



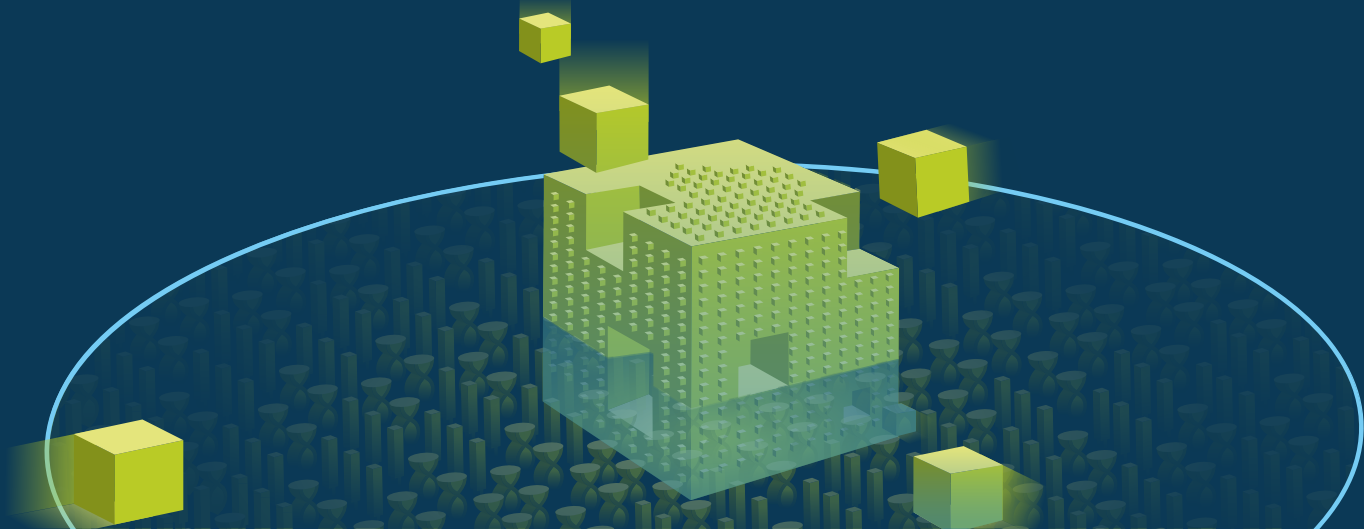
**Fraunhofer**

**IWM**

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM

# **JAHRESBERICHT 2019**





*Programmierbare Materialien eröffnen ein einzigartiges Potenzial für neue Systemlösungen, da sie wesentliche Systemfunktionalitäten selbst übernehmen und so zusätzliche Teile wie Sensoren oder Aktoren überflüssig machen. Komplexe und lokal unterschiedliche Funktionen sind quasi »einprogrammiert«: Je nach Anwendung und Situation nimmt das Material dann von externen Triggern initiiert verschiedene Zustände und Materialeigenschaften an. Das Fraunhofer IWM hat eine zentrale Rolle im Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM. Lesen Sie dazu weiter auf Seite 68 dieses Jahresberichts.*

---

## Die Fraunhofer-Gesellschaft

---

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

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 26 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von mehr als 2,6 Milliarden Euro. Davon fallen mehr als 2,2 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

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

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

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

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

# JAHRESBERICHT 2019

---

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



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

# VORWORT

## Liebe Leserinnen und Leser,

entsprechend dem Motto des Jubiläumsjahrs der Fraunhofer-Gesellschaft »70 Jahre Fraunhofer. 70 Jahre Zukunft. What's next?« konnten wir 2019 viele Weichen für die Zukunft stellen. Wir haben mehrere Fraunhofer-interne Vorlaufforschungsprojekte etabliert, mit denen wir technische Antworten auf die großen gesellschaftlichen Herausforderungen suchen wie die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und die Etablierung nachhaltiger Produktionsweisen. Im Leitprojekt EVOLOPRO arbeiten wir an einer neuen Generation von Produktionssystemen, die sich analog biologischer Organismen selbstständig und schnell an neue Bedingungen anpassen können. Im Leitprojekt MaNiTu entwickeln wir nachhaltige, höchsteffiziente und kostengünstige Tandemsolarzellen auf der Basis neuer Absorbermaterialien. Für zukunftsweisenden Leichtbau charakterisieren, bewerten und modellieren wir hochfestes Aluminium – einerseits für einen neuen, kombinierten Wärmebehandlungs- und Kaltumformprozess (Projekt AluInForm), andererseits für Guss und additive Fertigungsverfahren (Projekt HalUr). Weitere Informationen dazu finden Sie auf den Seiten 10 bis 12 dieses Jahresberichts.

Unser strategisches Thema »Digitale Repräsentation von Werkstoffen« nimmt wissenschaftlich und politisch Fahrt auf. Einerseits designen wir eine grundlegende und übertragbare Umgebung für unternehmensspezifische Werkstoffdatenräume. Für eine beschleunigte Produktentwicklung soll darin die komplexe Historie von Werkstoffen über Analysewerkzeuge wie Design of Experiments oder Machine Learning zugänglich sein. Um andererseits Daten und Software verschiedener Anwendungsfelder miteinander verknüpfen zu können, haben wir im Juli die BMBF-finanzierte Innovationsplattform MaterialDigital mit ins Leben gerufen: Gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), dem Leibnitz-Institut für Werkstofforientierte

Technologien, dem Max-Planck Institut für Eisenforschung (MPIE) und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung bauen wir Strukturen für einen virtuellen Materialdatenraum auf. Die Plattform zielt darauf, akademische Institutionen und Industrieunternehmen bei der Umsetzung von Digitalisierungsaufgaben für Materialien zusammenzuführen und zu unterstützen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) generiert den Aufbau der Plattform und die Vernetzung der Materialforschung in Deutschland über die aktuelle BMBF-Ausschreibung MaterialDigital und weitere Ausschreibungen von Industrie-Verbundprojekten.

Unsere noch auf Hochtouren laufenden Bauaktivitäten behindern uns zwar momentan, machen uns aber auch langfristig zukunftsfest. Wir freuen uns auf die neuen Möglichkeiten, die sich uns durch mehr Platz und noch modernere Labore eröffnen werden.

Das Fraunhofer-Jubiläumsjahr feierten wir gemeinsam mit den anderen Freiburger Fraunhofer-Instituten mit einem Wissenschaftsmarkt in der Innenstadt, der die Zukunfts-Frage nach »what's next?« auf unterhaltsame Weise vielen interessierten Bürgerinnen und Bürgern beantwortete.

Gemäß dem Fraunhofer-Jubiläumsmotto laden wir auch Sie ein, gemeinsam Zukunft zu gestalten, und wünschen Ihnen dabei Inspiration durch die Lektüre unserer wissenschaftlichen Themen!

Prof. Dr. Peter Gumbsch





*Der Institutsleiter des Fraunhofer IWM:  
Prof. Dr. Peter Gumbach.*

## INSTITUTSPROFIL

- 6 Beiträge des Fraunhofer IWM zu großen gesellschaftlichen Herausforderungen
- 8 Digitalisierung von Materialien in Forschung und Industrie, Workshop-Reihe MaterialDigital
- 9 1. Internationale Konferenz Programmierbare Materialien ProgMatCon2020, 27. bis 29. April 2020, Berlin
- 10 Fraunhofer IWM. What's next?
- 13 Kuratorium
- 14 Das Institut in Zahlen
- 16 Organisation des Fraunhofer IWM

## AUSGEWÄHLTE FORSCHUNGSERGEBNISSE

- 18 Geschäftsfeld Materialdesign**
- 20 Verfahren zur Berührungslosen Echtzeit-Dehnungsmessung für Mikroproben entwickelt
- 22 Grundlagen im Quanten-Magnetometer: Entwickelt für berührungslose Materialprüfung
  
- 24 Geschäftsfeld Fertigungsprozesse**
- 26 Semantische Digitalisierung einfach gemacht und im Data Space Management System demonstriert
- 28 Leichtbaustähle: Auswertung automatisiert und 3D-Mikrostruktur digital rekonstruiert
- 30 Optimierung der Biegefestigkeit von Solarglasoberflächen
  
- 32 Geschäftsfeld Tribologie**
- 34 Diamant-SiC-Komposite qualifiziert für Gleitlager in SubSea-Anwendungen
- 36 Schmierstoffe: Hochdruck-Viskositäts-Berechnung aus Molekül-Struktureigenschaften
- 38 Abriebtest für Ermüdungverschleiß an kleinen Elastomerproben entwickelt
- 40 Heteroepitaktische Oxyd-Metall-Schichtstapel im RF-Magnetronputter hergestellt
- 41 Echtzeitverschleißmessungen an einem Gleitlager

#### 42 Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau

- 44 Schweißverbindungen bei mehrachsiger Beanspruchung: Lebensdauermodell verfeinert
- 46 Modellierung des anisotropen Verhaltens von Al-Strangpressprofilen
- 48 Scherprobengestaltung für die dehnratenabhängige Blechcharakterisierung
- 50 Zerstörungsfreie Messung der Elastizitätskonstanten anisotroper Verbundwerkstoffe
- 52 Charakterisierung und Modellierung von Klebverbindungen
- 53 Lebensdauerbewertung von Bauteilen mit fertigungsbedingten Fehlern

#### 54 Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte

- 56 Mikrostrukturuntersuchungen magnetimpulsgeschweißter Cu-Al-Mischverbindungen
- 58 Lebensdauervorhersage dünnwandiger gekühlter Hochtemperaturkomponenten verbessert

### KERNKOMPETENZEN

#### VERNETZUNG

- 60 Kernkompetenzen des Fraunhofer IWM, Mess- und Analysemöglichkeiten
- 66 Mitarbeit in Verbänden, Allianzen und Zentren der Fraunhofer-Gesellschaft
- 68 Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM

### ANHANG

- 70 Personen, Ausbildung, Ereignisse
- 73 Veröffentlichungen
- 77 Impressum

# BEITRÄGE DES FRAUNHOFER IWM ZU GROSSEN GESELLSCHAFTLICHEN HERAUSFORDERUNGEN

Der Klimawandel und der Ressourcenschutz stellen unsere Gesellschaft auf vielen Ebenen vor Herausforderungen. Deutschland strebt mit seinen Klimaschutzzielen an, bis 2050 weitgehend treibhausgasneutral zu werden. Die EU hat sich konkrete Ziele für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 gesetzt, die eine Senkung der Treibhausgasemissionen, Erhöhung des Anteils von Energie aus erneuerbaren Quellen und die Steigerung der Energieeffizienz beinhalten. Ein zentraler Baustein für technische Lösungen sind bedarfsgerechte, zuverlässige Werkstoffe. Sie sind Treiber und Enabler für viele technologische und gesellschaftliche Entwicklungen. Regenerative Energien, Leichtbau in der Mobilität, moderne Medizintechnik, um nur einige Beispiele zu nennen, sind ohne intelligente Werkstofflösungen nicht denkbar. Das Fraunhofer IWM trägt mit seinem werkstoffmechanischen Know-how zu solchen Lösungen bei. Klimaschutz, nachhaltig gewonnene Energie sowie Ressourcenschutz durch nachhaltige Produktionsweisen sind Hauptbestandteil unserer heutigen Projekte.

Werkstoffe sind Funktionsträger in technischen Systemen, und an sie werden entsprechend hohe Anforderungen gestellt. Werkstoffe sollen ressourcenschonend und energieeffizient hergestellt und verarbeitbar sein. In komplexen Belastungssituationen sollen sie die bestmögliche Leistung zeigen bei angemessener, bekannter Lebensdauer und maximaler Zuverlässigkeit. Darüber hinaus sollen Werkstoffe eine geringe Umweltbelastung im Lebenszyklus eines Produkts bedingen.

Die Voraussetzungen, um diese Anforderungen zu erfüllen, schaffen wir mit unseren Lösungen zur optimierten Nutzung von Werkstoffeigenschaften und neuen Werkstofffunktionen. Damit ermöglichen wir innovative und zuverlässige technische Bauteile und Fertigungsverfahren bei unseren Auftraggebern.

## Zuverlässige Bauteile mit langer Lebensdauer

Mit unserer Verknüpfung von Experiment und Simulation beschreiben wir präzise und über mehrere Größen- und Zeitskalen hinweg Werkstoffmechanismen unter Belastungsbedingungen aus den Bereichen Energie, Mobilität und Produktion. Wir tragen zu maßgeblichen Energie-Einsparungen in diesen Bereichen bei, indem wir Reibungs- und Verschleißmechanismen aufklären. Unsere Crash-, Festigkeits- und Sicherheitsbewertungen unterstützen unter anderem den Leichtbau im Automobilbereich, der hilft, Emissionen zu verringern. Wir liefern Ergebnisse zum Wasserstoffeinfluss auf Werkstoffe, die beispielsweise in Lagerungs- und Transportüberlegungen für Wasserstoff einfließen.

Das Einsatzverhalten von Produkten im Lebenszyklus klären wir mit eigen- und weiterentwickelten Ermüdungs-, Schädigungs-, Versagens- und Lebensdauermodellen auf und prognostizieren ihr mechanisches Verhalten. Die so gewonnenen Aussagen unterstützen unsere Kunden bei der Auslegung ihrer Produkte und helfen dabei maßgeblich, in der Produktentwicklung Zeit, Material und Energie einzusparen.

Für die Lösung von Fragen der Zuverlässigkeit und Funktionalität beziehen wir immer stärker mikrostrukturelle Werkstoffaspekte ein, die bisher mit makroskaliger Bewertung noch nicht adressiert wurden. Durch unsere Bewertung von Einflüssen der Werkstoffherstellung auf die Werkstoff-Mikrostruktur finden wir Potenziale zur Prozess- oder Lebensdaueroptimierung und erschließen dadurch Material- und Energieeinsparmöglichkeiten.

## Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und Produktqualität in Produktionsprozessen

Wir entwickeln Lösungen für Fertigungsprozesse, mit deren Hilfe einerseits die Eigenschaften von Werkstoffen und Bau-



teilen optimiert oder eingestellt werden können. Andererseits unterstützen wir auch bei neuen Prozesslösungen, beispielsweise im Bereich Glasformung oder bei Pulververfahren. Mit effizienter Kombination von Charakterisierung, Simulation und Modellexperimenten werden beispielsweise umweltfreundliche Schmierstoffe auf Wasserbasis für Anwendungen gefunden und zusammengestellt. Ideal ausgelegte Oberflächen von Schneidwerkzeugen müssen seltener gewartet und ausgetauscht werden und helfen so, Material und Energie zu sparen. Unsere Lösungen im Bereich innovativer Schmierstoffe und Beschichtungen helfen, die Energiefresser Reibung und Verschleiß zu minimieren.

### Lösungen zum Ersatz knapper oder umweltbelastender Rohstoffe

Wir betreiben zunehmend Werkstoffentwicklung auf der Basis von Multiskalensimulationen. Ein Beispiel aus der klassischen Materialentwicklung ist ein spritzgussgeeigneter, sortenreiner PE-Komposit mit integrierten PE-Verstärkungsfasern als Leichtbaumaterial. Mithilfe multiskaligem Materialdesign und Hochdurchsatz-Screening finden wir vielversprechende Kandidaten für den Austausch umweltschädlicher Bestandteile von beispielsweise Lithium-Ionen-Batterien oder die Substitution von Seltenerdmetallen in Hartmagneten. Die Erforschung und Bewertung von Metamaterialien und programmierbaren Materialien befindet sich in der Aufbauphase. Das Ziel ist, unterschiedlich funktionalisierte Werkstoffe beispielsweise im 3D-Druckverfahren aus einem einzigen Material herzustellen, das dann gut recycelt werden kann.

### Werkstoffwissen verfügbar machen

Große gesellschaftliche Herausforderungen wie der Klimawandel auf der einen und die industrielle Wertschöpfung in einem Hochtechnologieland auf der anderen Seite erfordern zunehmend schnellere Produktionsentwicklungszyklen, einen

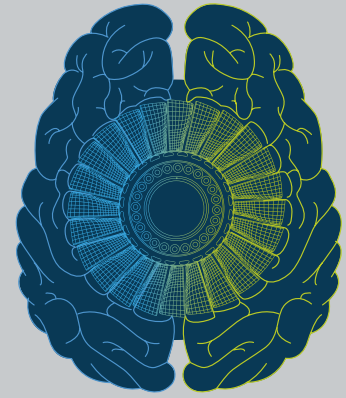
effizienten Umgang mit Materialien und die Nutzung von dessen Eigenschaften. Hierzu müssen Entwicklungsprozesse beschleunigt werden und auf ein neues Qualitätslevel kommen. Die Digitalisierung verspricht hierzu Unterstützung durch Vernetzung, Integration und neue Dienstleistungen.

Als führendes Zentrum zur Simulation von Werkstoffen und ihrem Verhalten ist unser Ziel, neue Leistungen in der datenbasierten Forschung und Entwicklung generieren und anbieten zu können. »Dies umfasst die Bereitstellung digitaler Workflows von der Prüfmaschine bis zur Bauteilbewertung«, aber auch die Strukturierung von Werkstoffdatenräumen. Die in diesem Zuge gespeicherten und bedarfsgerecht zugänglich gemachten Werkstoffdaten liefern eine größere Wissensbasis für Entwicklungsprozesse und werden zukunftsweisende Innovationen beschleunigen – ganz im Sinne der Leitgedanken der Fraunhofer-Gesellschaft als Beitrag zum Wohl der Gesellschaft und zur Stärkung der deutschen und europäischen Wirtschaft.



