowie durch die institutionelle Förderung (Grundfinanzierung). Der Anteil der Industrieerträge am Betriebshaushalt 2020 liegt bei 33,2 Prozent. Der Investitionshaushalt 2020 beträgt 2,7 Millionen Euro.



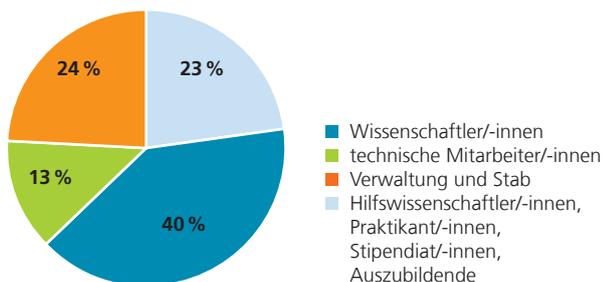
1 Entwicklung Investitionshaushalt und Betriebshaushalt.



2 Entwicklung Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM.

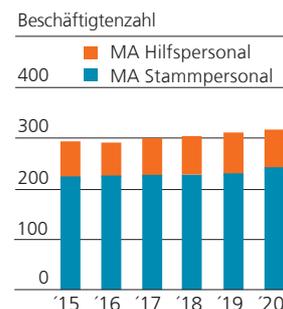
## Personalentwicklung

Ende 2020 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 316 Personen beschäftigt. Davon sind 243 Mitarbeitende als Stammpersonal und 73 Mitarbeitende als Hilfspersonal (Hilfskräfte, Praktika, Ausbildung, Abschlussarbeiten). Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus

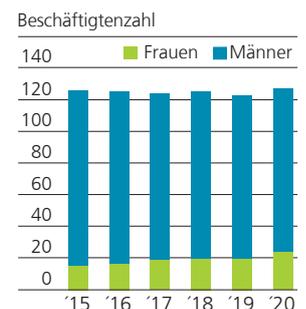


3 Personal am Fraunhofer IWM Ende 2020 nach Bereichen.

127 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, 42 technischen Beschäftigten sowie 74 Angestellten in Verwaltung und IL-Stab. 10 Auszubildende werden in vier Berufsbildern ausgebildet.



4 Entwicklung Personal am Fraunhofer IWM.



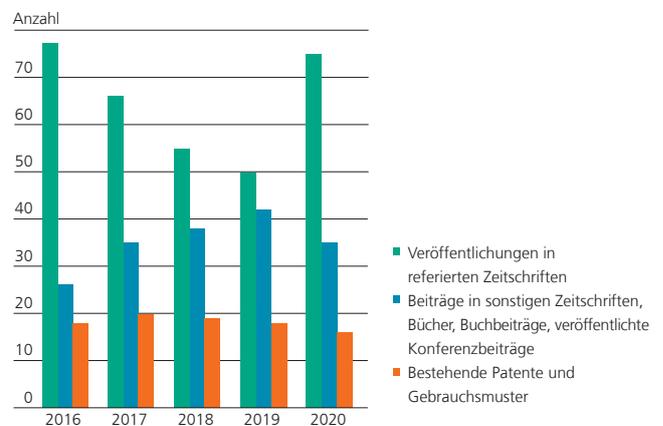
5 Entwicklung der Anzahl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am Fraunhofer IWM.

## Wissenschaftliche Kennzahlen

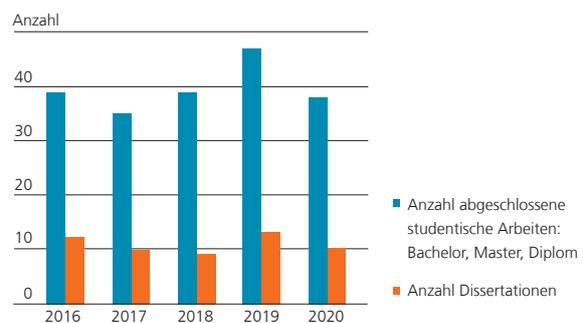
Die Fraunhofer-Institute betreiben anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für die Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Dabei ist neben dem wirtschaftlichen Erfolg die wissenschaftliche Exzellenz ein notwendiges Kriterium, um die Mission eines Instituts erfolgreich zu erfüllen. 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:

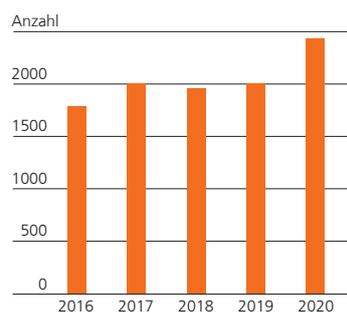
- Qualifikation von wissenschaftlichem Nachwuchs
- Wissenschaftlicher Output in Patenten und Veröffentlichungen
- Wissenschaftliche Anerkennung und Vernetzung



1 Publikationsleistung des Fraunhofer IWM.



2 Akademische Qualifizierung am Fraunhofer IWM.



3 Anzahl Zitationen von Veröffentlichungen des Fraunhofer IWM.

Stand: 11. Dez. 2020

# ORGANISATION DES FRAUNHOFER IWM

<b>Institutsleiter</b>	Prof. Dr. Peter Gumbsch	+49 761 5142-100	peter.gumbsch@iwm.fraunhofer.de
<b>Stellvertretende Institutsleiter</b>	Prof. Dr. Chris Eberl	+49 761 5142-495	chris.eberl@iwm.fraunhofer.de
	Dr. Rainer Kübler	+49 761 5142-213	rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de
<b>Stab</b>	Thomas Götz	+49 761 5142-153	thomas.goetz@iwm.fraunhofer.de
	Prof. Dr. Christian Elsässer	+49 761 5142-286	christian.elsaesser@iwm.fraunhofer.de

<b>Administrative Infrastruktur</b>	Elke Schubert	+49 761 5142-124	elke.schubert@iwm.fraunhofer.de
Finanzen und Verträge	Nina Halaczinsky	+49 761 5142-487	nina.halaczinsky@iwm.fraunhofer.de
Personal- und Reisemanagement	Kerstin A. Drüsedau	+49 761 5142-140	kerstin.druesedau@iwm.fraunhofer.de
Öffentlichkeitsarbeit und Besuchsmanagement	Katharina Hien	+49 761 5142-154	katharina.hien@iwm.fraunhofer.de
<b>Technische Infrastruktur</b>	Dr. Rainer Kübler	+49 761 5142-213	rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de
Mechanische Werkstatt	Stefan Frei	+49 761 5142-345	stefan.frei@iwm.fraunhofer.de
Technische Dienste	Manuel Birkle	+49 761 5142-219	manuel.birkle@iwm.fraunhofer.de
IT Services	Klaus Merkel	+49 761 5142-217	klaus.merkel@iwm.fraunhofer.de
Scientific IT	Dr. Heiko Hafok	+49 761 5142-311	heiko.hafok@iwm.fraunhofer.de
Arbeitssicherheit	Dr. Rainer Kübler	+49 761 5142-213	rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de

## Wissenschaftliche Geschäftsfelder und ihre Gruppen

<b>Fertigungsprozesse</b>	Dr. Dirk Helm	+49 761 5142-158	dirk.helm@iwm.fraunhofer.de
Pulvertechnologie und Fluidodynamik	Dr. Torsten Kraft	+49 761 5142-248	torsten.kraft@iwm.fraunhofer.de
Umformprozesse	Dr. Alexander Butz	+49 761 5142-369	alexander.butz@iwm.fraunhofer.de
Glasformgebung und -bearbeitung	Tobias Rist	+49 761 5142-430	tobias.rist@iwm.fraunhofer.de
<b>Tribologie</b>	Prof. Dr. Matthias Scherge	+49 761 5142-206	matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de
Verschleißschutz und Technische Keramik	Dr. Andreas Kailer	+49 761 5142-247	andreas.kailer@iwm.fraunhofer.de
Multiskalenmodellierung und Tribosimulation	Prof. Dr. Michael Moseler	+49 761 5142-332	michael.moseler@iwm.fraunhofer.de
Polymertribologie und biomedizinische Materialien	Dr. Raimund Jaeger	+49 761 5142-284	raimund.jaeger@iwm.fraunhofer.de
Tribologische und funktionale Schichtsysteme	Bernhard Blug	+49 761 5142-180	bernhard.blug@iwm.fraunhofer.de
Tribokonditionierung und -analytik	Prof. Dr. Matthias Scherge	+49 721 204327-12	matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de
<b>Bauteilsicherheit und Leichtbau</b>	Dr. Michael Luke und Dr. Silke Sommer	+49 761 5142-338 +49 761 5142-266	michael.luke@iwm.fraunhofer.de silke.sommer@iwm.fraunhofer.de
Ermüdungsverhalten und Bruchmechanik	Dr. Michael Luke Dr. Igor Varfolomeev	+49 761 5142-338 +49 761 5142-210	michael.luke@iwm.fraunhofer.de igor.varfolomeev@iwm.fraunhofer.de
Crashsicherheit und Schädigungsmechanik	Dr. Silke Sommer Frank Huberth	+49 761 5142-266 +49 761 5142-472	silke.sommer@iwm.fraunhofer.de frank.huberth@iwm.fraunhofer.de
Verbundwerkstoffe	Dr. Jörg Hohe	+49 761 5142-340	joerg.hohe@iwm.fraunhofer.de
Meso- und Mikromechanik	Dr. Thomas Straub	+49 761 5142-537	thomas.straub@iwm.fraunhofer.de
<b>Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte</b>	Dr. Christoph Schweizer	+49 761 5142-382	christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de
Mikrostruktur und Eigenspannungen	Dr. Johannes Preußner	+49 761 5142-101	johannes.preussner@iwm.fraunhofer.de
Lebensdauerkonzepte und Thermomechanik	Dr. Christoph Schweizer	+49 761 5142-382	christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de
Materialmodellierung	Dr. Daniel Urban	+49 761 5142-378	daniel.urban@iwm.fraunhofer.de

## FERTIGUNGSPROZESSE

### GESCHÄFTSFELDLEITER

Dr. Dirk Helm

Telefon +49 761 5142-158

dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

Fertigungsprozesse besser und effizienter zu machen und gleichwohl zu verstehen, welche Stellschrauben der Herstellung Halbzeug und Baueil beeinflussen – vor dieser Aufgabe stehen viele Unternehmen aus den Branchen Umformtechnik, Pulvertechnologie und Glasformgebung. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Geschäftsfelds Fertigungsprozesse sind auf entsprechende Fragestellungen spezialisiert. Durch die Kombination von interdisziplinärem Know-how zu Werkstoffverhalten, ausgefeilter Simulationen und einer Versuchstechnik, mit der wir möglichst realitätsnah Werkstoffbeanspruchungen in Fertigungsprozessen nachstellen, kann das Forschungsteam Prozesse umfassend bewerten und entsprechende Optimierungsvorschläge erarbeiten.

Zu den Kernkompetenzen zählt die Fähigkeit, das Verhalten von Werkstoffen während des Fertigungsprozesses im Detail und auf verschiedenen Skalen – von der Mikrostruktur bis zum Bauteil – analysieren, verstehen und optimieren zu können. Besonders hilfreich ist unsere Simulationskompetenz, die auch im vergangenen Jahr im Geschäftsfeld weiter ausgebaut worden ist. Neben vielen branchenüblichen Simulationstools sind unsere modernen, umfangreichen Materialmodelle die Grundlage dazu, im Computer das Verhalten eines Werkstoffs realitätsnah abzubilden. Dieses Wissen ist die Voraussetzung für die Weiterentwicklung von Fertigungsprozessen in Zusammenarbeit mit unseren Industriepartnern.

#### Digitalisierung und Maschinelles Lernen

Zu den Highlights des Jahres 2020 zählen unter anderem die Arbeiten, die unser Geschäftsfeld im Fraunhofer-Leitprojekt »Machine Learning for Production ML4P« durchgeführt hat. In dem Leitprojekt forscht ein Fraunhofer-Konsortium, bestehend aus sechs Instituten, an der Entwicklung eines toolgestützten Vorgehensmodells sowie an der Realisierung entsprechender interoperabler Software-Tools, um systematisch das Optimie-

rungspotenzial in produktionstechnischen Anlagen durch den Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens zu erschließen. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Geschäftsfelds haben sich darin intensiv mit der Digitalisierung von Glasbiegeprozessen befasst – am Beispiel von Glas, das um 90 Grad quasi um die Ecke gebogen werden kann. Künftig soll es besondere Designakzente setzen. Bislang müssen derartige Biegeprozesse in der Industrie relativ aufwendig an die jeweilige Charge oder die Glasdicke angepasst werden. Dank der Digitalisierung und den Methoden des Maschinellen Lernens sollen sich die Prozesse künftig von allein steuern und trotz Abweichungen des Materials stabil laufen. Dafür wurden 2020 in der Fertigungsanlage am Fraunhofer IWM weitere Sensoren installiert – darunter Thermoelemente und Thermokameras für den Ofen – und eine digitale Infrastruktur geschaffen, mit der umfassend Prozessparameter gemessen und digitalisiert werden konnten. Diese Daten waren Grundlage für die Optimierung des Fertigungsprozesses mittels des Maschinellen Lernens.

In einem anderen Projekt wurden mithilfe von Maschinellen Lernverfahren Materialparameter von Kupferwerkstoffen bestimmt, mit denen sich die Langzeitstabilität von Kupferverbindungen im Computermodell bestimmen lassen. Anwendungsbeispiele sind Steckkontakte auf der Basis von Kupferlegierungen. Die erfolgreiche Beantragung der neuen Projekte *StahlDigital* (interoperable Workflows) und *KupferDigital* (Datenökosystem für die digitale Materialforschung) im Rahmen der BMBF-Ausschreibung *MaterialDigital* haben uns besonders gefreut.

#### Modernes Blechprüflabor mit kooperativem Roboter

2020 sind auch die Arbeiten im Virtuellen Labor weitergegangen, das am Fraunhofer IWM in den vergangenen Jahren etabliert wurde. Die Methode der »virtuellen Versuche« wird hier vor allem an Blechwerkstoffen eingesetzt und kontinuierlich weiterentwickelt. Um die Auswertung der virtuellen Versuche



zu vereinfachen und den Anwendungs-Komfort zu erhöhen, wurden 2020 beispielsweise eine »Virtuelle Labor«-App und eine neue grafische Benutzeroberfläche fertiggestellt. Das Virtuelle Labor zeichnet sich dadurch aus, dass das Verhalten der Bleche bei der Verarbeitung über viele Skalen simuliert werden kann – von dem mikroskopischen Gefüge bis hin zum Halbzeug. Unterstützt wird die virtuelle Materialanalyse durch reale Versuche im Blechprüflabor, das 2020 fertiggestellt worden ist. Es verfügt über eine Zug-Druck-Prüfmaschine mit automatisiertem Extensometer und einer Blechprüfmaschine mit optischer Dehnungsmessung sowie einem kollaborativen Roboter, um im Rahmen der digitalen Transformation die Versuchsautomatisierung zu erproben. Im Blechprüflabor untersuchen wir die Werkstoffeigenschaften, um unsere Materialmodelle zu optimieren, und bestimmen Werkstoffkennwerte für die Umformsimulation. Die intensive Forschung an Blechwerkstoffen hat dem Geschäftsfeld 2020 einen Erfolg der besonderen Art beschert: So wurde Herr Alexander Wessel zusammen mit einem Kollegen vom Institut für Baustatik und Baudynamik der Universität Stuttgart für seine Arbeiten am Projekt »Verbesserte Blechumformsimulation durch 3D-Werkstoffmodelle und erweiterte Schalenformulierungen«, an dem das Fraunhofer IWM maßgeblich beteiligt war, mit dem EFB-Projektpreis 2020 der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung ausgezeichnet.

» Unsere Philosophie ist, in unseren Projekten die verschiedenen Gruppen und Geschäftsfelder des Fraunhofer IWM miteinander zu vernetzen, um Herausforderungen aus der Industrie mit unserer interdisziplinären Expertise gemeinsam zu lösen.

*Dr. Dirk Helm*

### Additive Fertigungsprozesse simulieren

Darüber hinaus hat das Geschäftsfeld auch die simulationsgestützte Prozessentwicklung in der Additiven Fertigung weiter vorangetrieben: Ein Fokus lag hier auf Simulation der Fließeigenschaften zur Beschreibung der Extrusion von Pasten. Des Weiteren haben wir auch für die Additive Fertigung von Metallpulvern unsere Simulationskompetenz ausgebaut und unter anderem die Simulation der Schmelzpoolodynamik in laserbasierten additiven Fertigungsverfahren verbessert.

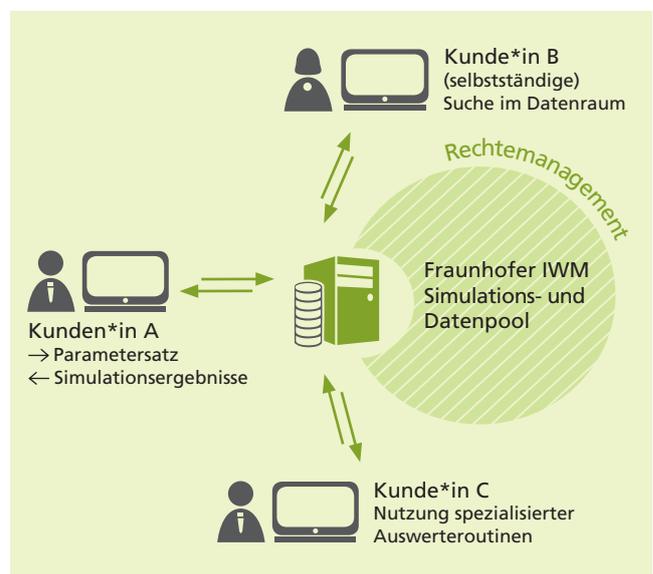


## MACHINE LEARNING FOR PRODUCTION: DIGITALE TRANSFORMATION DER GLASBIEGEMASCHINE

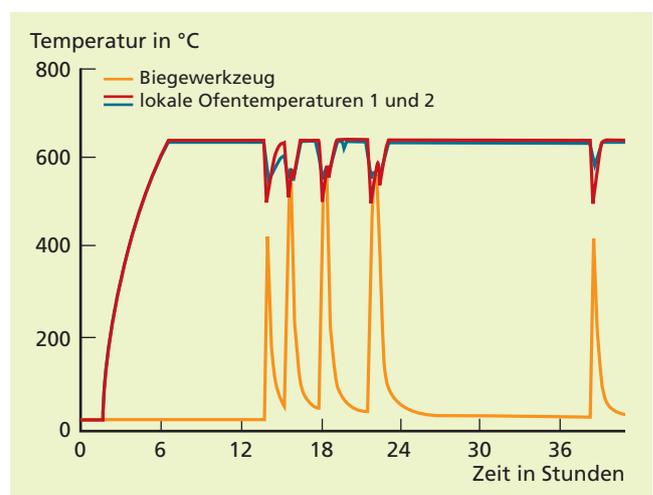
Maschinelles Lernen (ML) in Produktionsprozessen verspricht effizientere Prozesse, geringeren Ressourcenverbrauch und kleinere Ausfallraten. Es ist ein wichtiges Instrument, um konventionelle Produktionsprozesse in »kognitive Maschinen« im Rahmen von Industrie 4.0 umzuwandeln. Im Fraunhofer-Leitprojekt »Machine Learning for Production ML4P« arbeiten sechs Fraunhofer-Institute zusammen, um grundlegende Werkzeuge und Infrastrukturen zu etablieren und ein Vorgehensmodell zu entwickeln. Darüber hinaus wird ML in drei Anwendungsfällen implementiert, um zu demonstrieren, wie das Konzept in der realen Produktion funktioniert. In der Gruppe »Glasformgebung und -bearbeitung« des Fraunhofer IWM haben wir ein wegweisendes Glasbiegeverfahren entwickelt, um eine 90°-Biegung auf Flachglas zu realisieren. Um bestimmte Qualitätsanforderungen des Produkts zu erreichen und die Prozessfehlertoleranz zu charakterisieren, digitalisieren wir den gesamten Herstellungsprozess und implementieren ML als Demonstrator für das ML4P-Projekt.

### Dateninfrastrukturziel verdeutlicht Erweiterungsbedarf

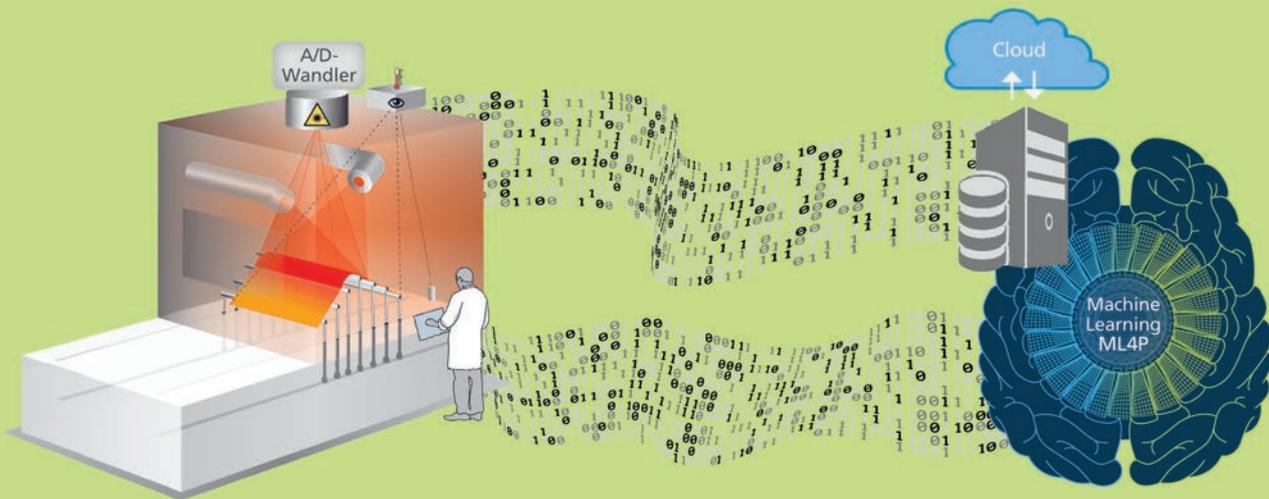
Eine große Herausforderung besteht darin, dass das Design der Glasbiegemaschine ursprünglich nicht für die digitale Verarbeitung von Prozessdaten ausgelegt war, was für den Maschinenpark vieler kleiner und mittlerer Unternehmen beispielhaft ist. Der erste Schritt umfasste daher die Analyse des vorhandenen Systems und die Entwicklung von Konzepten zur Aufrüstung der Glasbiegemaschine mit zusätzlichen Sensoren. Als Basis wurde ein Konzept für die gewünschte Dateninfrastruktur der Glasbiegemaschine erarbeitet. Zudem sind eine Thermokamera und zusätzliche Thermolemente im Ofen installiert und ein CAD-Modell des Systems erstellt worden. Parallel dazu wurde eine FEM-Simulation des gesamten Glasbiegeprozesses sowie eine Schnittstelle zur externen



1 Anwendungsmöglichkeiten von Simulation as a Service, ausgehend vom Angebot an Simulations- und Auswertetools am Fraunhofer IWM.



2 Visualisierung ausgewählter Prozessparameter in Zeitdiagrammen in Echtzeit und mit Historie.



3 Die konzeptionelle Skizze der digitalen Transformation des Glasbiegeprozesses.

Ausführung der Simulation realisiert. Über diese Schnittstelle wurden automatisiert vom Fraunhofer ITWM aus Simulationen am Fraunhofer IWM in Form einer Parameterstudie durchgeführt. Die gewonnenen Simulationsdaten werden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ITWM zur Visualisierung und zur Entwicklung der ersten ML-Modelle verwendet. Dieses toolgestützte Vorgehen bietet Kunden eine äußerst flexible und hochspezialisierte Lösung, beispielsweise Simulation as a Service (Abbildung 1). Das durch FEM-Simulationsdaten trainierte ML-Modell kann die Beziehungen zwischen Prozessparametern visualisieren und die Abhängigkeit zwischen verschiedenen Variablen verdeutlichen.

#### Datenverfügbarkeit über ein Informationsmodell

Mit zunehmender Art und Menge der Daten wird deren Integration und Organisation zu einer wichtigen Aufgabe. Das erste Ziel besteht darin, die auflaufenden Zeitreihendaten in der cloudbasierten Datenbank zu speichern und sie strukturiert zugänglich zu machen. Außerdem stellt ein Informationsmodell mit gesammelten Systeminformationen die komplexe Struktur des realen Systems klar dar und bildet die Grundlage für die Verschmelzung der verschiedenen Datenquellen. Das Informationsmodell basiert auf dem OPC-UA-Standard, dem weit verbreiteten Kommunikationsstandard für die industrielle Automatisierung. Es enthält Informationen zu allen Komponenten des Systems, einschließlich ihrer Position, sowie eine eindeutige Zuordnung der Messwerte. Außerdem sind die Datenquellen durch den Prozesslauf, aus dem sie stammen, explizit miteinander verknüpft. Bei der Erstellung der Konzepte wurden branchenrelevante Anforderungen wie Datenverfügbarkeit, Datenhoheit und die selektive Bereitstellung von Daten berücksichtigt. Dies führte zu der Entscheidung, neben der cloudbasierten Zeitreihendatenbank eine lokale Datenbank

am Fraunhofer IWM einzurichten und die Kontrolle der Datenflüsse vor Ort bei den Maschineneignern anzusiedeln.

Mit Unterstützung der Eckelmann AG wurde die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Glasbiegemaschine aktualisiert, um Prozessdaten gleichzeitig als Streams in die lokale Datenbank auszugeben. Andere Prozessdaten wie die Laserprogrammspezifikationen und Thermographiedaten sollen in die lokale Datenbank einfließen, sobald die Schnittstellen eingerichtet sind. Im nächsten Schritt sollen die Streaming-Daten mit der cloudbasierten Zeitreihendatenbank zur weiteren Analyse durch die Projektpartner synchronisiert werden. Außerdem werden Chargendaten wie die Simulationsdaten, Informationen aus den Materialcharakterisierungen, Daten aus den Geometriescans der gebogenen Gläser und die Prozessprotokolle während des gesamten Prozesses gesammelt und sowohl lokal als auch cloudbasiert in der Datenbank gespeichert (siehe Schema im Header-Bild).

#### Visualisierung remote und vor Ort

Neben der neuen Infrastruktur und den neuen Tools ist es grundlegend wichtig, das durch die Prozessdigitalisierung gewonnene Wissen verständlich zu vermitteln. Ein an die Datenbank angeschlossenes Graph-Panel bietet eine flexible, vollständig anpassbare und in Echtzeit visualisierte Ansicht (Abbildung 2). Dieses Visualisierungstool hilft nicht nur den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, den Prozess zu analysieren, sondern unterstützt auch bei der Prozesssteuerung, indem alle notwendigen Daten auf einen Blick und in Echtzeit zur Verfügung stehen.

Kuo-I Chang, Tobias Rist

## VORHERSAGE DES EXTRUSIONSVERHALTENS BEIM ROBOCASTING

Das Robocasting ist ein neuer Prozess der Additiven Fertigung, bei dem mittels Extrusion keramischer Pasten kontinuierliche strangförmige Filamente übereinander gedruckt werden. Diese strangförmigen Filamente besitzen die Fähigkeit, auch große Spalte zu überbrücken. Aus diesem Grund ist der Prozess gut geeignet, um filigrane Körper geringer Dichte zu drucken. Die Besonderheit des Robocastings im Unterschied zu verwandten Prozessen liegt in der Zusammensetzung der Paste: Diese besteht rein aus keramischen Partikeln in einer Wasserlösung ohne Zugabe möglicherweise toxischer Zusatzstoffe. Das Robocasting wird daher hauptsächlich im Bereich der Elektro- und Medizintechnik eingesetzt. Wichtige Faktoren bei der Zusammensetzung der Paste sind der Füllgrad und die Geometrie der Keramikpartikel, denn diese Faktoren beeinflussen die Rheologie der Paste. Das Herstellen der Pasten ist zeitintensiv und die ideale Rheologie für den Prozess meist unbekannt. Daher wurde der Prozess mittels numerischer Simulationen nachgebildet, um so zeit- und kostensparend den Einfluss der Rheologie auf die beim Drucken entstehende Filamentform zu untersuchen.

### Netzfrie Simulationsmethode

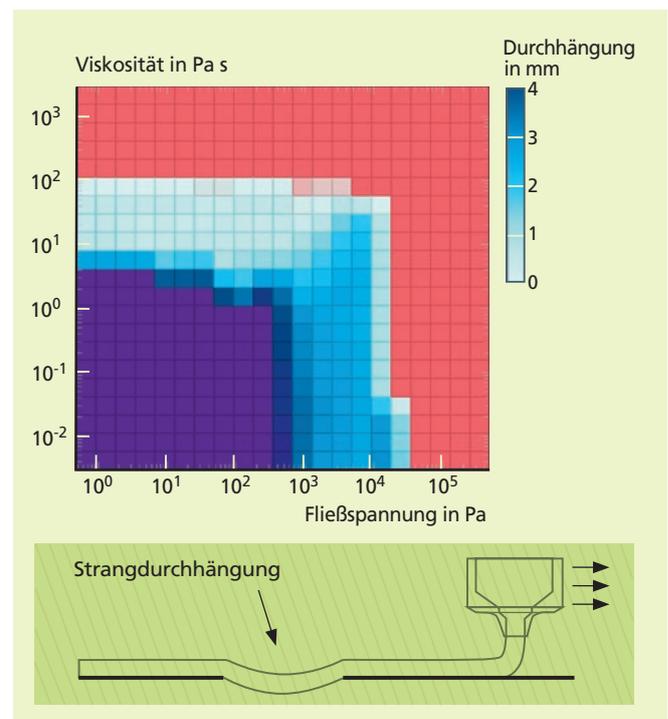
Eine effiziente Methode zur Simulation des Robocastings ist die netzfrie Beschreibung »Smoothed Particle Hydrodynamics«. Diese Methode, optimiert für hochviskose Pasten, ist in unserer Software SimPARTIX® implementiert. Bei der numerischen Untersuchung des Prozesses liegt der Fokus insbesondere auf der Fähigkeit, spaltüberbrückende Filamente zu drucken.