# DIGITALISIERUNG VON MATERIALIEN IN FORSCHUNG UND INDUSTRIE

## WORKSHOP-REIHE MATERIALDIGITAL



Unser zweiter Workshop MaterialDigital im Mai 2019 zeigte eindrucksvoll die Bestrebungen von Industrie und Wissenschaft, mit digitalen Workflows materialbasierte Entwicklungs- und Fertigungsprozesse sowie das Management von Produktlebenszyklen auf ein neues Qualitätsniveau zu bringen. In den praxisbezogenen Vorträgen und Diskussionen wurde deutlich, wie sich die Auseinandersetzung mit dem Thema professionalisiert. Besonders interessiert waren die Teilnehmerinnen und Teilnehmer an den Themen »Umgang mit Digitalen Materialdaten im Unternehmen« und »neue Geschäftsmodelle auf Basis strukturierter Materialdaten«.

### Workshop MaterialDigital2020 am 22. und 23. April 2020 in Freiburg

Die Methoden der Digitalisierung zielen darauf ab, Ursache-Wirkungs-Beziehungen präziser zu beschreiben und das Netzwerk der berücksichtigten Einflussfaktoren zu vergrößern. Die Werkzeuge dafür sind Ontologien, Wissensgraphen, Datenbanken, Werkstoffmodelle, künstliche Intelligenz, digitalisierte Maschinen und Digitale Zwillinge. Hier setzt auch der Workshop MaterialDigital2020 an: Er präsentiert aus erster Hand Best-Practice-Beispiele aus vielen Unternehmen und zeigt den aktuellen Stand der Forschung auf. Die Referentinnen und Referenten stellen ein einmaliges Portfolio an Lösungsansätzen für unterschiedliche Entwicklungsstufen der Digitalisierung in der werkstoffintensiven Wertschöpfung vor.

Das Interesse der Industrie an pragmatischen Lösungen, um die Digitalisierungschancen in der Werkstofftechnik zu nutzen, ist groß. Die Herausforderung besteht für viele Unternehmen darin, einen Startpunkt zu definieren, von dem man in die Tiefen des Datenschungels eintauchen kann, um möglichst bald davon zu profitieren.

Hierfür zeichnen sich vier Handlungsfelder ab:

**Daten strukturieren und Dateninseln integrieren:** Die Basis der Digitalisierung in werkstoffintensiven Wertschöpfungsketten bildet die Strukturierung von Werkstoffdaten. Erst durch eine »gemeinsame Sprache« werden ein sinnhafter Austausch und eine Verknüpfung möglich. Auf dieser Grundlage können Prozesse oder Prozessschritte datenbasiert dargestellt und Dateninseln zusammengeführt werden.

**Datenströme implementieren:** Die vielzitierte durchgängige Verfügbarkeit von Werkstoffinformationen erfordert die Implementierung von Datenströmen. Dazu müssen Messdaten, Maschinen und Messgeräte in einen digitalen Workflow integriert werden. Beispielsweise gilt es, digitale Pfade von der Prüfmaschine bis zum Simulationstool mit automatischen Schnittstellen (APIs) zu etablieren.

**Datenbestände analysieren und nutzen:** In vielen Unternehmen schlummern ungenutzte wertvolle Datenbestände, die es zu analysieren und zu nutzen gilt. Zentrale Arbeitsfragen sind: Wie können vorhandene Werkstoffdaten für die Entwicklung neuer Produkte genutzt werden? Wie Datenverarbeitungsprozesse beschleunigt werden? Hierbei nehmen in Zukunft sicherlich die Methoden des maschinellen Lernens eine viel zentralere Rolle ein.

**Datenprodukte entwickeln:** Letztlich führen digitalisierte Entwicklungs- und Produktionsprozesse zu neuen Geschäftsmodellen. Dazu gehören digitalisierte Werkstoffe und Digitale Zwillinge oder die Verhaltensvorhersage zur Auswahl eines neuartigen Materials.



**MaterialDigital2020**  
Der wertschöpfende und innovative Umgang  
mit Werkstoffdaten und -informationen  
Workshop, 22. - 23. April 2020  
[www.matdig.de](http://www.matdig.de)

# 1. INTERNATIONALE KONFERENZ PROGRAMMIERBARE MATERIALIEN PROGMATCON2020

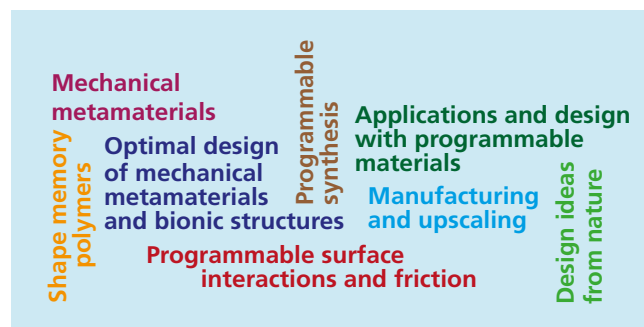
27. BIS 29. APRIL 2020, BERLIN

## Materialien neu denken: Funktionsintegration direkt ins Material

Globale Megathemen wie Klimawandel, Energiewende, Zugang zu sauberem Wasser, E-Mobilität oder Digitalisierung erfordern neben politischem und gesellschaftlichem Wandel disruptive technologische Lösungen, die einen intelligenten, effizienten und nachhaltigen Umgang mit lokal zur Verfügung stehenden Ressourcen ermöglichen. Programmierbare Materialien haben das Potenzial, hier einen Paradigmenwechsel einzuleiten, da sie technische Systeme aus vielen Bauteilen und Materialien durch ein einzelnes, lokal konfiguriertes ersetzen. Programmierbare Materialien übernehmen wesentliche Systemfunktionalitäten selbst und machen auf diese Weise zusätzliche Systemteile wie Sensoren oder Aktoren überflüssig. Sie ermöglichen damit kleinere Systemgrößen und reduzieren die Komplexität von Gesamtsystemen sowie die Abhängigkeit von großen Infrastrukturen. Neben der höheren Funktionsintegration und der damit verbundenen Ressourceneffizienz gestatten programmierbare Materialien in Zukunft aber auch gänzlich neue Funktionalitäten.

Um programmierbare Materialien zu konzipieren und produzieren, vereint das Fraunhofer »Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM« die Kompetenzen einer Vielzahl von Fraunhofer-Instituten. Damit im Materialeinsatz an der passenden Stelle im Produkt situativ die gewünschten Eigenschaften erzeugt werden können, muss die Informationsverarbeitung direkt im Material stattfinden. Dies stellt einen Paradigmenwechsel in der Produktentwicklung dar, der mehr fordert als Materialkompetenz: Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften und Informatik müssen in einer neuen Qualität zusammenwirken (siehe Seite 68).

Hier setzt die 1. Internationale Konferenz für Programmierbare Materialien ProgMatCon2020 an. Von 27. bis 29. April 2020 treffen sich in Berlin Expertinnen und Experten verschiedenster Fachrichtungen, um voneinander zu lernen und die Entwicklung, die Herstellung und die Anwendung programmierbarer Materialien voranzubringen.



In acht Symposien (siehe Abbildung) wird daran gearbeitet, die Programmierung konzeptionell und technisch umzusetzen. Das Feld der Referentinnen und Referenten zeigt die Multidisziplinarität des Themas und unterstreicht die Notwendigkeit der Abkehr vom Silodenken hin zu einer neuen Kultur des produktiven wissenschaftlichen Austauschs.

[www.progmatcon.com](http://www.progmatcon.com)

**ProgMatCon  
2020**

International Conference on Programmable Materials

# FRAUNHOFER IWM. WHAT'S NEXT?

2019 feierte die Fraunhofer-Gesellschaft ihr 70-jähriges Bestehen unter dem Motto »70 Jahre Fraunhofer. 70 Jahre Zukunft. #WHATSNEXT?«. Das Fraunhofer IWM gestaltet Zukunft mit seinen nachhaltigen Lösungen für eine optimierte Nutzung von Materialeigenschaften und neue Materialfunktionen. Um für Kunden und Gesellschaft den größtmöglichen Nutzen zu erzielen, richten sich unsere Themenschwerpunkte nach aktuellen und zukünftigen industriellen und gesellschaftlichen Bedarfen. Die Hinweise darauf erhalten wir aus intensiven Dialogen mit der Industrie, der Wissenschaft und der deutschen Politik. Unsere Strategie spiegelt sich in Investitionen und Vorlaufforschungsprojekten, deren Schwerpunkte 2019 hier dargestellt sind.

## Werkstoff-Mikrostrukturen bewerten und digitalisieren

Die strategischen Investitionen hatten einerseits die mikrodefektbasierte Festigkeitsbewertung im Fokus und andererseits die automatisierte Erfassung und systematische Digitalisierung von Werkstoffmikrostrukturen und deren Eigenschaften. Beide Investitionen nutzen unterschiedliche Wege und Werkzeuge, um Ermüdungs- und Lebensdauervorhersagen zu präzisieren.

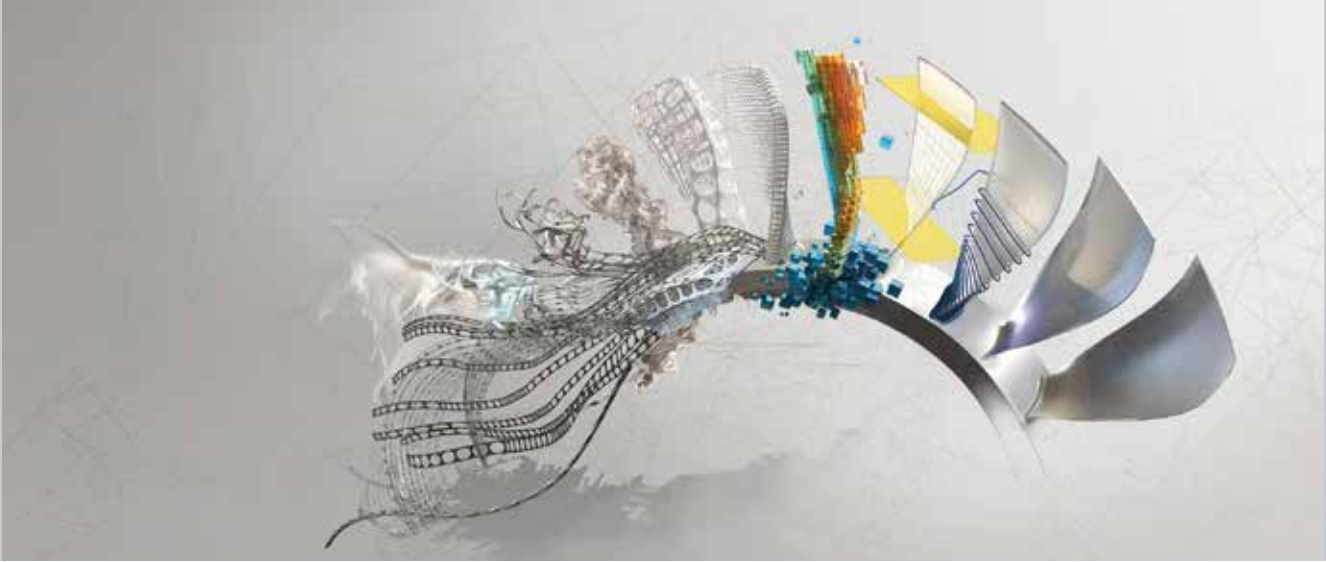
## Simulation metallischer Gusswerkstoffe beinhaltet nun Mikrodefektfelder

Der Stahlguss macht zwar nur 4 Prozent der gesamten Gussfertigung in Deutschland aus, ist jedoch für hochbeanspruchte Bauteile unabdingbar: beispielsweise als korrosionsbeständiger Werkstoff für Pumpengehäuse und Rotoren oder hitzebeständig in Verbrennungsanlagen, Biokraftwerken und Walzstraßen-Komponenten. Ansonsten harmlose kleine Defekte können darin als Ansammlung große Auswirkungen auf die Lebensdauer der Bauteile haben. Das gilt in ähnlicher Weise für Aluminium-Legierungen, die mit 88 Prozent den größten Teil in der NE-Metallgussfertigung ausmachen. Mit unserer erweiterten »Mikrodefektbasierten Festigkeitsbewertung« und unserem fundierten Know-How von schädigungs- und bruchmechanischen Methoden bewerten wir gehäuft auftretende Mikrodefekte, die mit dem umgebenden Material wechselwirken, sogenannte Defektfelder. Zudem erfassen wir mit besonders hoher zeitlicher Auflösung gleichzeitig Temperatur- und Dehnungs-

felder, verteilt über den Probenquerschnitt. Dazu nutzen wir die Grauwertkorrelation per ARAMIS und Infrarot-Kameras. Die resultierenden Bewertungen präzisieren unsere Ermüdungs- und Lebensdauervorhersagen.

## Systematische Digitalisierung von Werkstoffmikrostrukturen und deren Eigenschaften

Die Investitionsmaßnahme soll das Fraunhofer IWM in die Lage versetzen, Konzepte zur Digitalisierung von Werkstoffen und deren Eigenschaften zu entwickeln und zu erproben sowie im Laboralltag anzuwenden. Hierzu wurde unter anderem in ein Blechprüflabor mit Automatisierungstechnik und in eine Erweiterung unserer Mikroskopie hin zu einer automatisierten Mikrostrukturanalyse investiert. Wir arbeiten an der Integration aller Arbeitsschritte in einen Workflow, der teilweise automatisierte Versuche und metallografische Untersuchungen beinhalten soll. Die Werkstoffmikrostrukturdaten sollen dann mit den zugehörigen Ergebnissen systematisch und digitalisiert abgelegt werden, damit sie für weitergehende Abfragen und Untersuchungen praxistauglich zur Verfügung stehen als auch für virtuelle Tests zur Erzeugung ergänzender Datenpunkte genutzt werden können.



*Im neu gestarteten Fraunhofer-Leitprojekt EVOLOPRO nutzen die beteiligten Fraunhofer-Institute evolutionsbiologische Mechanismen für die Entwicklung einer neuen Generation von Produktionssystemen. © Fraunhofer IPT*

## Vorlaufforschungsprojekte

Das Fraunhofer IWM beteiligt sich in Zusammenarbeit mit anderen Fraunhofer-Instituten an Vorlaufforschungsprojekten, die in der Wirtschaft zu Innovationen führen werden. Die Fraunhofer-internen Programme unterstützen institutsübergreifende, anspruchsvolle Vorlaufforschung zur Vorbereitung neuer Geschäftsfelder.

### 2019 neu begonnen

**PREPARE Inline-Umformvergüten von Leichtbauwerkstoffen: Eine Technologie für große Stückzahlen – AlInForm**  
Für hochfeste Aluminium-Blechwerkstoffe wird ein kombinierter Wärmebehandlungs- und Kaltumformprozess entwickelt, um ihn in den Prozessstakt zu integrieren. Das Fraunhofer IWM arbeitet an der Charakterisierung, Bewertung und Modellierung der Werkstoffeigenschaften, die stark von der Prozessführung abhängen. So wird das günstigste Prozessfenster für den jeweiligen Umformprozess gefunden.

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

### PREPARE Hoch(warm)feste Aluminiumlegierungen für das Urformen im Leichtbau – HAlUr

Für neue Möglichkeiten im Leichtbau werden hochfeste Aluminiumlegierungen entwickelt, die für Guss und additive Fertigungsverfahren geeignet sind. Für die Berechnung der voraussichtlichen Eigenschaften der neuen 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

### PREPARE 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 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

### PREPARE Unternehmensspezifische Werkstoffdatenräume zur beschleunigten Produktentwicklung – UrWerk

Ein Framework für maßgeschneiderte Werkstoffdatenräume wird entwickelt, das die komplexe Historie von Werkstoffen in Form eines Netzwerkgraphen abbildet. Das Ergebnis soll eine allgemeingültige Basis-Ontologie für Werkstoffdaten sein, die bei Bedarf anwendungs- und unternehmensspezifisch erweitert werden kann. Die strukturierte Datenablage und Dokumentation verschiedenster Werkstoff- und Werkstoffsystemzustände wird durch datengetriebene Analyse-Werkzeuge wie Design of Experiments oder Machine Learning zugänglich.

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

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

Evolutionsbiologische 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 Umgebungsbedingungen 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 IWM. WHAT'S NEXT?

## **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

### **Laufend**

## **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 – März 2021 | Dr. Jörg Hohe

## **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

### **2019 abgeschlossen**

## **MAVO Biomimetischer Synthesekautschuk in innovativen Elastomerkompositen – BISOYA**

Die Leistungsfähigkeit von synthetischem Kautschuk wurde nach dem Naturkautschuk-Vorbild verbessert. Das Fraunhofer IWM entwickelte experimentelle Verfahren zur Untersuchung der Abriebbeständigkeit der Elastomerkomposite.

Laufzeit: März 2015 – Jan. 2019 | Dr. Raimund Jaeger

## **MAVO Ceramic Subsea Systems – CS<sup>3</sup>**

Systemlösungen und Prüfverfahren für wartungsarme, langlebige Komponenten (bis 6000 m Tiefe) wurden realisiert. Das Fraunhofer IWM entwickelte Verbindungstechniken sowie Herstellungs- und Simulationsmethoden zu extrem korrosionsbeständigen Diamant-Keramiken, die hohen Temperaturen und Drücken standhalten.

Laufzeit: Febr. 2016 – Jan. 2019 | Dr. Andreas Kailer

## **MAVO Leichtbaustrukturen aus SiC/SiC-Keramik – CMC-Engine**

Die Voraussetzungen für den Einsatz keramikfaserverstärkter Keramiken (CMC) im Heißgasbereich künftiger Flugzeugtriebwerke wurden gelegt: von der Materialherstellung über die Charakterisierung und Modellierung der Materialien bis hin zur Bearbeitung und Bewertung des Einsatzverhaltens von Bauteilen.

Laufzeit Jan. 2017 – Dez. 2019 | Dr. Jörg Hohe

## **MAVO Skalierbare Perowskit-Technologie – PeroTec**

Für Photovoltaik im Quadratmeter-Maßstab wurden technologische Voraussetzungen für Perowskit-Materialien geschaffen: Geschützt vor Wasser, Sauerstoff und Ionendrift wurden sie im Bauteil integriert und elektrisch kontaktiert.

Laufzeit Febr. 2016 – Jan. 2019 | Dr. Rainer Kübler



# KURATORIUM

## **MEF Entwicklung von Verfahren für solar und optisch funktionale gebäudeintegrierbare Glaselemente mit kleinen Knickradien – soGlas**

Ein Verfahren wurde entwickelt, das die lokale Formgebung von Flachglas sowie eine Methode zur Laminierung der dreidimensionalen Strukturen mit PVB oder EVA-Folien beinhaltet.  
Laufzeit: Jan. 2017 – Dez. 2019 | Dr. Rainer Kübler

## **Fraunhofer-Discoverprojekt Druckbare nanoskalige Festschmierstoffe zur lokalen Einstellung der Reibung beim Umformen – Blechfunktionalisierung**

Die entwickelten druckbaren, nanoskaligen Festschmierstoff-Systeme ermöglichen, die tribologischen Eigenschaften der Bleche und den Werkstofffluss beim Tiefziehen werkzeug- und maschinenunabhängig zu steuern.  
Laufzeit: Juli 2018 – Juni 2019 | Prof. Dr. Martin Dienwiebel

## **Projekt der Fraunhofer-Zukunftstiftung Diamant für Hochleistungsanwendungen der Zukunft – DiaLe**

Das Fraunhofer IWM entwickelte die Technologie zur Abscheidung präzise orientierter, einkristalliner Metall- und Oxidschichten auf Silizium als Substrat für einkristalline Diamantschichten.  
Laufzeit: Jan. 2015 – Aug. 2019 | Dr. Frank Burmeister

## **Das Kuratorium des Fraunhofer IWM 2019**

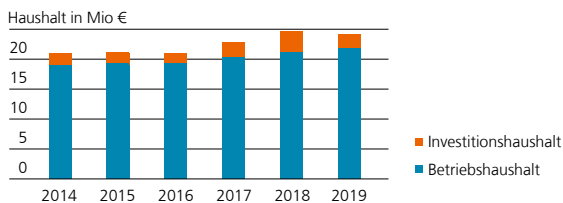
Dem Kuratorium gehören Persönlichkeiten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft an, die dem Fraunhofer IWM fachlich nahestehen. Gemeinsam mit dem Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft beraten und unterstützen sie das Institut mit ihrer Expertise bei strategischen Themen, Weichenstellungen im Institut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

- Dr. Jürgen Kirschner,  
Kuratoriumsvorsitzender bis Juni 2019  
Robert Bosch GmbH, Renningen
- Dr. Markus Hermle,  
Kuratoriumsvorsitzender ab Juni 2019  
Daimler AG, Sindelfingen
- Dr. Nikolaus Blaes,  
Saarschmiede GmbH, Völklingen
- Alexander Essig,  
Rosswag GmbH, Pfinztal
- Dr. Jörg Eßlinger,  
MTU Aero Engines AG, München
- Dr. Martin Grönefeld,  
Magnetfabrik Bonn GmbH, Bonn
- Dr. Roland Herzog,  
MAN Diesel & Turbo SE, Oberhausen
- Bernhard Hötger,  
HEGLA GmbH & Co. KG, Beverungen
- Prof. Dr. Oliver Kraft,  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe
- Bruno Posset,  
Märkisches Werk GmbH, Halver
- Dr. Silke Wagener,  
Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG,  
Weinheim
- MinRat Dr. Joachim Wekerle,  
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau,  
Baden-Württemberg, Stuttgart

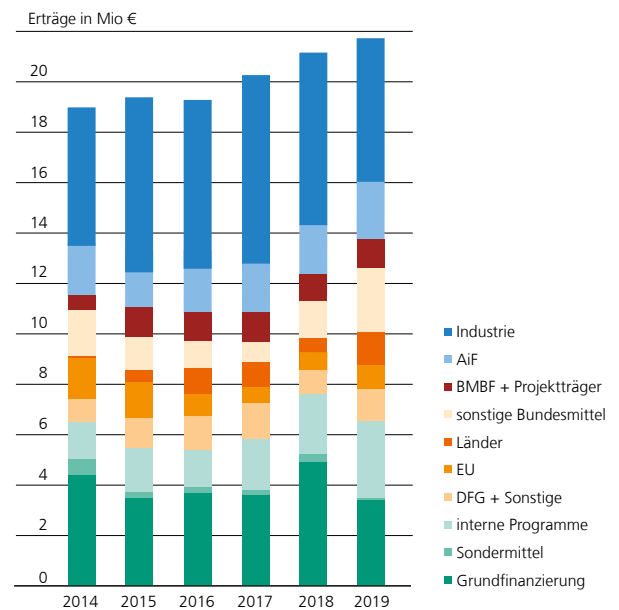
# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## 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 21,7 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 2019 liegt bei 36,6 Prozent. Der Investitionshaushalt 2019 beträgt 2,3 Millionen Euro.



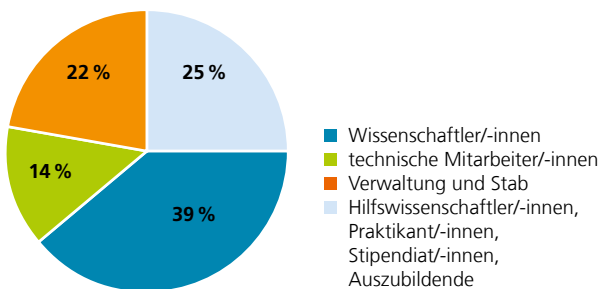
1 Entwicklung Investitionshaushalt und Betriebshaushalt.



2 Entwicklung Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM.

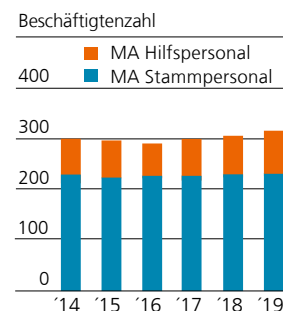
## Personalentwicklung

Ende 2019 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 313 Personen beschäftigt. Davon sind 233 Mitarbeitende als Stammpersonal und 80 Mitarbeitende als Hilfspersonal (Hilfskräfte, Praktika, Ausbildung, Abschlussarbeiten). Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus

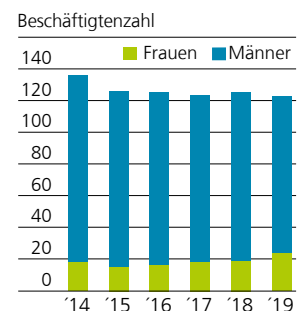


3 Personal am Fraunhofer IWM Ende 2019 nach Bereichen.

122 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, 43 technischen Beschäftigten sowie 68 Angestellten in Verwaltung und IL-Stab. 9 Auszubildende werden in vier Berufsbildern ausgebildet.



4 Entwicklung Personal am Fraunhofer IWM.



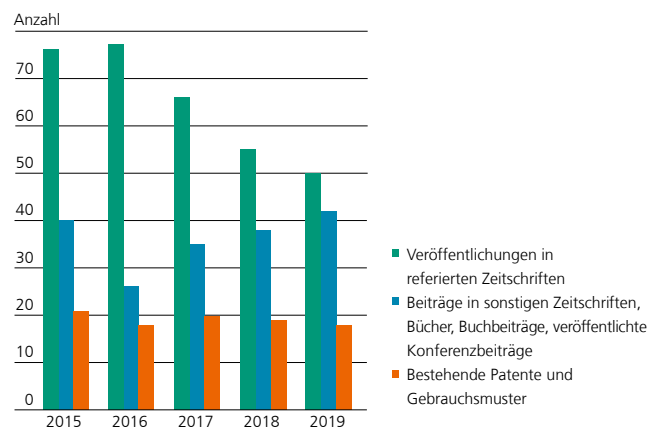
5 Entwicklung der Anzahl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am Fraunhofer IWM.

## Wissenschaftliche Leistung

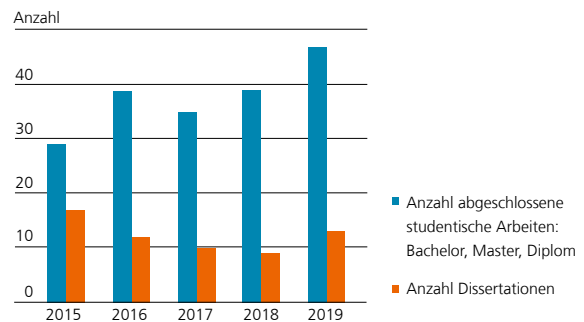
Die Fraunhofer-Institute betreiben anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für die Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Dabei ist neben dem wirtschaftlichen Erfolg die wissenschaftliche Exzellenz ein notwendiges Kriterium, um die Mission eines Instituts erfolgreich zu erfüllen.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

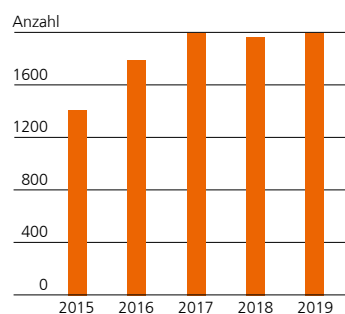
- Qualifikation von wissenschaftlichem Nachwuchs
- Wissenschaftlicher Output in Patenten und Veröffentlichungen
- Wissenschaftliche Anerkennung und Vernetzung



1 Publikationsleistung des Fraunhofer IWM.



2 Akademische Qualifizierung am Fraunhofer IWM.



3 Anzahl Zitationen von Veröffentlichungen des Fraunhofer IWM.

# 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>Leitungsbereich</b>			
<b>Strategische Planung</b>	Prof. Dr. Peter Gumbsch	+49 761 5142-100	peter.gumbsch@iwm.fraunhofer.de
Strategische Planung und Kommunikation	Thomas Götz	+49 761 5142-153	thomas.goetz@iwm.fraunhofer.de
<b>Arbeitssicherheit und Organisationsentwicklung</b>	Dr. Rainer Kübler	+49 761 5142-213	rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de
Organisationsentwicklung	Elke Schubert	+49 761 5142-124	elke.schubert@iwm.fraunhofer.de
<b>Digitalisierung</b>	Prof. Dr. Chris Eberl	+49 761 5142-495	chris.eberl@iwm.fraunhofer.de
HUB MaterialDigital	Philipp von Hartrott	+49 761 5142-273	philipp.von.hartrott@iwm.fraunhofer.de

---

<b>Infrastruktur</b>	Dr. Rainer Kübler	+49 761 5142-213	rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de
Projektadministration und Finanzen	Nina Halaczinsky	+49 761 5142-487	nina.halaczinsky@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
Einkauf und Besuchermanagement	Iris Wehrle	+49 761 5142-360	iris.wehrle@iwm.fraunhofer.de
Personal und Dienstreisen	Kerstin A. Drüsedau	+49 761 5142-140	kerstin.druesedau@iwm.fraunhofer.de

## Geschäftsfelder und ihre Gruppen

<b>Materialdesign</b>	<b>Prof. Dr. Christian Elsässer</b>	+49 761 5142-286	christian.elsaesser@iwm.fraunhofer.de
Meso- und Mikromechanik	Dr. Thomas Straub	+49 761 5142-537	thomas.straub@iwm.fraunhofer.de
Materialmodellierung	Dr. Daniel Urban	+49 761 5142-378	daniel.urban@iwm.fraunhofer.de
<b>Fertigungsprozesse</b>	<b>Dr. Dirk Helm</b>	+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>	<b>Prof. Dr. Matthias Scherge</b>	+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>	<b>Dr. Michael Luke</b>	+49 761 5142-338	michael.luke@iwm.fraunhofer.de
Ermüdungsverhalten	Dr. Majid Farajian	+49 761 5142-268	majid.farajian@iwm.fraunhofer.de
Crashsicherheit und Schädigungsmechanik	Dr. Silke Sommer	+49 761 5142-193	silke.sommer@iwm.fraunhofer.de
Crashdynamik	Frank Huberth	+49 761 5142-472	frank.huberth@iwm.fraunhofer.de
Fügeverbindungen	Dr. Silke Sommer	+49 761 5142-266	silke.sommer@iwm.fraunhofer.de
Verbundwerkstoffe	Dr. Jörg Hohe	+49 761 5142-340	joerg.hohe@iwm.fraunhofer.de
Bruchmechanik und Strukturintegrität	Dr. Igor Varfolomeev	+49 761 5142-210	igor.varfolomeev@iwm.fraunhofer.de
<b>Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte</b>	<b>Dr. Christoph Schweizer</b>	+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



## MATERIALDESIGN

### GESCHÄFTSFELDLEITER

Prof. Dr. Christian Elsässer

Telefon +49 761 5142-286

[christian.elsaesser@iwf.fraunhofer.de](mailto:christian.elsaesser@iwf.fraunhofer.de)

### GRUPPEN



#### MESO- UND MIKROMECHANIK

Wir untersuchen mechanische Eigenschaften und die Zuverlässigkeit von Werkstoffen anhand klein-volumiger Proben. Hierfür entwickeln wir die experimentelle Mechanik zur Untersuchung mechanischer Materialeigenschaften in kleinen Dimensionen kontinuierlich weiter.

*Dr. Thomas Straub | [thomas.straub@iwf.fraunhofer.de](mailto:thomas.straub@iwf.fraunhofer.de)*



#### MATERIALMODELLIERUNG

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

*Dr. Daniel Urban | [daniel.urban@iwf.fraunhofer.de](mailto:daniel.urban@iwf.fraunhofer.de)*

A portrait of a middle-aged man with short, graying hair and glasses, wearing a dark blue suit jacket, a white shirt, and a red and white striped tie. He is smiling slightly and looking towards the camera. The background is a blurred office setting with windows.

## UNSERE HIGHLIGHTS 2019

2019 haben wir fünf größere Fraunhofer-Verbundprojekte begonnen. Im Leitprojekt Quantenmagnetometrie (QMag) sind unsere Aufgaben zum einen die Modellierung von quantenmechanischen Zuständen atomarer NV-Zentren in Diamant-Quantenmagnetsensoren, mit denen sich schwache Magnetfelder mit hoher Signalempfindlichkeit und Ortsauflösung messen lassen. Zum anderen arbeiten wir an neuartigen Einsatzkonzepten für QMag-Sensoren zur frühzeitigen Detektion von Schädigungen in Materialgefügen unter mechanischer Belastung mit. Im Leitprojekt MaNiTu geht es darum, für Tandemsolarzellen mit atomistischen Methoden von Perowskiten neuartige Absorberverbindungen abzuleiten sowie diese an Kontaktschichten anzupassen. In den marktorientierten strategischen Vorlauforschungsprojekten (MAVO) MESiC und HAIUr berechnen wir Grenzflächeneigenschaften von SiC-Leistungselektronik-Materialien beziehungsweise Kristallphaseneigenschaften von Al-Leichtbau-Legierungen. Im MAVO-Projekt Ur-Werk erarbeiten wir Data-Space- und Workflow-Konzepte zur experimentellen Ermittlung von Werkstoffverhalten. Für diese Aufgaben sind wir 2019 auch personell gewachsen. Wir freuen uns mit Dr. Daniel Mutter über seine Auszeichnung mit dem Werkstoffmechanikpreis.