### Mit Prozesskarte die ideale Pastenrheologie finden

Die Rheologie der Paste hat einen wesentlichen Einfluss auf die Durchhängung des Filaments in einen Spalt. Je nach

gewünschter Geometrie des fertigen Körpers kann hierbei entweder eine große Durchhängung oder keine Durchhängung gewünscht sein. Mit einer Parameterstudie wurde eine Prozesskarte (Abbildung 1) erstellt, aus welcher der Einfluss der Fließspannung und der Viskosität auf die Strangform hervorgeht. Es ergeben sich drei Pastentypen: Druckbare Pasten (blau) sowie zum Drucken zu dünnflüssige (violett) oder zu dickflüssige Pasten (rot). Der Blauton der druckbaren Pasten kennzeichnet dabei die Größe der Durchhängung.

Bastien Dietemann, Dr. Claas Bierwisch



1 Simulation des Strangverhaltens in Abhängigkeit der Pastenrheologie – die blauen Bereiche markieren druckbare Pasten.

## »VIRTUELLES LABOR«: EINE APP FÜR DIE AUSWERTUNG VIRTUELLER VERSUCHE

Die Methode der virtuellen Versuche an Blechwerkstoffen wird am Fraunhofer IWM seit mehreren Jahren eingesetzt und kontinuierlich weiterentwickelt. Um die Auswertung der virtuellen Versuche zu vereinfachen und den Komfort für den Anwender zu erhöhen, wurde eine »Virtuelle Labor«-App entwickelt (Abbildung 1).

### Virtuelle Kennwertermittlung

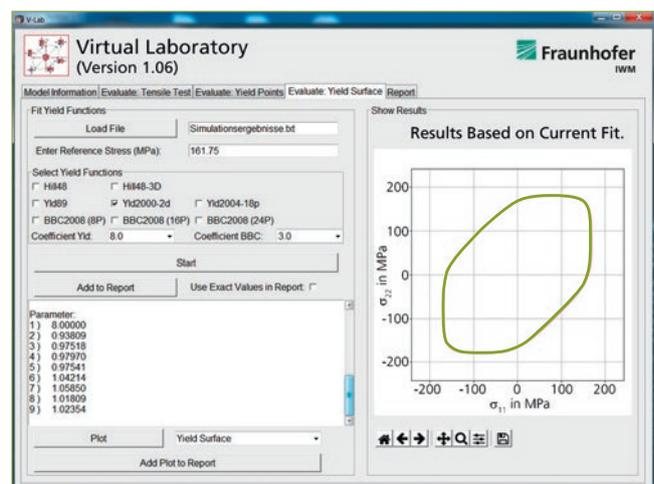
Das »Virtuelle Labor« des Fraunhofer IWM ermöglicht eine effiziente Prognose richtungsabhängiger Eigenschaften von ein- und mehrphasigen Blechwerkstoffen. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Mikrostrukturmodell des Blechwerkstoffs aufgebaut. Die Aufbringung verschiedener Randbedingungen erlaubt die Untersuchung unterschiedlicher Belastungszustände. Die Methodik eignet sich für Belastungszustände, die experimentell schwer zu realisieren sind, sowie Druckversuche oder mehraxiale Versuche. Anschließend können mithilfe der Simulationsergebnisse makroskopische Werkstoffkennwerte für die Umformsimulation beziehungsweise Eingangsdaten für die Erstellung von Materialkarten ermittelt werden. Für die Umformpraxis stellt das »Virtuelle Labor« ein sehr hilfreiches Werkzeug dar, da eine adäquate Beschreibung des anisotropen elasto-plastischen Verformungsverhaltens von Blechwerkstoffen von maßgeblicher Bedeutung für die präzise Simulation von Umformprozessen ist.

### Anwendung der »Virtuellen Labor«-App

Von der Auswertung der virtuellen Versuche bis zur Erstellung einer Materialkarte für die Umformsimulation sind mehrere Schritte erforderlich. Diese können in der »Virtuellen Labor«-App schrittweise auf mehreren Tabs nacheinander durchgeführt werden. Neben einer Analyse einzelner virtuell

gemessener Spannungs-Dehnungs-Kurven, können die Ergebnisse der Mikrostruktursimulationen weiter ausgewertet und Parameter für viele gängige anisotrope Fließortmodelle (beispielsweise Hill48, Yld89, Yld2000-2d und Yld2004-18p) bestimmt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, weitere Details wie experimentelle Messdaten und Modellinformationen in der Applikation abzulegen. Abgerundet wird der Funktionsumfang durch eine automatisierte Berichterstellung, in der alle wesentlichen Informationen zu den durchgeführten Mikrostruktursimulationen, der Simulationsauswertung und den ermittelten Werkstoffparametern zusammengefasst werden.

Alexander Wessel, Dr. Alexander Butz



1 Benutzeroberfläche der »Virtuellen Labor«-App.

## GESCHÄFTSFELDLEITER

Prof. Dr. Matthias Scherge

Telefon +49 761 5142-206

matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de

In Deutschland kosten Verluste durch Reibung und Verschleiß nach Angaben des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) rund 1,2 bis 1,7 Prozent des Bruttoinlandsprodukts – im Jahr 2019 etwa zwischen 41,2 und 58,4 Milliarden Euro. Das Ziel muss es sein, bei technischen Anwendungen Reibung und Verschleiß weiter deutlich zu reduzieren. Die Expertinnen und Experten des Geschäftsfelds Tribologie sind darauf spezialisiert, die der Reibung zugrundeliegenden chemischen und physikalischen Phänomene bis auf die atomare Ebene zu verstehen und damit Reibung und Verschleiß berechenbar zu machen. Das sind wichtige Voraussetzungen für künftige verschleißarme Produkte. International gibt es viele Arbeitsgruppen, die auf die Entwicklung von Oberflächen spezialisiert sind und sich unter anderem auch mit den Themen Reibung und Verschleiß beschäftigen. Das Geschäftsfeld Tribologie aber widmet sich diesen Themen exklusiv und verfeinert sein langjährig aufgebautes Know-how durch Experimente und Simulationen aus einer Hand auf höchstem Niveau. Ein Alleinstellungsmerkmal ist das MikroTribologie Centrum  $\mu$ TC – eine Kooperation des Fraunhofer IWM und des KIT, die sich tiefgehend mit Tribologie befasst. Die meisten Fragestellungen, die dort bearbeitet werden, kommen direkt aus der industriellen Anwendung. Das MikroTribologie Centrum  $\mu$ TC kann darauf in besonderer Weise eingehen: Das Fraunhofer IWM liefert die benötigte Kompetenz für die industriennahe Forschung, das KIT ermöglicht, tief in die wissenschaftlichen Grundlagen einzutauchen und eine Fragestellung mit langem Atem über einen Zeitraum von fünf oder gar mehr Jahren zu bearbeiten.

### Tribomechanismen an diamantähnlichen Beschichtungen

Das MikroTribologie Centrum  $\mu$ TC arbeitet in Kooperation mit verschiedenen Industriepartnern aktuell in größeren Verbundprojekten mit. Dazu zählt das vom Bundeswirtschafts-

ministerium geförderte Projekt »Prometheus«, mit dem die Reibung von Verbrennungsmotoren noch einmal deutlich verbessert werden soll – etwa das Gleiten des Kolbenrings am Zylinder. Mit dabei sind auch das Fraunhofer IWS in Dresden, das diamantähnliche Beschichtungen für diesen Einsatz bereitstellt, sowie elf Industriepartner. Dem Geschäftsfeld Tribologie kommt die Aufgabe zu, das Reibungsverhalten der Schichten zu analysieren und zu simulieren sowie die grundlegenden Tribomechanismen zu verstehen.

### Fernwartungs-Sensorik für den laufenden Betrieb

Um diesen Aufgabenbereich geht es auch im aktuell laufenden Verbundprojekt »Lube-Life«, das sich mit der vorausschauenden Wartung von Windkraftanlagen befasst. Windkraftanlagen besitzen Getriebe, die stets gut geschmiert sein müssen. Allerdings ist es aufwendig, den Ölstand regelmäßig vor Ort zu kontrollieren, weil die Anlagen weit verstreut in der Fläche und zunehmend auch im Meer stehen. Lube-Life hat das Ziel, eine automatische Fernwartung zu realisieren: Über einen Sensor gesteuert, soll bei Bedarf automatisch Getriebeöl aus einem Dosierapparat nachgeliefert werden. In Lube-Life arbeiten mehrere Industrieunternehmen zusammen. Das Geschäftsfeld Tribologie ist exklusiver Forschungspartner.

### Grundlagen für Festschmierstoff-Optimierung

Darüber hinaus ist das MikroTribologie Centrum  $\mu$ TC derzeit gleich an mehreren Projekten eines DFG-Schwerpunktprogramms beteiligt, in dem Festschmierstoffe optimiert und weiterentwickelt werden. Ein Beispiel für einen klassischen Festschmierstoff ist Graphit. Doch obwohl es etabliert ist, sind seine tribologischen Grundlagen kaum verstanden. Das MikroTribologie Centrum  $\mu$ TC setzt in den aktuellen Projekten



Experimente und Simulationen ein, um das Grundlagenverständnis zu liefern, das zur Optimierung verschiedener Graphit-Festschmierstoffe beitragen soll.

Trotz der Corona-Krise hat das Geschäftsfeld Tribologie auch im Jahr 2020 durch viele Industrieprojekte einen hohen Umsatz erzielt. Auf Grundlage dieser Mittel soll das Geschäftsfeld auch im kommenden Jahr weiter ausgebaut werden – und zwar in doppelter Hinsicht: Zum einen werden die Einrichtungen in Freiburg und in Karlsruhe weiter mit technischen Geräten ausgestattet. Damit wird sich künftig zum Beispiel der Einfluss von Wasserstoff auf die tribologischen Eigenschaften von Wälzlagern analysieren lassen. Möglich werden auch Getriebeprüfstandsversuche mit Online-Verschleißmessung, bei der Radionuklidtechnik zum Einsatz kommt. Zum anderen werden neue engagierte Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler eingestellt.

Hervorzuheben ist, dass Thomas Reichenbach, Wissenschaftler der Gruppe »Multiskalenmodellierung und Tribosimulation«, für seine Veröffentlichung über »Atomistische Simulationen zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen chemischer Oberflächenstruktur und trockener Reibung am Beispiel harter Wasserstoff- und Fluorterminierter Kohlenstoffbeschichtungen« in diesem Jahr den mit 3 000 € dotierten Werkstoffmechanikpreis erhielt, den das Fraunhofer IWM jährlich auslobt.

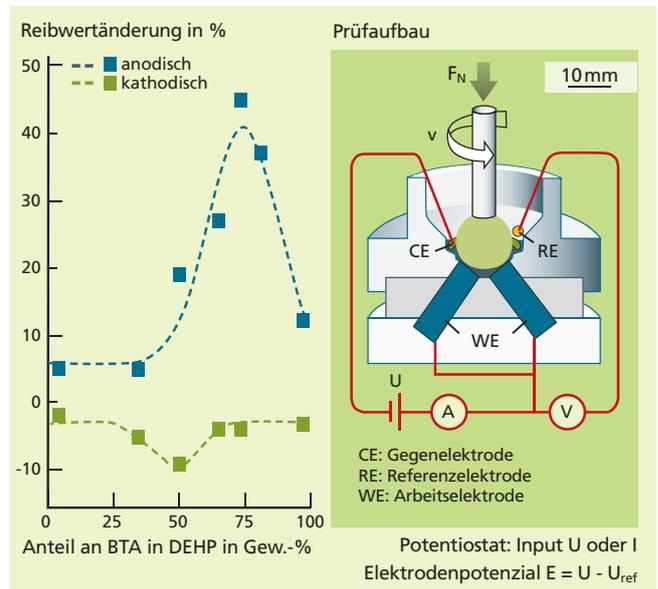
» Unser Geschäftsfeld steht für höchsten Umsatz und beschäftigt die meisten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Fraunhofer IWM, die alle mitziehen, engagiert an gemeinsamen Zielen arbeiten und vor Kreativität geradezu sprudeln.

*Prof. Dr. Matthias Scherge*

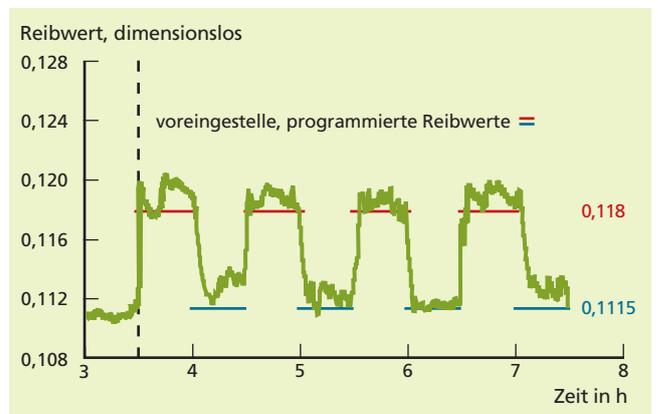


## PROGRAMMIERUNG DES REIBWERTS DURCH ELEKTROCHEMISCHE POTENZIALE

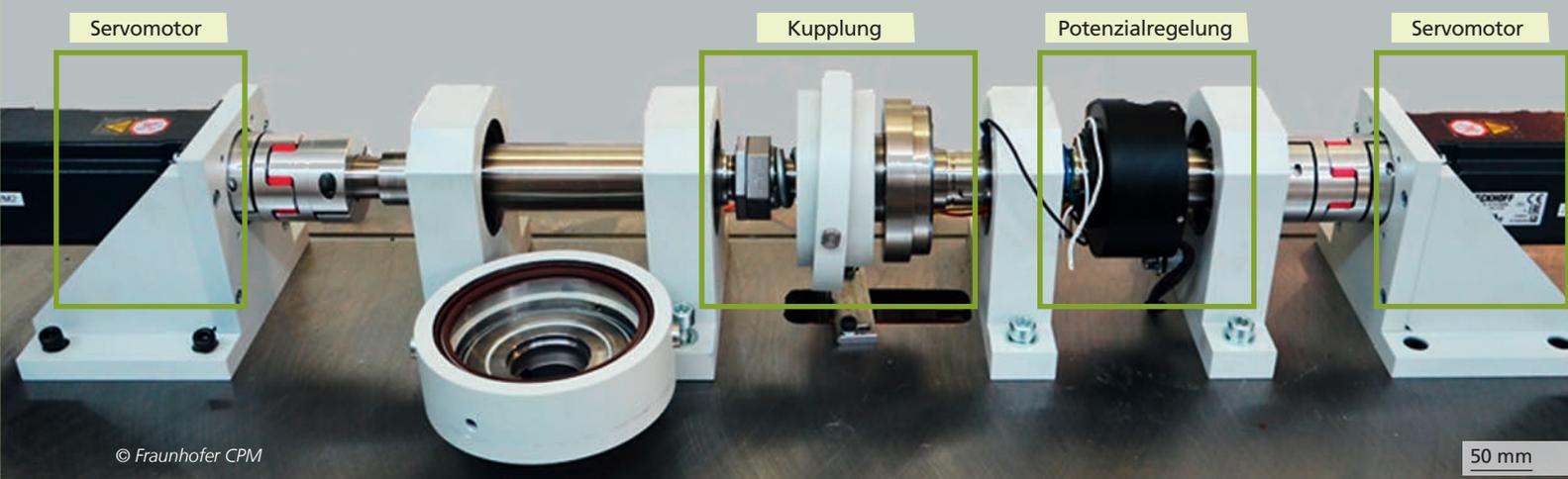
Mechanisch bewegte Teile verursachen Reibung, die Material- und Energieverlust zur Folge haben. Etwa ein Fünftel der weltweit genutzten Energie wird benötigt, um diese Reibung in technischen Einrichtungen zu überwinden. Daher ist Reibung ein Parameter mit großem Einfluss auf Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Bauteilen und Systemen. Durch den Einsatz von Schmierstoffen, die nach heutigem Stand speziell und individuell auf ein Reibsystem abgestimmt werden, können Reibung und Verschleiß minimiert und damit auch die Effizienz erhöht werden. Die Beschaffenheit dieser Schmiermittel ist in Bezug auf Viskosität und Additivzusammensetzung auf die vorhandenen Parameter der jeweiligen Anwendung zugeschnitten. Ändern sich diese Parameter, wie Temperatur oder Pressung, wird der optimale Betriebspunkt des Systems verlassen. Durch gezielte Reibungskontrolle könnte das Reibsystem auf sich verändernde Einflüsse reagieren und den optimalen Betriebszustand wieder einregeln. Aus diesem Grund bietet die Reibungssteuerung ein enormes Potenzial bei der Steigerung der Energieeffizienz und wurde 2020 unter anderem von J. Krim als eine der wichtigsten Herausforderungen in der Tribologie identifiziert (Krim, J. et al. *Front.Mech.Eng.* 5/2; 2020). In wissenschaftlichen Arbeiten wurde der Nachweis der Beeinflussbarkeit des Reibwerts mit unterschiedlichsten Methoden bereits erbracht. Das Ziel der Forschungsarbeiten im Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM besteht daher in der automatisierten Anpassung der Reibung bei sich verändernden äußeren Bedingungen. Um dieses Ziel der programmierbaren Reibung zu realisieren, wurde 2018 ein Forschungsteam aus den Fraunhofer-Instituten ICT, IWU und IWM zusammengestellt. Diese institutsübergreifende Zusammenarbeit ermöglichte eine Untersuchung entlang der gesamten Entwicklungskette von den elektrochemischen Grundlagen bis hin zu einem Demonstrator.



1 Reibwertänderung in Abhängigkeit zum IL-Mischungsverhältnis (links); Aufbau des Kugel-3-Stifte Versuchs mit 3-Elektrodenkonfiguration (rechts).



2 Der Reibwert (grün) wird durch den »Tribo-Regler« automatisch auf die Sollwerte (rote und blaue Querbalken) gebracht.



### 3 Demonstration einer Kupplung mit integrierter Potenzialregelung. Aufbau und Konstruktion erfolgte am Fraunhofer IWU.

#### Reibwertsteuerung durch Polarisierung

Der Ansatz der elektrischen Reibungssteuerung besteht darin, dass durch die Verwendung von oberflächenaktiven und geladenen, ionischen Flüssigkeiten (ionic liquids, ILs) als Schmierstoff in Kombination mit elektrischen Spannungen die Reibbedingungen im Schmier-spalt reversibel verändert werden können. Dazu wurden tribologische Modellversuche durchgeführt – Abbildung 1 zeigt einen 3-Elektrodenaufbau. Damit können elektrische Potenziale und Ströme gezielt eingestellt und variiert werden. Die beiden als Schmiermittel eingesetzten ILs unterscheiden sich in der funktionellen Gruppe des Anions bei gleichem Kation. Zum einen wurde ein Sulfonylimid-Anion (BTA) und zum anderen ein Phosphat-Anion (DEHP) verwendet. Als Kation wurde jeweils ein Phosphonium-Ion (P66614) eingesetzt. Die ILs wurden nicht nur in reiner Form, sondern auch in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen zueinander eingesetzt. In Abbildung 1 ist die maximale Reibwertänderung der unterschiedlichen ILs auf einen Strom von  $+300 \mu\text{A}$  (anodische Oberflächenladung) beziehungsweise  $-300 \mu\text{A}$  (kathodische Oberflächenladung) dargestellt. Der elektrische Strom wurde nach einer Einlaufphase von zwei Stunden eingestellt und für eine halbe Stunde gehalten. Die größte Reibwertsteigerung von 45 Prozent konnte bei einem Verhältnis von 3:1 von BTA:DEHP erzielt werden. Eine Reibwertreduktion um 10 Prozent konnte bei einem 1:1 Verhältnis erreicht werden.

#### Programmierbare Reibung durch »Triboregler«

Durch die Vorarbeiten konnten zur Reibwertsteuerung geeignete IL-Mischungen identifiziert werden. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass bei anodischem Potenzial

der Reibwert erhöht und im Gegensatz dazu bei kathodischem Potenzial reduziert wird. Daraus ergibt sich, dass die Reibwertänderung eine Funktion der elektrischen Spannung ist, wodurch Reibwerte durch die Implementierung eines »Triboreglers« automatisch eingestellt werden können. Dieser Regelkreis verbindet das Tribometer und den Potentiostat und regelt das elektrische Signal, um die Reibungskoeffizienten auf vorgegebene Sollwerte einzustellen. Dabei wird der gemessene Reibwert mit dem Sollwert verglichen. Mit dem Potentiostaten wird dann das elektrische Eingangssignal kontrolliert und angepasst, bis der Sollwert erreicht ist. Das Regelsystem kann außerdem die Reibwerte im Zielbereich konstant halten. Mit dieser Entwicklung können voreingestellte Reibwerte reversibel erreicht und gezielt verändert werden (hier:  $\pm 5$  Prozent, Abbildung 2).

#### Bau eines Demonstrators

Parallel zu diesen grundlagenorientierten Modelluntersuchungen wurde am Fraunhofer ICT die elektrochemische Stabilität der ILs nachgewiesen. Die Ergebnisse der Reibwerterhöhung um 45 Prozent führten zum Aufbau eines Kupplungsdemonstrators am Fraunhofer IWU als konkretes Anwendungsbeispiel (Abbildung 3). Das Problem bei geschmierten Kupplungen besteht darin, dass die Kraftübertragung mit der Zeit abnimmt. Durch die Programmierung des Reibwerts auf einen Soll-Bereich kann die Kraftübertragung bei zu starker Änderung durch eine elektrische Spannung wieder auf den optimalen Betriebszustand eingestellt werden.

Felix Gatti, Dr. Tobias Amann

## HERVORRAGENDE TRIBOSYSTEME UNTER HOHER LAST: GESCHMIERTE W-DIAMANT-KONTAKTE

Metall-Diamant-Systeme finden aufgrund ihrer guten tribologischen Eigenschaften beispielsweise in Kolbenringen für Dieselmotoren Anwendung. Allerdings sind die Mechanismen, die für wenig Reibung und Verschleiß sorgen, bisher nur wenig verstanden. Zudem ist die Rolle von Schmierstoffen für die weitere Optimierung von besonderem Interesse. Am Fraunhofer IWM wurde das Thema mithilfe atomistischer Simulationsmethoden, tribologischer Experimente und Oberflächenanalytik angegangen. Als Modellsystem diente ein mit Hexadekan geschmiertes Wolfram-Diamant-Tribopaar. Reaktive klassische Molekulardynamiksimulationen (MD-Simulationen) zeigten unter hohem Kontaktdruck die Bildung von Alkanradikalen an der Metalloberfläche. Die Radikale wiederum vermochten an der chemisch sehr stabilen Diamantoberfläche anzubinden und einen Tribofilm zu erzeugen. Damit einhergehend zeigten sich stark verminderte Reibwerte im Bereich von 0,05. Die MD-Simulationen wurden mit quantenchemischen Dichtefunktionaltheorierechnungen (DFT-Rechnungen) überprüft und bestätigt.

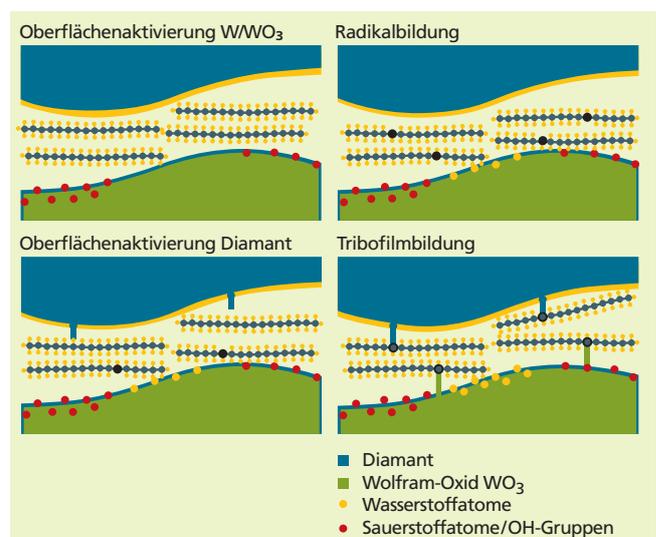
### Druckabhängige atomare Vorgänge im Reibspalt

Neben metallischen Oberflächen spielen in der Anwendung oxidierte Oberflächen eine entscheidende Rolle. Da die Modellierung der Oxide mit klassischen MD-Simulationen unzureichend ist, kamen zur Untersuchung von Alkanen auf der Wolfram-Oxidoberfläche DFT-Rechnungen zum Einsatz. Es wurde eine druckinduzierte Radikalbildung festgestellt. Zusätzlich sagten die DFT-Simulationen Additionsreaktionen sauerstoffhaltiger funktioneller Gruppen und eine chemische Anbindung der degradierten Moleküle an der Oxidoberfläche voraus. Die Befunde aus den Simulationen wurden in den Triboexperimenten erhärtet. So wurde auch experimentell

ein Reibwert im Bereich von 0,04 gemessen, und sowohl auf der Diamant- als auch auf der oxidierten Wolframoberfläche wurde die Bildung eines kohlenstoffreichen, sauerstoffhaltigen Tribofilms oberflächenanalytisch nachgewiesen.

Unsere Untersuchung zeigt, dass die Bildung eines Passivierungsfilms, der aus degradierten Schmierstoffmolekülen besteht, die Metalloberfläche von der Diamantoberfläche äußerst effektiv chemisch trennt. Dadurch werden das sogenannte Kaltverschweißen und die hohen Reibwerte, die damit einhergehen, unterbunden. Weitere Details zur Arbeit können der Veröffentlichung *Front. Mech. Eng.* 5, 6 (2019) entnommen werden.

Dr. Leonhard Mayrhofer



1 Passivierung des Wolfram-Diamant-Kontakts durch tribochemische Prozesse, aus *Front. Mech. Eng.* 5, 6 (2019).

## EINFLUSS DER SCHMIERSTOFFE AUF REIB- UND VERSCHLEISSVERHALTEN VON THERMOPLASTEN

Kunststoffkomponenten in der Antriebstechnik zeigen in Kontakt mit Schmierstoffen häufig ein unerwartetes Einsatzverhalten. Die hierbei wirkenden chemisch-physikalischen Vorgänge sind bisher ungenügend verstanden. Im Rahmen eines von der »Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.« und der »Forschungsgesellschaft Kunststoffe e. V.« begleiteten Projekts wird die Wechselwirkung von Schmierstoff und Polymer untersucht und einfache »Screening«-Ansätze bewertet, die erste Aussagen zum tribologischen Verhalten machen können.

### Bestimmung von Interaktionsenergien und Reibverhalten

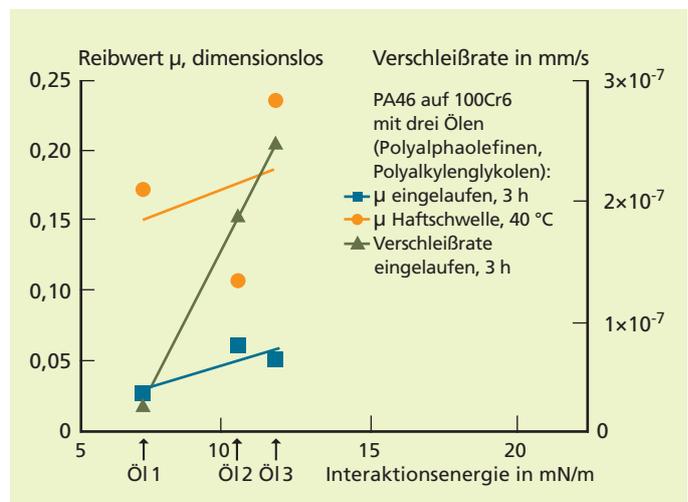
Die Bestimmung von Ober- und Grenzflächenenergien von Polymer, Stahl und Schmierstoff sind Bestandteil der Screening-Ansätze und digitalisierten Bewertung. Die tribologischen Eigenschaften von geschmierten Kunststoffen im Kontakt mit Stählen hängen von der jeweiligen Interaktionsneigung ab. Ob das Öl zwischen dem trockenen Kunststoff-Stahl-Kontakt spreiten will, wird mittels der Spreitungsenergie beschrieben. Die Interaktionsenergie beschreibt die Wechselwirkung von Schmierstoff mit Kunststoff und trifft beispielsweise Aussagen zur Veränderung der Oberfläche und zur sorptiven Aufnahme des Schmierstoffs.

Mit der tribologischen Messzelle eines Rheometers kann die Schmierung in verschiedenen tribologischen Regimen untersucht und unterschiedliche tribologische Systeme können verglichen werden. Bei geringsten Geschwindigkeiten und phasenaufgelösten Haft-Gleit-Übergängen wird die adhäsive Neigung der schmierstoffbenetzten Kontaktpartner analysiert. Hier zeigt sich auch bei Schmierstoffen gleicher Viskosität bereits ein Verhalten in Abhängigkeit der Interaktionsenergien.

### Verschleißverhalten während und nach einer Einlaufphase

Im Kontakt mit technisch geschliffenen Stahlkontakten treten bei geschmierten Thermoplastkontakten zwei Verschleißmechanismen auf: adhäsiver und abrasiver Verschleiß. Der dominierende Verschleißmechanismus wird anhand der Bestimmung der Haftneigung und anderer Kenngrößen wie der Oberflächenhärte bestimmt. So kann effizient ermittelt werden, welche Schmierstoff-Kunststoff-Systeme zur Vermeidung von Adhäsion auf glatteren Flächen oder Abrasion auf raueren Flächen geeignet sind. Die Variation der Prüftemperatur ermöglicht zusätzlich die Analyse des thermischen Einflusses, um Aussagen für verschiedene praxisrelevante Systeme zu treffen.

Dr. Christof Koplin, Dr. Raimund Jaeger



1 Getrocknetes Polyamid46 zeigt ein ölspezifisches Reib- und Verschleißverhalten, wie hier in Abhängigkeit der Interaktionsenergie ( $W_{solving}$ ).

## 60 GPa HARTE DLC-SCHICHTEN MIT HOHEN ABSCHIEDERATEN IM PE-CVD-VERFAHREN

Die Anforderungen an tribologische Schichten erhöhen sich immer weiter. Meist sind möglichst niedrige Reibwerte bei minimalem Verschleiß gefordert. Diamantähnliche Kohlenstoffschichten (DLC) haben sich in den letzten Jahren als eine der erfolgreichsten tribologischen Schichten durchgesetzt, wenn es um niedrige Reibung bei gleichzeitig geringem Verschleiß geht. Dazu hat unter anderem beigetragen, dass fast alle in gängigen Reibsystemen genutzten Substrate problemlos mit DLC-Schichten beschichtet werden können. Industriell haben sich größtenteils die Beschichtungsverfahren Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung PE-CVD und Physikalische Gasphasenabscheidung PVD durchgesetzt. Ging es um sehr harte DLC-Schichten (Härten größer als 30 GPa), dann konnten bisher nur die PVD-Verfahren eingesetzt werden. Diese sind jedoch durch einerseits recht niedrige Beschichtungsraten (weniger als 1 µm pro Stunde) und andererseits bezüglich dreidimensionaler Beschichtbarkeit recht eingeschränkt. Am Fraunhofer IWM ist es nun erstmals gelungen, in einem PE-CVD-Verfahren DLC-Schichten abzuscheiden, die Härten von 60 GPa bei Abscheideraten von bis zu 16 µm pro Stunde erzielen.