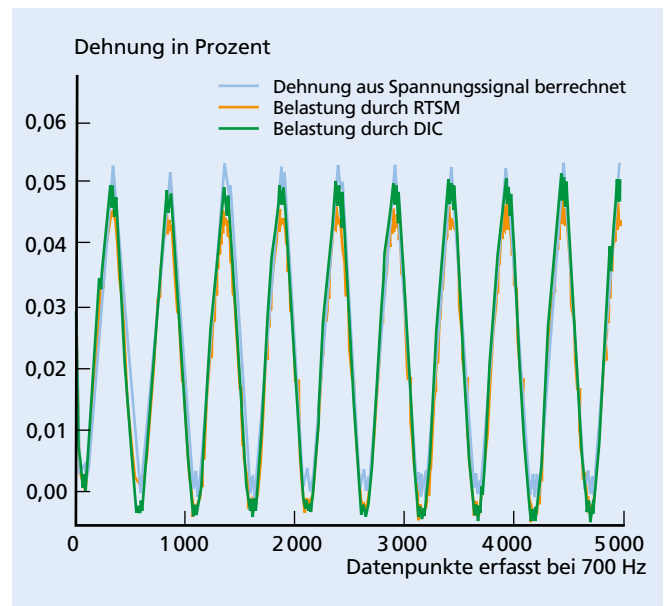
## VERFAHREN ZUR BERÜHRUNGSLOSEN ECHTZEIT-DEHNUNGSMESSUNG FÜR MIKROPROBEN ENTWICKELT

Kleinste mechanische Teile unter Last sind in Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), Automobilen oder Uhrenkomponenten häufig zu finden. Da die kleinen Abmessungen einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Komponenten haben, ist es sinnvoll, deren Materialeigenschaften an Mikroproben im Mikro- bis Millimeter-Maßstab zu ermitteln. Mikroproben sind zudem wichtig, um lokale Materialeigenschaften kritischer Bereiche von Makrobauteilen zu erfassen. Die Basis dafür ist eine gezielte Probenpräparation – beispielsweise für Schweißverbindungen, für Beschichtungen wie Wärmedämmschichten für Turbinenschaufeln oder für die Untersuchung der Entwicklung mikrostruktureller Schäden.

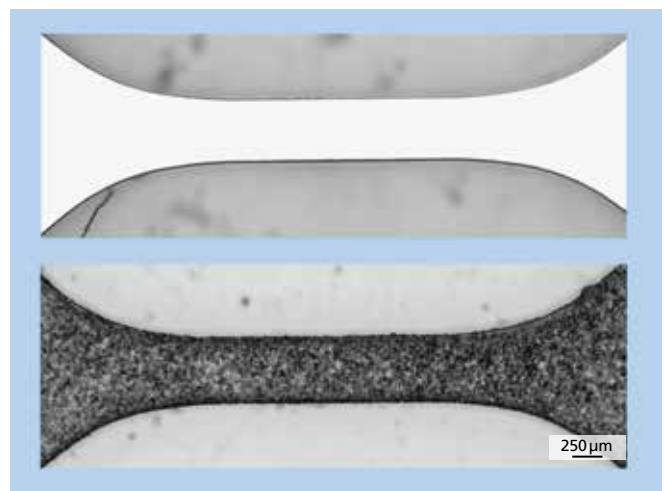
Zur experimentellen mechanischen Charakterisierung ist die genaue Bestimmung der Dehnung grundlegend, beispielsweise bei Ermüdungs- und Zugversuchen. Insbesondere bei Ermüdungsversuchen ist es vorteilhaft, Dehnungen in Echtzeit zu bestimmen, es handelt sich dabei um dehnungskontrollierte Ermüdungsversuche. Für die sehr kleinen Proben bei mikromechanischen Prüfungen können die üblichen Dehnungsmessstreifen und Dehnungsaufnehmer nicht genutzt werden: Diese müssen mit der zu prüfenden Probe in Kontakt stehen, sind jedoch zu groß für die Abmessungen der Proben, die in der Größenordnung von Mikrometern liegen. Alternative Lösungen sind berührungslose Messtechniken. Am Fraunhofer IWM nutzen wir hierzu Kamerabilder. Kameras sind benutzerfreundlich und leicht verfügbar.

### Echtzeit Spannungsmessungs-Software

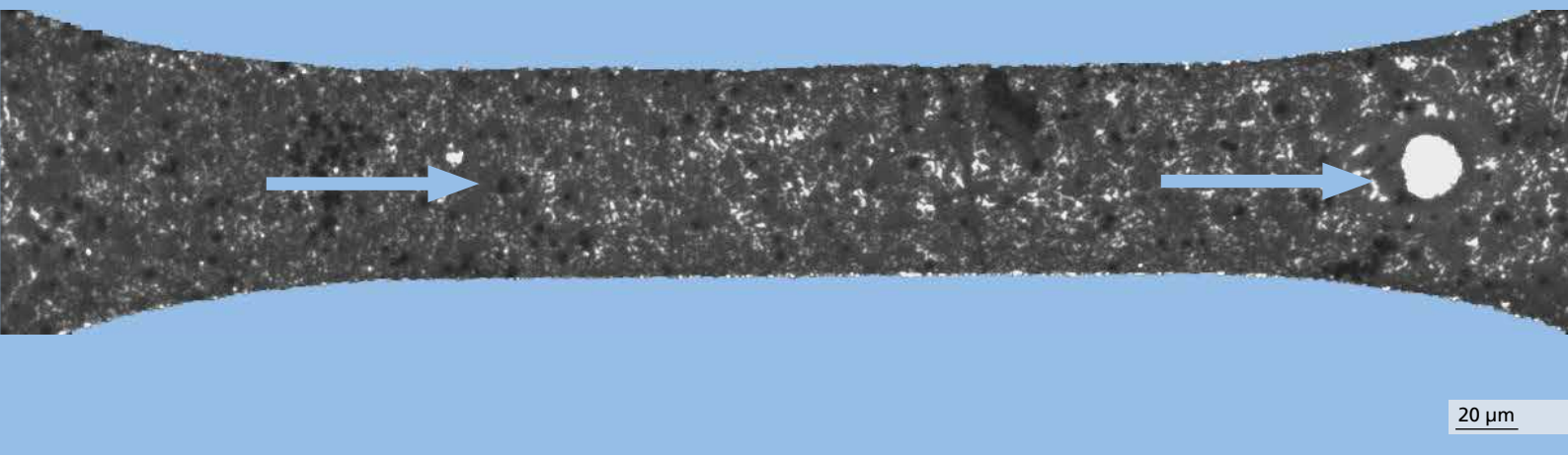
In den letzten Jahren haben wir die Digital-Image-Correlation-(DIC)-Technik eingesetzt, insbesondere das auch am Institut weiterentwickelte Matlab-Toolkit »Digital Image Correlation and Tracking« 12413 ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)) von Chris Eberl.



1 Dehnungsmessungen im elastischen Bereich bei  $E = 150 \text{ GPa}$ .



2 Verbesserung der Oberflächenstruktur von Proben für die Real-Time-Strain-Measurement-(RTSM-)Technik: oben polierte Probe, unten Probe mit eigenentwickelter Texturverbesserung.



3 Screenshot bei Real Time Strain Measurement RTSM:  
Die Dehnung wird durch die blauen Pfeile dargestellt.

Damit konnten wir aus unseren mikromechanischen Experimentbildern offline die Dehnung bestimmen. Diese Technik verwendet die Kreuzkorrelation zwischen zwei Bildern, um definierte Marker zu verfolgen. Diese Marker werden zuvor manuell festgelegt und können mittels der Software effektiv gefiltert werden. Der Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch: Er ist sehr rechenintensiv und nicht für eine Echtzeitanwendung geeignet.

Die in Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IPM entwickelte Real-Time-Strain-Measurement-(RTSM-)Technik ermöglicht uns, die Dehnung online bei etwa 1,2 kHz zu messen. Die Genauigkeit der Software wurde getestet, indem deren Ergebnisse mit denen der DIC-Technik sowie mit der im elastischen Bereich berechneten Dehnung verglichen wurden (Abbildung 1). Die RTSM-Technik findet im Referenzbild denjenigen Bereich, der im zu verfolgenden Bild markiert wurde. Um dies zu erreichen, wird eine effiziente GPU-Implementierung der Kreuzkorrelation genutzt, die auf der schnellen Fourier-Transformation basiert.

### Dehnungsgesteuerte Ermüdungsexperimente

Dehnungskontrollierte Ermüdungstests stellen sicher, dass die auf die Probe ausgeübte Dehnung während der gesamten Messung in einem festgelegten Bereich liegt. Solche Prüfungen sind vor allem dann sinnvoll, wenn die angewandte Belastung die Streckgrenze überschreitet, wie es bei niedrigzyklischen Ermüdungstests vorkommt. Die Kontrolle der Dehnung statt der Last stellt sicher, dass ein ausgelöster Riss nicht beschleunigt bis zum Bruch der Probe weitergeleitet wird. Die Last bei der Rissinitiierung ist auf diese Weise reduziert, wodurch die Rissübertragung stabilisiert (oder in einigen Fällen gestoppt) wird.

Mit dieser Software ist es nun möglich, dehnungsgesteuerte Ermüdungsexperimente auch für Mikroproben durchzuführen. Dies betrifft insbesondere niedrigzyklische Ermüdungsexperimente, die eine Probe in den elastisch-plastischen Lastbereich bringen. Die Software wurde bis an ihre Grenzen getestet, um Dehnungen im Bereich von  $10^{-5}$  bis 30 genau zu registrieren. Die Technik ist hervorragend geeignet für Proben mit gut sichtbarer mikrostruktureller Textur. Die optische Strukturverfolgung für dehnungskontrollierte Tests wird bei polierten Materialien ungenau. Diese Einschränkung wird durch die Verwendung einer selbst entwickelten Texturverbesserung überwunden – das Ergebnis zeigt Abbildung 2.

Bisher haben wir erfolgreich dehnungskontrollierte Experimente für mit High Frequency Mechanical Impact (HFMI) behandelte Mikroproben aus geschweißten Bereichen einer Edelstahlprobe durchgeführt. Die Proben waren gut poliert, sodass ihnen eine künstliche Textur hinzugefügt werden musste. Die dehnungskontrollierten Tests, die im elastisch-plastischen Lastbereich durchgeführt wurden, zeigten Phänomene wie die Spannungsrelaxation über die Zeit und das Verhalten von Spannung und Dehnung während der Rissausbreitung.

Thomas Akhil, Dr. Thomas Straub

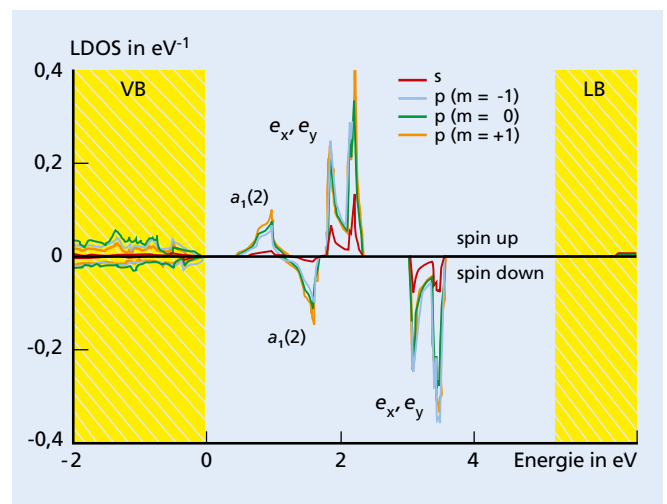
## GRUNDLAGEN IM QUANTEN-MAGNETOMETER: ENTWICKELT FÜR BERÜHRUNGSLOSE MATERIALPRÜFUNG

Die Vermessung und Optimierung komplexer nanostrukturierter Schaltkreise, die Sichtbarmachung einzelner Bits in elektronischen Speichermedien sowie die kontaktfreie Materialprüfung zur Detektion kleinster Risse – all dies sind vielversprechende Anwendungsfelder für den Einsatz neuartiger Quanten-Magnetometer. Damit diese Visionen Realität werden, hat sich das Fraunhofer IWM mit fünf weiteren Fraunhofer-Instituten (IAF, IPM, IMM, IISB und CAP) im Fraunhofer-Leitprojekt »Quantenmagnetometrie (QMag)« zusammengeschlossen.

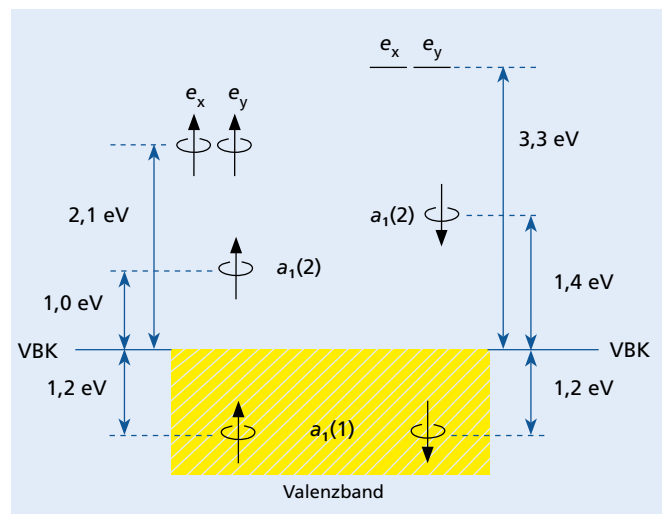
Die Magnetometrie hat das Ziel, Magnetfelder hochpräzise und auf kleinster Skala orts aufgelöst zu messen. In der Medizintechnik werden dafür erfolgreich und standardmäßig supraleitende Tunnelkontakte erfolgreich eingesetzt, etwa zur Untersuchung von Hirnströmen. Ein entscheidender Nachteil ist jedoch, dass die SQUID-Sensoren aufwändig auf Temperaturen nahe null Kelvin gekühlt werden müssen. Die Verwendung sogenannter NV-Zentren in Diamant bietet hingegen erstmals die Möglichkeit, eine entsprechend hohe Messempfindlichkeit bei Raumtemperatur zu erreichen. Zudem ist eine sehr hohe Ortsauflösung im Nanometerbereich möglich, hundertmal genauer als der Stand der Technik.

### NV-Defektkomplex in Diamant

Was versteht man unter einem NV-Zentrum, und wie ist dieses aufgebaut? Ausgangspunkt ist ein Diamantkristall, in dem ein Kohlenstoffatom durch ein Stickstoffatom (N) ersetzt wird, in dessen direkter Nachbarschaft ein weiteres Kohlenstoffatom fehlt, eine sogenannte Kohlenstoff-Vakanz (Abbildung 3). Die durch diesen Defektkomplex hervorgerufenen Änderungen in der Elektronenstruktur des Diamanten lassen sich gezielt durch Laser manipulieren und als ein Spinqubit präparieren, also als

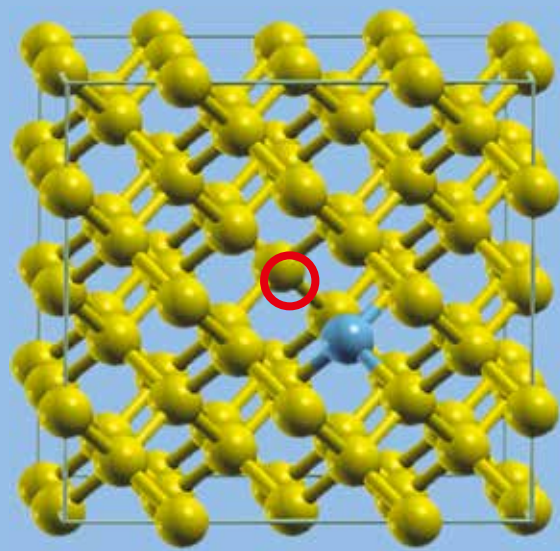


1 Lokale spinabhängige Zustandsdichten (LDOS) benachbarter C-Atome (unten), aufgespalten in Anteile der s- und p-Orbitale; gelb unterlegt: Valenzband (VB) und Leitungsband (LB).



2 Berechnete spinaufgelöste Einelektronenniveaus relativ zur Valenzbandkante (VBK) in guter Übereinstimmung mit Literaturwerten (vgl. Gali et al. PRB 77, 155206).





3 Atomistisches Superzellenmodell eines NV-Zentrums in Diamant: gelb Kohlenstoff, blau Stickstoff, rot Sauerstoffleerstelle.

ein Zweizustands-Quantensystem: Dieser elementarste Magnet reagiert hochsensibel auf äußere Magnetfelder, was wiederum durch Laser registriert werden kann.

Mit einem NV-Defekt in einer Diamantspitze eines Rasterkraftmikroskops bietet sich erstmals die Möglichkeit, auf atomarer Skala Magnetfeldverteilungen zu messen. Befinden sich jedoch in der Nähe des NV-Zentrums Gitterverzerrungen, atomare Fehlstellen, Korngrenzen, Versetzungen oder gar Oberflächen, so haben diese einen unerwünschten Einfluss auf dessen Energieniveaus. Mit physikalischen Modellen und theoretischen Methoden (wie der Dichtefunktionaltheorie) unterstützt das Fraunhofer IWM seine Partner beim Bau hochempfindlicher Magnetometer. Die eigens entwickelten Modelle verbessern das Verständnis der Vorgänge auf atomarer Skala und erlauben die quantitative Berechnung von Störeinflüssen. Befindet sich ein NV-Defektkomplex sehr nah an der Oberfläche der Diamantspitze, so besitzt er eine andere Resonanzfrequenz als wenn er tief im perfekt kristallinen Diamantbereich lokalisiert ist. Der Defekt darf jedoch nicht zu weit von der Spitze entfernt sein, um die angestrebte Ortsauflösung der Magnetfeldmessung zu gewährleisten. Welcher Abstand zur Oberfläche ist nun ein guter Kompromiss? Welche Einflüsse haben verschiedene kristallographische Terminierungen von Oberflächen? Diese und andere Fragen geht das Fraunhofer IWM im Projekt an und beantwortet so genau wie möglich, was bei der Kalibrierung und Interpretation realer Messergebnisse von Nutzen sein wird.