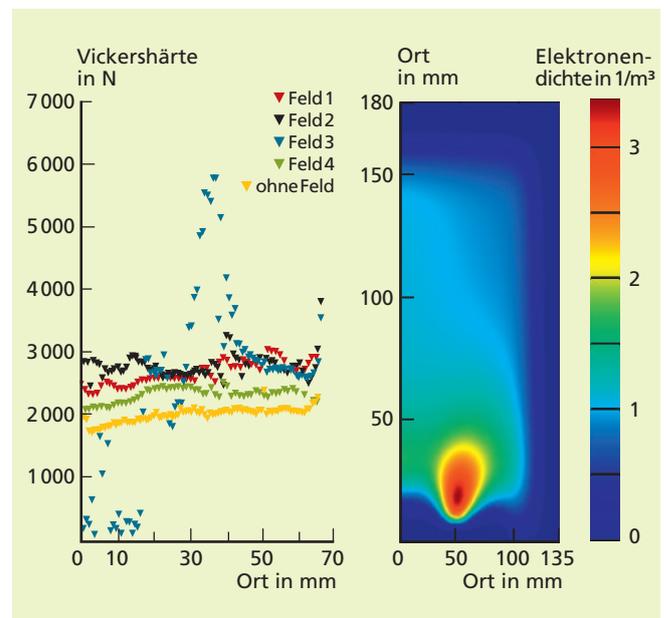
### Ultraharte DLC-Schichten

Zur Abscheidung der 60 GPa harten DLC-Schicht wird dabei ein Standard-Hochfrequenz-Abschideverfahren (13,56 MHz PE-CVD) verwendet. Zusätzlich wird die eigentliche Hochfrequenz nochmals mit einem elektromagnetischen Feld überlagert, sodass die Ionenenergien sehr gezielt in bestimmten Bereichen einstellbar sind. Die in der Regel sehr breite Ionenverteilung kann so auf ein relativ enges Energieband eingegrenzt werden. Gleichzeitig erhöht sich die Plasmadichte stark, was zu diesen extrem hohen Abscheideraten führt.

### Upscaling der Schichten

Derzeit lassen sich die Schichten nur auf Flachsubstraten und eingeschränkten Geometrien abscheiden. Das Fraunhofer IWM plant in Zusammenarbeit mit interessierten Firmen das Upscaling des Verfahrens hin zu serienfähigen Prozessen in Standard PE-CVD-Anlagen mit einer größeren Geometrievielfalt.

Bernhard Blug, Stefan Schnakenberg



1 Härteverlauf der DLC-Schichten für verschiedene elektromagnetische Felder in Abhängigkeit des Ortes (achsensymmetrisch) (links); Simulation der ortsabhängigen Elektronendichte im Plasma (achsensymmetrisch) (rechts).

## HOCHAUFLÖSENDE TRIBOMESSUNGEN MIT EINEM RNT-UNTERSTÜTZTEN VERZÄHNUNGSPRÜFSTAND

Zur Analyse von Graufleckigkeit oder WEC-Phänomenen an Stahloberflächen von Zahnrädern und Wälzlagern wird in der Regel ein länger laufender Test (FZG oder FE8) durchgeführt, und auftretende Änderungen der Oberflächen werden nachträglich untersucht. Diese Methode kann keine initialen Vorgänge erfassen. Um maßgebliche laufzeitrelevante Einflussgrößen bereits im Frühstadium zu identifizieren, wurde die kontinuierliche Reibungs- und Verschleißmessung mit einem Verzahnungsprüfstand und einer Radionuklid Verschleißmessanlage gekoppelt.

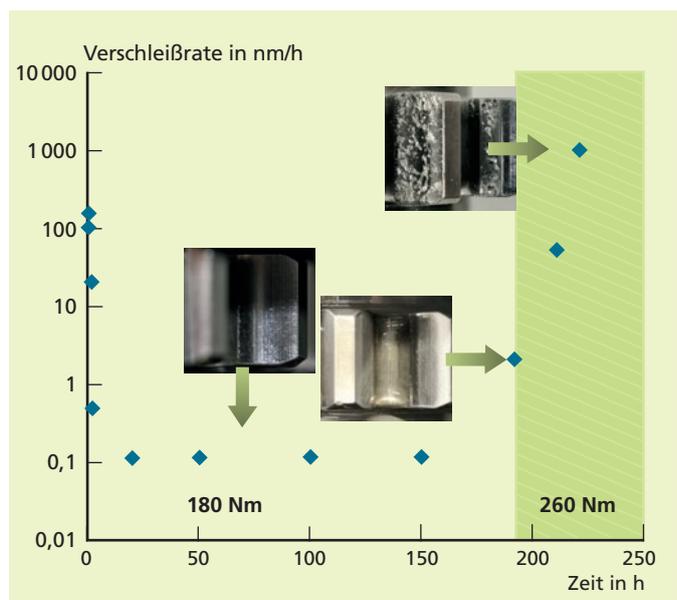
Zur Verschleißmessung einer Zahnflanke wurde <sup>56</sup>Co als Messnuklid aus einem Teil der Eisenatome des Bauteilstahls erzeugt. Der Verschleißprozess generierte Partikel, die über den Ölkreislauf per Spektrometer detektiert wurden, und die Messnuklide enthielten. Die instabilen <sup>56</sup>Co Kerne zerfallen unter Aussendung von Gammastrahlung mit charakteristischen Energien. Je mehr Gammaimpulse das Spektrometer erfasst, desto mehr Verschleißpartikel befinden sich im Ölkreislauf. Nach Kalibrierung der Anlage ergab sich eine quantitative Aussage in Form einer Verschleißrate in µg pro Stunden oder nach Umrechnung in nm/h (Abbildung 1).

### Verschleißentwicklung vom Einlauf bis zum Versagen

Mithilfe des Versuchsstands wurde die Verschleißentwicklung über eine Zeit von 230 Stunden und 2 Laststufen (180 Nm und 260 Nm) erfasst. In den ersten beiden Stunden erfolgte der topographische Einlauf, der nach rund 3 Stunden in den tribochemischen Einlauf mündete. Ab etwa 25 Stunden war dieser abgeschlossen, und die Verschleißrate verharrte auf einem Wert um 0,1 nm/h. Nach der Laststeigerung auf 260 Nm gelangte das System in den Bereich des Hochverschleißes und fiel nach

rund 230 Stunden aus. Dies zeigt, dass der gewählte Ansatz die initialen Prozesse sehr gut erfassen kann. Das ist besonders wichtig, da Einlaufvorgänge für das Erreichen einer großen Lebensdauer und mutmaßlich auch für das Entstehen von Graufleckigkeit oder WEC-Phänomenen entscheidend sind. Darüber hinaus können auf diese Weise neben den Effekten der Öl- und Additivchemie auch die Einflüsse der Endbearbeitung der Zahnräder bewertet und deren defektverhinderndes Potenzial gehoben werden. Schließlich können auch Aspekte der prädiktiven Wartung adressiert werden, indem mit dem Versuchsaufbau die Schwingungssensoren geeicht werden.

Prof. Dr. Matthias Scherge



1 Entwicklung der Verschleißrate über der Laufzeit des Versuchs. Die Zahnrad-Abbildungen im Diagramm haben eine Zahnbreite von 14 mm.

## BAUTEILSICHERHEIT UND LEICHTBAU

### GESCHÄFTSFELDLLEITER

Dr. Michael Luke

Telefon +49 761 5142-338

michael.luke@iwf.fraunhofer.de

### GESCHÄFTSFELDLLEITERIN

Dr. Silke Sommer

Telefon +49 761 5142-266

silke.sommer@iwf.fraunhofer.de

Bauteile können versagen, wenn sie ermüden oder hohe Kräfte auf sie einwirken. Für ein einfach gestaltetes Bauteil lässt sich durch Belastungsversuche noch relativ einfach bestimmen, bei welchen Kräften beziehungsweise wie schnell es versagt. Bei Verbundwerkstoffen oder Komponenten, die miteinander durch Schweißnähte oder Bolzen verbunden und etwa in einem Fahrzeug verbaut sind, ist es deutlich schwieriger herauszufinden, wann sie versagen. Die Kernkompetenz der Forscherinnen und Forscher im Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau liegt darin, die Festigkeit und Sicherheit solcher komplexen Komponenten im Detail zu ermitteln. Dabei nutzen sie sowohl technische Anlagen für ausgefeilte Experimente als auch numerische Simulationen, mit denen sie das Verhalten der Bauteile unter bestimmten Belastungsszenarien am Computer durchspielen können. Das Geschäftsfeld leitet seit Anfang 2020 eine Doppelspitze, die sich die Aufgaben fachlich aufteilt: Dr. Silke Sommer verantwortet den Schwerpunkt Crashesicherheit, Dr. Michael Luke ist der Spezialist für Ermüdungsverhalten und Bruchmechanik.

#### Bauteilsicherheit im Leichtbau

Die Fragestellungen, denen das Geschäftsfeld nachgeht, werden aus der Industrie herangetragen. Ein Wunsch sind beispielsweise längere Wartungsintervalle bei Produkten, die sich durch die Optimierung von Werkstoffen erreichen lassen können. Auch bei Leichtbaukonstruktionen ist die Bauteilsicherheit ein großes Thema, weil die Werkstoffe auf leichtere oder Material sparendere Konstruktionen ausgelegt sein müssen. Ein Fokus der Gruppe »Verbundwerkstoffe« liegt dabei beispielsweise auf der Prüfung und Optimierung von festen Schäumen, die auch in Sandwich-Konstruktionen als Kernmaterial eingesetzt werden. Aus den Prüf- und Simulationsergebnissen lassen sich dann unter anderem Rückschlüsse für eine Optimierung der Produktionsprozesse ziehen.

#### Multiskalige Bewertung von Werkstoffen

Dank der Kombination von Experiment und numerischer Simulation ist es möglich, eine industrielle Komponente ihrer Werkstoff-Mikrostruktur bis hin zum Gesamtbauteil multiskalig zu untersuchen. Dabei analysiert das Geschäftsfeld insbesondere auch, wie sich die Verarbeitung auf das Material auswirkt – etwa das Schmieden, Strangpressen oder Schweißen von Metallen. So lässt sich die Mikrostruktur von Metallen an Schweißnähten untersuchen, um so Schwachstellen aufzudecken. Eine Spezialität des Geschäftsfelds ist die Mikroprobenprüftechnik. Dabei werden aus einem Bauteil winzige Proben in Mikrometerdimension für detaillierte Materialtests gewonnen. Die Gruppe »Meso- und Mikromechanik« beherrscht die Kunst, die Proben so zu fertigen, dass die Materialeigenschaften der Probe nicht durch Rauigkeiten oder Eigenspannungen verändert werden, dass also keine Artefakte entstehen. Aktuell ist das Geschäftsfeld etwa am Projekt »Hochfeste Stähle« beteiligt, das von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert wird. Hier geht es darum, unter anderem mithilfe der Mikroprobenprüftechnik die Schwingfestigkeiten dieser Stähle umfassend zu beschreiben.

#### Digitaler Zwilling für Erkenntnisse von Zusammenhängen

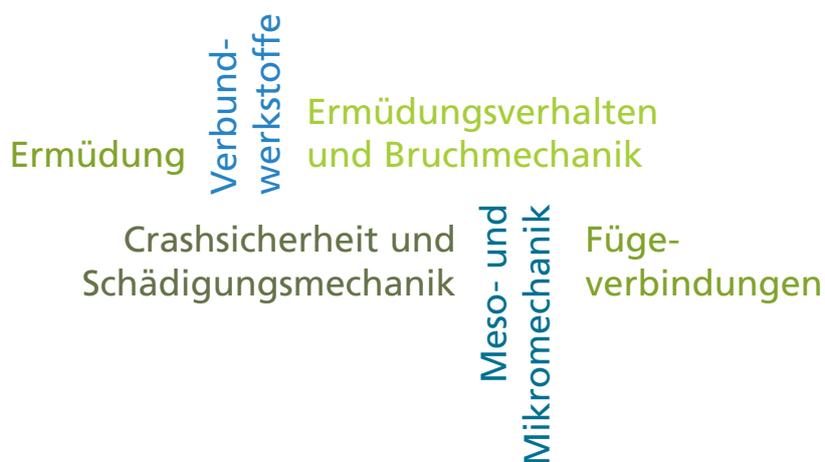
Wie in den anderen Geschäftsfeldern des Fraunhofer IWM spielt hier die zunehmende Digitalisierung eine große Rolle. Aktuell wird beispielsweise die Datenfusion vorangetrieben. Dabei geht es unter anderem darum, Digitale Zwillinge von Bauteilen zu entwickeln: Künftig sollen die Ergebnisse verschiedener Messungen und Messmethoden in einem digitalen Modell des Bauteils zusammengefasst werden, um es umfassend beschreiben zu können. Bislang liegen die Ergebnisse verschiedener Messungen als getrennte Datensätze



vor – etwa die Messung der Deformation oder die Messung der Temperaturentwicklung im Bauteil unter schneller Belastung. Fügt man diese Datensätze zusammen, ergeben sich neue Korrelationsmöglichkeiten. Zum Beispiel wird so direkt die lokale Erwärmung eines Bauteils während der Verformung ortsgenau sichtbar.

### Highspeed für Materialverhalten und Corona-Forschung

Im Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau wurde in den vergangenen Jahrzehnten unter anderem auch die Hochgeschwindigkeitsprüfung etabliert, mit der sich das Verhalten von Werkstoffen und Komponenten bei einem Crash beobachten lässt: Hochgeschwindigkeits-Kameras nehmen eine Million Bilder pro Sekunde auf. Im Corona-Jahr 2020 hat die Gruppe »Crashsicherheit und Schädigungsmechanik« diese Kameratechnik mit Hohlspiegeln und Blenden für eine Messung ganz anderer Art verwendet. Dabei wurde analysiert, wie stark sich Atemluft mit und ohne Mund-Nasen-Schutz im geschlossenen Raum im Nahfeld und bis 1,5 m Entfernung verbreitet. Das Messsystem nimmt feinste Lichtbrechungsunterschiede in der Raumluft auf, die sich aus den durch das Atmen verursachten Differenzen des Luftdrucks ergeben.



» Die Arbeit in der Doppelspitze hat den Vorteil, dass jede Seite die Forschung des Gegenübers hinterfragt und wir gemeinsam so auf ganz neue Ideen kommen können.

Dr. Michael Luke

» Es war absolut sinnvoll, die Expertise zum Thema Crashverhalten aus verschiedenen Gruppen in der großen Gruppe »Crashsicherheit und Schädigungsmechanik« zusammenzuführen. Das erhöht das gegenseitige Verstehen und bietet viele interessante Möglichkeiten.

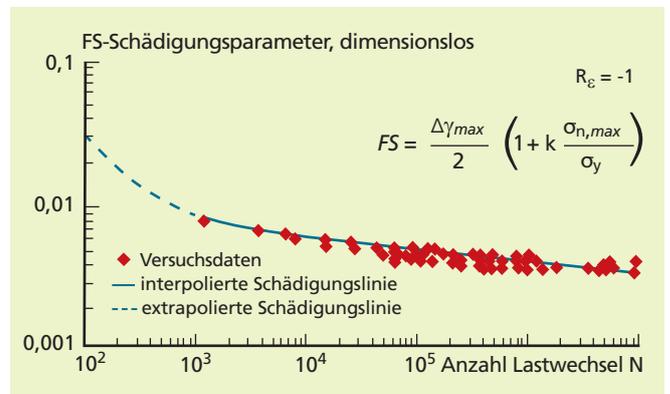
Dr. Silke Sommer

## BEWERTUNG DES EINFLUSSES VON ÜBERLASTEN AUF DIE LEBENS- DAUER VON STRUKTURBAUTEILEN

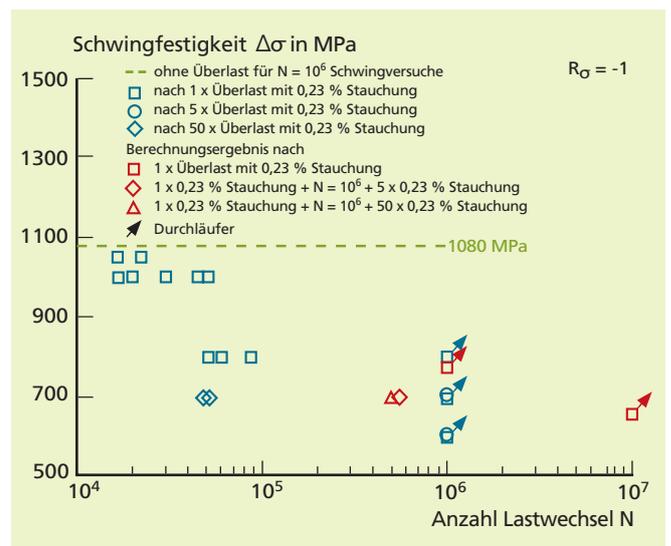
Strukturbauteile können im Betrieb Überlasten ausgesetzt sein, die insbesondere an Kerben zu plastischen Verformungen führen. Drucküberlasten (Stauchungen) und daraus resultierende Zugeigenspannungen können je nach Ausprägung eine Reduktion der Lebensdauer bewirken. Es ist daher von großem Interesse, diesen Effekt sicher zu bewerten und damit entscheiden zu können, ob das Bauteil betrieben werden kann. Im Rahmen einer Studie wurde experimentell und numerisch untersucht, mit welcher Prognosegüte der Einfluss von Drucküberlasten auf die Lebensdauer von bauteilähnlichen Kerbproben für verschiedene Strukturwerkstoffe (hochfeste Stähle sowie Al- und Titan-Legierungen) mittels eines schädigungsmechanischen Ansatzes berechnet werden kann.

### Überlast-Simulation

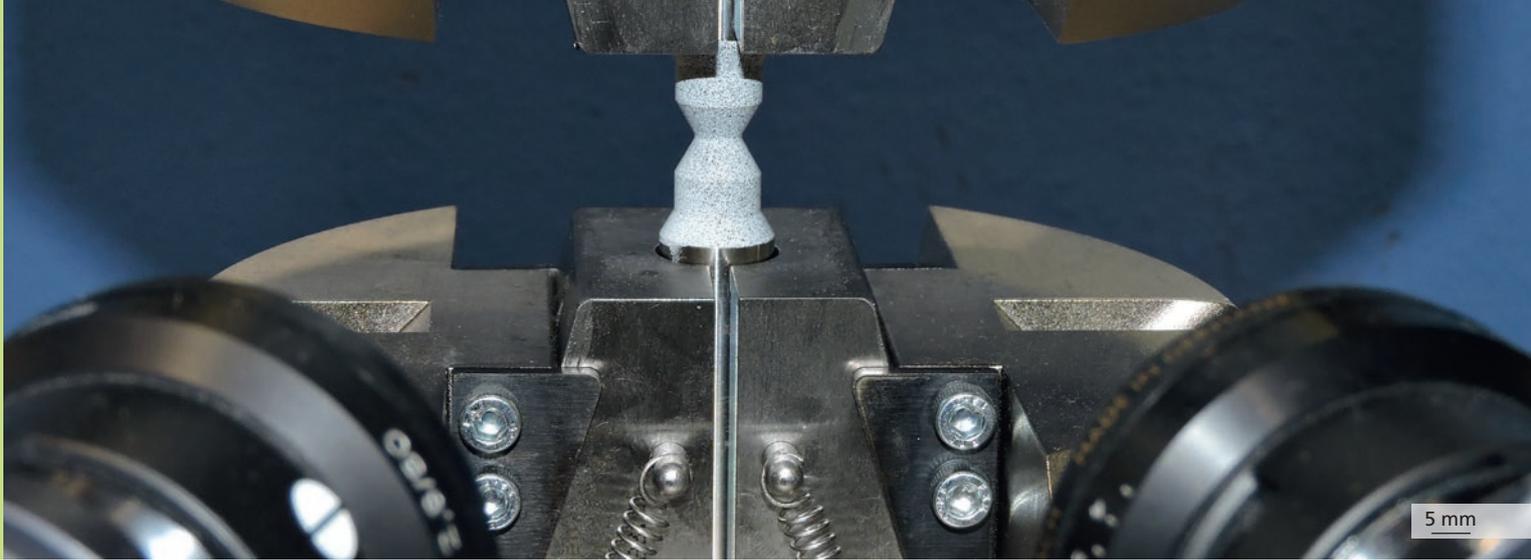
Die Validierung der berechneten Dehnungsverteilungen, hervorgerufen durch einzelne Überlasten, erfolgte durch eine definierte Stauchung der Kerbproben bei gleichzeitiger optischer Messung der Verformung im Kerbgrund mithilfe der Grauwertkorrelationsmethode. Beispielsweise führt ein Stauchversuch mit einer maximalen Stauchkraft von -54 kN an einer Kerbprobe (Durchmesser 6,5 mm und Kerbradius 1 mm) aus einem vakuumgeschmolzenen niedrig-legierten Stahl zu einer maximalen Stauchung von 1,9 Prozent. Nach Entlastung verbleibt ein plastischer Verformungsanteil von 0,23 Prozent. Dieses Verformungs-Zeit-Verhalten wurde mit einem an den Werkstoff angepassten Chaboche-Materialmodell und einem geeignet diskretisierten Finite-Elemente-Modell simuliert. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung von Experiment und numerischer Simulation festgestellt.



1 Schädigungswöhlerlinie für  $R_{\epsilon} = -1$  für einen vakuumgeschmolzenen niedrig-legierten Stahl.



2 Vergleich experimentell bestimmter und berechneter Lebensdauern für einen vakuumgeschmolzenen niedrig-legierten Stahl.



### 3 Kerbgrund-Dehnungsmessung mittels Grauwertkorrelation.

#### Berechnung der Schädigungsanteile

Zur Berechnung der durch mechanische Belastungen hervorgerufenen Schädigungsanteile wurden zunächst an ungekerbten Proben desselben Werkstoffs einstufige dehnungskontrollierte Schwingfestigkeitsversuche bei einem Dehnungsverhältnis von  $R_\epsilon = -1$  durchgeführt. Aus den Versuchsdaten wurde dann eine Schädigungs-Wöhlerlinie nach Fatemie-Socie (FS) berechnet (Abbildung 1). Jeder Lastwechselzahl  $N$  kann somit ein Wert des FS-Schädigungsparameters zugeordnet werden. Zur Übertragung der Schädigungsanteile auf die bauteilähnlichen Kerbproben wurde der FS-Schädigungsparameter sowohl für die Überlast als auch für die anschließende Schwingbelastung nach dem »Kritischen-Ebenen-Ansatz« mittels Finite-Elemente-Analyse berechnet. Im ersten Schritt wird das Finite Element mit der höchsten Axialspannung bestimmt. Anschließend wird mithilfe der dort wirkenden Spannungen und Dehnungen jeweils der FS-Schädigungsparameter für die Teilschädigungen nach Abbildung 1 berechnet. Schließlich wird analog zur Vorgehensweise der linearen Schadensakkumulation eine ertragbare Lastwechselzahl  $N$  mit einer Schädigungssumme von  $D = 0,5$  berechnet.

#### Einfluss von Überlasten auf die Lebensdauer

Abbildung 2 visualisiert eine Gegenüberstellung verschiedener Belastungsszenarien hinsichtlich der berechneten Lebensdauer (rote Symbole) und eines experimentell ermittelten Validierungsversuchs (blaue Symbole). Alle Überlasten wurden so aufgebracht, dass sich im Kerbgrund plastische Stauchungen von 0,23 Prozent einstellten. Als Referenz ist der Mittelwert der Schwingfestigkeit (Spannungsamplitude  $\Delta\sigma = 1080$  MPa) aus kraftgesteuerten Wechsellastversuchen ( $R_\sigma = -1$ ) ohne Überlasten für 1 000 000 Lastwechsel aufgeführt. Demgegenüber

nimmt die Schwingfestigkeit nach vorherig einmalig aufgebrachtener Überlast deutlich auf einen Wert von  $700 \text{ MPa} < \Delta\sigma < 800 \text{ MPa}$  ab. Ein genaueres Ergebnis kann aufgrund der im Versuch gewählten Belastungsstufung nicht angegeben werden. Der Wert des vorgestellten schädigungsmechanischen Ansatzes liegt bei  $\Delta\sigma = 773 \text{ MPa}$  und liefert somit gegenüber den Validierungsversuchen ein konsistentes Ergebnis. Ein Vorteil des Berechnungsansatzes liegt darin, dass Schwingfestigkeiten für beliebige Lastwechselzahlen ermittelt werden können. So ergibt sich beispielsweise für den Zielwert von 10 000 000 Lastwechsel eine Schwingfestigkeit von  $\Delta\sigma = 657 \text{ MPa}$ . Auch der Einfluss mehrfach wiederholter Überlasten auf die Lebensdauer ist bei den experimentellen Ergebnissen gut zu erkennen. Bei einer Spannungsamplitude von  $\Delta\sigma = 700 \text{ MPa}$  ergeben sich nach 5-facher Überlast mit  $-54 \text{ kN}$  noch Durchläufer. Wird die Anzahl der Überlasten auf den Faktor 50 erhöht, so versagen die Proben bereits bei rund 50 000 Lastwechseln. Einen weiteren Vorteil der Berechnung stellt die Aussagefähigkeit für beliebige Überlastkombinationen dar. Um dies zu demonstrieren, wurde ein komplexes Belastungsszenario erstellt und die dazugehörige Lebensdauer berechnet. Dazu wurde eine Kerbprobe mit  $-54 \text{ kN}$  gestaucht, danach mit  $\Delta\sigma = 700 \text{ MPa}$  und 1 000 000 Lastwechseln belastet, im Anschluss nochmals 5 Mal beziehungsweise 50 Mal mit  $-54 \text{ kN}$  gestaucht und schließlich bis zum Bruch mit  $\Delta\sigma = 700 \text{ MPa}$  belastet. Auch hier ordnen sich die Ergebnisse konsistent in die experimentellen Befunde ein. Die vorgestellten Untersuchungen und Vergleiche zeigen, dass der FS-Schädigungsparameter nach ausreichend genauer Kalibrierung sehr gut angewendet werden kann, um den Einfluss von Überlasten auf die Lebensdauer zu bewerten und experimentelle Befunde zu ergänzen.

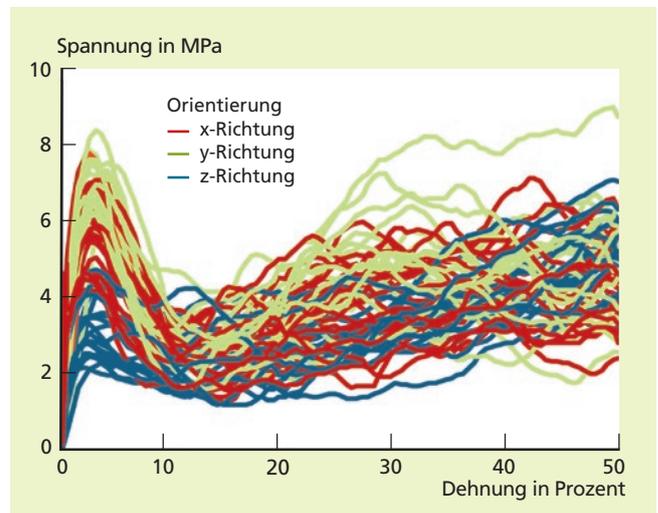
Christian Eichheimer, Dr. Michael Luke

## CHARAKTERISIERUNG UND MODELLIERUNG ANISOTROPER SCHÄUME

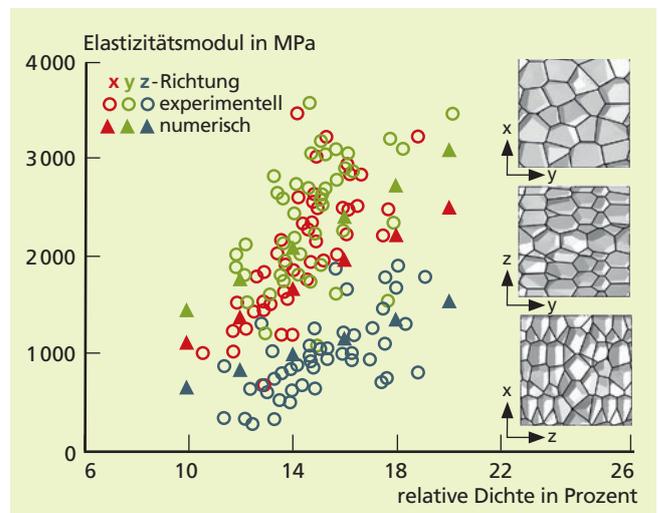
In vielen Bereichen des modernen Leichtbaus werden feste Schäume eingesetzt. Wichtige Anwendungsbereiche sind Kerne von Sandwich-Konstruktionen, Energieabsorptionselemente, aber auch multifunktionale Anwendungen wie Konstruktionselemente mit inhärenten akustischen oder Wärmeisolationseigenschaften. Herstellungsbedingt weisen Schäume nicht nur eine ungeordnete, heterogene, sondern auch eine anisotrope Mikrostruktur auf. Bei der Auslegung von Bauteilen mit zellulären Anteilen werden anisotrope Eigenschaften bislang selten berücksichtigt. Der Einfluss von länglich gestreckten oder gestauchten Zellen auf das Strukturverhalten kann jedoch erheblich sein. Da für viele Anwendungen recycling-fähige Leichtbau-Konstruktionen an Bedeutung gewinnen, werden im Fließbandprozess hergestellte stoffreine Aluminium-Sandwichplatten mit einem geschlossenzelligen Aluminium-Schaumkern betrachtet (Abbildung 3). Zur gezielten Untersuchung des Einflusses anisotroper Mikrostruktureigenschaften auf das Strukturverhalten wird ein Algorithmus zur zufallsgesteuerten Generierung von Finite-Elemente-Modellen mit anisotropen Zellstrukturen entwickelt. Hierauf basierend erfolgt eine Bauteilauslegung unter Berücksichtigung streuender und anisotroper Zellmaterialeigenschaften.

### Experimentelle Charakterisierung

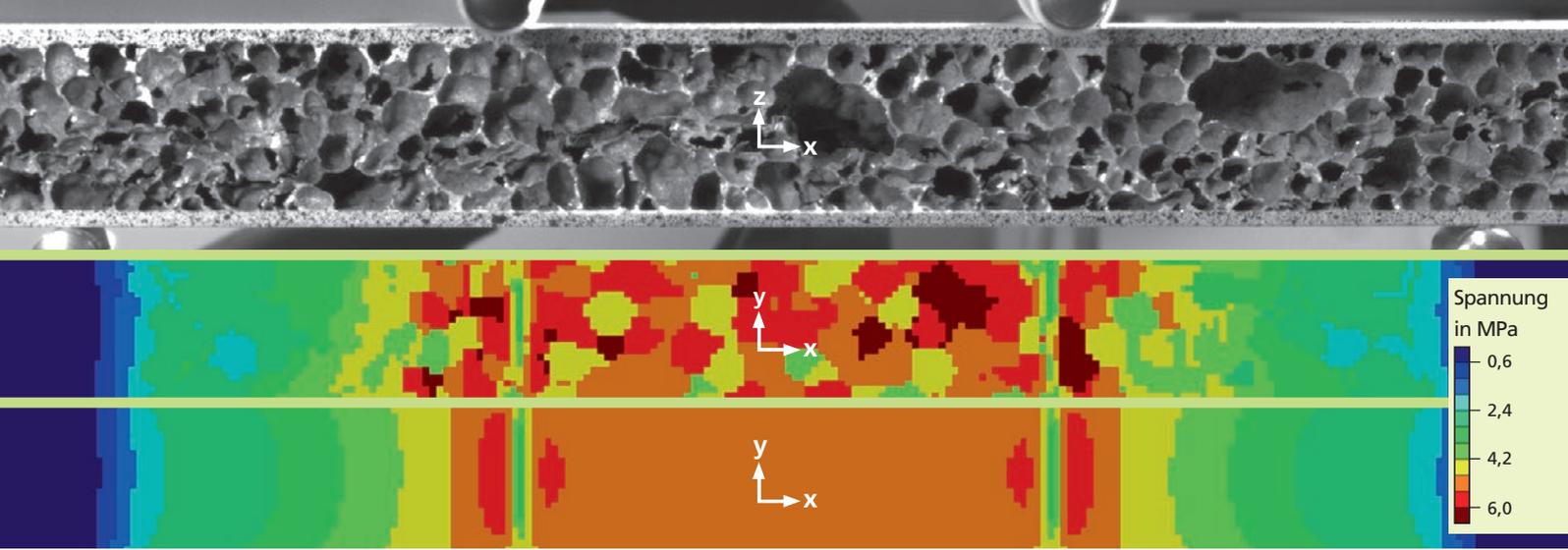
In einem ersten Schritt wird das mechanische Verhalten des Schaumkerns experimentell charakterisiert. Aus dem Kern werden würfelförmige Druckproben entnommen und der Entnahmeort sowie die räumliche Orientierung dokumentiert. Für jede Probe wird die relative Dichte ermittelt. Durch fotografische Aufnahmen der Probenoberflächen wird die ursprüngliche Mikrostruktur festgehalten. Es zeigen sich prozessbedingte ortsabhängige Dichteveriationen innerhalb



1 Spannungs-Dehnungs-Kurven der Schaumdruckproben in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung, bezogen auf die ursprüngliche Orientierung in der Sandwichplatte.



2 Anisotropes Schaummodell mit in z-Richtung gestauchten Zellen: Vergleich zwischen experimentell sowie numerisch ermittelten Elastizitätsmoduln.



3 Sandwichbalken (oben), berechnete von-Mises-Spannungsverteilungen mit anisotropen streuenden (Mitte) und homogenen Kerneigenschaften (unten).

der Platte. Die Druckprüfung erfolgt mit einer Bilderfassung, um das Zellversagen nachverfolgen zu können. Es ergeben sich nicht nur dichteabhängige Spannungs-Dehnungs-Verläufe, sondern für Proben vergleichbarer Dichte ist ein Einfluss der Belastungsrichtung bezüglich der ursprünglichen Orientierung der Probe in der Platte zu beobachten (Abbildung 1). Flachere Verläufe ergeben sich für Proben, die in Dickenrichtung des Sandwichkerns (z-Richtung) belastet werden. Dies ist ein herstellungsbedingter Anisotropie-Effekt: Der Aufschäumprozess wird in Dickenrichtung durch Walzen behindert, um die Sollkerndicke zu erhalten, wodurch die Zellen in dieser Richtung gestaucht sind.

### Anisotrope mikromechanische Modellierung

Zum tieferen Verständnis der mikromechanischen Vorgänge bei der Deformation und als Basis für ein virtuelles Materialdesign unter Berücksichtigung der Streuung der Materialeigenschaften erfolgt eine probabilistische mikromechanische Simulation des Deformationsverhaltens. Hierzu wird als Erweiterung des klassischen Voronoi-Verfahrens zur Zellstrukturgenerierung ein Algorithmus entwickelt, der auf einer Ellipsoidpackung beruht. So können Strukturen mit gestreckten beziehungsweise gestauchten Zellen, die eine vorgegebene Orientierung im Raum aufweisen, erzeugt werden. Durch Variation der Zellgrößenverteilung sowie Zellorientierung und des Aspektverhältnisses der Ellipsoidachsen können stark variierende Zellstrukturen generiert werden. In Abbildung 2 sind die Oberflächen eines Modells mit gestauchten Zellen dargestellt. Anhand dieses Modells sind mithilfe einer Homogenisierungsanalyse numerisch bestimmte und dichteabhängige Werte für den Elastizitätsmodul ermittelbar. Diese stehen mit dem experimentell beobachteten Anisotropie-Effekt im Einklang.

### Anisotropie-Einfluss auf das Bauteilverhalten

Bei der Bewertung von Bauteilen mit zellulären Anteilen ist die reale Abbildung der Mikrostruktur zumeist zu aufwändig. Hier bietet sich eine Diskretisierung mittels Zufallsfeldern zur Beschreibung des örtlich variierenden Materialverhaltens an. Im Gegensatz zu Berechnungen mit vollständig homogen idealisierten Materialeigenschaften kann durch dieses Vorgehen sowohl die Streuung als auch die Anisotropie in den Mikrostruktureigenschaften berücksichtigt werden. Um den Einfluss der Zellstruktur auf das Strukturverhalten aufzuzeigen, werden Sandwichbalken mit verschiedenen Schaumkernen betrachtet: eine anisotrope Zellstruktur mit in Dickenrichtung gestauchten Zellen im Vergleich zu einer Zellstruktur mit homogenen Materialeigenschaften. Die sich unter Vier-Punkt-Biegung ergebenden von-Mises-Spannungs-Verteilungen weisen signifikante Unterschiede auf. Dargestellt sind diese für den Grenzbereich zur oberen Decklage in Abbildung 3 (Mitte und unten). Bei gleicher relativer Dichte von 14 Prozent der Schaumkerne treten erheblich höhere versagenskritische maximale Spannungswerte in dem Sandwichkern mit den anisotropen gestauchten Zellen auf. Dies bedeutet, dass bei der Bewertung von Bauteilen mit zellulären Anteilen versagenskritische Spannungen unterschätzt werden können, wenn sowohl die Streuung als auch die Anisotropie-Eigenschaften in der Zellstruktur nicht berücksichtigt werden.

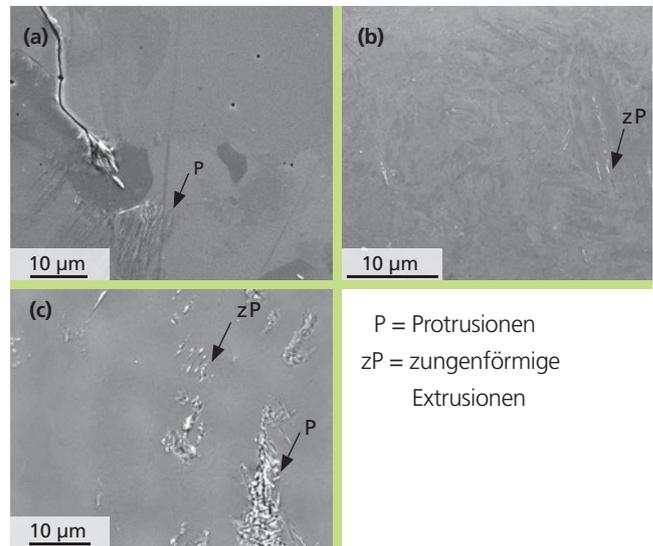
Dr. Carla Beckmann, Dr. Jörg Hohe

## ERMÜDUNGSMECHANISMEN AUF MIKROMECHANISCHER EBENE VERSTEHEN

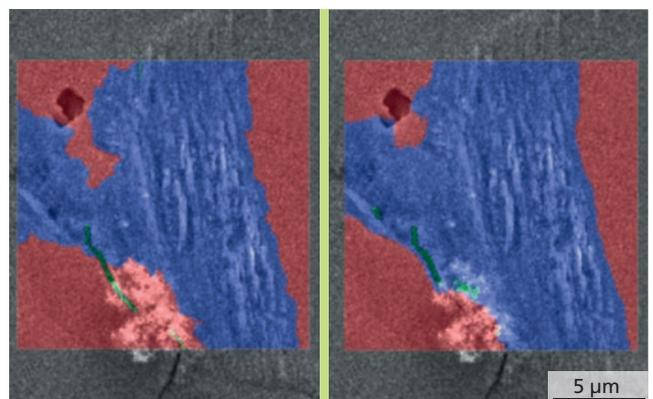
Wieso sind Materialien zwar bei einmaliger Belastung unterhalb der Streckgrenze beständig, versagen aber bei zyklischer Belastung mit ähnlichen Amplituden? Da Ermüdung die häufigste Versagensursache darstellt, besteht großes Interesse an einer zuverlässigen experimentellen und simulativen Basis für die Auslegung von Bauteilen. Das Ziel ist, bei gegebener Mikrostruktur, Belastung und Bauteilgeometrie das Ermüdungsverhalten und die Lebensdauer eines Bauteils zu prognostizieren – dies ist in allen Branchen wichtig, die hohe Sicherheitsanforderungen an Leichtbaukonstruktionen stellen. Viele Bauteilentwicklungen nutzen neue oder optimierte Materialien mit unterschiedlichen Ermüdungsmechanismen. Dabei ist ein Verständnis von Ermüdungsmechanismen über Materialdomänen und Skalen hinweg essenziell. Vor allem die ausschlaggebenden Mechanismen von Initiierung und Wachstum kurzer Risse sind dabei noch zu wenig verstanden.

### Ermüdungsschädigungen und Risse optisch detektieren

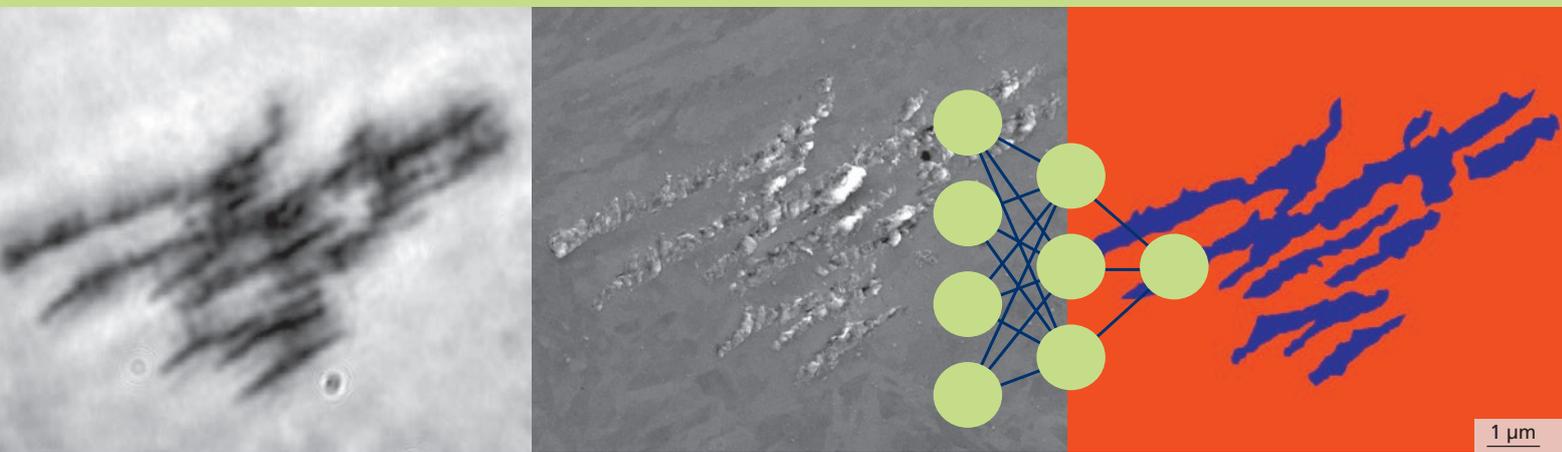
Die Beschaffenheit solcher initialer Schädigungen hängt stark vom Material (Abbildung 1) und vom Belastungsszenario ab. Die Bilddaten von Schädigungen streuen aufgrund der optischen Abbildungseinstellungen und generieren dadurch Ungenauigkeiten. Methoden des maschinellen Lernens dienen der automatisierten Detektion von Schädigungsstellen in diversen Materialien, und tiefe neuronale Netze ermöglichen im Vergleich zu konventionellen Bildverarbeitungsmethoden eine zuverlässigere Detektion der Schädigungen. Im Rahmen einer durch die Bosch-Forschungsförderung geförderten Dissertation wurde eine Methode der pixelweisen Detektion (semantische Segmentierung) von Extrusionen und Rissen an mehreren Materialien entwickelt. Eine hohe Genauigkeit ist essenziell, um eine verlässliche Zuordnung der Schädigung zu mikrostrukturellen Merkmalen der Probe zu erhalten. Diese



1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen typischer Extrusionsmorphologien in ferritischem EN 1.4003 (a), martensitischem EN 1.7228 (b) und sauerstofffreiem Kupfer (c).



2 Rasterelektronenabbildung überlagert mit Segmentierungskarten in EN 1.4003. Vergleich von manuell gelabelter Schädigungsstelle (links) und Vorhersage des tiefen neuronalen Netzes (rechts). Die Farben Rot, Grün und Blau zeigen jeweils Hintergrund-, Riss- und Extrusionsregionen auf.



3 *Detailaufnahme zungenförmiger Extrusionen aus ROCS-Mikroskopie (links), Rasterelektronenmikroskopie (Mitte) und korrespondierende Segmentierungskarte (rechts), die mithilfe eines neuronalen Netzwerks (grün-blaues Schema) aus der rasterelektronischen Aufnahme erzeugt wurde.*

liefert Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen und ermöglicht eine Optimierung und Validierung von mikromechanischen Simulationsmodellen (wie Kristallplastizitätsmodellen).

Die hohe Streuung der Messdaten erfordert eine große Datenbasis für das Training eines tiefen neuronalen Netzes. Dazu dienen manuell markierte Rasterelektronenmikroskopie-Bilddaten für die in Abbildung 1 dargestellten charakteristischen Extrusionmorphologien. Hierzu wurde eine an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg entwickelte U-Net-Architektur angewandt. Um die begrenzten Datenmengen auszugleichen, wurde die Datenbasis mittels dedizierter Data Augmentation künstlich erweitert. Die Fähigkeit des Netzwerkes, das anhand von Ferrit-Schädigungsaufnahmen trainiert wurde, um daraufhin Schädigungen in martensitischem Stahl und Kupfer zu segmentieren (Abbildung 1), wurde evaluiert. Zudem wurde ein mit Materialdatenkombinationen trainiertes Modell an den drei Materialien getestet.

### **Auswahl von Bildtransformationen wichtig für Modelltraining**

Die Ergebnisse zeigen, dass für Materialien mit ähnlicher Extrusionsmorphologie das Netzwerk übertragbar ist. So konnten mit dem anhand von Ferritdaten trainierten Modell flächigere Extrusionen (Protrusionen) in Kupfer vorhergesagt werden. Dagegen stellte die Vorhersage zungenförmiger Extrusionen eine Herausforderung dar. Als entscheidend für die Übertragbarkeit auf mehrere Materialien hat sich die Auswahl von Bildtransformationen der Data Augmentation ausgewirkt: Sowohl Risse als auch Extrusionen konnten in allen Materialien erfolgreich mit einem einzigen trainierten Modell segmentiert werden. Hierzu war eine repräsentative Datenbasis mit Trainingsdaten aus mindestens zwei Materialdomänen mit verschiedenen Extrusionsmorphologien notwendig.

Die drei geprüften Legierungen decken einen weiten Bereich auftretender Schädigungsmorphologien ab, sodass eine Übertragbarkeit auf weitere metallische Materialien zu erwarten ist. Eine Anwendung der Methode auf lichteoptische Aufnahmen ist beabsichtigt. Höchstauflösende optische Verfahren, wie die am Lehrstuhl für Bio- und Nanophotonik der Universität Freiburg entwickelte Rotating Coherent Scattering (ROCS) Mikroskopie (Abbildung 3 links), liefern einen für die Detektion von Extrusionen in martensitischen Materialien angemessenen Detailgrad. Diese Methode wurde mit einer empfindlichen Ermüdungsapparatur zu einem in situ-Aufbau integriert und trägt zum Verständnis der initialen Ermüdungsmechanismen an Luft bei. Neben der Schädigungssegmentierung startete eine Kooperation mit der Universität des Saarlandes und dem Material Engineering Center Saarland (MECS) zur Segmentierung lattenförmiger Bainit-Phasen in Multi-Phasen-Stählen. Dazu wurden lichtmikroskopische Aufnahmen angeätzter Oberflächen verwendet und die Übertragbarkeit der Methode auf andere materialwissenschaftliche Fragestellungen demonstriert.

Ali Riza Durmaz, Dr. Thomas Straub

## AUTOMATISIERTE DEFEKTAUSWERTUNG MITTELS KÜNSTLICHER NEURONALER NETZE

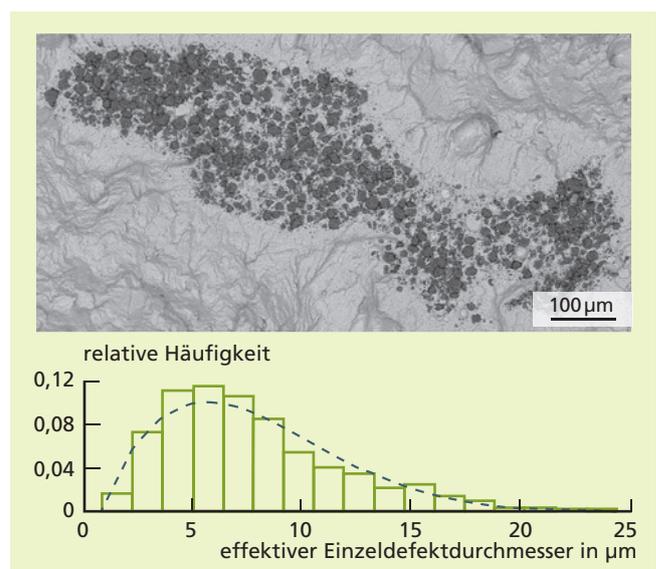
Die Lebensdauer von Bauteilen wird durch das Vorliegen von Materialdefekten teilweise stark beeinträchtigt. In vielen Fällen handelt es sich dabei um Defektfelder, die aus mehreren Einzeldefekten, beispielsweise nichtmetallischen Einschlüssen, bestehen. Um eine statistisch abgesicherte Lebensdauerprognose für Bauteile abzuleiten, bei deren Herstellung vergleichbare Werkstoffe und Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen, werden einerseits Informationen über die Größe von Defektfeldern und andererseits über deren Morphologie herangezogen. Während die Ausdehnung eines Defektfelds mit herkömmlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren ermittelt werden kann, erfordert die Bestimmung der Größe der Einzeldefekte und der Abstände zwischen ihnen einen beträchtlichen personellen Aufwand. Dieser kann durch automatisierte Bilderkennung und den Einsatz von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) signifikant reduziert werden.

### Semantische Segmentierung mithilfe von KNN

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und der Siemens AG geförderten Vorhabens erfolgten Ermüdungsfestigkeitsversuche an Proben mit Defekten. Dabei wurde einerseits die Lebensdauer der Proben in Abhängigkeit von der Größe der jeweiligen Defektfelder untersucht und andererseits die Defektmorphologie anhand von automatisierten Bruchflächenanalysen bestimmt. Mithilfe von Materialkontrastbildern wurden Defektfelder teilweise in hunderte Einzeldefekte aufgelöst (Abbildung 1 oben). Zur Detektion der Einzeldefekte wurde die semantische Segmentierung in Kombination mit faltenden neuronalen Netzen herangezogen. Die erstellten Materialkontrastbilder wurden anschließend zum Trainieren, Testen und Validieren des KNNs genutzt, wobei die Segmentierungsgenauigkeit unter Einsatz von Algorithmen des

maschinellen Lernens weiter verbessert wurde. Auf Basis der vorhergesagten Masken wurden anschließend Einzeldefektgrößen sowie Abstände zwischen Defekten statistisch ausgewertet. Abbildung 1 (unten) zeigt exemplarisch die Häufigkeitsverteilung von effektiven Durchmessern der Einzeldefekte sowie deren Anpassung mit einer statistischen Verteilungsfunktion. Die ermittelte Defektstatistik dient als Input für numerische Simulationen der Rissnukleation an Einzeldefekten sowie als Input für die Simulation der Entstehung eines makroskopischen, das Defektfeld umschließenden Makrorisses.

Ali Aydin, Dr. Igor Varfolomeev



1 Kontrastbild mit Defektfeld aus hunderten Einzeldefekten (oben); Häufigkeitsverteilung von Einzeldefektdurchmessern mit dreiparametrischer Weibull-Verteilung (gestrichelte Linie).

Gruppe

## CRASHSICHERHEIT UND SCHÄDIGUNGSMECHANIK

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

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

## WERKSTOFFDATENFUSION AUF DEM WEG ZUM »DIGITALEN ZWILLING«

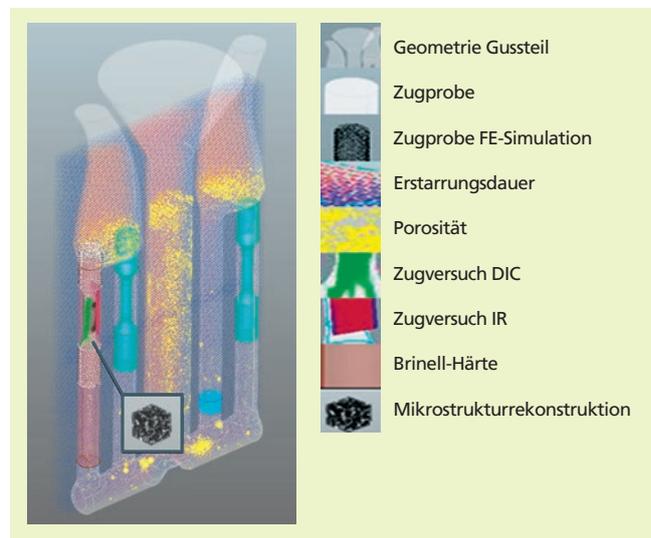
Im Rahmen des vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg geförderten Projekts MaterialDigital wurde ein Materialdatenraum zur Verwaltung und Abfrage von Metadaten entlang von Prozessketten sowie Digitale Zwillinge für durchgängige, ortsabhängige Materialzustandsinformationen entwickelt. Im Digitalen Zwilling zu einem Aluminiumkokillengussteil wurden verschiedene Daten fusioniert: beispielsweise ort aufgelöste Prozesskennwerte (wie lokale Erstarrungsdauer aus einer Gießsimulation), Porenverteilungen (aus der Computertomographie), mechanische Eigenschaften (wie lokale Brinell-Härte, DIC und IR-Messungen) oder aus Schlibildern rekonstruierte Mikrostrukturen. Dabei ist eine ortsgenaue Zuordnung der Daten grundlegend, um Abhängigkeiten zu identifizieren – beispielweise hängen die lokalen Erstarrungsdauern sowie daraus entstehende Gefüge- und Defektmerkmale mit lokalen Festigkeitseigenschaften zusammen.

### Räumliche Datenfusion für Gießprozess

Auf der Basis von Python OCC wurde ein Tool für die geometrische Fusion von Bauteil-, Prozesskennwerten und Materialzustandsinformationen entwickelt. Dieses Tool zur Erstellung eines Digitalen Zwillings verheiratet räumliche Daten aus Prozesssensoren und -simulation sowie Mess- und Simulationsdaten aus zerstörungsfreier und zerstörender Werkstoffanalyse. Über die Visualisierung der Bauteilgeometrie und einzelner Proben sowie ausgewählter skalenübergreifender Datensätze im grafischen User-Interface (GUI) kann die räumliche Lage der Daten überprüft werden (Abbildung 1). Für die Fusion der Daten auf gemeinsame Koordinatenpunkte werden lokal steuerbare Finite-Elemente-Netze verwendet, auf die alle vorhandenen Daten über eine Triangulation räumlich interpoliert werden.

Im nächsten Schritt werden mit den fusionierten Datensätzen Korrelationen erstellt und künftig Künstliche Neuronale Netze trainiert, um Zusammenhänge zwischen Herstellungsparametern und dem Einsatzverhalten von Bauteilen zu ermitteln. Unseren Kunden aus Industrie und Forschung bieten wir hiermit ein Werkzeug für die Integration in digitale Bewertungsketten, Prozessparameteroptimierung und gezielte Steuerung von Bauteileigenschaften.

Dr. Jörg Lienhard, Till Hermann



1 Über die Visualisierung der Bauteilgeometrie und einzelner Proben sowie ausgewählter skalenübergreifender Datensätze im grafischen User-Interface (GUI) kann die räumliche Lage der Daten überprüft werden.

## WERKSTOFFBEWERTUNG UND LEBENSDAUERKONZEPTE

### GESCHÄFTSFELDLEITER

Dr. Christoph Schweizer

Telefon +49 761 5142-382

christoph.schweizer@iw.fraunhofer.de

Wie verhalten sich Werkstoffe, wenn sie künftig verstärkt Wasserstoff unter hohem Druck ausgesetzt sind? Und wie verändern sich die Eigenschaften einer Legierung für Hochleistungsmagnete, wenn man ein chemisches Element durch ein anderes ersetzt? Mit diesen und vielen weiteren Fragen befassen sich aktuell die Forscherinnen und Forscher des Geschäftsfelds Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte. Das Geschäftsfeld ist darauf spezialisiert, mit anspruchsvollen Experimenten und mathematischen Simulationen zu analysieren, wie sich ein Werkstoff im Routinebetrieb verändert. Zum Alltag werden künftig immer häufiger Anwendungen gehören, bei denen Bauteile Hochtemperaturbedingungen und Hochdruck-Wasserstoff ausgesetzt sind. Denn gemäß der deutschen und der europäischen Wasserstoffstrategie soll Wasserstoff in den nächsten Jahrzehnten zu einem dominierenden Energieträger werden. Hierbei werden Werkstoffe, die bei Erzeugung, Transport, Speicherung und Nutzung mit Wasserstoff in Kontakt kommen, neuen Belastungen ausgesetzt. Bei der Umnutzung von Gasturbinen oder bei völlig neuartigen Antriebskonzepten spielt auch die Temperatur eine wesentliche Rolle in der Auslegung. Allerdings kann Wasserstoff Werkstoffe unter den oben genannten Bedingungen stark beeinflussen. Das Geschäftsfeld untersucht daher intensiv, wie sich Werkstoffe an diese Belastungen anpassen lassen.

#### Materialverhalten vorhersagen per Simulation quantenmechanischer Prozesse

Im September 2020 hat sich die Gruppe »Materialmodellierung« dem Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte angeschlossen. Diese ist darauf spezialisiert, mit physikalischen Modellen und numerischen Methoden die Eigenschaften eines Werkstoffs zu berechnen. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind in der Lage, im Modell anhand weniger dutzend Atome präzise quantenmechanische

Prozesse abzubilden. Damit lässt sich beispielsweise errechnen, wie sich Materialeigenschaften verändern, wenn man die chemische Zusammensetzung einer Legierung oder eines Mischkristalls variiert und beispielsweise einzelne chemische Elemente substituiert. Die Simulationen helfen dabei, in kurzer Zeit verschiedene Kombinationen von Legierungselementen zu untersuchen und Eigenschaften der neuen Materialien vorherzusagen. Das ist beispielsweise wichtig für die Herstellung von Hochleistungsmagneten, die Seltene Erden enthalten. Für einige dieser Elemente werden für die Zukunft Lieferengpässe befürchtet, weshalb man seit längerem nach alternativen Elementen und neuen Legierungen sucht. Darüber hinaus ist diese simulationsbasierte Werkstoffentwicklung auch für die Additive Fertigung, den 3D-Druck, von Interesse, für die neue leistungsfähige Materialien mit langer Lebensdauer gesucht werden.