### NV-Defektenergieniveaus im Einkristall

Zum Start des Projekts untersuchten wir das Energieniveauschema des isolierten (idealen) NV-Defektkomplexes und berechneten mit hoher Genauigkeit die beteiligten elektro-

nischen Energieniveaus. Die Energieunterschiede zwischen diesen Niveaus bestimmen die Laserfrequenzen, die zur Realisierung des gewünschten Spinqubits benötigt werden. Abbildung 1 zeigt die lokale Zustandsdichte (LDOS) der an den Defekt angrenzenden C-Atome. Die Defektniveaus inmitten der Bandlücke gehören zu den für die Magnetometrie interessanten Elektronenzuständen. Die Ergebnisse unserer bisherigen Rechnungen sind in einem Termschema in Abbildung 2 zusammengefasst. Sie stimmen mit den Vorarbeiten anderer Theoriegruppen sehr gut überein.

Diese NV-Defektenergieniveaus im Einkristall sind nun der Ausgangspunkt, um die Vielzahl der oben erwähnten Störeinflüsse zu untersuchen. Wir vergrößern dafür die in Abbildung 3 gezeigte Simulations-Superzelle, ergänzen sie um strukturelle Defekte und berechnen die modifizierten Energieniveaus.

### Magnetometrie für Werkstoffcharakterisierung und Bauteilprüfung

Die berührungslose und zerstörungsfreie Materialprüfung, beispielsweise von hochfesten Stählen, ist ein vielversprechendes Anwendungsgebiet der Quantenmagnetometrie. Die hochempfindliche 3D-Magnetfeldmessung bietet erstmals das Potenzial, Mikrorisse im Material – welche Ausgangspunkt von Überlastung und Bauteilversagen sein können – bei zyklischen Belastungstests ortsaufgelöst zu erfassen. Im Bereich makroskopischer Tests sind solche magnetisch messenden Verfahren bekannt und etabliert, zum Beispiel bei der Wirbelstromprüfung. Drei bis vier geometrische Größenordnungen darunter, bei Mikrorissen nahe der Rauheitsgrenze des Prüflings, betreten wir jedoch wissenschaftliches Neuland.

Dr. Wolfgang Körner, Dr. Daniel Urban

## FERTIGUNGSPROZESSE

### GESCHÄFTSFELDLLEITER

Dr. Dirk Helm

Telefon +49 761 5142-158

[dirk.helm@iwm.fraunhofer.de](mailto:dirk.helm@iwm.fraunhofer.de)

### GRUPPEN



#### **PULVERTECHNOLOGIE UND FLUIDDYNAMIK**

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

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



#### **UMFORMPROZESSE**

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

*Dr. Alexander Butz | [alexander.butz@iwm.fraunhofer.de](mailto:alexander.butz@iwm.fraunhofer.de)*



#### **GLASFORMGEBUNG UND -BEARBEITUNG**

Wir erarbeiten bruchmechanische Analysemethoden und Fertigungsverfahren für Glas-Heißformen, Ultrapräzisionsbearbeitung, Fügetechniken und spezielle Trenn- und Sägeverfahren. Wir entwickeln neue Prozesse und Produkte im Bereich Gläser, Glaskeramiken und Halbleitermaterialien und bewerten sie bezüglich Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit in die industrielle Anwendung.

*Tobias Rist | [tobias.rist@iwm.fraunhofer.de](mailto:tobias.rist@iwm.fraunhofer.de)*

A portrait of Dr. Alexander Butz, a middle-aged man with short grey hair, wearing black-rimmed glasses, a light blue button-down shirt, and a dark blue suit jacket. He is smiling and looking towards the camera. The background is a blurred office interior with windows showing greenery outside.

## UNSERE HIGHLIGHTS 2019

Mit Dr. Alexander Butz konnten wir für die Gruppe »Umformprozesse« einen exzellenten Gruppenleiter gewinnen. Bei der Digitalisierung in den Werkstoffwissenschaften haben wir Fortschritte erzielt: Das Projekt »European Materials Modelling Council (EMMC)« haben wir zusammen mit Partnerinnen und Partnern erfolgreich abgeschlossen und waren unter Mitwirkung von Dr. Adham Hashibon an der Veröffentlichung der »European Materials Modelling Ontology (EMMO)« beteiligt. Des Weiteren haben wir die Digitalisierung einer Glasbiegemaschine zur Demonstration des Maschinellen Lernens in der Produktion im Leitprojekt »Machine Learning for Production (ML4P)« vorangetrieben.

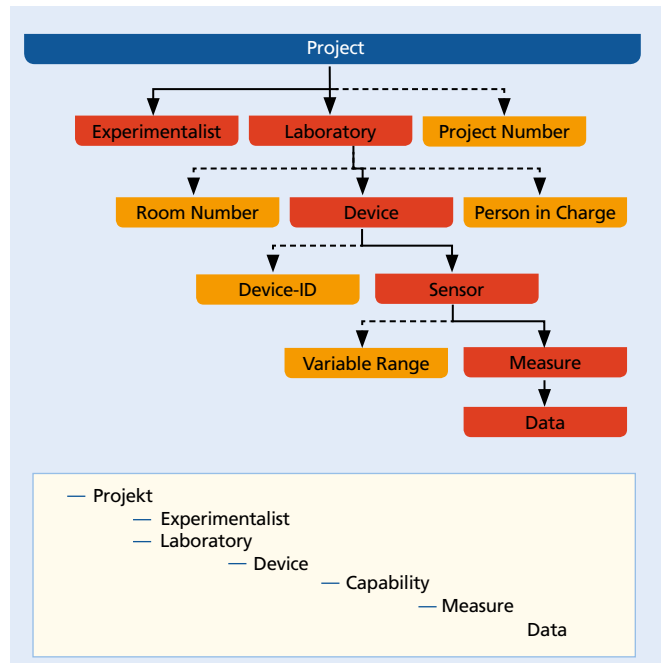
Zur Demonstration der webbasierten Plattform im EU-Projekt »Marketplace (Materials Modelling Marketplace for Increased Industrial Innovation)« wurde ein Cluster beschafft und installiert. Zudem haben wir in ein Blechprüflabor, bestehend aus Blechprüfmaschine, optischer Dehnungsmessung und Zug-Druckprüfmaschine sowie zugehöriger Automatisierungstechnik, investiert und unsere Möglichkeiten zur spannungsoptischen Messung großflächiger Glasscheiben erweitert. Im erfolgreich abgeschlossenen Fraunhofer-Vorlauftforschungsprojekt PeroTec® wurde mit weiteren Fraunhofer-Instituten eine Technologie zur kostengünstigen Fertigung von Perowskit-Solarzellen entwickelt.

## SEMANTISCHE DIGITALISIERUNG EINFACH GEMACHT UND IM DATA SPACE MANAGEMENT SYSTEM DEMONSTRIERT

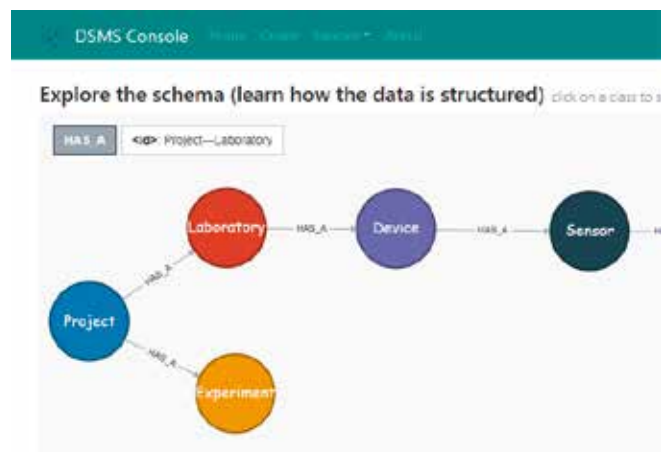
Aufgrund der Automatisierung der experimentellen Versuchstechnik und der verfügbaren Sensorik in der industriellen Prozessführung nehmen das Volumen und die Qualität der verfügbaren Material- und Prozessdaten stetig zu. Dies betrifft auch den Umfang der numerischen Simulationsdaten, die zum Beispiel im Rahmen von Parameterstudien automatisiert erzeugt werden. Dem großen Datenumfang wird bisher Rechnung getragen, indem die unterschiedlichen Datentypen in dezentrale Datenbanken eingepflegt werden, die dafür besonders geeignet sind. Darüber hinaus sind aus Mangel an leistungsfähigen Datenverwaltungswerkzeugen mit einer feingranularen Rechteverwaltung diese Daten sogar innerhalb eines Unternehmens in der Regel nur sehr eingeschränkt zugänglich. Diese Heterogenität in aktuellen Datenablagen hat zur Konsequenz, dass aus Sicht der modernen Materialwissenschaften viele aktuelle Fragestellungen (zum Beispiel die Optimierung parametersensitiver Prozessschritte oder die Entwicklung neuer Materialien) nur mit sehr großem manuellem Aufwand zu bewältigen sind, da die Daten vor einer weiteren automatisierten Verwendung zum Beispiel für das Maschinelle Lernen umständlich konvertiert und transferiert werden müssen. Zukünftige, zunehmend komplexe und zeitkritische Herausforderungen für die Materialwissenschaften sind mit einer solchen Datenverwaltung nicht mehr lösbar.

### Strukturierung und Verwaltung von Materialdatenräumen

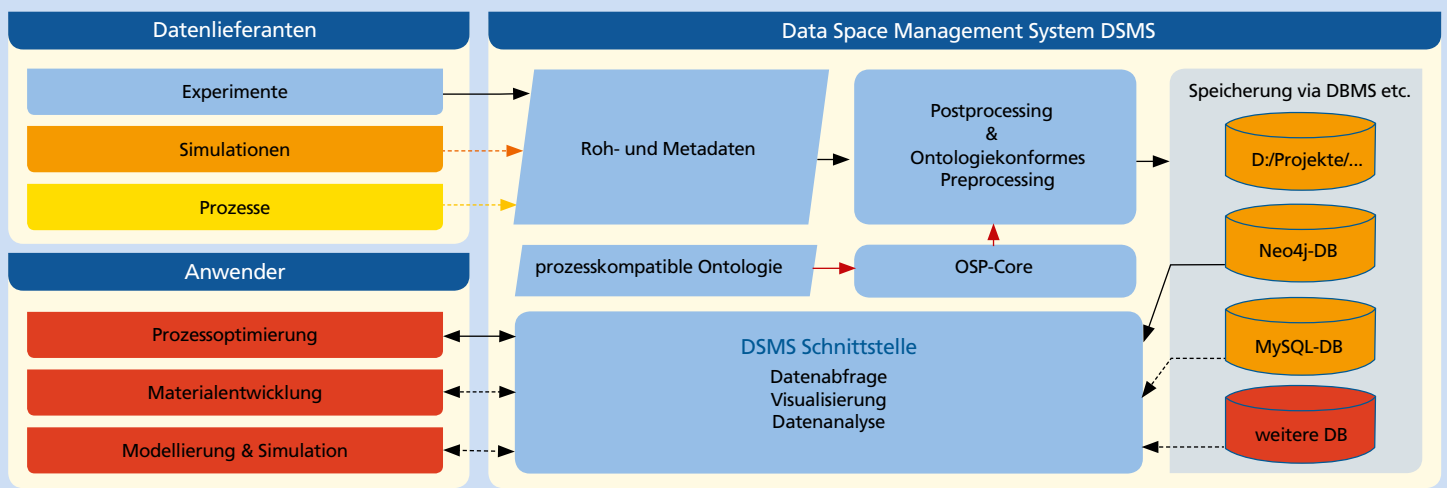
Aus diesen Gründen wurde vom Team »Materialinformatik« am Fraunhofer IWM in enger Kooperation mit europäischen Partnern (siehe European Material Modelling MarketPlace) ein Data Space Management System (DSMS) für die Organisation, Strukturierung und Verwaltung von Materialdatenräumen und des darin enthaltenen Wissens entwickelt. Das System basiert auf einer materialwissenschaftlichen Ontologie (European



1 Darstellung der Datenstruktur anhand von Graphen (oben) oder per zugehörigem YAML-Format (unten).



2 Visualisierung innerhalb des DSMS-Frontends.



3 Schematische Darstellung der DSMS-Bestandteile und deren Integration in bestehende Arbeits- und Versuchsabläufe.

Materials and Modelling Ontology – EMMO) und ermöglicht, unabhängig vom jeweiligen Datentyp, Materialien einschließlich ihrer Eigenschaften für die rechnergestützte Forschung und Entwicklung systematisch digital zu erfassen, zu repräsentieren (»Digitaler Zwilling«) und effizient auszuwerten.

Aus zusätzlich gewünschten übergeordneten, strategischen Zielen, wie interdisziplinärer Zusammenarbeit und Kooperation über Unternehmensgrenzen hinweg, folgen zusätzlich technische und wissenschaftliche Anforderungen an einen Materialdatenraum. So ist zu gewährleisten, dass

- die Skalierung für einen hinreichend großen Datenumfang,
- die Kompatibilität an Skalengrenzen,
- die Interoperabilität über Fach- und Bereichsgrenzen hinweg sowie
- flexible und intuitive Formulierungen von Abfragen möglich sind.

Alle genannten Anforderungen sind im DSMS-Konzept realisiert, da die Daten unabhängig vom Datentyp (binär oder ASCII) und den Datenquellen (Simulations-, Experiment- und Prozessdaten) in einem gemeinsamen Datenraum organisiert werden. Darüber hinaus stellt die DSMS-Methode Werkzeuge und Schnittstellen zur Verfügung, mit denen die Datenontologie in einer für beliebige Fragestellungen geeigneten und leicht zu interpretierenden Form bereitgestellt werden.

### Kernkomponenten des DSMS

Die typische Datenflusskette (Abbildung 3) setzt sich aus den Datenlieferanten (Simulations-, Experiment- und Prozessdaten), dem DSMS für die Datenpflege und -abfrage sowie den Anwendern zusammen, deren Interesse in der Auswertung

und Weiterverarbeitung der Daten besteht. Der DSMS ist auf einfache Weise in bereits bestehende und vielfach optimierte Versuchs- und Arbeitsabläufe integrierbar.

Das modular aufgebaute DSMS-Konzept berücksichtigt zudem EU-weite Standards, die sich etablieren: die Common Unified Basic Attributes (CUBA) stellt die Syntax zur Verfügung und die Common Unified Data Structures (CUDS) beinhaltet die Semantik. Das Schema für die Daten-Strukturierung basiert auf einem international etablierten Standard für die Datenserialisierung (YAML-Format, siehe Abbildung 1) und beschreibt logisch strukturiert Materialeigenschaften sowie Prozessabläufe und -historien. Das zugrunde liegende Schema kann innerhalb des DSMS einfach in die Web Ontology Language (OWL) konvertiert werden, die häufig in anderen Fachgebieten verwendet wird. Durch zentrale DSMS-Interfaces (Bestandteil des Backend) kann das dauerhafte Abspeichern der Daten flexibel in unterschiedlichen Datenbanksystemen (beispielsweise SQL-basiert oder Neo4j) erfolgen. Sowohl mittels der DSMS-Web-Applikation (Frontend) als auch über die API-Schnittstelle ist es dem DSMS-Anwender möglich, die Suche und Weiterverarbeitung von Informationen unabhängig vom gewählten Backend teil- oder vollautomatisiert durchzuführen. Dadurch kann das DSMS sehr flexibel auf die Bedürfnisse angepasst werden. Mit der im DSMS implementierten Rechteverwaltung und Frontend-Backend-Interaktion ist es technisch möglich, sowohl die von Unternehmen häufig gewünschte feingranulare interne Zugriffsteuerung als auch mittels dezentraler Nutzung des DSMS-Frontend das Teilen von Daten mit externen Partnern zu realisieren.

Dr. Adham Hashibon



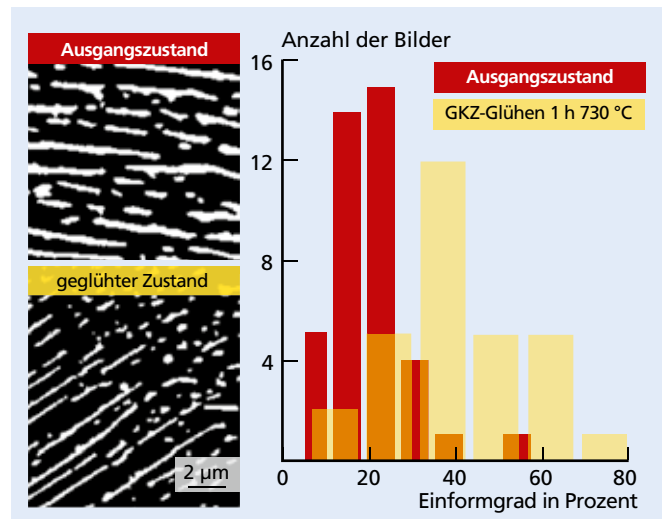
## LEICHTBAUSTÄHLE: AUSWERTUNG AUTOMATISIERT UND 3D-MIKROSTRUKTUR DIGITAL REKONSTRUIERT

Leichtbaukonzepte im Bereich des Fahrzeugbaus beeinflussen die Gestaltung fließgepresster Bauteile und die Anwendung von Werkstoffen zu deren Fertigung. Um die für den Leichtbau geeigneten hochfesten Stähle kaltumformtechnisch mit ausreichender Werkzeugstandzeit einsetzen zu können, müssen die Werkstoffe als Draht vor der Kaltumformung einer sogenannten GKZ-Glühbehandlung (Glühen auf kugeligem Zementit) unterzogen werden, um ihre Zerspanbarkeit sowie Kaltverformbarkeit zu verbessern. In einem von der AiF geförderten Vorhaben entwickelte das Fraunhofer IWM ein Verfahren zur automatisierten Mikrostrukturauswertung und simulativen Bestimmung des Fließverhaltens von Kaltfließpressstählen in unterschiedlichen Glühzuständen.