#### Digitalisierung von Material-Wissen

Die Aspekte »simulationsgestützte Werkstoffentwicklung« und »Wasserstoff« gehören zu den Querschnittsthemen, an denen aktuell alle Geschäftsfelder des Fraunhofer IWM ihren Forschungsbeitrag leisten. Zu diesen Themen zählt ferner die Digitalisierung. Das Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte fokussiert dabei aktuell unter anderem auf die Digitalisierung von Prozessketten. So leitete das Fraunhofer IWM das Landes-Forschungsprojekt MaterialDigital, das vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg gefördert und Ende 2020 abgeschlossen wurde. Es soll besonders für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) die Digitalisierung in materialintensiven Branchen voranbringen, die für die Steuerung von Fertigungs- oder Betriebsprozessen große Mengen an Werkstoffdaten erzeugen und verarbeiten müssen. Im Projekt entwickelten die Forscherinnen und Forscher des Geschäftsfelds Analyse-

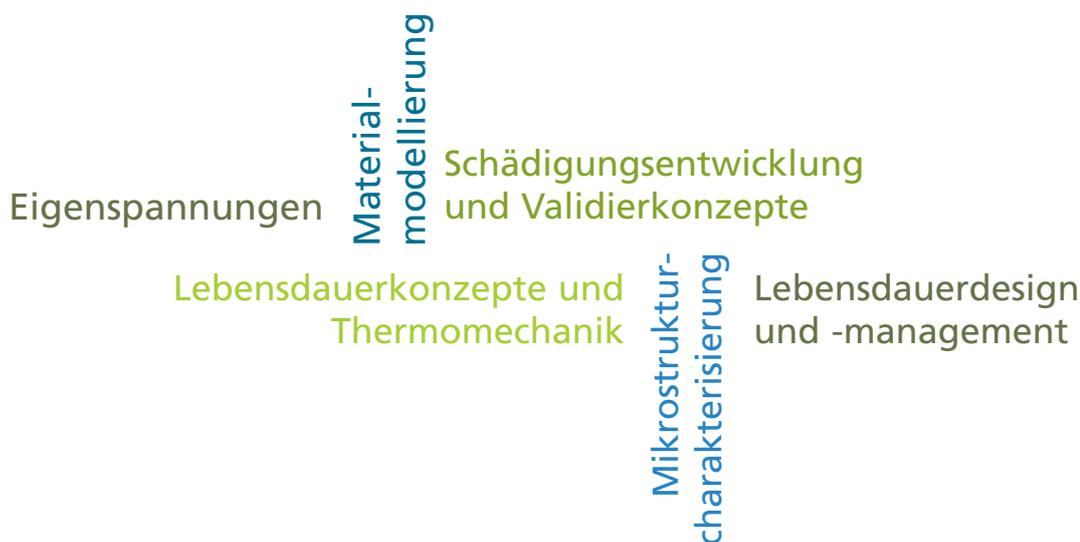


Werkzeuge, die alle Daten und auch die Materialexpertise von erfahrenen Mitarbeitenden in sogenannten Wissensgraphen zusammenführen. So sollen die Materialdaten entlang ganzer Prozessketten abgebildet werden. Konkret wurde im Forschungsprojekt MaterialDigital unter anderem am Beispiel des Aluminium-Kokillengusses ein Prozedere konzipiert und getestet, das die Entwicklung, die Herstellung oder den Betrieb digital abbildet und dabei alle wichtigen Prozessgrößen miteinander verknüpft. Liegen Daten eines Prozesses bisher oftmals in verschiedenen Datenformaten und Programmen vor, so wird man Dank der Wissensgraphen künftig maschinell per Knopfdruck auf alle Daten entlang der Prozesskette zugreifen können.

Darüber hinaus war das Geschäftsfeld im Jahr 2020 an dem Fraunhofer-internen Innovationspush-Programm »Digitalisierte Material- und Datenwertschöpfungsketten – DMD4future« beteiligt, in dem vierzehn Fraunhofer-Institute zusammengearbeitet haben. Das Ziel war auch hier, die Digitalisierung von Herstellungsprozessen voranzutreiben. Konkret wurde vom Fraunhofer IWM ein Materialdatenraum entwickelt, der den Datenaustausch zwischen Partnern über die Grenzen eines Produktionsstandortes beziehungsweise eines Unternehmens hinweg erleichtern soll.

» Wir sind stolz darauf, dass wir den Laborbetrieb trotz Corona mit nahezu der üblichen Effizienz aufrecht erhalten und auch über HomeOffice unsere gewohnt hohe Arbeitsleistung erbringen konnten. Was mit Videokonferenzen alles möglich ist, hätte man sich vor einem Jahr noch nicht vorstellen können – das ist quasi gelebte Digitalisierung.

*Dr. Christoph Schweizer*



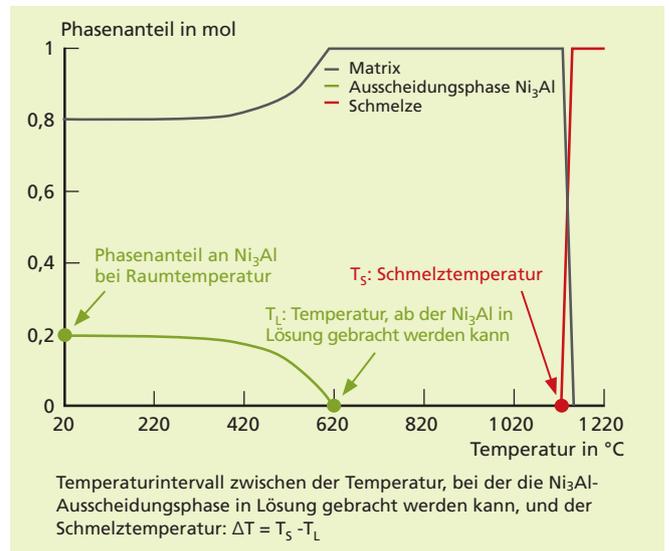
## ENTWICKLUNG NEUER, HOCHFESTER KUPFERLEGIERUNGEN

Kupfer-Beryllium Legierungen zeichnen sich durch eine für Kupferlegierungen sehr hohe Festigkeit bei vergleichsweise hoher elektrischer Leitfähigkeit aus. Beryllium und insbesondere Berylliumstäube können beim Menschen sehr gesundheitsschädlich sein. Im Rahmen der Förderung der innovativen Rohstoffnutzung in KMU des Landes Baden-Württemberg werden CuNiAl-Legierungen als Ersatzwerkstoffe für Kupfer-Beryllium-Legierungen in Kooperation mit dem »fem Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie« in Schwäbisch Gmünd, »NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut« in Reutlingen und einer Reihe von Industriepartnern weiterentwickelt. Das Legierungssystem erwies sich im Rahmen einer Untersuchung von 35 Legierungssystemen als sehr vielversprechend hinsichtlich erreichbarer Festigkeit und elektrischer Leitfähigkeit.

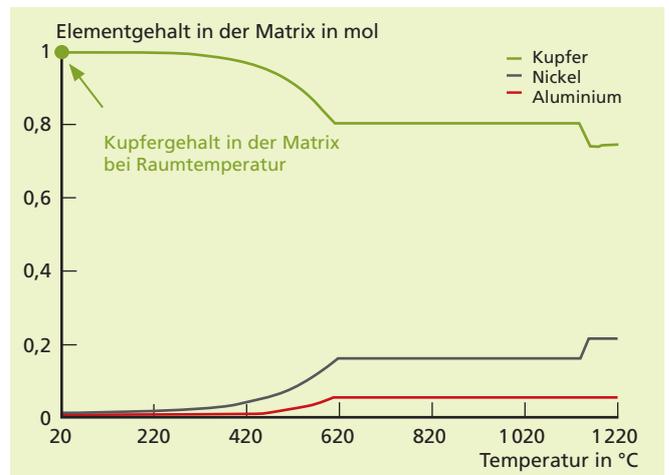
### Automatisierte Berechnung von Phasengleichgewichten zur Legierungsauswahl

Am Fraunhofer IWM werden nun Legierungszusammensetzungen im CuNiAl-Legierungssystem mit hohem Aushärtungspotenzial gesucht, in denen ein möglichst hoher Anteil an Legierungselementen in Ausscheidungsphasen gebunden sind. Hierdurch soll neben einer hohen Festigkeit auch eine hohe elektrische Leitfähigkeit erreicht werden, die zu anderen hochleitfähigen Kupferlegierungen vergleichbar ist.

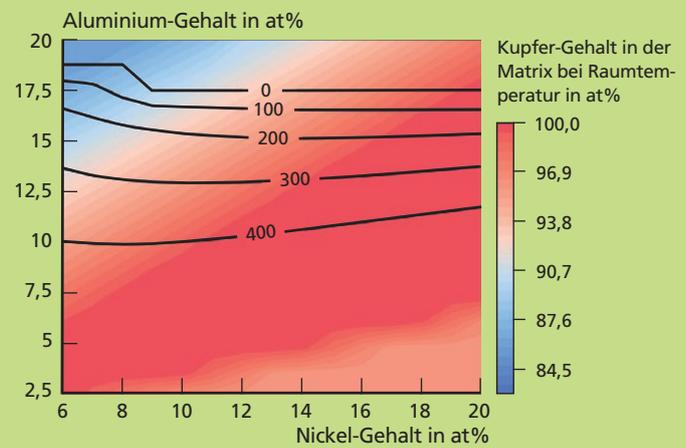
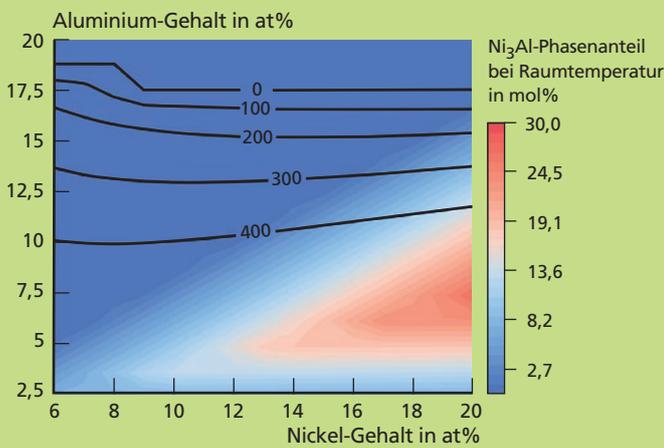
Temperaturabhängige Phasenanteile und Elementgehalte in den jeweiligen Phasen können in thermodynamischen Simulationen berechnet werden. Der Ausscheidungsphasenanteil bei Raumtemperatur im thermodynamischen Gleichgewicht wird als Größe für das Aushärtungspotenzial der Legierungen zu Grunde gelegt (Abbildung 1). Eine optimale Aushärtung



1 Berechnete Phasenanteile im thermodynamischen Gleichgewicht als Funktion der Temperatur in der Legierung  $\text{CuNi}_{15}\text{Al}_5$ .



2 Berechnete Elementgehalte in der Matrix im thermodynamischen Gleichgewicht als Funktion der Temperatur in der Legierung  $\text{CuNi}_{15}\text{Al}_5$ .



3 Berechnetes Temperaturintervall für eine mögliche Lösungsglühung (schwarze Linien); berechneter  $\text{Ni}_3\text{Al}$ -Phasenanteil (links) und Cu-Gehalt (rechts) in der Matrix bei Raumtemperatur in CuNiAl-Legierungen.

ergibt sich durch die gezielte Einstellung der Ausscheidungsgröße und Partikelanzahl durch Wärmebehandlung. Voraussetzung hierzu ist, dass die Ausscheidungsphase im festen Zustand in der Mischkristallmatrix bei erhöhten Temperaturen in Lösung gebracht werden kann. Es muss also ein gewisses Temperaturintervall geben, um diese Lösungsglühung technisch realisieren zu können (Abbildung 1). Als Größe für eine gute elektrische Leitfähigkeit wird der Kupfergehalt in der Matrix bei Raumtemperatur im thermodynamischen Gleichgewicht zu Grunde gelegt (Abbildung 2).

### Erkenntnisgewinn Dank umfangreicher Simulationen

Zusammen mit Industriepartnern wurden relevante Bereiche der chemischen Zusammensetzungen definiert und daraus 225 CuNiAl-Legierungszusammensetzungen abgeleitet, die nun automatisiert berechnet werden können. Die Durchführung der thermodynamischen Simulationen erfolgte mithilfe der Schnittstelle TC-Python. Hierzu wurden Berechnungsmethoden entwickelt, wodurch es ermöglicht wird, in einem automatisierten Rechenvorgang die Ausscheidungsphasenanteile (Abbildung 1), den Kupfergehalt in der Matrix (Abbildung 2) und das Temperaturintervall für eine mögliche Lösungsglühung (Abbildung 3) für alle chemischen Zusammensetzungen auszuwerten. Diese Herangehensweise erlaubt also die gleichzeitige Betrachtung mehrerer anwendungsrelevanter Zielgrößen. Die Ergebnisse der Berechnungen werden als Dateien und in zusammenfassenden grafischen Darstellungen ausgegeben. Dank dieser umfangreichen automatisierten Simulationen ist es zum Beispiel möglich, festzustellen, ob sich bei geringfügiger Variation der chemischen Zusammensetzung, wie sie lokal im Gefüge oder zwischen verschiedenen Chargen auftreten können, auch die Eigenschaften deutlich verändern.

Die intermetallische Ausscheidungsphase  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , die ein hohes Aushärtungspotenzial aufweist, bildet sich in zahlreichen der untersuchten Legierungen aus. Die linke Grafik in Abbildung 3 stellt den Anteil an  $\text{Ni}_3\text{Al}$  für einen Bereich aus dem Legierungssystem CuNiAl dar, womit aussichtsreiche Legierungen identifiziert werden können. Zudem wird rechnerisch analysiert, ob die  $\text{Ni}_3\text{Al}$ -Ausscheidungsphase auch in Lösung gebracht werden kann. Das Temperaturintervall für eine mögliche Lösungsglühung ist ebenfalls in der linken Grafik in Abbildung 3 anhand von Konturlinien dargestellt. Die Simulationsergebnisse legen nahe, dass der Kupfergehalt in der Matrix bei Raumtemperatur (Abbildung 3 rechts) vergleichsweise hoch ist, sodass eine gute elektrische Leitfähigkeit zu erwarten ist.

Dank dieser umfangreichen automatisierten thermodynamischen Simulationen konnten CuNiAl-Legierungen für industrielle Abgüsse definiert werden. Die Prototyplegierungen werden am »fem Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie« sowie von den Industriepartnern hergestellt und deren Mikrostruktur, mechanische und elektrische Eigenschaften und Korrosionsneigung untersucht. Mittels hochauflösender elektronenmikroskopischer Untersuchungen werden Ausscheidungsphasen identifiziert und der Anteil und die Morphologie bestimmt. Aktuell wird der Einfluss weiterer Legierungselemente auf Festigkeit, elektrische Leitfähigkeit und Prozessierbarkeit in Simulationen analysiert.

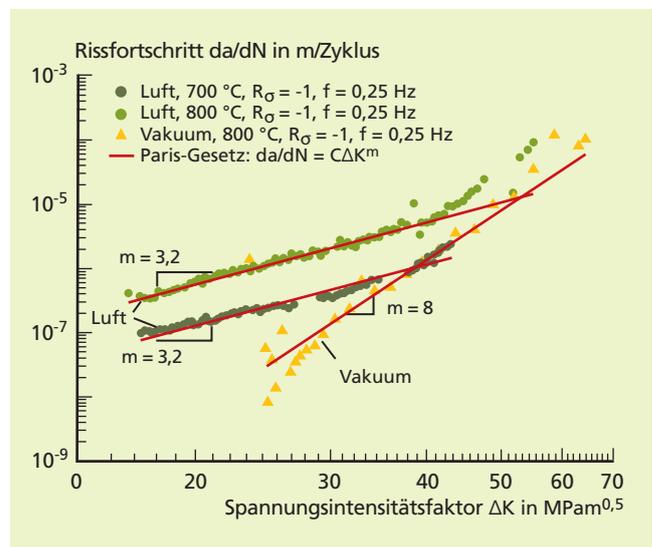
Dr. Valérie Friedmann, Dr. Johannes Preußner

## QUANTIFIZIERUNG DES UMGEBUNGSEINFLUSSES AUF DIE HOCH-TEMPERATURERMÜDUNG

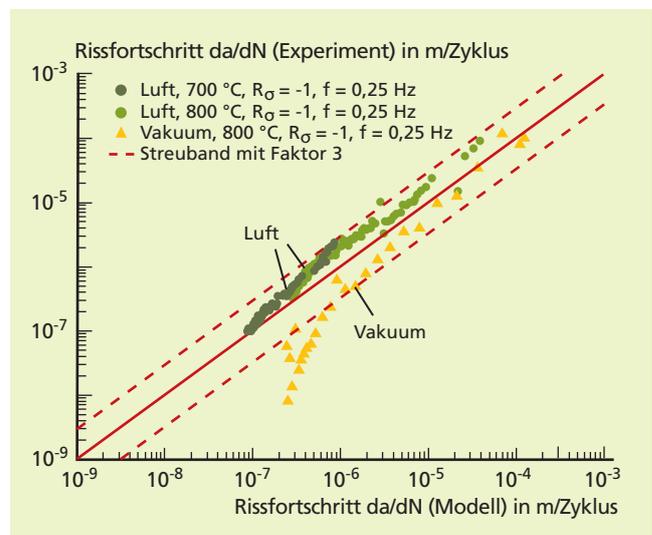
Das Schädigungsverhalten metallischer Werkstoffe wird bei erhöhter Temperatur zunehmend durch die Umgebungsatmosphäre mitbeeinflusst. Insbesondere bei der Ermüdungsschädigung spielt der Sauerstoff eine bedeutende Rolle: Die Bildung von Oxiden und die Sauerstoffdiffusion im Bereich der Risspitze bewirken eine mit der Temperatur zunehmende Beschleunigung des Risswachstums und folglich eine Reduzierung der Lebensdauer. Einige meist hochwarmfeste Legierungen unterliegen unter bestimmten Belastungsbedingungen gar einer sauerstoffbedingten Versprödung, die als SAGBO-Effekt (engl. stress assisted grain boundary oxidation) oder »dynamische Versprödung« bezeichnet wird. Es gibt jedoch auch Hinweise, dass die Sauerstoffatmosphäre den Ermüdungsvorgang durch den sogenannten sauerstoffinduzierten Risschließeffekt insbesondere bei Belastungen im Bereich des Schwellenwerts verlangsamt. In der technischen Anwendung gibt es hingegen auch Bereiche, die der Umgebungsatmosphäre nicht ausgesetzt sind, wie innenliegende Defekte von gegossenen oder 3D-gedruckten Bauteilen. Hier würde dieser Stützeffekt des Risschließens wegfallen, und folglich können unter Laborluft ermittelte Schwellenwerte und Dauerfestigkeiten nicht auf diese Fälle übertragen werden.

### Hochtemperaturversuche unter Hochvakuum

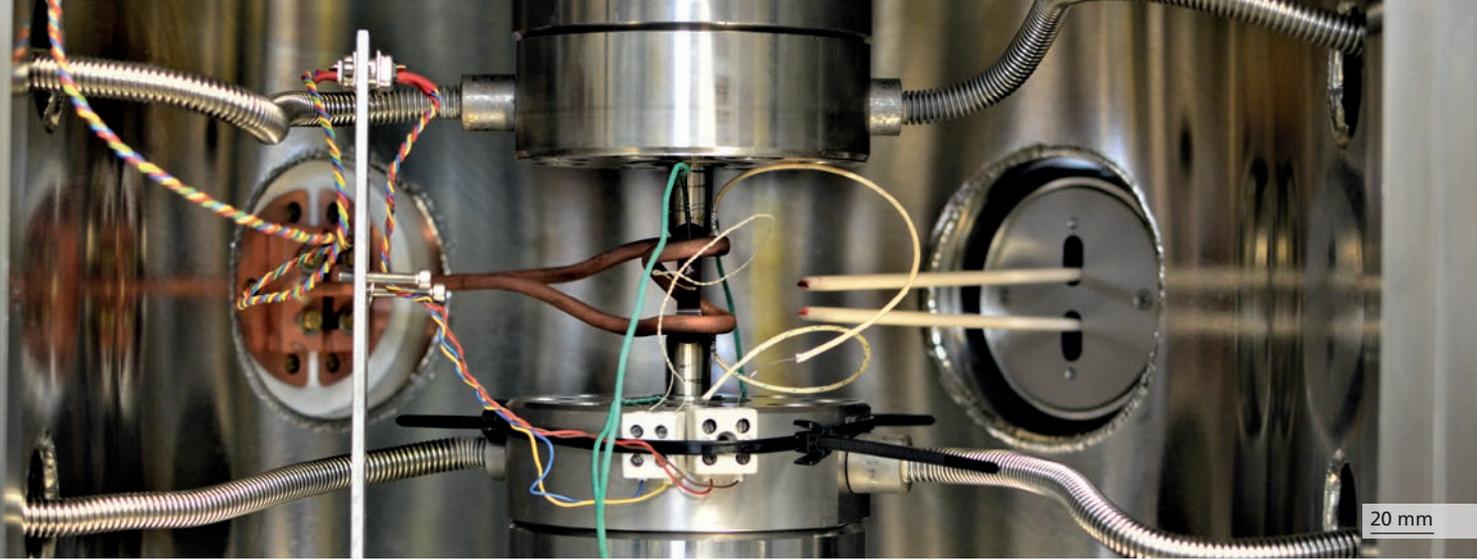
Um den Effekt der Umgebungsatmosphäre und ihren Einfluss auf die Schädigung zu quantifizieren, wurde am Fraunhofer IWM ein Prüfaufbau mit Vakuumkammer entwickelt. Mit ihm lassen sich sämtliche Hochtemperaturversuche, die zur Qualifizierung von Werkstoffen für Hochtemperaturbauteile dienen, beispielsweise LCF-, TMF-, HCF- oder Risswachstumsversuche, unter Hochvakuum (bis  $10^{-9}$  bar) durchführen (Abbildung 3). Optional kann die Kammer auch mit diversen Schutzgasen gespült werden.



1 Bei erhöhter Temperatur unter Luft und unter Vakuum gemessenes Ermüdungsrisswachstum an einer Nickellegierung.



2 Beschreibung der Risswachstumskurven aus Abbildung 1 mittels eines mechanismenbasierten Rissfortschrittsmodells.



3 Prüfstand zur Durchführung von Hochtemperaturversuchen unter Hochvakuum.

Das Herzstück der Anlage ist die Prüfkammer, welche doppelwandig ausgeführt ist und somit eine innenliegende Wasserkühlung ermöglicht. Die Vakuumherzeugung erfolgt zunächst mittels Drehschieberpumpe. Durch Zuschalten einer leistungsstarken Turbomolekularpumpe wird das Hochvakuum erreicht. Die Signale der Messaufnehmer werden über geeignete Schnittstellen aus der Kammer geführt. Die mechanische Last wird durch eine servohydraulische Universalprüfmaschine auf die Probe aufgebracht. Als Probenbeheizung dient eine Hochfrequenz-Induktionsanlage.

#### Rissfortschritts- und Schwellwertverhalten bei Ermüdung unter Vakuum

Abbildung 1 zeigt die Messergebnisse zweier bei 700 °C und 800 °C durchgeführter Risswachstumsversuche sowie eines bei 800 °C unter Hochvakuum durchgeführten Vergleichsversuchs an einer Nickellegierung für Gasturbinenanwendungen. Der Rissfortschritt pro Zyklus  $da/dN$  ist unter Vakuum bei niedrigen Spannungsintensitäten  $\Delta K$  teilweise über eine Größenordnung niedriger als im entsprechenden Versuch an Luft. Auch ist die Steigung der an die Messkurven angepassten sogenannten Parisgerade im Vakuumversuch höher. Unter Vakuum durchgeführte Vergleichsversuche können letztlich dazu genutzt werden, um die Schädigungsmechanismen, hervorgerufen durch Kriechen und Umgebung, zu separieren. Damit lassen sich mechanismenbasierte Modelle für Ermüdungsrissfortschritt und Lebensdauer, die eine umgebungsbedingte Schädigung berücksichtigen, zuverlässig validieren. Abbildung 2 zeigt die Anwendung eines solchen Modells auf die genannten Versuche. Aufgetragen ist der gemessene Rissfortschritt über den berechneten Werten. Es gelingt eine wesentlich einheitlichere Darstellung als mit dem zuvor verwendeten Spannungsintensitätsfaktor  $\Delta K$ .

Eine weitere Anwendung findet der Vakuumprüfstand zurzeit bei der Untersuchung kurzer Risse und der Messung des risslängenabhängigen Schwellenwerts in der Legierung Inconel 718. Dazu werden an SENT-Proben (engl. single edged notched tension) Risse durch Druckanschwingen initiiert und daraufhin Schwellenwertversuche durchgeführt, in denen die Last stufenweise gesteigert wird. An diesen Versuchen wird der intrinsische Schwellenwert, unterhalb dessen auch ein kurzer Riss nicht wachstumsfähig ist, sowie der Übergang zum Langrisschwellenwert, die sogenannte zyklische R-Kurve, ermittelt. Außerdem wird ersichtlich, wie sich das Wachstum des kurzen Risses, das stark von mikrostrukturellen Hindernissen und Risschließeffekten beeinflusst wird, unter Vakuum verändert. Da die auftretenden Risschließeffekte vom Belastungsverhältnis abhängig sind, werden sowohl Zug-Druck als auch Zug-Schwellbelastungen untersucht.

Zur Messung des Rissfortschritts wird eine Wechselstrom-Potenzialsonde verwendet. Damit können Risslängenzuwächse im unteren Mikrometerbereich detektiert werden. Im Rahmen dieses Vorhabens werden neben dem geschmiedeten Material des Versuchswerkstoffes auch gegossene und 3D-gedruckte Varianten untersucht und miteinander verglichen. Um weitere Erkenntnisse über das Schädigungsverhalten zu erhalten, soll zukünftig eine hochauflösende Messkamera innerhalb der Prüfkammer installiert werden. Mittels digitaler Bildkorrelation ist damit auch eine lokale Verformungsmessung möglich.

Stefan Eckmann, Mathis Bellmer

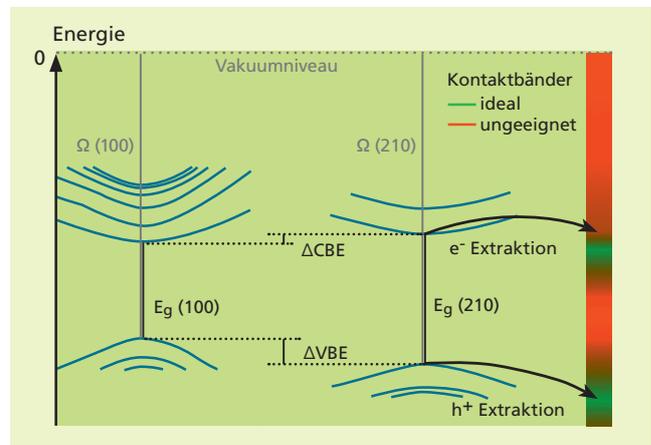
## MASSGESCHNEIDERTE MATERIALGRENZFLÄCHEN FÜR OPTIMALE BAUTEILEIGENSCHAFTEN

Kontakte verbinden zwei Komponenten, die sich durch unmittelbare Nähe gegenseitig beeinflussen und dadurch eine neue Einheit bilden. An der Kontaktfläche zweier Feststoffe treffen Materialoberflächen unterschiedlicher Kristallordnung und chemischer Zusammensetzung aufeinander und bilden eine Grenzschicht aus. Diese kann das chemische und physikalische Verhalten des Materialverbunds dominieren. In polykristallinen Gefügen treten zwischen unterschiedlich orientierten Kristalliten ebenfalls Grenzflächen auf, die sogenannten Korngrenzen. Auch freie Oberflächen sind Grenzflächen zwischen Werkstoffen und der Umgebungsluft.

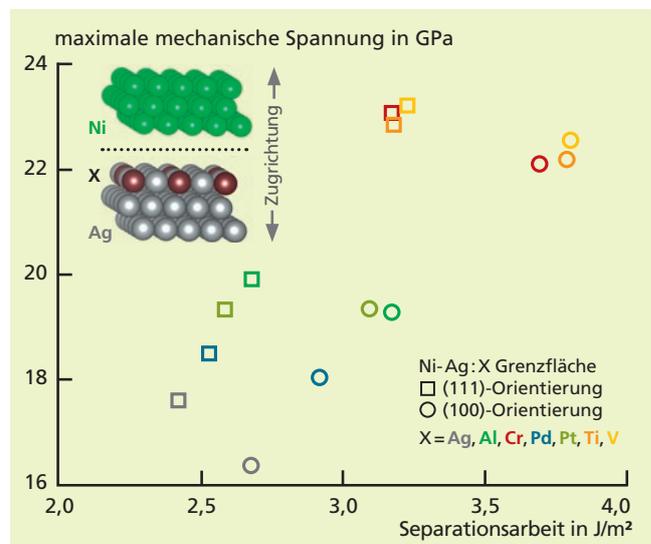
Atomar aufgelöste Strukturen experimentell zu beobachten, bleibt eine Herausforderung. Um Oberflächen isoliert zu betrachten, werden spezielle Untersuchungsmethoden im Ultrahochvakuum benötigt. Die meisten technisch relevanten Grenzflächen sind zudem Phasengrenzen in fest/fest-, fest/flüssig- oder flüssig/flüssig-Stoffgemischen, deren experimentelle Charakterisierung schwierig ist. Hier bieten atomistische Simulationen im Rahmen der Dichtefunktionaltheorie ein geeignetes Werkzeug, um diese Grenzflächen theoretisch zu untersuchen und deren Effekte zu verstehen.

### Atomare Simulation von Grenzflächeneigenschaften

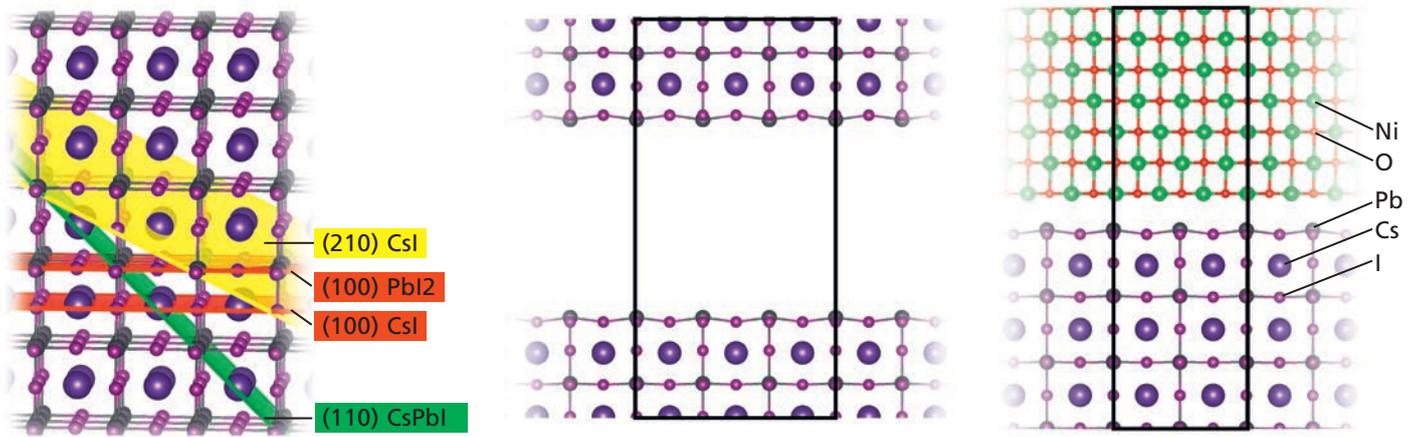
Um atomistische Strukturmodelle von Materialoberflächen zu konstruieren, muss ein Material zunächst entlang einer bestimmten Richtung entzweigeschnitten werden (Abbildung 3 links). Die entstehende Oberfläche des Materials ist abgesehen von der Schnittrichtung ebenso von der Schnittstelle abhängig. Je nach Kristallstruktur sind verschiedene Terminierungen möglich, das heißt unterschiedliche abschließende Atomlagen. Die Möglichkeiten an Schnitt Ebenen und Schnittpositionen sind für jedes Material unendlich.