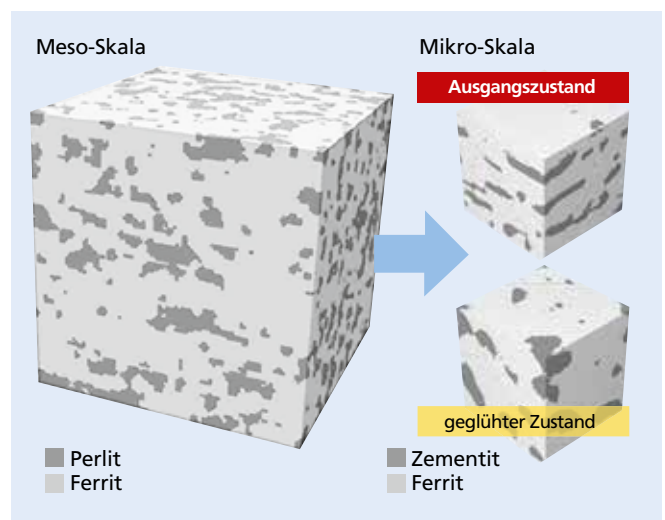
### Automatisierte Mikrostrukturauswertung

Die quantitative mikrostrukturelle Charakterisierung der Einformungszustände des Zementits stellt das wichtige Bindeglied zwischen dem Glühprozess und den mechanischen Materialeigenschaften dar. Damit der Einformungszustand eindeutig, reproduzierbar und effizient analysiert werden kann, entwickelte das Fraunhofer IWM ein automatisiertes Analysewerkzeug, welches folgende Möglichkeiten umfasst:

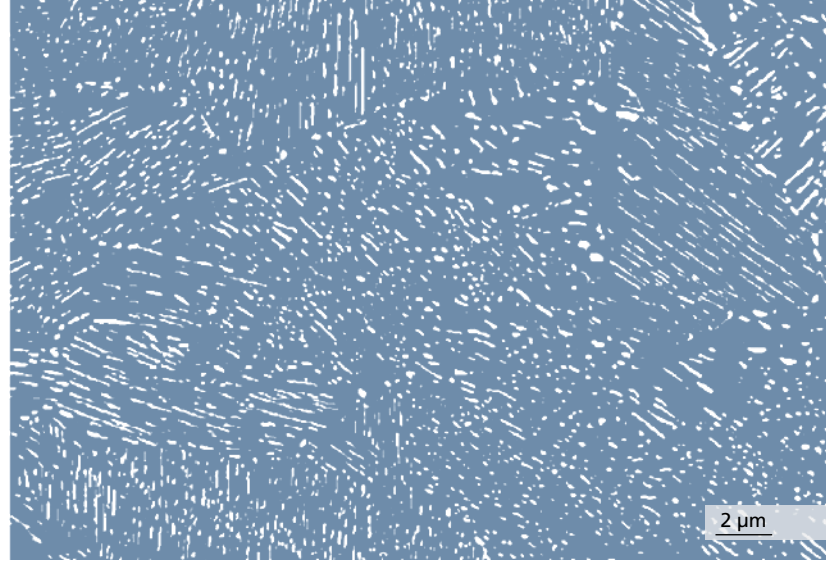
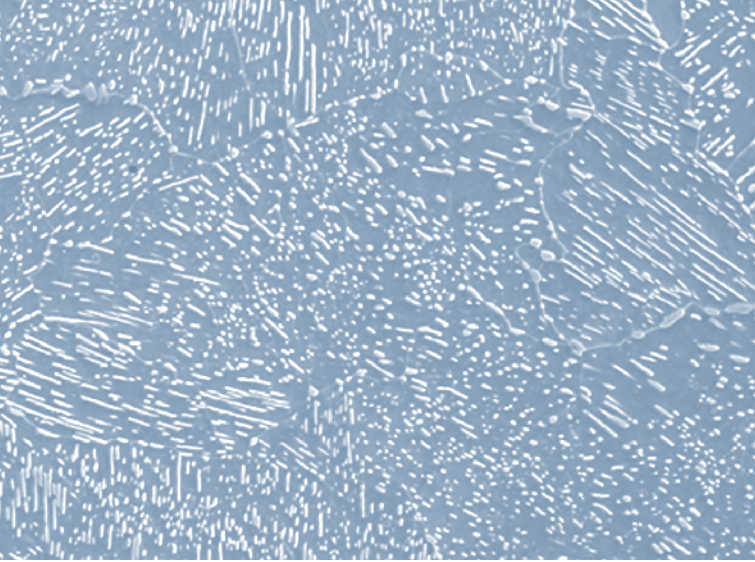
- Erkennung des Maßstabalkens und Kalibrierung der Vergrößerung der Mikrostrukturbilder
- Verbesserung und Vereinheitlichung der Bildqualität durch Analyse der Grauwertverteilung und entsprechende Korrekturen von Helligkeit, Kontrast und Schattierungen
- Erkennung von Partikeln mittels geeigneter Filter und Binarisierungsmethode
- Vermeiden von Fehl-Erkennungen durch systematisches Löschen sehr kleiner Partikel oder Korngrenzen
- Quantitative Analyse der folgenden Partikeleigenschaften: Fläche, Orientierung, Umfang, Länge, Rundheit, Aspekt-Verhältnis, Einformgrad



1 Ausgewertete REM-Aufnahmen von Perlitkörnern im Stahl 35B2: Zementit weiß, Ferrit schwarz dargestellt (links); statistische Verteilung des Einformgrads (rechts).



2 3D-Rekonstruktion eines repräsentativen Volumenelements auf der Meso-Ebene (links) sowie auf der Mikro-Ebene (rechts), basierend auf Mikrostrukturdaten von Stahl 35B2.



3 REM-Aufnahme (links) und automatisierte Partikelanalyse (rechts) des GKZ-geglühten Stahls 35B2.

Der Einförmigkeitszustand kann anhand der letztgenannten Parameter charakterisiert werden (siehe Abbildung 1).

### Digitale 3D-Rekonstruktion der Mikrostruktur

Um die mechanischen Eigenschaften von Kaltfließpressstählen in den unterschiedlichen Glühzuständen berechnen zu können, wurden numerische Simulationen des Werkstoffverhaltens unter verschiedenen Belastungszuständen auf zwei Größenskalen durchgeführt (siehe Abbildung 2). In der Mikro-Skala tritt zum Teil eingeförmter Perlit als zweiphasiges Gefüge auf, bestehend aus Ferrit und Zementit. Auf der Meso-Skala wurde ein zweiphasiges Gefüge betrachtet, das aus Ferrit und Perlit besteht. Die Fließeigenschaften des unterschiedlich stark eingeförmten Perlits aus den Simulationen auf der Mikro-Skala sind Eingangsgrößen für die Simulationen auf der Meso-Skala. Generell gilt, dass solche Simulationen an repräsentativen Volumenelementen (RVE) das Materialfließverhalten gut abbilden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind: Einerseits die qualitativ und quantitativ repräsentative geometrische Abbildung der Phasen und andererseits die Zuweisung passender mechanischer Eigenschaften zu den einzelnen Phasen. Auf der Meso-Ebene sind die RVE-Simulationen bereits ausreichend etabliert. Hingegen wurde die Methode bisher noch nicht auf die hier vorliegende Mikro-Ebene (Gefüge innerhalb eines eingeförmten Perlitkorns) übertragen.

Zur digitalen Abbildung des Perlitgefüges wurde die mathematische Methode nach Torquato [1] zur Rekonstruktion zufälliger heterogener Mikrostrukturen verwendet. Um aus einer zweidimensionalen Mikrostrukturaufnahme dreidimensional die Mikrostruktur zu rekonstruieren, wurde eine entsprechende Strategie entwickelt und validiert. Mithilfe der oben beschriebenen automatisierten Gefügeanalyse kann aus den vielen

sehr unterschiedlichen und mit starker Streuung behafteten Mikrostrukturbildern eine geeignete Auswahl getroffen werden. Das entwickelte Skript zur digitalen 3D-Mikrostruktur-Rekonstruktion benötigt einfache und günstige Eingangsdaten und kann auch auf schräg orientierte Strukturen angewendet werden. Eine Parallelisierung der Rekonstruktionsrechnung auf mehreren CPUs ist möglich.

Zur Validierung der Methodik wurden im Anschluss an die Rekonstruktion Schnitte durch das 3D-RVE erstellt und diese wie die Mikrostrukturaufnahmen statistisch mit dem Analyseskript ausgewertet. Die so ausgewerteten statistischen Größen der RVEs stimmen mit denen der ursprünglichen Mikrostruktur überein. Dies zeigt die Leistungsfähigkeit der Methode, eine vorgegebene Mikrostruktur realistisch zu rekonstruieren.

Nach der Anpassung der mechanischen Eigenschaften der beiden Phasen können an den Einheitszellen (RVEs) die mechanischen Eigenschaften des Gesamtgefüges in Abhängigkeit vom Einförmgrad des Perlits berechnet werden. Entsprechende Validierungen zeigen, dass die durchgeführten Simulationen realistische Ergebnisse für das Fließverhalten des lamellaren und eingeförmten Perlits ergeben. Damit können auf den Werkstoff zugeschnittene Parameter der Wärmebehandlung durch virtuelle Experimente wirtschaftlich günstig ermittelt werden.

[1] Torquato, S.; Random heterogeneous materials: Microstructure and macroscopic properties; Interdisciplinary applied mathematics, mechanics and materials; Springer Science & Business Media, LLC (2002)

Eva Augenstein, Dr. Maksim Zapara

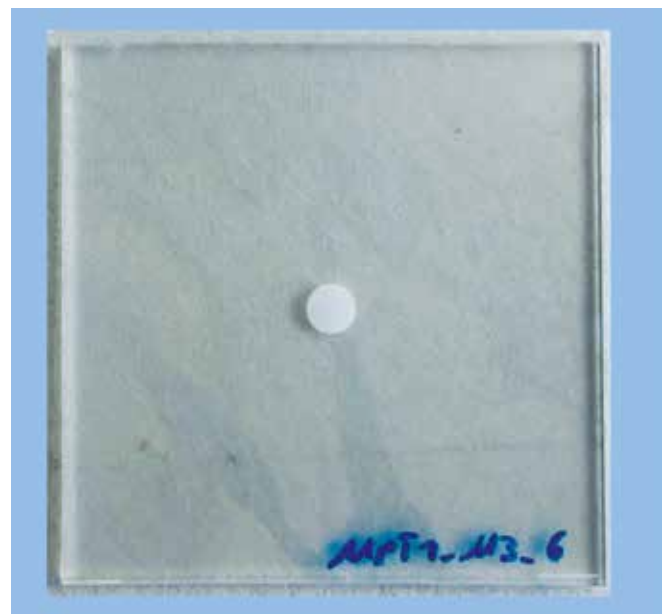


## OPTIMIERUNG DER BIEGEFESTIGKEIT VON SOLARGLASOBERFLÄCHEN

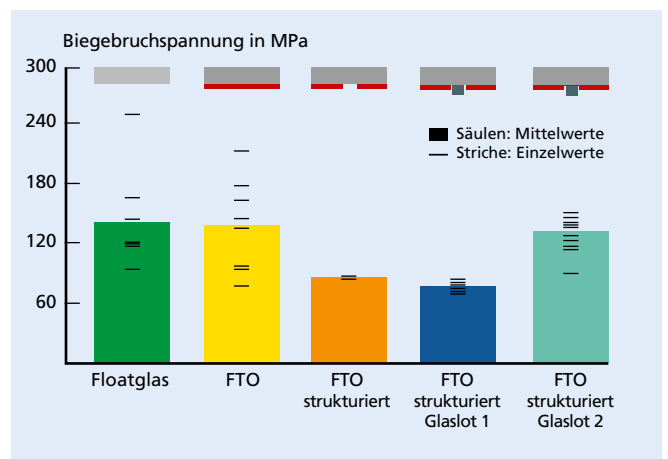
Im Rahmen von Fraunhofer-internen Forschungsarbeiten zur Herstellung von neuartigen, nahezu vollständig aus Glas bestehenden Solarmodulen wurden nach verschiedenen Prozessschritten der Bearbeitung und Funktionalisierung von Solarglasoberflächen Untersuchungen zur Bewertung der Festigkeit durchgeführt. Für den Aufbau elektrisch verschalteter Zellen innerhalb des Solarmoduls ist es erforderlich, dass die Glasscheiben mit einer transparenten, elektrisch leitfähigen Schicht TCO (transparent conductive oxides) beschichtet sind. Wegen vorteilhafter Materialeigenschaften werden als elektrisch leitfähige Schichten in Solarmodulen vor allem mit Fluor angereicherte Zinnoxid-Schichten FTO (fluorine doped tin oxides) eingesetzt. Solche vollflächig aufgetragenen Schichten müssen für die Verschaltung im Solarmodul zunächst strukturiert werden. Dazu wird die Schicht entsprechend dem entworfenen Layout mittels Laserverfahren lokal entfernt. In einem weiteren Verarbeitungsschritt werden Glaslote auf die zuvor entschichteten Flächen aufgebracht und eingebrannt. Es ist grundsätzlich bekannt, dass solche, die Glasoberfläche verändernden Bearbeitungs- und Veredelungsschritte Einfluss auf die Festigkeit nehmen. Im Zuge der Forschungsarbeiten wurden diese Einflüsse untersucht und ein optimiertes System für die Herstellung von Ganzglassolarmodulen erarbeitet.

### Festigkeitsbestimmung im Doppelringbiegeversuch

Für die Bestimmung der Biegefestigkeit wurden quadratische Proben (Kantenlänge 66 mm) im Doppelringbiegeversuch bis zum Bruch belastet. Die Proben hatten verschiedene Oberflächen: unbeschichtetes Floatglas, FTO-beschichtetes Glas, laserstrukturiertes FTO-Glas sowie Varianten mit strukturiertem FTO, die mit verschiedenen Glasloten bedruckt waren. Aus der Bruchkraft und der Probendicke wurde die Bruchspannung



1 Mit Glaslot (weißer Kreis) bedruckte Probe, Kantenlänge 66 mm, zur Ermittlung der Biegefestigkeit per Doppelringbiegeversuch.



2 Ergebnisse aus den Doppelringbiegeversuchen: Biegebruchspannungen an Gläsern mit unterschiedlichen Oberflächen.



10 mm

### 3 Doppelringbiegeversuch: Werkzeuge in Universalprüfmaschine eingebaut und darin eingelegte Probe.

bestimmt. Die Dickenänderung durch die leitfähige Schicht (zirka 300 bis 700 nm) und durch das Glaslot (zirka 10 bis 20  $\mu\text{m}$ ) sind bei der Spannungsberechnung nicht miteinbezogen worden.

Die Laserstrukturierung und die Glaslot-Bedruckung wurden im Probenzentrum in einem kreisrunden Bereich (Durchmesser 6 mm) realisiert. Die Glaslote wurden vor den Versuchen jeweils auf die zuvor laserstrukturierten Flächen aufgebracht und im Ofen gemäß der Herstellerangabe verglast (Abbildung 1). Die Proben wurden im Biegebruchversuch (Abbildung 3) so angeordnet, dass die prozessierten Probenoberflächen genau zentrisch gegenüber dem für die Krafteinleitung angewendeten Druckring positioniert waren, sodass diese Oberflächen auf Zug belastet wurden. Da Glas als sprödebrechender Werkstoff eine statistische Festigkeitsverteilung aufweist, wurden je Probentyp mindestens sieben Proben untersucht.