1 Banddiagramm (schematisch) für (100)- und (210)-Oberflächen eines Perowskitabsorbermaterials, mit Austrittsarbeit  $\Omega$ , Bandlücke  $E_g$  und Änderungen von Valenzbandkante  $\Delta VBE$  und Leitungsbandkante  $\Delta CBE$ .



2 Abhängigkeit der Nickel-Silber-Grenzflächenhaftung von der Zugabe unterschiedlicher Legierungselemente (X), ermittelt durch Simulation idealisierter Zugversuche.



3 Oberflächenschnitte (links), die zu Oberflächensystemen (Mitte) führen, die schließlich zu Grenzflächen (rechts) kombiniert werden.

Allerdings ist jeder Schnitt mit Energieaufwand verbunden, da hierfür atomare Bindungen gespalten werden und an den Oberflächen ungesättigte Elektronenumgebungen zurückbleiben (Abbildung 3 Mitte). Nur Oberflächenstrukturen mit möglichst niedrigem Energieaufwand sind praktisch relevant.

Bringt man zwei freie Oberflächen zusammen, um eine Materialgrenzfläche zu formen, so ergeben sich weitere Freiheitsgrade der relativen Verschiebung und Verdrehung zueinander (Abbildung 3 rechts). Auch hier lässt sich eine energetische Hierarchie der Vielzahl an möglichen Strukturen für Korn- und Phasengrenzen aufstellen. Für die Eigenschaften von Materialgrenzflächen sind die oben genannten Faktoren (Missorientierung und Terminierung) beider Oberflächen relevant. Sie bestimmen beispielsweise maßgeblich die optoelektronischen Eigenschaften von Solarzellen oder die mechanische Haftung von Schutzbeschichtungen.

### Elektronische Eigenschaften von Absorbermaterialien in Perowskitsolarzellen

Die Fraunhofer-Institute IWM, ISE, ISC, IWKS, IST und IMWS arbeiten im Fraunhofer-Leitprojekt MANITU an der Optimierung neuartiger Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen. Nach der erfolgreichen Demonstration der Funktionsweise im Labor und schneller Steigerung des Wirkungsgrades geht es nun an die Optimierung der technischen Umsetzung solcher Zellen. Hierfür müssen geeignete Absorbermaterialien evaluiert und auftretende Grenzflächen zu Kontaktmaterialien optimiert werden. Mit unseren Simulationen freier Oberflächen können wir Austrittsarbeiten berechnen, um für den Transport von Elektronen oder Löchern geeignete Kontaktmaterialien auszuwählen (Abbildung 1). Zusätzlich können wir so überprüfen, ob es durch die Ausbildung der experimentell beobachteten Oberflächen zu unerwünschten elektronischen Zuständen

in der Bandlücke kommt, welche die Funktionsweise der Solarzelle stören. Mit diesen Informationen nehmen wir mit unseren Partnern geeignete Materialmodifikationen vor.

### Schichthftung einer Dünnschichtmetallisierung

Für die elektrische Kontaktierung von SiC-Hochleistungselektronikchips wird üblicherweise eine Metallisierung in Form einer Abfolge dünner Schichten unterschiedlicher Metalle aufgebracht. Diese sollte einen guten Ohmschen Kontakt ermöglichen, mechanisch fest haften und die Interdiffusion störender Fremdatome unterbinden. Im Fraunhofer-Vereinbündelprojekt MESIC arbeiten wir an der Entwicklung einer solchen Metallisierung, die besonders hohe thermische Belastungen aushalten kann, ohne mechanisch abzutrennen oder sich chemisch umzuwandeln. Virtuelle Zugversuche helfen dabei, geeignete Legierungselemente ausfindig zu machen, die eine Erhöhung der mechanischen Haftung der Metall-Metall-Grenzflächen erzielen (Abbildung 2). Hierfür dienen die zu leistende Separationsarbeit und die dabei auftretende maximale mechanische Spannung als Kenngrößen, die mithilfe der Simulationen ermittelt werden. Ein systematisches numerisches Screening der infrage kommenden Legierungszusätze ermöglicht es, diese Kenngrößen zu maximieren und dabei die notwendige Anzahl an experimentellen Probenbeschichtungen und Temperaturlagerungen zu reduzieren.

Dr. Julian Gebhardt, Dr. Daniel Urban

# KERNKOMPETENZ

## WERKSTOFF-, OBERFLÄCHEN- UND BAUTEILCHARAKTERISIERUNG

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

### **Werkstoffe und Werkstoffverbände in ihrer inneren Struktur erfassen und lokale Mechanismen und das globale Verhalten analysieren**

Die Voraussetzung, um Lösungen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Werkstoffen und Bauteilen zu finden, ist, Werkstoffe in ihrer inneren Struktur zu erfassen. Das Fraunhofer IWM untersucht die Reaktion von Werkstoffen, Werkstoffverbänden und Bauteilen auf mechanische, thermo- und chemomechanische sowie tribologische Belastungen und klärt Verformungs- und Versagensmechanismen auf. Die Werkstoffmechanismen und Werkstoffkennwerte erfasst und bewertet es in Korrelation zur Mikrostruktur und zu strukturverändernden Prozessen auf allen Größenskalen, und es strukturiert Werkstoffdaten zukunfts-fähig. Auf dieser Basis betreibt das Fraunhofer IWM Materialentwicklung sowie Prozess- und Verfahrensentwicklungen. Eine besondere Stärke des Fraunhofer IWM ist, komplexe, über standardisierte Verfahren hinausgehende Prüf-, Mess- und Analysemethoden zu entwickeln und

anzuwenden. Die Grundlagen dazu sind zum einen mechanische Prüftechniken für ein sehr breites Spektrum an Temperatur-, Umgebungs- und Kraftbereichen, Belastungsgeschwindigkeiten sowie Größenskalen und zum anderen die Expertise bei der Auswahl werkstoff- und einsetzgerechter Methoden der Charakterisierung und der Bewertung von Schädigungsentwicklungen. Die Bauteilprüfung berücksichtigt lokal unterschiedliche Werkstoffeigenschaften. Zudem werden bruchmechanische Fehlerbewertungen und Schadensanalysen durchgeführt, mehrachsige Beanspruchungszustände erfasst und bewertet sowie lokale Kennwerte durch Mikroprüftechniken und Gefügeanalytik ermittelt. Das Portfolio ist ergänzt durch verschiedene hochauflösende Eigenspannungsanalysetechniken und thermophysikalische und thermomechanische Charakterisierungen.

### **Mess- und Analysemöglichkeiten**

Das Fraunhofer IWM arbeitet mit der modernsten am Markt verfügbaren Geräteausstattung und entwickelt spezifische Versuchsstände für individuelle Kundenanfragen.

#### **Statische, zyklische und dynamisch schlagartige Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung**

- Dehnratenabhängigkeit mit Schnellzerreißmaschinen, Fallwerken und Kerbschlagbiegeversuchsständen
- Statische Festigkeit, Mehrachsigekeitsparameter, Schwingfestigkeit, Bruchzähigkeit, Rissfortschritt und Torsionsfestigkeit mit servohydraulischen, elektrodynamischen und elektromechanischen Prüfmaschinen
- Fretting Fatigue zum Beispiel mit kombinierter Aufbringung geregelter Längs- und Querkräfte

- Bauteilfestigkeit mit einem Spannungsfeld mit servohydraulischen Zylindern und Torsionszylindern
- E-Modul, Speichermodul, Verlustmodul und Glasübergang mit dynamischer mechanischer Analyse
- Eigenfrequenzen, Modalanalyse, Vibrationsprüfung und Schocktests mit klimatisierter Shakeranlage
- Dehnungsfeldanalysen durch Bildkorrelation
- Schädigungsentwicklung durch Thermographie und weiterführende Datenkorrelationen und Analysen
- Kriechverhalten mit temperierten und klimatisierten Prüfständen

#### **Thermomechanische Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung**

- Ermüdungslebensdauer, Fließgrenze, Zugfestigkeit, E-Modul und Rissfortschritt mit mechanischen beziehungsweise servohydraulischen Prüfmaschinen



*Ein nützliches Standardverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen in Proben: die inkrementelle Bohrlochmethode.*

#### **Mikromechanische Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung**

- E-Modul, Schwingfestigkeit und Probeneigenfrequenz, die sich mit dem Ermüdungsfortschritt ändert, sowie Kriechwiderstand mit Mikrozugapparaturen
- Position, Verschiebung und Dehnung mit Kameras, Mikroskopen, Rasterelektronenmikroskopen und digitaler Bildkorrelation
- Dynamische Mikroprüfung über fünf Größenordnungen der Dehnrate mit lokaler Dehnungsmessung durch Bildkorrelation und Hochgeschwindigkeitsvideo

#### **Thermophysikalische Werkstoffeigenschaften**

- Spezifische Wärmekapazität und quantitative Bestimmung von exothermen und endothermen Reaktionen mit Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC)
- Thermische Längenänderung und Bestimmung von Längenausdehnungskoeffizienten, Phasenumwandlungen und Umwandlungstemperaturen sowie temperaturabhängiger Dichteänderung mit thermomechanischem Analysator
- Temperaturleitfähigkeit mit Laser-Flash-Apparatur (LFA) mit verschiedenen Gasatmosphären und Vakuum
- Thermomechanische Eigenschaften von Metallen mit »Gleeble 3150« in Gasatmosphären und im Hochvakuum
- Bauteilgeometrie mit 3D-Laserscanner zum optischen Scannen und berührenden Abtasten von Bauteilen, Auswertesoftware vergleicht direkt zwischen Scan und CAD-Teil

#### **Chemomechanische Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung Hochvakuum**

- Wasserstoffgehalt, Sauerstoffgehalt mit Wasserstoffbeziehungswise Sauerstoffanalysator
- Wasserstoffgehalt, Bindungsenergien von Wasserstoff-Fallen, Unterscheidung von unterschiedlich stark getrapptem Wasserstoff mit Heißextraktions-Analysator für diffusiblen Wasserstoff / Thermische Desorptionsspektroskopie
- Diffusionskoeffizienten, kinetische Konstanten der Wasserstoff-Fallen (Trap- und Release-Rate) mit Permeationsprüfstand

- Mechanische Eigenschaften bei Wasserstoffversprödung: Zug-, Kerbzug-, Ermüdungs-, Rissausbreitungsversuche sowie mechanisches Verhalten beschichteter Proben mit servomechanischen Prüfmaschinen

#### **Metallographie (Mikrostrukturaufklärung)**

- Chemische Zusammensetzung mit Tiefenprofilspektrometer GDOES
- Härte mit diversen Härtemessgeräten, Verfahren nach Vickers, Brinell, Knoop, Rockwell, Shore A; Nanohärte mit Nanoindenter (Vickers oder Kugeleindruck)
- Lokale chemische Zusammensetzung mit EDX, EDAX an definierten Punkten, entlang Linien oder mittels Elementmapping
- Partikel- und Porenanalyse (Volumenanteil, Größenverteilungen, Formfaktoren) mit Lichtmikroskopen mit Bildverarbeitungssystemen
- Kristall- und Kornorientierung, Textur, Korndeformation, Darstellung von Orientierungskarten mit EBSD

#### **Röntgenographische Eigenspannungsmessungen**

- Eigenspannung, Textur, Phasenanalyse (speziell Restaustenit) und Tiefenverläufe mit stationären Röntgendiffraktometern für Metalle, Keramiken und unterschiedliche Phasen
- Eigenspannung mit mobilen Röntgendiffraktometern für Metalle, Keramiken und unterschiedliche Phasen
- Eigenspannungs-Mapping auf Messspuren bei komplizierter Oberflächengeometrie mit Roboter-Diffraktometer
- Eigenspannungstiefenverläufe mit Bohrlochgeräten und Ringkerngerät

#### **Pulvertechnologische Werkstoffbewertung**

- Fließverhalten mit Trichterausflussversuch
- Schüttwinkel mit Schüttwinkelmesser
- Füllgrad mit Füllversuch
- Verdichtungsverhalten, Wandreibung mit instrumentierter Matrize
- Sinterschwindung mit Lastdilatometer

# KERNKOMPETENZ

## WERKSTOFFMODELLIERUNG UND SIMULATION

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

### Werkstoffeigenschaften in Modelle umsetzen

Werkstoffmodelle und Simulationswerkzeuge sind notwendig, um Versuch-und-Irrtum-Schleifen in der Entwicklung von Werkstoffen, Bauteilen und Fertigungsverfahren zu vermeiden, komplexe Belastungsszenarien abzubilden oder zuverlässige Voraussagen zum Einsatzverhalten von bestehenden und in der Entwicklung befindlichen Werkstoffen und Bauteilen zu treffen.

Die relevanten Werkstoffeigenschaften ermittelt das Fraunhofer IWM meist experimentell, es bestimmt die zugehörigen Modellparameter und entwickelt Methoden und Algorithmen. In virtuellen Testlabors werden die Eigenschaften von Werkstoffen sowie die Sicherheit und Lebensdauer von Bauteilen vorhergesagt. Mit der Prozesssimulation werden Fertigungsparameter und Werkzeuge für optimale Bauteileigenschaften angepasst.

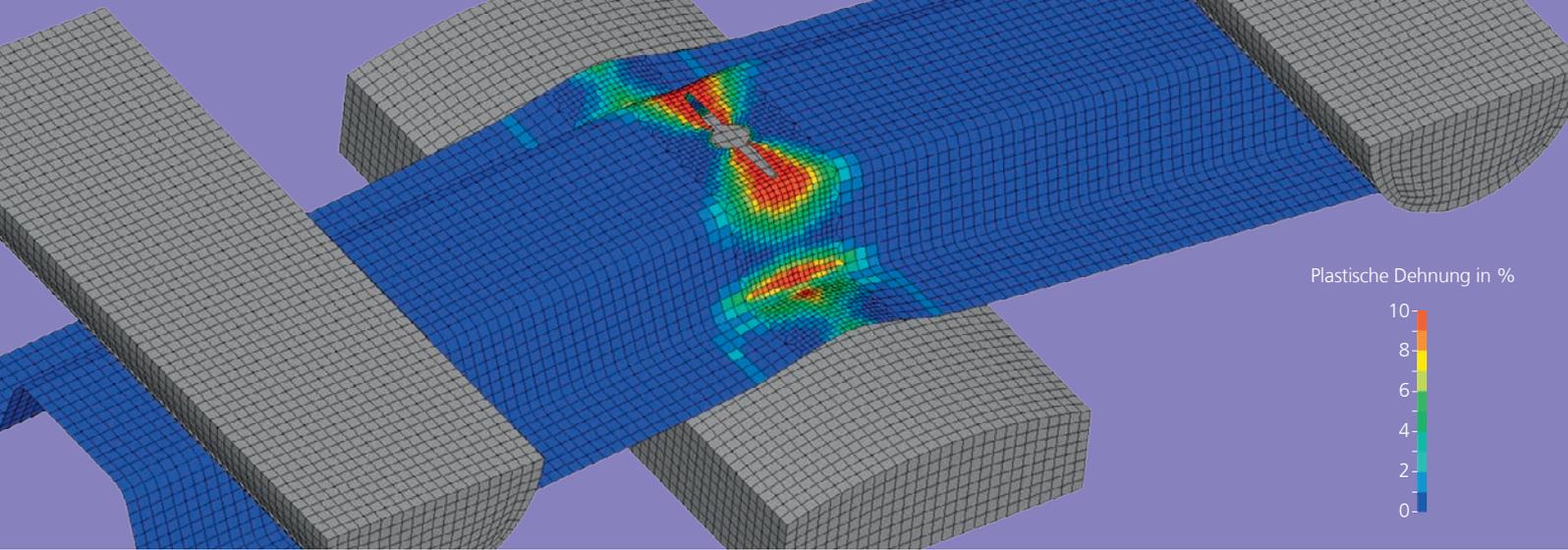
Das Fraunhofer IWM beschreibt entsprechendes Verformungs-, Schädigungs-, Bruch- und Funktionsverhalten von Werkstoffen und modelliert Mechanismen auf der Makro-, Mikro-, Meso- und Nanoskala bei Belastung von Bauteilen oder Materialsystemen wie Festkörpern, Flüssigkeiten, Pulvern oder Verbundwerkstoffen.

Das Kompetenzspektrum des Fraunhofer IWM reicht von der Quantenmechanik, Molekulardynamik bis zu Computational Physics, von Homogenisierungsmethoden bis zu Kontinuumsmodellen. Im Rahmen der Kontinuumsmechanik, der Materialtheorie, der Bruchmechanik und der Thermodynamik beschreiben wir das Verhalten von Werkstoffen auf makroskopischer Skala bis hin zu Fertigungsprozessen und Bauteilverhalten. Darin eingeschlossen sind Fragestellungen, die zu den Mehrfeldproblemen zählen: Exemplarisch seien hier Werkstoffe unter thermomechanisch oder -elektrisch gekoppelten Belastungszuständen genannt.

Entscheidend für signifikante Verbesserungen und Innovationen bei Funktionalität, Zuverlässigkeit, Lebensdauer oder Wirtschaftlichkeit sind die integrale Betrachtungsweise beziehungsweise die Kopplung von Informationen aus verschiedenen Skalen und das Verfolgen der Veränderung von Werkstoffeigenschaften über mehrere Prozessschritte hinweg. Integrated Computational Materials Engineering (ICME) oder Integrierte Computergestützte Materialentwicklung ist das Werkzeug zur quantitativen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Prozessschritten, Materialmikrostruktur, Materialeigenschaften und Bauteilverhalten. Mit ICME kann die Veränderung der Werkstoffeigenschaften während des gesamten Bauteilentstehungsprozesses und während des Betriebs verfolgt und numerisch beschrieben werden. Auf dieser Basis kann das Fraunhofer IWM Schwachstellen in der Prozesskette und während der Lebensdauer ermitteln und beseitigen. Die digitale Repräsentation von Werkstoff- und Bauteilzuständen sowie relevanter Prozesse in Form von Digitalen Zwillingen und die Entwicklung von ontologiebasierten Datenräumen verbessert unsere Möglichkeiten signifikant. Durch die Sicherstellung der Interoperabilität wird die Kopplung von Daten und Simulationsmethoden vereinfacht.

Beispielhafte Fragestellungen, die mit ICME gelöst werden können, sind:

- das Design von Werkstoffen
- die Berechnung der Mikrostrukturentwicklung
- die virtuelle Ermittlung von Materialdaten und die Entwicklung geeigneter Materialmodelle
- die virtuelle Vorhersage und reale Voreinstellung von Bauteileigenschaften wie Rissfreiheit, Konturgenauigkeit, Lebensdauer oder Crashfestigkeit
- die Optimierung von Werkzeugen und Prozessschritten zur Steigerung der Fertigungsausbeute



*Simulation eines 3-Punktbiegeversuchs an einem gelochten Bauteil zur Validierung eines Modellierungsansatzes für die Berücksichtigung von Kerbeffekten in der Crashsimulation.*

## Methoden

Für die Simulation nutzen wir einerseits kommerzielle und andererseits eigenentwickelte Software. Bei der Lösung der Simulationsaufgaben arbeiten wir mit:

- numerischen Methoden wie derjenigen der Finite-Elemente-, der Finite-Differenzen- und Finite-Volumen-Methode
- netzfreien Methoden wie der Diskrete-Elemente-Methode
- Parameteridentifikation
- Maschinellem Lernen
- thermokinetischen Simulationen
- Hochdurchsatzmethoden, High-Throughput-Screening

Insgesamt stehen Werkstoffmodelle für Metalle, Keramiken, Gläser, Verbundwerkstoffe, Halbleiter und biologische Materialien zur Verfügung. Hierzu zählen mikromechanische Modelle zur Vorhersage der duktilen Schädigung in Metallen, Modelle zur Darstellung des Verhaltens von Metallen und Kunststoffen sowohl bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten als auch unter Kriechbeanspruchung sowie Sprödbbruchmodelle für hochfeste Stähle, Gusswerkstoffe, Keramiken, Gläser, Silizium und Verbindungshalbleiter. Wir beschreiben Mechanismen auf atomarer, mikrostruktureller oder makroskopischer Skala: Verformung, Verschleiß, Verfestigung, Ermüdung, Crash, Kriechen, Alterung, Schädigung, Versagen, Piezoeffekte, Diffusion, Migration, Phasenbildung und Gefügeentwicklung. Mit High-Throughput-Methoden finden wir effizient neue Materialien.

Für unsere Simulationen steht ein High-Performance Computing Cluster zur Verfügung.

## Simulationen zu Werkstoffeigenschaften und Werkstoffentwicklung

- Quantenmechanische Berechnungen und atomistische Simulationen von Werkstoffeigenschaften
- Mikrostruktur-Eigenschaftsbeziehungen
- Probabilistische Werkstoffsimulation
- Simulation von Verbundwerkstoffen
- Werkstoffverhalten unter Hochtemperatur
- Reibungs- und Verschleißprozesse

## Simulation des Bauteilverhaltens

- Probabilistische Bauteilsimulation
- Bruchmechanische Simulation rissbehafteter Bauteile
- Bauteilverhalten unter Hochtemperatur
- Verhalten von Schweißverbindungen
- Verhalten von Fügeverbindungen
- Crashsimulation metallischer Werkstoffe, Verbundwerkstoffe und Klebstoffe
- Vorhersage der Sicherheit und Lebensdauer von Bauteilen

## Fertigungs- und Prozesssimulation

- Mikrostrukturentwicklung
- Gefügeausbildung
- Wärmebehandlung
- Werkstoffdegradation
- Umformsimulation und Simulation umformtechnischer Prozessketten
- Simulation von Glasformgebungsprozessen
- Schweißsimulation
- Simulation von Fügeprozessen
- Schichtwachstumssimulation
- Partikel- und Strömungssimulation
- Simulation pulvertechnologischer Fertigungsschritte (Pulverschütten, Matrizenpressen, Sintern, Folien gießen, additive Fertigung)

# KERNKOMPETENZ

## TRIBOLOGIE UND OBERFLÄCHENDESIGN

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

### Oberflächen für mehr Funktionalität und Leistungsfähigkeit

Bauteiloberflächen bestimmen oftmals die Funktionalität des damit verbundenen technischen Systems – an ihnen greifen häufig Beanspruchungen im Einsatz an. Das Fraunhofer IWM verfügt über fundiertes Know-how, Methoden und Verfahren, um die Oberflächen von Bauteilen und Komponenten hinsichtlich geforderter Eigenschaften einzustellen: niedrige Reibwerte, verbesserte Beständigkeit oder eine optische Anmutung. Am Anfang einer kundenspezifischen Entwicklung steht meist die Aufklärung oberflächenbedingter Versagensmechanismen. Eine besondere Stärke des Fraunhofer IWM ist dabei die Begleitung der experimentellen Arbeiten mit vielfältigen Simulationsmethoden auf der Nano- und

Mesoskala. Mit atomistischen DFT-Rechnungen können Vorhersagen zu Schicht- und Grenzflächeneigenschaften erstellt und material- und mikrostrukturabhängige Trends, beispielsweise zur Schichthftung oder Diffusion, abgeleitet werden. Mit thermodynamisch-kinetischen Berechnungen der Interdiffusion zwischen verschiedenen Schichten oder zwischen Schicht und Substrat können im Einsatz veränderliche intermetallische Phasen berechnet werden. Basierend auf diesen Informationen können für die Schicht- und Verfahrensentwicklung zum Beispiel Wärmebehandlungen bewertet, Schichteigenschaften vorhergesagt und Aussagen zur Langzeitstabilität der Schichten getroffen werden.

### Mess- und Analysemöglichkeiten

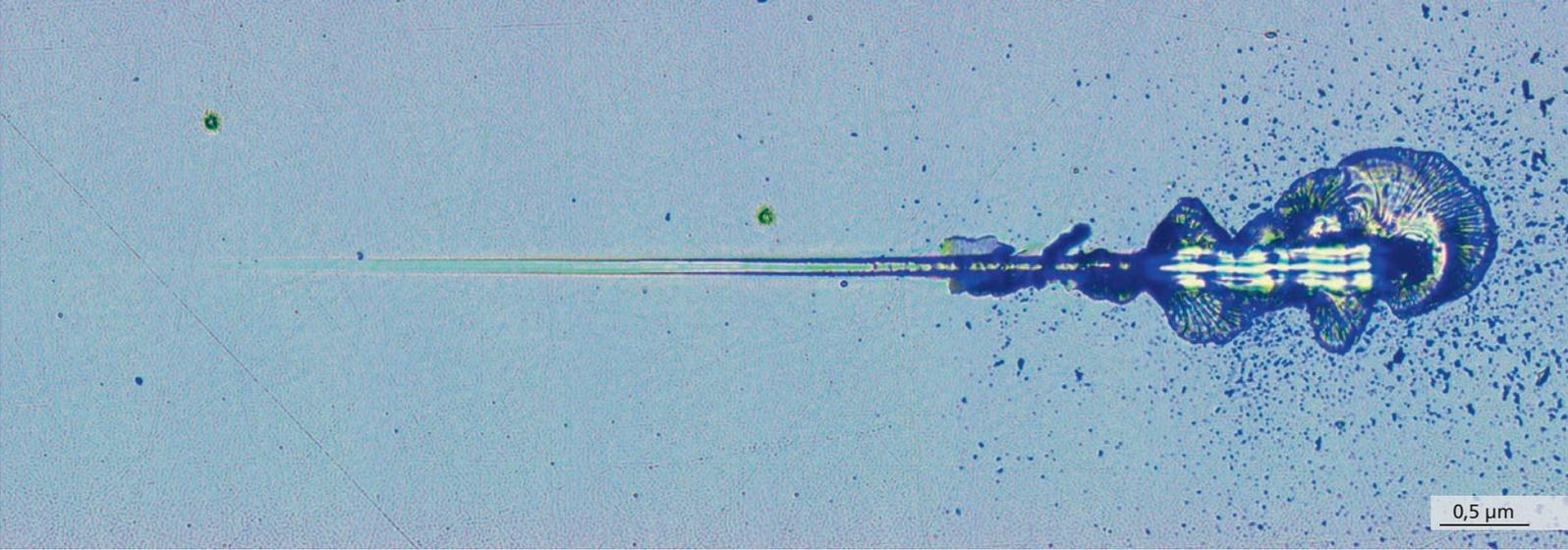
Das Fraunhofer IWM arbeitet mit modernen Geräten und Instrumenten und entwickelt darüber hinaus spezifische Versuchsstände für individuelle Kundenanfragen.

#### Oberflächenfunktionalisierungen: Charakterisierung und Steuerung von Verschleiß, Benetzungsverhalten, optischer Anmutung, Glanzgrad oder Haptik von Bauteiloberflächen

- Kontur- und Oberflächentopographiemessungen mit Rasterkraftmikroskop (AFM), Rasterelektronenmikroskop (REM), Profilometer und Rauheitsmesseinrichtung, Lichtmikroskop, Konfokal-Laserscanningmikroskop (CLSM), Weißlichtinterferometer (WLI), Phasenschieber-Interferometer
- Oberflächenleitfähigkeit und wellenlängenabhängige Messung von Reflexion, Transmission und Farbe mit Hochohm-Widerstandsmessgerät, 4-Punkt-Widerstandsmessung, Glasfaserspektrometer und Wellenfrontmessplatz
- Beschichtung und Plasmabehandlung von Oberflächen mit reaktivem Magnetron-Sputtern (HF, DC, Puls-DC), Ionenstrahltechniken, Elektronenstrahlverdampfer, PECVD-Anlagen und Plasmaätzer

#### Chemisch-mechanische Eigenschaften: Bewertung, Anpassung und Optimierung der Korrosionsstabilität, Adhäsion, Katalyse, Materialverträglichkeit, Diffusivität von Bauteiloberflächen

- Erfassung der chemisch-strukturellen Zusammensetzung von Komponentenoberflächen und Schichten, orts aufgelöst, tiefenabhängig sowie Phasenanalysen mit konfokalem Raman-Mikroskop, FTIR-Spektrometer, ICP-OES (optische Emissionsspektroskopie), Glimmentladungsspektrometer (GDOES), energiedispersive Röntgenanalyse, Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) und Quadrupolmassenspektrometer
- Röntgendiffraktometer (XRD) zur Strukturaufklärung und zu Eigenspannungsanalysen, Röntgenreflektometrie (XRR) zur Dünnschichtanalyse; hochauflösendes EBSD gekoppelt mit EDX zur Phasenanalyse
- Messung von Oberflächenenergien und Kontaktverhalten mit Prüfständen für Glas- und Kunststoffkontakt sowie Kontaktwinkelmessgerät mit Temperaturmesszelle
- Untersuchung des Korrosionsverhaltens mit Atlas-Zellen-Prüfstand (cold wall effect), Hochspannungsporenprüfgerät, Prüfstand für elektrochemisches Rauschen, Elektrolysezelle



*Linearscratch auf DLC-Schicht zur Schichthaftungsmessung.*

zur Messung der Wasserstoffdiffusion und Prüfstand zur Korrosion in heißen Salzschnmelzen

- Erfassung der chemischen Zusammensetzung von Flüssigkeiten und Gasen durch ICP-OES (optische Emissionsspektroskopie) und Quadrupolmassenspektrometer
- Gaspermeationsprüfstand zur temperaturabhängigen Messung der H<sub>2</sub>-Diffusion durch Membranen und Schichten; Elektrochemischer Permeationsprüfstand zur Messung der H<sub>2</sub>-Diffusion
- Präparation von Schlifren zur Darstellung und Untersuchung von Schichtfolgen
- Anwendungsspezifisch angepasste Oberflächenkonditionierung mit Beschichtungen, Strahlprozessen (Metalle, Keramiken) und Wärmebehandlungsverfahren

**Mechanische Eigenschaften: Optimierung von Tribo-  
paarungen, Bestimmung von Reibwert, Verschleißbe-  
ständigkeit, Notlaufeigenschaften, Schmierstoffstabilität,  
Frettingverhalten von Bauteilen im Einsatz**

- Untersuchung des tribologischen Verhaltens mit anwendungsspezifisch angepassten Triboprüfständen: Kolbenring-Liner-Simulator mit RNT (Radionuklid-Technologie), Stift-Scheibe-Tribometer mit RNT-Technologie, Gleitlager- und Komponentenprüfstand mit RNT, Stift-Scheibe-, Wälzverschleiß und Kugellagerprüfstand, oszillierende Gleitverschleißprüfeinrichtung, Mikrotribometer, Tribokorrosionsprüfstand, Hysitron Triboindenter TI 950, Oberflächentester Tetra BASALT MUST, BASALT HOMAT, selbstentwickelte UHV-Mikrotribometer und Multiskalentribometer, Eistribo-meter, Rheometer, Motorenprüfstand
- Tribometerfarm zur simultanen Testung von Reibpaarungen z. B. zur Schmierstoffentwicklung
- Messung der mechanischen Eigenschaften von Randschichten und Beschichtungen wie Schichtdicke, Härte, Haftung, Eigenspannungen und E-Modul mit Schichtdickenmessung

(Wirbelstrom, magnetinduktiv), ScanningScratchTest (SST), Abreißtest, Nanoindenter, Rockwell-Eindruck, Kugelein-  
druck, Zygo-Interferometer zur Verwölbungsmessung,  
Kugelschlag-Test und Mikromechanikprüfstände

**Beschichtung und Konditionierung von Oberflächen**

- Erarbeitung und Aufbringung anwendungsspezifisch ange-  
passter Beschichtungen, gegebenenfalls in Kombination  
mit geeigneter Oberflächenkonditionierung mit reaktivem  
Magnetron-Sputtern (HF, DC, Puls-DC) mit HF-Substrat-  
Biasing (Substrattemperaturen bis 1 000 °C), Ionenstrahltech-  
niken, Elektronenstrahlverdampfer, PECVD-Anlagen, Plasma-  
CVD-Beschichtungsanlage CCP/ICP, Mehrkammerbeschich-  
tungsanlage für Multilagenschichtungen und Hybrid-  
schichten, Plasmaätzenanlage, nasschemische Beschichtungs-  
anlage (Spin-Coating, Rakelbeschichtung, Tauchbeschich-  
tung), Ionenätzenanlage zur Probenpräparation und Ober-  
flächenbearbeitung, Ultra-Präzisionsdreh-, -schleif- und  
-fräsmaschine zur Diamantbearbeitung von Formgebungs-  
werkzeugen, Kugelstrahlanlage zur Verfestigung und Struk-  
turierung von Oberflächen

**Oberflächendesign und Funktionalisierung durch Mikro-  
strukturierung mithilfe von Zwei-Photonen-Lithographie**

- Konstruktion und Herstellung von hoch aufgelösten und  
detailgetreuen Mikrostrukturen auf festen oder flexiblen  
Substraten. Damit kann eine Anpassung der Oberflächen-  
struktur realisiert werden und somit die Benetzbarkeit gezielt  
eingestellt werden (Nanoscribe Photonic Professional GT).
- Entwerfen von Mikrobauanteilen, die unter bestimmten  
mechanischen Belastungen komplexe Reaktionen zeigen  
und damit wie ein technisches System reagieren können
- Mikromechanik-Untersuchungen der additiv hergestellten  
Bauteile für Funktionsnachweise

# MITARBEIT IN INSTITUTS-KOOPERATIONEN INNERHALB DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## Fraunhofer-Verbund MATERIALS

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS bündelt die Kompetenzen der materialwissenschaftlich orientierten Fraunhofer-Institute. Er ist auch nach der kürzlichen Ausgründung des Fraunhofer-Verbunds Energietechnologien und Klimaschutz mit einem Gesamthaushalt von mehr als 500 Millionen € einer der größten Verbände in der Gesellschaft. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik umfassen bei Fraunhofer die gesamte Wertschöpfungskette, von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien und Werkstoffe über die passenden Fertigungsverfahren im quasi-industriellen Maßstab, die Charakterisierung der Eigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens. Dies gilt auch für die aus den Werkstoffen hergestellten Bauteile und Produkte und deren Systemverhalten in den jeweiligen Anwendungen.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in den Verbundinstituten setzen ihre Expertise im Kundenauftrag vor allem in den Geschäftsfeldern Mobilität, Gesundheit, Maschinen- und Anlagenbau, Bauen und Wohnen, Mikrosystemtechnik, Sicherheit sowie Energie und Umwelt ein. Neben experimentellen Untersuchungen in Labors, Technika und Pilotanlagen werden gleichrangig Verfahren der numerischen Simulation und Modellierung eingesetzt; dies über alle Skalen, vom Molekül über das Bauteil bis hin zum komplexen System und zur Prozesssimulation. Stofflich deckt der Fraunhofer-Verbund MATERIALS den gesamten Bereich der metallischen, anorganisch-nichtmetallischen, polymeren und aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugten Werkstoffe sowie Halbleitermaterialien ab. Eine große Bedeutung haben in den letzten Jahren hybride Materialien und Verbundwerkstoffe gewonnen.

*Verbundvorsitzender*  
*Prof. Dr. Peter Gumbsch*  
[www.materials.fraunhofer.de](http://www.materials.fraunhofer.de)

## 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 Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM

Das Exzellenzcluster entwickelt Programmierbare Materialien exemplarisch in sechs Themenschwerpunkten, die sich auf Transporteigenschaften, mechanische Materialeigenschaften, Produktentwicklung und Fertigung fokussieren.

Das Fraunhofer IWM nimmt im Exzellenzcluster eine zentrale Rolle ein: Es stellt die Geschäftsstelle und steht für zwei der sechs Themenschwerpunkte: »Programmierbare Reibung« sowie »Programmierbare Formänderung und Mechanik«.

*Prof. Dr. Chris Eberl*  
[www.cpm.fraunhofer.de](http://www.cpm.fraunhofer.de)

## Fraunhofer Cluster of Excellence Advanced Photon Sources CAPS

Ultrakurzpuls laser versprechen erstaunliche Möglichkeiten, die jedoch durch die bislang geringe Laserleistung limitiert ist. Um Laserquellen und Prozesstechnik für Leistungen bis 20 kW zu entwickeln, hat die Fraunhofer-Gesellschaft das Cluster of Excellence Advanced Photon Sources CAPS gegründet. Das Ziel ist die internationale Technologieführerschaft bei Lasersystemen, die mit ultrakurzen Pulsen (UKP) höchste Leistungen erreichen, sowie die Erforschung ihrer Einsatzpotenziale, der Prozesstechnik und möglicher Anwendungen. Im Zusammenhang der Aktivierung von Stickstoffdefekten in Diamant mit EUV-Strahlung modelliert das Fraunhofer IWM neue Materialien und entwickelt multifunktionale Werkstoffe.

*Prof. Dr. Christian Elsässer*  
[www.caps.fraunhofer.de](http://www.caps.fraunhofer.de)



*Durch additive Fertigung Materialien anwendungsorientiert designen.*

### **Fraunhofer-Forschungsfeld Leichtbau**

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

*Dr. Michael Luke*

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

### **Fraunhofer-Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg**

Die fünf Freiburger Fraunhofer-Institute und die Albert-Ludwigs-Universität beantworten zusammen mit Industriepartnern die fachübergreifenden Forschungsfragen für eine nachhaltige Entwicklung von Wirtschaft und Gesellschaft und setzen sie in konkrete Innovationen um. Mit Projekten, Veröffentlichungen und Patenten, durch Existenzgründung mit Industriepartnern und mit umfassender Lehre und Weiterbildung am 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-Leistungszentrum Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe**

Vier Fraunhofer-Institute sowie die Fraunhofer-Projektgruppe »Neue Antriebssysteme (NAS)« erforschen mit dem Institut für Technologie der Hochschule Karlsruhe und dem FZI Forschungszentrum Informatik Themen zu effizienter, intelligenter und integrierter Mobilität. Das Leistungszentrum vernetzt wichtige Akteure aus Wissenschaft, angewandter Forschung und Industrie. Die Zukunftsthemen reichen von Mobilitätsanforderungen durch Überalterung oder Urbanisierung über veränderte städtische Infrastruktur, automatisierte und autonome Mobilität

bis hin zu Leichtbau sowie (hybrid-)elektrischen und verbrennungsmotorischen Antrieben zur Effizienzsteigerung und CO<sub>2</sub>-Ausstoßminderung.

*Prof. Dr. Martin Dienwiebel*

[www.profilregion-ka.de](http://www.profilregion-ka.de)

### **Fraunhofer-Themennetzwerk Additive Fertigung**

Additive Fertigungstechniken sind konventionelle Techniken bei der Herstellung maßgeschneiderter, komplexer Bauteile und Kleinserien in Flexibilität, Arbeits- und Materialaufwand überlegen. Das Themennetzwerk widmet sich der Entwicklung, Anwendung und Umsetzung additiver Fertigungsverfahren und Prozesse sowie der dazugehörigen Materialien.

*Dr. Raimund Jaeger*

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

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

Das Fraunhofer-Themennetzwerk bearbeitet institutsübergreifende Aufgaben zur Entwicklung und Verbesserung von Simulationsverfahren. Es bündelt zudem Kompetenzen aus dem Bereich Informations- und Kommunikationstechnologie IuK, das Werkstoff- und Bauteil-Know-how sowie Wissen aus der Oberflächen- und Produktionstechnik.

*Dr. Claas Bierwisch*

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

# ANHANG

**Berechnungen katalytisch relevanter Eigenschaften atomarer Defekte in Perowskit-Anodenmaterialien für Festoxid-Elektrolysezellen**

Mutter, D.; Urban, D.F.; Elsässer, C.  
 Teilvorhaben 10: P2X – Erforschung, Validierung und Implementierung von »Power-to-X« Konzepten  
 Fraunhofer IWM, Freiburg (2020)  
 Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, 035FK210  
 Projektlaufzeit: 1.9.2016-31.8.2019

**Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation**

Schuster, L.; Sommer, S.  
 FAT-Schriftenreihe 333; FAT, Berlin (2020)  
 Förderung: Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V., AVIF A 294  
 Projektlaufzeit: 1.7.2015-31.8.2019

**Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation**

Sun, D.Z.; Fritsch, J.  
 FAT-Schriftenreihe 332; FAT, Berlin (2020)  
 Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, IGF-Vorhaben 19567 N  
 Projektlaufzeit: 1.6.2017-30.11.2019

**Dehnungsabhängige Elastizitätsmodule und weitere bestimmende Faktoren auf die Rückfederung bei der Blechumformung**

Silbermann, K.; Mauermann, R.; Butz, A.  
 EFB-Forschungsbericht 531; EFB, Hannover (2020)  
 Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, IGF-Vorhaben: 19453 N  
 Projektlaufzeit: 1.4.2017-31.12.2019

**Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für die Crashsimulation**

Gumbusch, P.; Sommer, S.; Schöbel, A.; Andrä, H.  
 FAT-Schriftenreihe 331; FAT, Berlin (2020)  
 Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, IGF-Vorhaben 19532 N  
 Projektlaufzeit: 1.5.2017-31.12.2019

**MaterialDigital – Digitalisierung: Chance für Nachhaltigkeit und Energiewende**

Schweizer, C.; Reichenbach, R.; Butz, A.; Lienhard, J.; Herrmann, T.; Preußner, J.; Hartrott, P. von; Friedmann, V.; Wessel, A.; Thomas, A.; Augenstein, E.; Oesterlin, H.; Tlatlik, J.; Bader, B.; Graf, M.; Baumann, S.; Grau, G.; Schindler, S.; Dauner, M.; Bullinger, F.; Tiberto, D.; Klotz, U.; Basler, C.; Bertz, A.; Blug, A.; Becker, A.; Goranov, A.; Burkhardt, C.; Hartmann, H.; Körte, F.  
 Fraunhofer IWM, Freiburg (2020)  
 Förderung: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, 3-4332.62-IWM/21  
 Projektlaufzeit: 1.8.2018-30.6.2020

**Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagenverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation**

Andrieux, F.; Fehrenbach, C.; Oeser, S.; Sun, D.-Z.; Ebrahimi, A.; Heuser, M.; Lehnhus, D.; Struss, A.  
 FAT-Schriftenreihe 338; FAT, Berlin (2020)  
 Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, IGF-Vorhaben 19495 N  
 Projektlaufzeit: 1.5.2017-30.4.2020

**Numerische Analyse der Materialunsicherheiten in Bauteilen mit mikroheterogenem Anteil**

Beckmann, C.  
 Fraunhofer IWM, Freiburg (2020)  
 Förderung: Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, BE 6121/1-1  
 Projektlaufzeit: 1.10.2016-30.9.2019

**Ultraglatte antiadhäsive Werkzeugbeschichtungen für Kunststoffformgebungs- und Folienverarbeitungsprozesse – GLANZFORM**

Steinhoff, B.; Burmeister, F.; Keunecke, M.  
 Fraunhofer IWM, Freiburg (2020)  
 Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, IGF-Vorhaben 19545 N  
 Projektlaufzeit: 1.5.2017-31.10.2019

**Verbesserte Blechumformsimulation durch 3D-Werkstoffmodelle und erweiterte Schalenformulierungen**

Butz, A.; Wessel, A.; Bischoff, M.; Willmann, T.  
 EFB-Forschungsbericht Nr. 532; EFB, Hannover (2020)  
 Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi, IGF-Vorhaben 19532 N  
 Projektlaufzeit: 1.5.2017-31.12.2019

**Preise und Ehrungen**

Werkstoffmechanikpreis 2020 des Fraunhofer IWM an Thomas Reichenbach für seine Arbeiten zum Thema »Atomistische Simulation zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen chemischer Oberflächenstruktur und trockener Reibung am Beispiel harter Wasserstoff- und Fluor-terminierter Kohlenstoffbeschichtungen«  
28.5.2020, online-Kuratorium des Fraunhofer IWM

EFB-Projektpreis 2020 der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. an Alexander Wessel für das IGF-Forschungsvorhaben: »Verbesserte Blechumformsimulation durch 3D-Werkstoffmodelle und erweiterte Schalenformulierungen«  
30.6.-1.7.2020, EFB-Kolloquium Bad Boll

»BestChance« 2020 Award der Fraunhofer-Gesellschaft an Dr. Rainer Kübler und Alexander Fromm für die nachhaltige Bildungspartnerschaft mit dem St. Ursula-Gymnasium Freiburg  
11.11.2020, online-Tagung der Beauftragten für Chancengleichheit

Ehrenpreis »BestChance« 2020 Award der Fraunhofer-Gesellschaft an Dr. Bärbel Thielicke für ihr außergewöhnlich hohes Engagement als Zentrale Gleichstellungsbeauftragte der Fraunhofer-Gesellschaft  
11.11.2020, online-Tagung der Beauftragten für Chancengleichheit

**Erteile Patente 2020**

Kübler, R.; Gremmelspacher, M.; Gumbach, P.; Lang, B.; Rist, T. Verfahren zum lokalen Umformen einer glatten Oberfläche eines aus Glas oder einer Glaskeramik gefertigten Substrates sowie ein mit dem Verfahren hergestelltes Bedienelement  
Patent-Nr.: US 10,730,781 B2

**Dissertationen**

Matthew Berwind\*  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Materials design: the influence of structure, size, and composition on material properties

Taymour El-Achkar\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Elementare Ermüdungsmechanismen in Metallen zur Lebensdauer-vorhersage mittels Versetzungsdynamiksimulation

Tobias Frenzel\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
On 3D Chiral Mechanical Metamaterials

Reyhaneh Gassemizadeh\*  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Ab initio study on molecular charge transport and conformational analysis of organic molecules

Lukas Gröner  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Untersuchungen zur Synthese und Mikrostruktur von Ti2AlN-Dünnschichten sowie deren Schutzwirkung auf ferritische Stähle

Richard Jana\*  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Atomistic mechanics of metallic and network glasses

Daniel Kümmel\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Einfluss laserinduzierter Veränderungen der lokalen Materialchemie auf das tribologische Verhalten von Ti6Al4V

Manitra Rakotomahefa\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Fundamentals of lubricated friction in deep drawing of zinc coated sheet metal considering contacting surface morphology and chemistry

Friederike Ruebeling\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Initiale Mikrostrukturentwicklung in Kupfer infolge einer tribologischen Belastung

Erik Schimrosczyk\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tribologische Analysen eines hochbelasteten Rastmechanismus unter unterschiedlichen kinematischen Bedingungen

Oliver Stauffert\*  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Electron-phonon coupling with density functional theory

Michael Ziemann\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Versetzungsstrukturen in tordierten Goldmikrodrähten mit einer Bambusstruktur

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

Viktor Adam  
Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft  
Automatisierung eines Ultrahochvakuumtribometers (B)

Ishak Antty  
Hochschule Offenburg  
Konstruktion einer Prüfvorrichtung zur Materialprüfung in Flüssigstickstoff mit gleichzeitiger Wasserstoffbeladung (B)

Robin Backes  
Hochschule Offenburg  
Vorhersage der Verbindungstragfähigkeit auf Basis der Prozessparameter beim Widerstandspunktschweißen mittels Machine Learning (B)

Maximilian Baur  
Hochschule Offenburg  
Finite-Elemente-Modellierung und Sensitivitätsanalyse zu porösen keramischen Schichtstrukturen für Fingergelenkimplantate (M)

Ashok Bhadeliya  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Correlation of mechanical behaviour and microstructure parameters of ductile cast iron at increased loading rates (M)

Beatrix Bieber\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gefügeeinstellung und tribologische Grundlagenuntersuchung von NiCoCr (B)

Sebastian Birnkammer  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Untersuchung des Einlaufverhaltens von amorphen Kohlenstoffschichten (M)

Fatih Bosna  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Assessment of macroscopic orientation models based on microscopic smoothed particle hydrodynamics simulations of suspensions containing fibers and spheres (M)

Harun Candan  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Graphit und Graphen: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf Reibung und Verschleiß (B)

Surya Chennareddy  
Universität Duisburg-Essen  
Parameter optimization with similarity measure as a comparison criterion of a non-linear viscoelastic material model for FEM-simulations (M)

Yakub Demirel  
Hochschule Offenburg  
Tribologische Untersuchungen von ionischen Flüssigkeiten und Graphen als Schmierstoffadditiv bei Tieftemperaturen (B)

Micha Dietrich  
Hochschule Offenburg  
Untersuchung des magnetischen Asymmetrie-Effektes bei der Herstellung von DLC-Schichten mittels PECVD-Verfahren (B)

Amey Abhay Dukle  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Classification of mechanical metamaterials and inverse unit cell design (M)

Berenalp Engürel  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Bestimmung von Faser-Bündelsteifigkeiten aus Zugversuchen an Mikroproben (M)

Christian Frie  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Versagensmodellierung von Aluminiumguss unter Berücksichtigung von CT-Bildern und metallographischer Analysen (M)

Oliver Moreno Gehrke\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Untersuchung von Reihenfolgeeffekten auf das Reibungs- und Verschleißverhalten der Al-Legierung Al7075 und des Wälzlagerstahls 100Cr6 im oszillierenden Gleitkontakt (B)

Nadira Hadzic  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hochaufgelöste Schädigungsanalyse und Extrusionsbildungskinetik mit der ROCS-Mikroskopie (M)

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

Shreyas Hebbar  
Technische Universität Chemnitz  
Heat treatment and experimental characterisation of 7xxx series aluminium alloys (M)

Julius Heinrich\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Development of a reciprocating tribometer for studying in-situ wear and microstructural evolution of metals under controllable load (M)

Junxiong Jin  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Automated thermodynamic simulations for the development of CuNiAl-based alloys with high strength and good electric conductivity (M)

Neil Lemcke  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Activation volumes of mechanochemical reactions in amorphous materials (M)

Niklas Maier  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tribologische Untersuchung von diamantartigen Kohlenstoffschichten zur Anwendung auf Dichtringen (M)

Lukas Mayer  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Festwalzen zur Lebensdauererweiterung von Schweißverbindungen aus der Aluminiumlegierung EN AW 5083 (M)

Fanxing Meng  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Quantification of the effect of crack tip constraint on fracture toughness of ductile steels (M)

Lena Merkle\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Einflüsse von Zyklenzahl und anschließender Expositionszeit auf die Tribooxidation von hochreinem Kupfer (B)

Felix Müller  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Quantifizierung der Schädigungsentwicklung in Schweißverbindungen unter mehrachsiger Belastung (M)

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

Ebrahim Norouzi  
Ruhr-Universität Bochum  
Analysis and application of machine learning approaches to identify parameters of a viscoplastic material model based on numerical and experimental data of copper (M)

Zakaria Ouargui  
Hochschule Offenburg  
Durchführung und Auswertung von Ermüdungsversuchen von festgewalzten Rundschweißverbindungen unter Biegeumlaufbelastung (B)

Niklas Ribic \*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Simulation der Versetzungsmikrostruktur in Drähten unter Torsionsbeanspruchung (B)

Tobias Rosenstingl  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Viskositätsschaltbare Silikonöle (M)

Olga Schiz\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Lokales Laserrandschicht härten des perlitischen Stahls C80 im Hinblick auf tribologische Anwendungen (B)

Oliver Schmidt\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Prediction of stress and material parameters based on surface measurements using machine learning (M)

Philipp Schübler \*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Laserlegieren von Grauguss zur Verbesserung der Verschleiß- und Korrosionseigenschaften (M)

Daniel Schuster\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Prediction of stress and material parameters based on surface measurements using machine learning (M)

Alexander Ugrumov  
Hochschule Offenburg  
Untersuchungen zur Materialprüfung an Proben mit Diffusions-sperrschichten in Wasserstoffatmosphäre (B)

Enid Vyshka  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Semantic segmentation of material defects on fracture surfaces using convolutional neural networks (M)

Tabea Weismann\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Lasergestützte Oberflächenmodifizierung des hochlegierten Stahls X5CrNi18-10 für tribologische Anwendungen (B)

Eduard Wolf  
Hochschule Offenburg  
Entwicklung eines elektrisch leitfähigen Schmierstoffes für Polymergleitlager (B)

Lea Wolfs\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Data-based quantification of dislocation reaction evolution in homogenized dislocation networks (B)

**Vorlesungen WS 2019/2020**

**Albert-Ludwigs-Universität Freiburg**

Theory and Modeling of Materials: Solid-State Magnetism  
Prof. Dr. Christian Elsässer

Kontinuumsmechanik II  
Dr. Dirk Helm

Computational Materials Engineering  
Prof. Dr. Michael Moseler

Wissenschaftliches Programmieren  
Dr. Michael Walter

**Hochschule Offenburg**

Werkstofftechnik I  
Dr. Ken Wackermann

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Nanotribologie und -mechanik  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

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

Schweißtechnik  
Dr. Majid Farajian

Prozesssimulation in der Umformtechnik  
Dr. Dirk Helm

**Universität Siegen**

Composites I – Verbundwerkstoffe  
Dr. Jörg Hohe

Anleitung zum wissenschaftlichen Arbeiten an IAM-CMS  
Prof. Dr. Matthias Scherge

Seminar zu studentischen Arbeiten an IAM-CMS  
Prof. Dr. Matthias Scherge

**Vorlesungen SS 2020**

**Albert-Ludwigs-Universität Freiburg**

Kontinuumsmechanik I  
Dr. Dirk Helm

Computational Physics: Materials Science  
Prof. Dr. Michael Moseler

Quantum Transport  
Dr. Michael Walter

**Hochschule Esslingen**

Werkstofftechnik 2  
Dr. Dominic Linsler

**Hochschule Offenburg**

Verbundwerkstoffe  
Frank Huberth

Verbundwerkstoffe  
Dr. Jörg Lienhard

Werkstofftechnik I  
Dr. Ken Wackermann

Schadenskunde  
Rolf Zeller

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Physik für Ingenieure  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Praktikum »Tribologie«  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Crashsimulation  
Dr. Silke Sommer

**Technische Universität Darmstadt**

Modern steels for automotive applications  
Dr. Thorsten Michler

**Universität Siegen**

Composites II – Werkstoffverbunde  
Dr. Jörg Hohe

**Gastwissenschaftlerinnen  
und Gastwissenschaftler**

Matthias Baldofski  
Freudenberg Technology  
Innovation SE & Co. KG  
1.1.-31.12.2020

Andrea Roberto Codrignani  
Institut für Mikrosystemtechnik  
IMTEK  
1.1.-31.12.2020

Dr. Frank DelRio  
National Institute of Standards  
and Technology, Maryland, USA  
1.1.-13.7.2020

Dr. Mastaneh Moattari  
Niroo Research Institute, Tehran,  
Iran  
1.1.-31.12.2020

Dr. Pedro Romero  
Freudenberg Technology  
Innovation SE & Co. KG  
1.1.-31.12.2020

Dr. Daniele Savio  
Freudenberg Technology  
Innovation SE & Co. KG  
1.1.-31.12.2020

Dr. Paul Schwarz  
Freudenberg Technology  
Innovation SE & Co. KG  
1.1.-31.12.2020

Prof. Dr. Thomas Seifert  
Hochschule Offenburg  
1.1.-31.12.2020

Yaping Tan  
Nanjing University of Science &  
Technology, Nanjing, China  
1.1.-31.12.2020

Dr. Koichi Tanaka  
DENSO Corporation, Kariya,  
Japan  
1.1.-31.3.2020

Dr. Bin Zhao  
School of Mechanical Engineer-  
ing, Shangdong, China  
1.1.-31.3.2020

- Amann, T.; Chen, W.; Baur, M.; Kailer, A.; Rühle, J.  
**Entwicklung von galvanisch gekoppelten Gleitlagern zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß – Development of galvanically coupled plain bearings to reduce friction and wear**  
 Forschung im Ingenieurwesen – Engineering Research 84/4 (2020) 315-322
- Bierwisch, C.; Mohseni-Mofidi, A.; Diemann, B.; Kraft, T.; Rudloff, J.; Lang, M.  
**Particle-based simulation, dimensional analysis and experimental validation of laser absorption and thermo-viscous flow during sintering of polymers**  
 Procedia CIRP 94 (2020) 74-79
- Chen, W.; Amann, T.; Kailer, A.; Rühle, J.  
**Macroscopic friction studies of alkylglucopyranosides as additives for water-based lubricants**  
 Lubricants 8/1 (2020) Art. 11, 13 pages
- Cihan, E.; Jungjohann, K.; Argibay, N.; Chandross, M.; Dienwiebel, M.  
**Effect of environment on microstructure evolution and friction of Au-Ni multilayers**  
 Tribology Letters 68/1 (2020) Art. 30, 10 pages
- Codrignani, A.; Savio, D.; Pastewka, L.; Frohnapfel, B.; van Ostayen, R.  
**Optimization of surface textures in hydrodynamic lubrication through the adjoint method**  
 Tribology International 148 (2020) Art. 106352, 12 pages
- Colonna, F.; Kühnhold-Pospischil, S.; Elsässer, C.  
**A density functional theory study on the passivation mechanisms of hydrogenated Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> interfaces**  
 Journal of Applied Physics 127/3 (2020) 035301 1-11
- Cui, K.; Mali, K.S.; Wu, D.; Feng, X.; Müllern, K.; Walter, M.; DeFeyter, S.; Mertens, S.F.L.  
**Ambient bistable single dipole switching in a molecular monolayer**  
 Angewandte Chemie International Edition 59/33 (2020) 14049-14053
- Darabi, A.C.; Guski, V.; Butz, A.; Kadkhodapour, J.; Schmauder, S.  
**A comparative study on mechanical behavior and damage scenario of DP600 and DP980 steels**  
 Mechanics of Materials 143 (2020) 103339 1-14
- Diemann, B.; Bosna, F.; Lorenz, M.; Travitzky, N.; Kruggel-Emden, H.; Kraft, T.; Bierwisch, C.  
**Modeling robocasting with smoothed particle hydrodynamics: Printing gap-spanning filaments**  
 Additive Manufacturing 36 (2020) Art. 101488, 10 pages
- Diemann, B.; Kraft, T.; Kruggel-Emden, H.; Bierwisch, C.  
**A smoothed particle hydrodynamics scheme for arbitrarily shaped rigid bodies within highly viscous fluids**  
 Journal of Computational Physics: X 8 (2020) 100068-100092, 25 pages
- Dornheim, J.; Link, N.; Gumbsch, P.  
**Model-free adaptive optimal control of episodic fixed-horizon manufacturing processes using reinforcement learning**  
 International Journal of Control, Automation and Systems 18/6 (2020) 1593-1604
- Eickworth, J.; Aydin, E.; Dienwiebel, M.; Rühle, T.; Wilke, P.; Umbach, T.R.  
**Synergistic effects of antiwear and friction modifier additives**  
 Industrial Lubrication and Tribology 72/8 (2020) 1019-1025
- Falk, K.; Savio, D.; Moseler, M.  
**Nonempirical free volume viscosity model for alkane lubricants under severe pressures**  
 Physical Review Letters 124/10-13 (2020) 105501 1-6
- Faller, J.; Scherge, M.  
**The identification of an adequate stressing level to find the proper running-in conditions of a lubricated DLC-Metal-System**  
 Lubricants 8/9 (2020) Art. 88, 7 pages
- Findeisen, C.; Forest, S.; Hohe, J.; Gumbsch, P.  
**Discrete and continuum modelling of size effects in architected unstable metamaterials**  
 Continuum Mechanics and Thermodynamics 32/6 (2020) 1629-1645
- Fischer, S.C.L.; Hillen, L.; Eberl, C.  
**Mechanical metamaterials on the way from laboratory scale to industrial applications: Challenges for characterization and scalability**  
 Materials 13/16 (2020) Art. 3605, 16 pages
- Fliegner, S.; Hohe, J.  
**An anisotropic creep model for continuously and discontinuously fiber reinforced thermoplastics**  
 Composites Science and Technology 194 (2020) 108168 1-11
- Fliegner, S.; Rausch, J.; Hohe, J.  
**Loading points for industrial scale sandwich structures – a numerical and experimental design study**  
 Composite Structures 226 (2019) 111278 1-13
- Gäbert, C.; Rosenstingl, T.; Linsler, D.; Dienwiebel, M.; Reinicke, S.  
**Programming viscosity in silicone oils: Reversible tuning of rheological properties in 9-anthracene ester-terminated polydimethylsiloxanes**  
 ACS Applied Polymer Materials 2/12 (2020) 5460-5468
- Gatti, F.; Amann, T.; Kailer, A.; Baltes, N.; Rühle, J.; Gumbsch, P.  
**Towards programmable friction: Control of lubrication with ionic liquid mixtures by automated electrical regulation**  
 Scientific Reports 10/1 (2020) Art. 17634, 10 pages
- Gola, A.; Schwaiger, R.; Gumbsch, P.; Pastewka, L.  
**Pattern formation during deformation of metallic nanolaminates**  
 Physical Review Materials 4/1 (2020) 013603 1-8
- Gröner, L.; Mengis, L.; Galetz, M.; Kirste, L.; Daum, P.; Wirth, M.; Meyer, F.; Fromm, A.; Blug, B.; Burmeister, F.  
**Investigations of the deuterium permeability of as-deposited and oxidized Ti<sub>2</sub>AlN coatings**  
 Materials 13/9 (2020) Art. 2085, 9 pages
- Gustmann, T.; Gutmann, F.; Wenz, F.; Koch, P.; Stelzer, R.; Drossel, W.-G.; Korn, H.  
**Properties of a superelastic NiTi shape memory alloy using laser powder bed fusion and adaptive scanning strategies**  
 Progress in Additive Manufacturing 5 (2020) 11-18
- Hartl, B.; Sharma, S.; Brügger, O.; Mertens, S.F.L.; Walter, M.; Kahl, G.  
**Reliable computational prediction of the supramolecular ordering of complex molecules under electrochemical conditions**  
 Journal of Chemical Theory and Computation 18/6 (2020) 5227-5243
- Haug, C.; Ruebling, F.; Kashiwar, A.; Gumbsch, P.; Kübel, C.; Greiner, C.  
**Early deformation mechanisms in the shear affected region underneath a copper sliding contact**  
 Nature Communications 11/1 (2020) Art. 839, 8 pages
- Hebbar, S.; Kertsch, L.; Butz, A.  
**Optimizing heat treatment parameters for the w-temper forming of 7xxx series aluminum alloys**  
 Metals 10/10 (2020) Art. 1361, 15 pages
- Hemmesi, K.; Mallet, P.; Farajian, M.  
**Numerical evaluation of surface welding residual stress behavior under multiaxial mechanical loading and experimental validations**  
 International Journal of Mechanical Sciences 168 (2020) Art. 105127, 17 pages