#### **Bewertung der Ergebnisse und Auswahl des Glaslots mit hoher Biegefestigkeit**

Die Festigkeiten der reinen Glasoberflächen und der FTO-beschichteten Oberflächen weisen mit 80 bis 250 MPa eine hohe Streuung auf. Im Mittel errechnet sich eine Spannung von rund 140 MPa. Bei den Proben mit strukturierter FTO-Schicht ergibt sich eine deutlich niedrigere gemittelte Festigkeit von 85 MPa. Das Streuband dieser Proben ist äußerst gering, die Standardabweichung beträgt gerade einmal 1 MPa. Bei Betrachtung der Proben unter dem Lichtmikroskop zeigte sich, dass der Bruch bei den Proben mit laserstrukturierter FTO-Schicht stets in den Bereichen der Laserstrukturierung seinen Anfang nahm. Sieht man von eventuell eingebrachten Eigenspannungen ab, so spiegelt nach dem bruchmechanischen

Modell die bei der Laserbearbeitung beobachtete geringe Streuung der Festigkeit eine ebenfalls sehr geringe Streuung der Größe der versagensauslösenden Fehler wider. Die Proben mit Glaslot 1 erzielten im Mittel eine etwas geringere Festigkeit als die laserstrukturierten Proben, jedoch mit einem breiteren Streuband als diese. Die Proben mit Glaslot 2 erlangten eine mittlere Festigkeit von 130 MPa. Diese Festigkeit liegt im Bereich des Ausgangsmaterials Floatglas sowie des FTO-beschichteten Glases. Dies ist insofern erstaunlich, da der Verarbeitungs-Zwischenzustand, eine laserstrukturierte FTO-Oberfläche, die mittlere Festigkeit von gerade einmal 85 MPa ergab. Die Festigkeit wurde demnach durch die Bedruckung und das Einbrennen von Glaslot 2 gesteigert.

Die angewendete Methodik liefert in der Bewertung somit wertvolle Hinweise für eine günstige Materialauswahl (Glaslot) als auch Hinweise für günstige Prozessbedingungen, um die Herstellung von Solarmodulen hinsichtlich ihrer Festigkeit zu optimieren. Genaue Mechanismen und mögliche zusätzliche Optimierungen sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Für die Bewertung von bearbeiteten Glasoberflächen und die Betrachtung einzelner Prozessschritte stehen mit dem beschriebenen Vorgehen Methoden zur Verfügung, oberflächenmodifizierende Arbeitsschritte und die daraus resultierenden Oberflächen hinsichtlich ihrer Festigkeit zu bewerten. Diese Methoden lassen sich auf andere Verarbeitungsschritte wie weitere Funktionsschichten oder verschiedene abtragende Verfahren sowie Verbindungsprozesse anwenden.

Tobias Rist, Alexander Kott

## **GESCHÄFTSFELDLEITER**

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

## **GRUPPEN**



### **VERSCHLEISSSCHUTZ UND TECHNISCHE KERAMIK**

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

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



### **MULTISKALENMODELLIERUNG UND TRIBOSIMULATION**

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

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



### **POLYMERTRIBOLOGIE UND BIOMEDIZINISCHE MATERIALIEN**

Wir bewerten mit Experimenten und Simulationen die Zuverlässigkeit und das Einsatzverhalten bio-medizinischer Materialien und Implantate, generativ gefertigter Komponenten sowie die Tribologie von Thermoplasten, Elastomeren und Hydrogelen.

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



### **TRIBOLOGISCHE UND FUNKTIONALE SCHICHTSYSTEME**

Wir entwickeln PVD- und PECVD-Beschichtungen und -Verfahren. Wir bewerten und realisieren diamant-ähnliche Kohlenstoffschichten (DLC) für hohe Gleit- und Wälzbelastungen, kristalline Diamantschichten sowie nitridische, oxidische und metallische Hochleistungsbeschichtungen für Formgebungsprozesse.

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



### **TRIBOKONDITIONIERUNG UND -ANALYTIK**

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

*Prof. Dr. Matthias Scherge | [matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de](mailto:matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de)*



## UNSERE HIGHLIGHTS 2019

Ein besonderer Höhepunkt unserer Arbeit war die Etablierung der Plattform TribolInnovation. Diese Aktivität des MikroTribologie Centrums vereint derzeit 20 Industrieunternehmen und dient der vorwettbewerblichen tribologischen Forschung. Diese Beteiligten erhalten zu Anfang jedes Jahres einen rund 60-seitigen Report, der die Trends für das Jahr aufzeigt. Basierend auf diesem Dokument werden kurz laufende und finanziell kleinvolumige Pilotprojekte und Studien aufgesetzt, die sich neuartigen Themen widmen. Stellt sich heraus, dass eine fachliche Vertiefung gewünscht ist, werden die Themen in Vertiefungsprojekte mit drei bis fünf Unternehmen und einer Finanzierung von drei Jahren überführt. Von diesem Projekttyp gab es 2019 drei, die sich auf Themen konzentrieren wie tribologische Ermüdung unter Wasserstoffeinfluss oder simulative Ansätze zur Tribochemie.

Ein weiterer Höhepunkt ist der Start des BMWi-Projekts »Prometheus«, in dem sich ein Team aus 13 Industrie- und Forschungsunternehmen der reibungstechnischen Optimierung von Verbrennungsmotoren widmet. Mithilfe unserer erprobten Kombination von Experiment und Simulation werden wir das Konzept der Supersmierung einer breiten technischen Verwertung zuführen.



## DIAMANT-SiC-KOMPOSITE QUALIFIZIERT FÜR GLEITLAGER IN SUB-SEA-ANWENDUNGEN

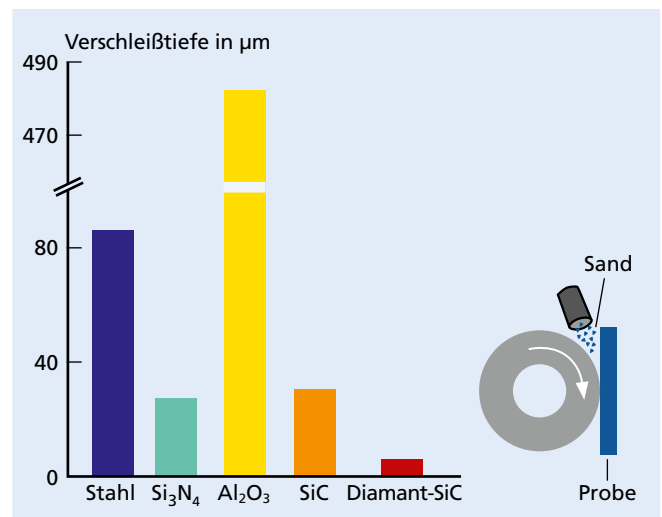
Neue Technologien, insbesondere auch die Elektromobilität, führen zu einem rasant steigenden Bedarf an Ressourcen, deren Versorgungssicherheit aus verschiedenen Gründen immer kritischer wird. Daher gewinnen Technologien an Bedeutung, mit denen Rohstoffe ökonomisch und umweltschonend aus dem Meer gefördert werden können. Eine große Herausforderung dabei ist: Die Prozesse müssen möglichst störungsfrei ablaufen. Durch Stillstand, Wartung und Reparatur der marinen Systeme würden sonst enorme Kosten verursacht. Dafür werden Werkstoffe und Komponenten benötigt, die unter extremen Bedingungen zuverlässig funktionieren und möglichst nicht gewartet werden müssen. Besonders wichtig in solchen Subsea-Systemen sind die Schlüsselkomponenten Lagerungen und dynamische Dichtungen, da diese neben den widrigen Umgebungsbedingungen zusätzlich hohen Reibungs- und Verschleißbeanspruchungen ausgesetzt sind.

### Höchststabile Werkstoffe und Komponenten

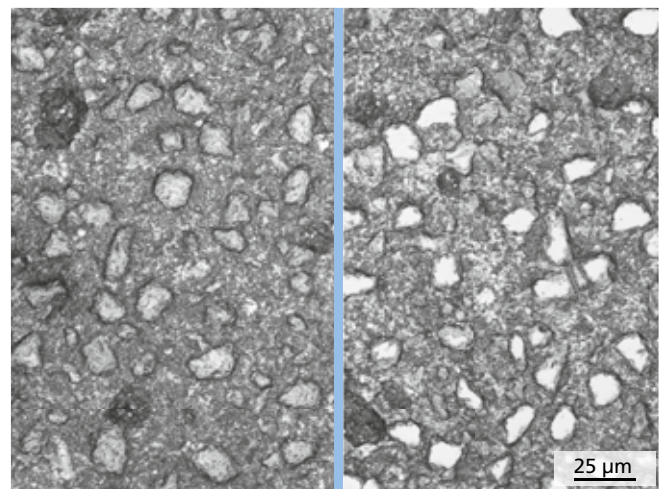
Für derartige Einsatzbedingungen wurden im Rahmen der Fraunhofer-Vorlauftforschung »Systemlösungen mit Hochleistungskeramik-Komponenten für Tiefsee-Anwendungen« mit den Fraunhofer-Instituten IKTS, IPK, ISC und IWM Werkstoffe und Komponenten mit größtmöglicher Verschleißbeständigkeit und Dauerfestigkeit entwickelt. Aufgabe des Fraunhofer IWM war dabei, die Werkstoffe und Komponenten hinsichtlich Festigkeit und Zuverlässigkeit sowie ihrer tribologischen Eigenschaften – Reibung und Verschleiß – unter Einwirkung von Salzwasser zu untersuchen und zu modellieren.

### Warum Diamant-SiC-Keramiken?

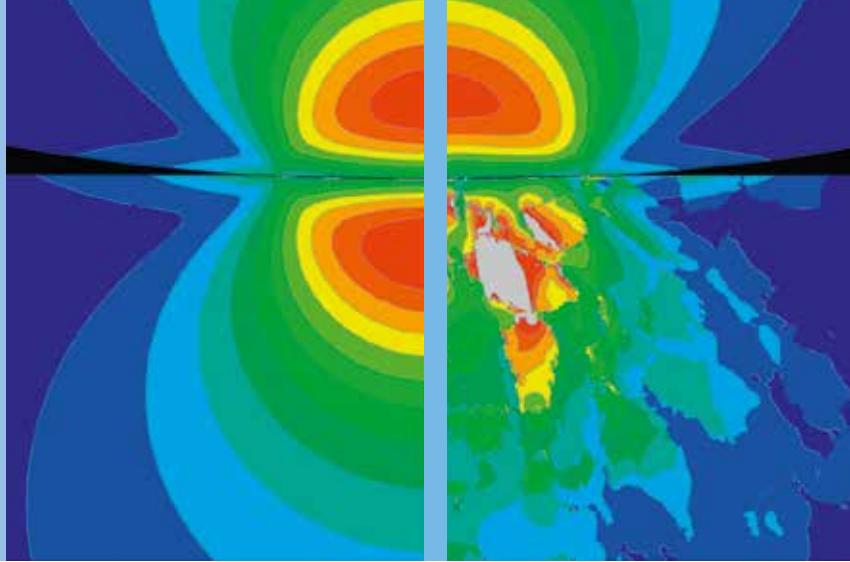
Diamant-SiC-Werkstoffe (SiC: Siliciumcarbid) sind extrem belastbar und verschleißbeständig. Sie zeigen in salzhaltigen



1 Die Abrasionsbeständigkeit von Diamant-SiC-Keramiken ist im Vergleich zu anderen Werkstoffen wesentlich höher: Prüfprinzip des Abrasionsversuchs (Reibradversuch nach ASTM G65, rechts).



2 REM-Aufnahmen der Gleitfläche der Diamant-SiC-Keramik vor dem Versuch (links) und nach dem Versuch (rechts).



3 *Finite-Elemente-Simulation der Kontaktspannungen (Kugel auf Keramikoberfläche) im Kontinuum (links) und die Mikrostruktur von Diamant-SiC (rechts).*

Medien weder korrosive Effekte noch eine zeit- oder belastungsabhängige Abnahme der Festigkeit. Wie sich die Festigkeit verschiedener Keramiken unter dem Einfluss von erwärmtem Salzwasser verändert, wurde am Fraunhofer IWM mit 4-Punkt-Biegeprüfungen und mit einer biaxialen Prüfung (»Ball-on-3-Balls« – B3B) getestet. Bei einer Variation der Belastungsrate über mehrere Größenordnungen hinweg kann aus der Veränderung der Festigkeit die Empfindlichkeit der Werkstoffe gegen Spannungsrisskorrosion ermittelt werden. Hierbei zeigte sich, dass die Festigkeit der Diamant-SiC-Keramik von der Belastungsrate unabhängig ist und somit keine Verringerung der Festigkeit über die Belastungsdauer zu erwarten ist. Für den Einsatz in Subsea-Anwendungen ist das ein großer Vorteil, da ein zuverlässiger Einsatz über lange Zeiträume hinweg ermöglicht wird.

### Reibungs- und Verschleißverhalten unter Wasser-schmierung

Ein weiterer entscheidender Vorteil der diamanthaltigen Keramiken ist deren exzellentes Reibungs- und Verschleißverhalten unter Wasser- und anderer Medienschmierung. In Modellversuchen und ersten Bauteilprüfungen mit Gleitringdichtungen wurde gezeigt, dass sie um ein Vielfaches abrasionsbeständiger sind als andere Keramiken, Hartmetalle und Stahl (Abbildung 1) und dass die Gleitreibung auch unter sogenannter Mangelschmierung, also bei geringsten Mengen an flüssigen Zwischenstoffen, extrem niedrig und stabil ist. Der Vergleich der Oberflächen zeigt, dass durch die Gleitbeanspruchung in Wasser lediglich eine leichte Einglättung der nach der Endbearbeitung etwas herausragenden Diamantkörner verursacht wurde (Abbildung 2).

### Simulation des Werkstoff- und Bauteilverhaltens

Im Rahmen der Fraunhofer-Eigenforschung »Systemlösungen mit Hochleistungskeramik-Komponenten für Tiefsee-Anwendungen« wurden Simulationsmethoden entwickelt, mit denen die Werkstoff- und Bauteilbeanspruchungen modelliert werden können. Einerseits können Spannungen im Werkstoffgefüge modelliert werden (Abbildung 3), andererseits kann die Simulation genutzt werden, um Bauteile optimal auszulegen und deren mechanische Stabilität und Zuverlässigkeit über eine lange Beanspruchungsdauer abzusichern. Dadurch lässt sich ein erheblicher Aufwand für die Prüfung und Qualifizierung der Komponenten und Systeme einsparen. Mit den neuen Simulationstechniken werden der Widerstand gegen Kontaktschädigung und Verschleiß simuliert, wodurch auch eine Vorhersage der Lebensdauer angestrebt wird.

Für die weitere Entwicklung und Qualifizierung von Diamant-SiC-Werkstoffen und der daraus gefertigten Bauteile in Subsea-Anwendungen gibt es noch viel Arbeit, die in weiteren geplanten Entwicklungsprojekten mit Industriebeteiligung weiterverfolgt wird. Als mögliche Anwendungen werden beispielsweise Pumpenkomponenten wie mediengeschmierte Gleitlager und Gleitringdichtungen für Pumpen betrachtet, die in Subsea-Systemen eingesetzt werden sollen. Hierzu müssen einerseits fertigungstechnische Herausforderungen angegangen werden, andererseits müssen die Leistungsfähigkeit und die Zuverlässigkeit der Materialien und Komponenten mit anwendungsnahen Prüfmethoden nachgewiesen werden, um schließlich die Anlagenbetreiber vom wirtschaftlichen und technischen Nutzen zu überzeugen.

Dr. Andreas Kailer



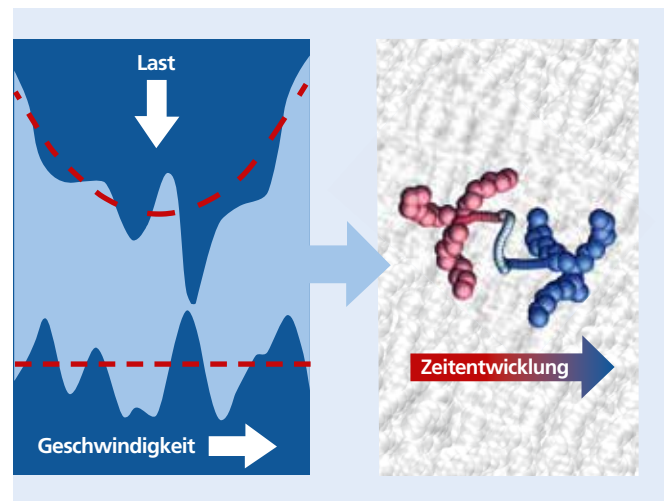
## SCHMIERSTOFFE: HOCHDRUCK-VISKOSITÄTS-BERECHNUNG AUS MOLEKÜL-STRUKTUREIGENSCHAFTEN

Zur optimalen Auslegung geschmierter tribologischer Kontakte ist die Kenntnis der Schmierstoffeigenschaften unter den im belasteten Kontakt vorherrschenden Bedingungen notwendig. Diese tribologischen Bedingungen gehen jedoch weit über den typischen Bereich experimentell ermittelter Werte hinaus. Von zentraler Bedeutung ist hier insbesondere die Druckabhängigkeit der Viskosität, die maßgeblichen Einfluss auf Reibung und Verschleiß hat. Zum einen bestimmt die viskose Dissipation im Schmierfilm direkt den Reibwert im hydrodynamischen Reibregime. Zum anderen hängt auch der Übergang in die verschleißanfällige Grenzreibung über die Lasttragfähigkeit von der Viskosität ab. Zur Vorhersage der Viskosität werden üblicherweise an experimentelle Werte im Normaldruck-Bereich angepasste Druck-Viskositäts-Modelle, wie Barus oder Roelands, für höhere Drücke extrapoliert. Diese empirischen Formeln versagen allerdings für die in Reibkontakten lokal auftretenden extremen Pressungen (im Giga-Pascal-Bereich).