- Hohe, J.; Beckmann, C.; Böhme, W.; Weise, J.; Reinfried, M.; Luthardt, F.; Rapp, F.; Diemert, J.  
**An experimental and numerical survey into the potential of hybrid foams**  
 Mechanics of Materials 136 (2019) 103063 1-15
- Hohe, J.; Gall, M.; Fliegenger, S.; Abdul Hamid, Z.M.  
**A continuum damage mechanics model for fatigue and degradation of fiber reinforced materials**  
 Journal of Composite Materials 54/21 (2020) 2837-2852
- Jacquemin, T.; Tomar, S.; Agathos, K.; Mohseni-Mofidi, S.; Bordas S.P.A.  
**Taylor-series expansion based numerical methods: A primer, performance benchmarking and new approaches for problems with non-smooth solutions**  
 Archives of Computational Methods in Engineering 27/5 (2020) 1465-1513
- Jimenez-Pena, C.; Goulas, C.; Preußner, J.; Debruyne, D.  
**Failure mechanisms of mechanically and thermally produced holes in high-strength low-alloy steel plates subjected to fatigue loading**  
 Metals 10/3 (2020) Art. 318, 21 pages
- Khader, I.; Kürten, D.; Raga, R.; Winzer, N.; Kailer, A.  
**Modeling hydrogen diffusion in a tribological scenario: A failure analysis of a thrust bearing**  
 Wear 438-439 (2019) Art. 203054, 15 pages
- Khader, I.; Schröder, C.; Stockmann, J.; Beckert, W.; Kunz, W.; Kailer, A.  
**Characterization of a silicon nitride ceramic material for ceramic springs**  
 Journal of the European Ceramic Society 40/10 (2020) 3541-3554
- Kulagin, R.; Beygelzimer, Y.; Estrin, Y.; Schumilin, A.; Gumbsch, P.  
**Architected lattice materials with tunable anisotropy: Design and analysis of the material property space with the aid of machine learning**  
 Advanced Engineering Materials 22/12 (2020) 2001069 1-9
- Kümmel, D.; Linsler, D.; Schneider, R.; Schneider, J.  
**Surface engineering of a titanium alloy for tribological applications by nanosecond-pulsed laser**  
 Tribology International 150 (2020) Art. 106376, 9 pages
- Kümmel, D.; Schneider, J.; Gumbsch, P.  
**Influence of interstitial oxygen on the tribology of Ti6Al4V**  
 Tribology Letters 68/3 (2020) Art. 96, 9 pages
- Kürten, D.; Khader, I.; Kailer, A.  
**Determining the effective hydrogen diffusion coefficient in 100Cr6**  
 Materials and Corrosion 71/6 (2020) 918-923
- Kürten, D.; Khader, I.; Kailer, A.  
**Tribochemical degradation of vacuum-stable lubricants: A comparative study between multialkylated cyclopentane and perfluoropolyether in a vacuum ball-on-disc and full-bearing tests**  
 Lubrication Science 32/4 (2020) 183-191
- Leduc, J.; Gönüllü, Y.; Ruoko, T.-P.; Fischer, T.; Mayrhofer, L.; Tkachenko, C.-L.D.; Held, A.; Moseler, M.; Sanya, M.  
**Electronically coupled uranium and iron oxide heterojunctions as efficient water oxidation catalysts**  
 Advanced Functional Materials 29/50 (2019) 1905005 1-7
- Li, K.; Jiang, J.; Amann, T.; Yuan, Y.; Wang, C.; Yuan, C.; Neville, A.  
**Evaluation of 1,3-diketone as a novel friction modifier for lubricating oils**  
 Wear 452-453 (2020) Art. 203299, 7 pages
- Lienhard, J.; Discher, D.; Hohe, J.  
**Strain rate dependent damage evolution in long glass fiber reinforced polypropylene**  
 Composites Science and Technology 189 (2020) 108007 1-11
- Liu, L.; Sheng, Y.; Liu, M.; Dienwiebel, M.; Zhang, Z.; Dastan, D.  
**Formation of the third bodies of steel sliding against brass under lubricated conditions**  
 Tribology International 140 (2019) Art. 105727, 7 pages
- Lorenz, M.; Dietemann, B.; Wahl, L.; Bierwisch, C.; Kraft, T.; Kruggel-Emden, H.; Travitzky, N.  
**Influence of platelet content on the fabrication of colloidal gels for robocasting: Experimental analysis and numerical simulation**  
 Journal of the European Ceramic Society 40/3 (2020) 811-825
- Maierhofer, J.; Gänser, H.-P.; Simunek, D.; Leitner, M.; Pippan, R.; Luke, M.  
**Fatigue crack growth model including load sequence effects – Model development and calibration for railway axle steels**  
 International Journal of Fatigue 132 (2020) Art. 105377, 11 pages
- Michler, T.; Bruder, E.; Linder, S.  
**Hydrogen effects in X30MnCrN16-14 austenitic steel – Einfluss von Wasserstoff in dem austenitischen Stahl X30MnCrN16-14**  
 Materials Science & Engineering Technology, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 51/4 (2020) 531-538
- Miehe, R.; Bauernhansl, T.; Beckett, M.; Brecher, C.; Demmer, A.; Drossel, W.-G.; Elfert, P.; Full, J.; Hellmich, A.; Hinxlage, J.; Horbelt, J.; Jutz, G.; Krieg, S.; Maufroy, C.; Noack, M.; Sauer, A.; Schließmann, U.; Scholz, P.; Schwarz, O.; Hompel, M.  
**The biological transformation of industrial manufacturing – Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry**  
 Journal of Manufacturing Systems 54 (2020) 50-61
- Mirzaei, S.; Alishahi, M.; Souček, P.; Buršíková, V.; Záborský, L.; Gröner, L.; Burmeister, F.; Blug, B.; Daum, P.; Mikšová, R.; Vašina, P.  
**Effect of substrate bias voltage on the composition, microstructure and mechanical properties of W-B-C coatings**  
 Applied Surface Science 528 (2020) 146966 1-9
- Mirzaei, S.; Alishahi, M.; Souček, P.; Ženišek, J.; Holec, D.; Koutná, N.; Buršíková, V.; Stupavská, M.; Záborský, L.; Burmeister, F.; Blug, B.; Czigánye, Zs.; Balázs, K.; Mikšová, R.; Vašina, P.  
**The effect of chemical composition on the structure, chemistry and mechanical properties of magnetron sputtered W-B-C coatings: Modeling and experiments**  
 Surface and Coatings Technology 383 (2020) Art. 25274, 12 pages
- Müssig, J.; Kelch, M.; Gebert, B.; Hohe, J.; Luke, M.; Bahnert, T.  
**Improvement of the fatigue behaviour of cellulose/polyolefin composites using photo-chemical fibre surface modification bio-inspired by natural role models**  
 Cellulose 27/10 (2020) 5815-5827
- Mutter, D.; Urban, D.F.; Elsässer, C.  
**Determination of formation energies and phase diagrams of transition metal oxides with DFT+U**  
 Materials 13/19 (2020) Art. 4303, 21 pages
- Oberle, N.; Amann, T.; Kürten, D.; Raga, R.; Kailer, A.  
**In-situ-determination of tribologically induced hydrogen permeation using electrochemical methods**  
 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 234/7 (2020) 1027-1034
- Pham, C.V.; Liu, L.; Britton, B.; Walter, M.; Holdcroft, S.; Thiele, S.  
**Stabilization of Li-S batteries with a lean electrolyte via ion-exchange trapping of lithium polysulfides using a cationic, polybenzimidazolium binder**  
 Sustainable Energy & Fuels 4/3 (2020) 1180-1190

- Reichenbach, T.; Mayrhofer, L.; Kuwahara, T.; Moseler, M.; Moras, G.  
**Steric effects control dry friction of H- and F-terminated carbon surfaces**  
ACS Applied Materials & Interfaces 12/7 (2020) 8805-8816
- Reichenbach, T.; Walter, M.; Moseler, M.; Hammer, B.; Bruix, A.  
**Effects of gas-phase conditions and particle size on the properties of Cu(111)-supported ZnO particles revealed by global optimization and ab initio thermodynamics**  
The Journal of Physical Chemistry C 123/51 (2019) 30903-30916
- Riedel, H.  
**Fatigue crack growth in a material with coarse brittle phases**  
International Journal of Fatigue 131 (2020) Art.105332, 6 pages
- Rudloff, J.; Lang, M.; Mohseni-Mofidi, S.; Bierwisch, C.  
**Experimental investigations for improved modelling of the laser sintering process of polymers**  
Procedia CIRP 94 (2020) 80-84
- Schlüter, B.; Stake, A.; Widrat, M.; Stenzel, V.; Kailer, A.  
**Einfluss von Graphen/PTFE auf die Belastbarkeit und Lebensdauer von Gleitlacken**  
Tribologie und Schmierungstechnik 67/1 (2020) 16-24
- Schubnell, J.; Carl, E.; Farajian, M.; Gkatzogiannis, S.; Knödel, P.; Ummenhofer, T.; Wimpory, R.; Eslami, H.  
**Residual stress relaxation in HFMI-treated fillet welds after single overload peaks**  
Welding in the World 64/6 (2020) 1107-1117
- Schubnell, J.; Eichheimer, C.; Ernould, C.; Maciolek, A.; Rebelo-Kornmeier, J.; Farajian, M.  
**The influence of coverage for high frequency mechanical impact treatment of different steel grades**  
Journal of Materials Processing Technology 277 (2020) Art.116437, 18 pages
- Schubnell, J.; Jung, M.; Le, C.H.; Farajian, M.; Braun, M.; Ehlers, S.; Fricke, W.; Garcia, M.; Nussbaumer, A.; Baumgartner, J.  
**Influence of the optical measurement technique and evaluation approach on the determination of local weld geometry parameters for different weld types**  
Welding in the World 64/2 (2020) 301-316
- Schubnell, J.; Pontner, P.; Wimpory, R.C.; Farajian, M.; Schulze, V.  
**The influence of work hardening and residual stresses on the fatigue behavior of high frequency mechanical impact treated surface layers**  
International Journal of Fatigue 134 (2020) Art.105450, 14 pages
- Srivastava, K.; Weygand, D.; Caillard, D.; Gumbsch, P.  
**Repulsion leads to coupled dislocation motion and extended work hardening in bcc metals**  
Nature Communications 11/1 (2020) Art. 5098, 8 pages
- Stauffert, O.; Walter, M.; Berciu, M.; Krem, R.V.  
**Substituent effects on the Su-Schrieffer-Heeger electron-phonon coupling in conjugated polyenes**  
Physical Review B 100/23 (2019) 235129 1-9
- Svoboda, J.; Hornik, V.; Riedel, H.  
**Modelling of processing steps of new generation ODS alloys**  
Metallurgical and Materials Transactions A 51/10 (2020) 5296-5305
- Temmler, A.; Liu, D.; Preussner, J.; Oeser, S.; Luo, J.; Poprawe, R.; Schleifenbaum, J.H.  
**Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11**  
Materials & Design 192 (2020) Art.108689, 25 pages
- Texier, D.; Cadet, C.; Straub, T.; Eberl, C.; Maurel, V.  
**Tensile behavior of air plasma spray MCrAlY coatings: Role of high temperature agings and process defects**  
Metallurgical and Materials Transactions A 51 (2020) 2766-2777
- Thiele, M.; Eckmann, S.; Huang, M.; Gampe, U.; Fischer, K.A.; Schlesinger, M.  
**Experimental and numerical investigation on the influence of thermally induced stress gradients on fatigue life of the nickel-base alloy MAR-M247**  
Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 142/12 (2020) Art. 101009, 9 pages
- Thomas, A.; Durmaz, A.R.; Straub, T.; Eberl, C.  
**Automated quantitative analyses of fatigue induced surface damage by deep learning**  
Materials 13/15 (2020) Art. 3298, 24 pages
- Trenkle, A.; Syha, M.; Rheinheimer, W.; Callahan, P.G.; Nguyen, L.; Ludwig, W.; Lenthe, W.; Echlin, M.P.; Pollock, T.M.; Weygand, D.; De Graef, M.; Hoffmann, M.J.; Gumbsch, P.  
**Nondestructive evaluation of 3D microstructure evolution in strontium titanate**  
Journal of Applied Crystallography 53 (2020) 349-359
- Walter, M.; Moseler, M.  
**Ab initio wavelength-dependent raman spectra: Placzek approximation and beyond**  
Journal of Chemical Theory and Computation 16/1 (2020) 576-586
- Wehmeyer, S.; Zok F.; Eberl, C.; Gumbsch, P.; Cohen, N.; McMeeking, R.; Begley, M.  
**Post-buckling and dynamic response of angled struts in elastic lattices**  
Journal of the Mechanics and Physics of Solids 133 (2019) Art. 03693, 19 pages
- Weinkamer, R.; Eberl, C.; Fratzl, P.  
**Mechanoregulation of bone remodeling and healing as inspiration for self-repair in materials**  
Biomimetics 4/3 (2019) Art. 46, 16 pages
- Weisheit, L.; Wenz, F.; Lichti, T.; Eckert, M.; Baumann, S.; Hübner, C.; Eberl, C.; Andrä, H.  
**Domänenübergreifende Workflows zur effizienten Entwicklung Programmierbarer Materialien**  
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115/7-8 (2020) 470-475
- Zabler, S.; Ullherr, M.; Schweizer, C.; Fella, C.; Hanke, R.  
**Characterization of aluminum alloy microstructures by means of synchrotron X-ray micro-tomography – A simple toolchain for extracting quantitative 3D morphological features**  
International Journal of Materials Research 111/1 (2020) 32-39
- Zhao, B.; Khader, I.; Raga, R.; Degenhardt, U.; Kailer, A.  
**Tribological behavior of three silicon nitride ceramics in dry sliding contact against Inconel 718 in a wide range of velocities**  
Wear 448-449 (2020) Art. 203206, 9 pages
- Zhao, B.; Khader, I.; Raga, R.; Konrath, G.; Degenhardt, U.; Kailer, A.  
**High temperature tribological properties of silicon nitride in dry sliding contact against Inconel 718 heated by laser**  
Wear 434-435 (2019) Art. 203000, 9 pages
- Ziegler, T.; Jaeger, R.  
**Fracture toughness and crack resistance curves of acrylic bone cements**  
Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials 108/5 (2020) 1961-1971
- Ziemke, P.; Frenzel, T.; Wegener, M.; Gumbsch, P.  
**Tailoring the characteristic length scale of 3D chiral mechanical metamaterials**  
Extreme Mechanics Letters 32 (2019) Art.100553, 6 pages

VERÖFFENTLICHTE KONFERENZBEITRÄGE

Beisheim, W.; Esderts, A.; Wächter, M.; Varfolomeev, I.; Dittmann, F.; Moroz, S.

**Bestimmung zyklischer Werkstoffkennwerte für Schweißnähte basierend auf der Härte**

in Tagungsband Werkstoffprüfung 2019 Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand, 37. Vortrags- und Diskussionstagung; Christ, H.-J. (Hrsg.); Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2019) 111-116

Beisheim, W.; Wächter, M.; Esderts, A.; Dittmann, F.; Moroz, S.; Varfolomeev, I.

**Berücksichtigung lokaler Werkstoffeigenschaften bei der Modellierung von Schweißnähten zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit**

in Tagungsband 37. CADFEM ANSYS Simulation Conference: die Fachkonferenz zur Numerischen Simulation in der Produktentwicklung; CADFEM GmbH, Grafing (2019) 6 Seiten

Bierwisch, C.

**DEM powder spreading and SPH powder melting models for additive manufacturing process simulations**

in Proc. of VI International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications - PARTICLES 2019; Oñate, E.; Wriggers, P.; Zohdi, T.; Bischoff, M.; Owen, D.R.J. (Eds.); International Centre for Numerical Methods in Engineering CIMNE, Barcelona, ESP (2019) 434-443

Bierwisch, C.; Mohseni-Mofidi, S.; Dietemann, B.; Rudloff, J.; Baumann, S.; Popp, K.; Lang, M.

**Particle-based simulations and dimensional analysis of selective laser sintering of PA12 powders**

in Proc. of II International Conference on Simulation for Additive Manufacturing – Sim-AM 2019; Auricchio, F.; Rank, E.; Kollmannsberger, S.; Morganti, S. (Eds.); International Centre for Numerical Methods in Engineering CIMNE, Barcelona, ESP (2019) 316-327

Blug, A.; Regina, D.J.; Eckmann, S.; Senn, M.; Eberl, C.; Bertz, A.; Carl, D.

**GPU-based digital image correlation system for real-time strain-controlled fatigue and strain field measurement**

in Proc. of SPIE Volume 11056, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI; Lehmann, P. (Ed.); Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Bellingham, WA, USA (2019) 110560V 1-10

Butz, A.; Wessel, A.; Pagenkopf, J.; Helm, D.

**Parameter identification of 3D yield functions based on a virtual material testing procedure**

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 651/1, 38th International Deep Drawing Research Group Annual Conference IDDRG 2019; van den Boogaard, T.; Langerak, N. (Eds.); IOP Publishing Ltd., Bristol, UK (2019) Paper 012078, 8 pages

Dietemann, B.; Bierwisch, C.; Kraft, T.

**Additive manufacturing of ceramics: Mobility of ceramic grains during printing**

PARTEC 2019: International Congress on Particle Technology; Heinrich, S. (Ed.); VDI Verlag; VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2019) 5 pages

Dittmann, F.; Moroz, S.; Varfolomeev, I.

**Zur Machbarkeit der Abschätzung von Schweißspannungen mittels KNN am Beispiel austenitischer Rohrverbindungen**

in Tagungsband 52. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethode und Anwendungen; Vormwald, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2020) 261-268

Feil, N.M.; Kurz, N.; Urban, D.F.; Altayara, A.; Christian, B.; Ding, A.; Zukauskaite, A.; Ambacher, O.

**Finite element analysis of SAW propagation characteristics in c-plane (0001) and a-plane (11-20) AlScN thin films**

in Proc. of 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium IUS 2019; Cochran, S. (Ed.); Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE, Piscataway, NY, USA (2019) 2588-2591

Hohe, J.; Fliegner, S.

**An anisotropic creep model for continuously and discontinuously fiber reinforced materials**

PAMM 19/1 Special Issue: 90th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Eberhardsteiner, J.; Schöberl, M. (Eds.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2019) Art. e201900086, 2 pages

Hohe, J.; Schober, M.; Weiss, K.P.; Appel, S.

**Failure criteria for CFRP composites in the cryogenic regime**

in Proc. of Aerospace Europe Conference AEC 2020; European Space Agency, Paris, France (2020) Paper No. #00354, 6 pages

Huberth, F.; Klitschke, S.; Sommer, S.; Ragupathi, B.; Baumgartner, J.

**Aluminum mixed metal welding applications joint by magnetic pulse welding, MPW**

in Proc. of EAC-European Aluminium Congress 2019, Aluminium & Mobility; Heidrich, W.; Grumm, G. (Hrsg.); Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Düsseldorf (2019) S2|P7, 13 pages

Koch, D.; Willmann, T.; Wessel, A.; Butz, A.; Bischoff, M.; Haufe, A.

**Das neue, richtungsabhängige Schädigungs- und Versagensmodell eGISSMO mit besonderem Fokus auf die Anwendung in der Blechbearbeitungssimulation**

EFB-Tagungsband Nr. 048, Wirtschaftliche Verarbeitung hochfester Werkstoffe für Leicht- und Funktionsbau, 39. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung 2019; EFB Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover (2019) 303-318

Lienhard, L.; Discher, D.

**Dehnratenabhängige Schädigungsdetektion an LFT mittels der Korrelation von Temperatur**

in Tagungsband Werkstoffprüfung 2019 Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand, 37. Vortrags- und Diskussionstagung; Christ, H.-J. (Hrsg.); Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM), Berlin (2019) 137-142

Mallco, A.; Fernandez, A.G.; Preußner, J.; Portillo, C.

**Corrosion and mechanical assessment in LiNO<sub>3</sub> molten salt as thermal energy storage material in CSP plants**

in Proc. of ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019; Cardemil, J.M.; Guthrie, K.; Ruther, R. (Eds.); International Solar Energy Society, Freiburg (2020) 1158-1167

Meschut, G.; Hein, D.; Unruh, E.; Gumbusch, P.; Sommer, S.; Bähr, P.

**Charakterisierung und Modellierung von Kerbeffekten durch Mischverbindungen in Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen**

EFB-Tagungsband Nr. 049, Gemeinsame Forschung in der Mechanischen Fügetechnik 2019, 9. Fügetechnischen Gemeinschaftskolloquium 2019; FOSTA, EFB, DVS (Hrsg.); EFB Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover (2019) 81-87

Morand, L.; Helm, D.; Iza-Teran, R.; Garcke, J.

**A knowledge-based surrogate modeling approach for cup drawing with limited data**

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 651/1; 38th International Deep Drawing Research Group Annual Conference IDDRG 2019; van den Boogaard, T.; Langerak, N. (Eds.); IOP Publishing Ltd., Bristol, UK (2019) Art. 012047, 8 pages

Neubrand, A.; Shi, Y.; Korschak, A.; Koch, D.

**Ermittlung der Eindringhärte keramischer Verbundwerkstoffe**

in Tagungsband Werkstoffprüfung 2019 Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand, 37. Vortrags- und Diskussionstagung; Christ, H.-J. (Hrsg.); Stahl Institut VDEh, Düsseldorf (2019) 355-360

Radaelli, F.; Kadau, K.; Amann, C.; Gumbsch, P.  
**Probabilistic fracture mechanics framework including crack nucleation of rotor forging flaws**  
Proc. of ASME Turbo Expo 2019: Power for Land, Sea, and Air, Turbomachinery Technical Conference and Exposition; Volume 7A: Structures and Dynamics; The American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2019) GT2019-90418, 7 pages

Rist, T.; Gremmelspacher, M.; Baab, A.  
**Innovative glass bending technology for manufacturing expressive shaped glasses with sharp curves**  
All Eyes on Smarter Glass, Glass Performance Days 2019, GPD Conference Proceedings, Complex Geometry & Curved Glass; Vitkala, J. (Ed.); Glaston Finland Oy, Tampere, Finland (2019) 34-35

Rochel, P.; Sommer, S.; Gumbsch, P.; Olfert, V.; Giese, P.; Meschut, G.  
**Einfluss fertigungsbedingter Toleranzen auf das Versagens- und Verformungsverhalten mechanisch gefügter Verbindungen unter Crashbelastung**  
EFB-Tagungsband Nr. 049, Gemeinsame Forschung in der mechanischen Fügetechnik 2019, 9. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium 2019; FOSTA, EFB, DVS (Hrsg.); Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. EFB, Hannover (2019) 61-67

Rohlfing, J.; Diemert, J.; Lüssenheide, S.; Abdul Hamid, Z.M.; Hohe, J.; Kranz, B.; Georgi, T.  
**Vibroacoustic characterisation methods for polymer materials and components**  
in Proc. of 29th ISMA International Conference on Noise and Vibration Engineering 2020; KU Leuven (Ed.); KU Leuven, Leuven, Belgien (2020) Art. 283, 15 pages

Rohrmüller, B.; Schober, M.; Dittmann, K.; Gumbsch, P.; Hohe, J.  
**Characterization of fiber matrix interface of continuous-discontinuous fiber reinforced polymers on the microscale**  
PAMM 19/1 Special Issue: 90th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Eberhardsteiner, J.; Schöberl, M. (Eds.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2019) Art. e201900190, 2 pages

Schober, M.; Dittman, K.; Gumbsch, P.; Kuboki, T.; Hohe, J.  
**Mechanical microstructure characterization of discontinuous-fiber reinforced composites by means of xperimental-numerical micro tensile tests**  
PAMM 19/1 Special Issue: 90th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Eberhardsteiner, J.; Schöberl, M. (Eds.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2019) Art. e2019001201, 2 pages

Singhal, A.; Schubert, R.; Hashibon, A.  
**Openfoam-interactive (OFI): an innovative universal interface to control solvers in openfoam**  
in Proc. of VI International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications - PARTICLES 2019; Oñate, E.; Wriggers, P.; Zohdi, T.; Bischoff, M.; Owen, D.R.J. (Eds.); International Center for Numerical Methods in Engineering CIMNE, Barcelona, ESP (2019) 456-465

Thiele, M.; Eckmann, S.; Huang, M.; Gampe, U.; Fischer, K.A.; Schlesinger, M.  
**Experimental and numerical investigation on the influence of thermally induced stress gradients on fatigue life of the nickel-base alloy MAR-M247**  
Proc. of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition; Volume 7A: Structures and Dynamics; The American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2019) GT2019-91540, 11 pages

Wessel, A.; Butz, A.; Willmann, T.; Bischoff, M.  
**Effect of different anisotropic 3D yield functions on a roller hemming simulation**  
Procedia Manufacturing 47; Bambach, M. (Ed.); Elsevier B.V., Amsterdam, NL (2020) 1358-1365

## BÜCHER, BUCHBEITRÄGE

Fischer, C.; Reichenbacher, A.; Metzger, M.; Schweizer, C.  
**Computational assessment of the microstructure-dependent thermomechanical behaviour of AlSi12CuNiMg-T7 – methods and microstructure-based finite element analyses**  
Advances in Mechanics of High-Temperature Materials. Advanced Structured Materials, Vol. 117; Naumenko, K.; Krüger, M. (Eds.); Springer, Cham, CH (2020) 35-56

Schober, M.; Hohe, J.; Gumbsch, P.; Kuboki, T.  
**Interlaminar fracture analysis of consolidated GF-PA6-tapes**  
Continuous-discontinuous fiber-reinforced polymers: An integrated engineering approach; Böhlke, T.; Henning, F.; Hrymak, A.; Kärger, L.; Weidenmann, K.A.; Wood, J.T. (Hrsg.); Carl Hanser Verlag, München (2019) 104-119

Wackermann, K.; Schweizer, F.; Pfeiffer, W.  
**Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe: Adsorption, Diffusion und Werkstoffeigenschaften**  
Gasqualitäten im veränderten Energiemarkt; Leicher, J.; Giese, A.; Petermann, H. (Hrsg.); Vulkan-Verlag GmbH, Essen (2020) 579-592

## ZEITSCHRIFTEN

Farajian, M.; Tempel, P.; Siegele, D.; Keitel, S.; Wagner, S.; Fenzl, R.  
**The influence of weld imperfections on fatigue strength and the current relevant design guidelines**  
Welding and Cutting 18/4 (2019) 284-288

Hoffmann, F.; Augenstein, E.; Zapara, M.; Guk, S.; Prah, U.  
**Optimierte Wärmebehandlung von hochfesten Stählen für das Kaltfließpressen**  
massivUMFORMUNG März 2020 (2020) 56-61

Meyer, F.; Burmeister, F.  
**Nanostrukturierte Beschichtung**  
Konstruktion 7-8 (2020) IW2-IW4

Mock, C.; Kölle, S.; Preußner, J.; Carl, E.-R.  
**Umweltverträgliche galvanische Abscheidung von Bronzeschichten als potentielle Nicklersatzschicht – Environmentally friendly galvanic separation of bronze layers as potential nickel replacement layer**  
Metall 73/11 (2019) 286-289

Nagel, S.; Ummenhofer, T.; Veile, I.; Tschuncky, R.; Jung, M.; Farajian, M.  
**Ermüdungsbeanspruchbarkeit bei Stahlguss – Berücksichtigung prozessbedingter Ungängen in der Bauteilbemessung**  
Giesserei 107/12 (2020) 32-42

Steinhof, B.; Kothe, H.; Keunecke, M.; Burmeister, F.; Meyer, F.; Zosel, J.  
**Hochglanzprodukte leichter entformen**  
Kunststoffe 7 (2020) 38-41

Wackermann, K.; Huising, O.J.; Hoeveler, D.; Adämmer, F.  
**Bruchmechanische Betrachtungen bei der Umstellung von Erdgasleitungen aus Stahl für den Transport von Wasserstoff**  
energie | wasser-praxis 91/9 (2020) 18-25

Weiß, A.; Offermanns, S.; Zapara, M.  
**Hochgeschwindigkeitsscherschneiden von Stangenmaterial**  
massivUMFORMUNG März 2020 (2020) 68-73

---

## Impressum

---

### Redaktion

Katharina Hien

### Gestaltung und Produktion

Erika Hellstab

Marianne Förderer

### Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut

für Werkstoffmechanik IWM

Wöhlerstraße 11

79108 Freiburg

Telefon +49 761 5142-154

Fax +49 761 5142-510

[info@iwf.fraunhofer.de](mailto:info@iwf.fraunhofer.de)

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

Alle Rechte vorbehalten.

Bei Abdruck ist die Einwilligung

der Redaktion erforderlich.

### Bildquellen

Seite 2, 19, 25, 33, 43: Stock-Müller,  
Freiburg

Seite 6, 57: Gebhard | Uhl, Freiburg

Seite 7 links: iStock

Seite 7 rechts: iStock / Bearbeitung  
Fraunhofer IWM

Seite 9: Felizitas Gemetz, Freiburg

Seite 11: iStock / Bearbeitung Fraunhofer

Seite 21: Gebhard | Uhl, Freiburg / Bearbei-  
tung Fraunhofer IWM

Seite 27: Fraunhofer CPM

Seite 51: Achim Käflein, Freiburg

Alle Abbildungen: © Fraunhofer IWM

ISSN 1616-3591