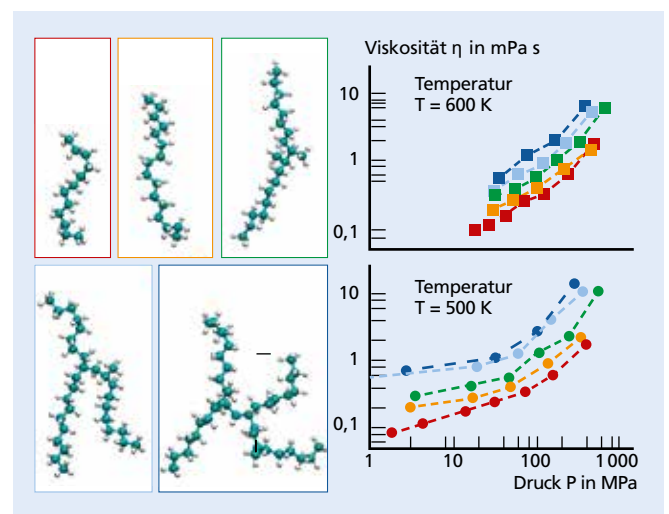
Atomistische Molekulardynamik-Simulationen erlauben die numerische Berechnung von Schmierstoffeigenschaften unter kontrollierten, beliebig einstellbaren Druck- und Temperaturbedingungen. Im vorliegenden Projekt wurde dies zunächst für die Viskositätsberechnung verschiedener Modell-Schmierstoffe aus linearen und verzweigten Alkanen bei Drücken bis zu etwa 700 MPa demonstriert.

### Strukturanalyse und Hochdruck-Viskositäts-Modell

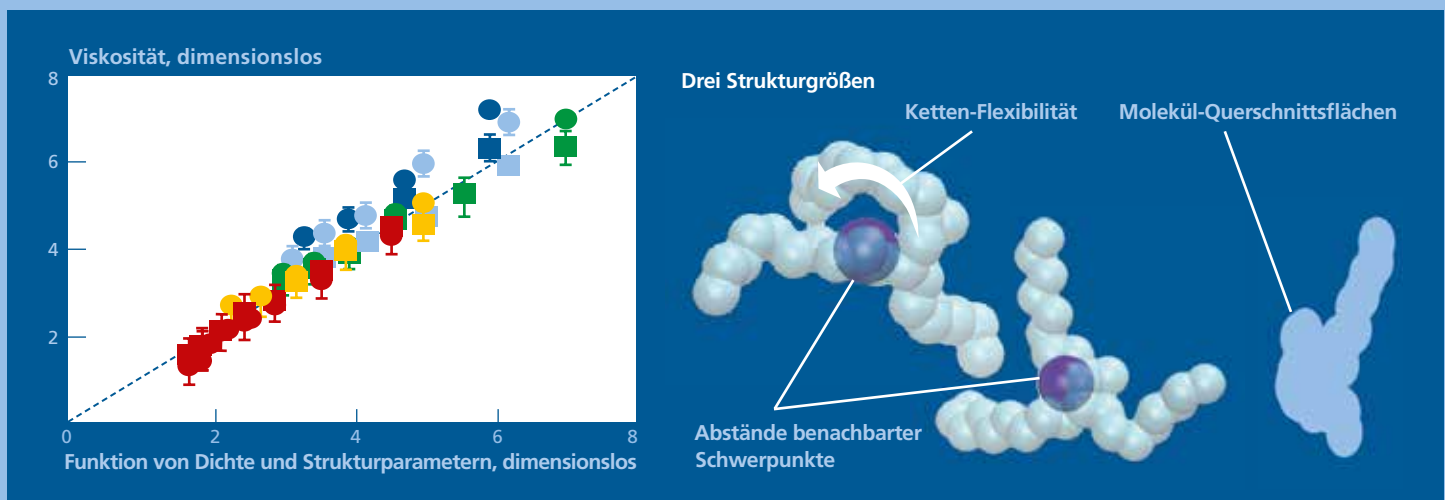
Abgesehen von der expliziten Berechnung der Viskosität unter gegebenen Bedingungen (ähnlich einer experimentellen Messung) ermöglicht die atomistische Simulation darüber hinaus auch eine mikroskopische Betrachtung der Schmierstoff-Struktur und -Dynamik. Mittels geeigneter statistischer



1 Molekulardynamische Untersuchung der Rheologie von Schmierstoffen unter Hochdruck-Bedingungen.



2 Viskosität verschiedener linearer und verzweigter Alkane unter Hochdruck- und Hochtemperatur-Bedingungen, berechnet mittels Molekulardynamiksimulationen.



3 Das Viskositäts-Dichte-Modell erlaubt eine parameterfreie Skalierung der Viskositätswerte (links), die nur drei Strukturgrößen enthält (rechts).

Analysen konnte dadurch für Alkan-basierte Schmierstoffe ermittelt werden, welche molekularen Größen die Viskosität bestimmen. Daraus resultiert ein physikalisch motiviertes Viskositätsmodell, das nur von der Schmierstoff-Dichte und -Temperatur sowie von wenigen Molekül-Strukturgrößen abhängt. Diese Strukturgrößen sind der mittlere effektive Moleküldurchmesser, der mittlere Abstand zwischen benachbarten Molekülen sowie die Flexibilität der Alkanketten (genauer: eine für die Umkonfiguration der Ketten typische, charakteristische Zeitkonstante). Diese drei Größen sind weitgehend unabhängig von der Dichte und können daher alle aus einer einzigen Molekuldynamik-Simulation bei beliebiger Dichte (beziehungsweise Druck, zum Beispiel Normaldruck) bestimmt werden. Zusammen mit einer akkuraten Zustandsgleichung für Druck, Temperatur und Dichte ergibt sich mit wenig Aufwand ein parameterfreies Viskositätsmodell, das auch als Konstitutivgesetz in Reynolds Solver implementiert werden kann.

### Physikalischer Hintergrund: Viskosität und Diffusion

Mehrere neue Erkenntnisse über die mikroskopische Dynamik der Schmierstoffmoleküle waren nötig, um dieses parameterfreie Dichte-Viskositäts-Modell aufstellen zu können. Zunächst wurde die Stokes-Einstein-Relation genutzt, um die Viskosität mit der Diffusion zu verknüpfen. Angewendet auf die Selbstdiffusion enthält die Stokes-Einstein-Gleichung jedoch den Moleküldurchmesser als freien Parameter, da dieser für nicht-sphärische Strukturen nicht eindeutig definiert ist. Am Beispiel der linearen und verzweigten Alkane wurde erstmals gezeigt, dass über den mittleren Querschnitt eines Moleküls ein effektiver Durchmesser bestimmt werden kann, der eine quantitative Verknüpfung ermöglicht. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der Selbstdiffusionsmechanismus eines Schmierstoffmoleküls einem »Random-Walk« des Massenschwerpunkts

mit einer typischen Schrittlänge und -frequenz entspricht. Die Schrittlänge ist dabei durch den mittleren Abstand des Massenschwerpunkts benachbarter Moleküle gegeben. Die Schrittfrequenz hängt dagegen von der Wahrscheinlichkeit ab, mit der das Molekül in seiner Umgebung den benötigten freien Platz vorfindet. In diese Wahrscheinlichkeit gehen einerseits die Molekül-Form und Flexibilität ein, andererseits das in der Flüssigkeit vorhandene freie Volumen, also letztlich die Fluidichte. Dieses mechanistische Verständnis resultiert in einem parameterfreien Ausdruck für den Selbstdiffusionskoeffizienten, der mittels Stokes-Einstein-Gleichung auf die Viskosität übertragen werden kann.

Dieses physikalisch-basierte Viskositätsmodell kann nun gezielt adaptiert werden, um weitere anwendungsrelevante Bedingungen abbilden zu können. Dies beinhaltet als nächsten Schritt eine Erweiterung auf die rheologischen Eigenschaften in engen Spalten, die insbesondere aufgrund der Verwendung immer dünnflüssigerer Öle eine zunehmend wichtige Rolle spielen: Eine korrekte Beschreibung dieses Reibregimes mit nanoskaligen Schmierfilmdicken ist mit einer EHD-Betrachtung möglich, für die entsprechende Konstitutivgesetze auf der Nanoskala jedoch noch fehlen. Wir verwenden das beschriebene Verfahren mittels atomistischer Simulationen als ideales Werkzeug, um die notwendigen Konstitutivgesetze bereitzustellen.

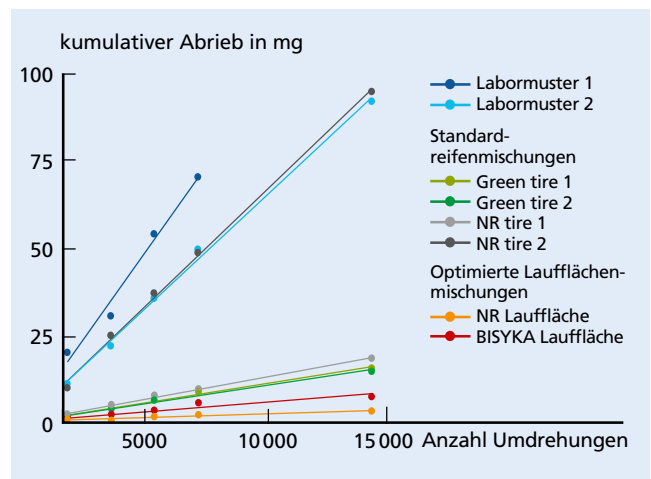
Dr. Kerstin Falk, Prof Dr. Michael Moseler

## ABRIEBTEST FÜR ERMÜDUNGSVERSCHLEISS AN KLEINEN ELASTOMERPROBEN ENTWICKELT

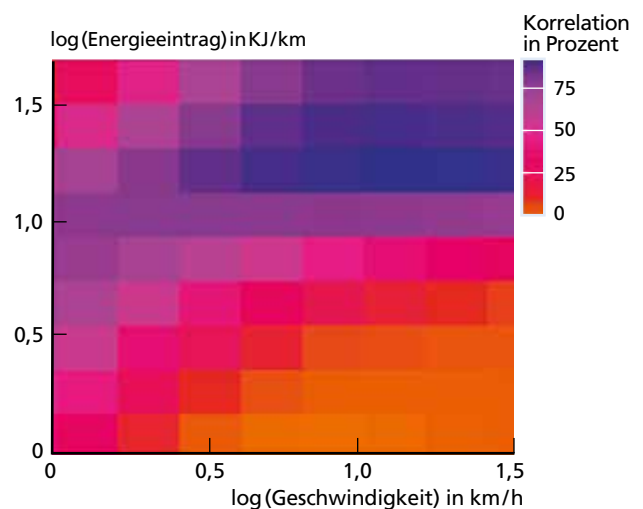
Bei der Beurteilung neuer Elastomercompounds ist die Abriebbeständigkeit eine zentrale Kenngröße: diese bestimmt letztendlich die Lebensdauer von Reifen, Transportbändern oder Schuhsohlen. Auch wenn sich abschließende Aussagen häufig nur durch aufwändige Praxistests gewinnen lassen, ist während der Entwicklungsphase eines Werkstoffs ein Abriebtest wünschenswert, mit dem erste Aussagen zum Abriebverhalten anhand kleiner Labormuster getroffen werden können. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fraunhofer IWM haben ein derartiges Testverfahren im Rahmen des Projekts BISYKA (biomimetischer Synthesekautschuk, [www.bisyka.de](http://www.bisyka.de)) entwickelt und in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen die Ergebnisse mit in der Reifenindustrie etablierten Testverfahren verglichen.

### Ermüdungsverschleiß von Elastomeren

Elastomere sind im Betrieb häufig einer Ermüdungsbelastung ausgesetzt. Zum Beispiel tragen bei einem rollenden Reifen die Spannungen und der Schlupf, die beim Kontakt mit der Fahrbahn entstehen, zur Ermüdung der Lauffläche bei. Hierdurch bilden sich Ermüdungsrisse, die letztendlich zur Ablösung von Abriebpartikeln führen. Diese Belastung wurde im Labor durch drei starr montierte Stahlkugeln nachgestellt, die in einer Kreisbahn über eine kleine Elastomerprobe (Abmessung etwa 4 cm x 4 cm x 2 mm) gleiten. Der hierdurch hervorgerufene Abrieb kann durch den Masseverlust der Probe nach einer definierten Anzahl von Überstreichungen ermittelt werden. Der kumulative Abrieb steigt in der Regel linear mit der Anzahl der Umdrehungen an, die Steigung der Ausgleichsgeraden entspricht der Verschleißrate des Elastomers. Versuche an verschiedenen Labormustern zeigten, dass das Verfahren in der Lage ist, zwischen verschiedenen Elastomerformulierungen zu differenzieren. Es stellt sich jedoch die Frage, wie diese Ergebnisse mit Ergebnissen



1 Lineare Zunahme des kumulativen Abriebs mit der Anzahl der Umdrehungen für die 8 untersuchten Elastomerproben, NR: Naturkautschuk.



2 Korrelation des per Abrasionstester gemessenen Abriebs der 8 Elastomerproben mit Abriebwerten, die die LAT100-Messungen für Geschwindigkeit-Energieeintrag-Kombinationen ergeben.



### 3 Reibpartner mit drei starr montierten Stahlkugeln mit dem Durchmesser von 10 mm.

anderer Abriebtests oder einem Praxistest von Reifen »auf der Straße« korrelieren: Ergeben diese Tests die gleiche Rangfolge hinsichtlich der Abriebbeständigkeit?

#### Vergleich mit dem Laborabriebtester LAT100

Eine in der industriellen Forschung etablierte Vorgehensweise ist die Messung des Abriebs mit dem Laborabriebtester LAT100. Vergleiche mit Praxistests an Reifen ergaben, dass dieser Test prinzipiell in der Lage ist, auch geringfügige Unterschiede im Labor zu reproduzieren, die sich beim Test von Reifen »auf der Straße« ergeben. In diesem Test wird der Abrieb eines Elastomerrads (Durchmesser 84 mm, Breite 18 mm) gemessen, das bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Schräglaufwinkeln gegen eine Edelkorundscheibe läuft. Durch die Variation dieser Versuchsparameter gewinnt man einen Einblick in das Abriebverhalten des Elastomers in verschiedenen tribologischen Belastungsregimen. Hierzu werden die mit dem LAT100 gewonnenen Abriebwerte durch ein zweidimensionales lineares Modell angepasst, das die tribologische Belastungssituation durch die Geschwindigkeit und den Energieeintrag beschreibt.

Für die Vergleichsstudie wurden acht unterschiedliche Elastomercompounds mit dem 3-Kugel-Abriebtester und dem LAT100 untersucht: zwei Labormuster, vier Standardreifenmischungen und zwei optimierte Laufflächenmischungen. Letztere unterschieden sich nur in der Polyisoprenkomponente, da eine Naturkautschuk (NR) enthielt, die andere den im Projekt BISOYKA entwickelten biomimetischen Synthesekautschuk. Die LAT100-Tests fanden an der Evonik Resource Efficiency GmbH durch Dr. Michael Heinz statt.

Wegen der Unterschiede der beiden Abriebtests ist eine perfekte Korrelation der Ergebnisse nicht zu erwarten. Vergleicht

man die Ergebnisse des LAT100 zu verschiedenen Belastungssituationen mit denen der 3-Kugel-Abrasion, so ergibt sich eine gute Korrelation bei harschen Belastungsbedingungen, bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Schräglaufwinkeln. Ein schlüssiger Befund, betrachtet man die in den Experimenten mit dem 3-Kugel-Abrasionstester aufgebrauchten Spannungen und die Schädigungsmuster in der Reibspur. Auch wenn der am Fraunhofer IWM entwickelte Abriebtester nicht eine vergleichbare Fülle an Informationen zum Abriebverhalten wie der LAT100 liefert, so erhält man doch mit moderatem experimentellen Aufwand und geringem Materialbedarf erste Aussagen zum Abriebverhalten von Elastomeren.

Die vertikale Position der drei Stahlkugeln wird während des Versuchs mit einem Taster ermittelt, sodass prinzipiell die Zunahme der Tiefe der Reibfurche – und somit der Verschleiß – kontinuierlich gemessen werden kann. Dies gelingt aber nur, wenn weitere Effekte berücksichtigt werden können, die die Position beeinflussen. Dies sind beispielsweise thermische Hübe oder die Verformung der Elastomerprobe in vertikaler Richtung, die durch die Reibkräfte verursacht werden. Erreicht das System einen thermisch und mechanisch stationären Zustand, spiegelt der Verlauf der z-Position den Verschleiß der Probe wider. Eine kontinuierliche Messung des Verschleißes ist besonders dann interessant, wenn die Probe während des Versuchs nicht ausgebaut werden soll, beispielsweise bei Messungen unter einer kontrollierten Atmosphäre. Wegen seiner kompakten Bauweise kann der Abriebtester recht einfach mit einer Einhausung versehen werden, sodass Messungen in einer inerten oder oxidativen Atmosphäre ausgeführt werden können. So kann der Einfluss tribochemischer Reaktionen auf den Abrieb untersucht werden.

Dr. Raimund Jaeger

## HETEROEPITAKTISCHE OXYD-METALL-SCHICHTSTAPEL IM RF-MAGNETRONSPUTTER HERGESTELLT

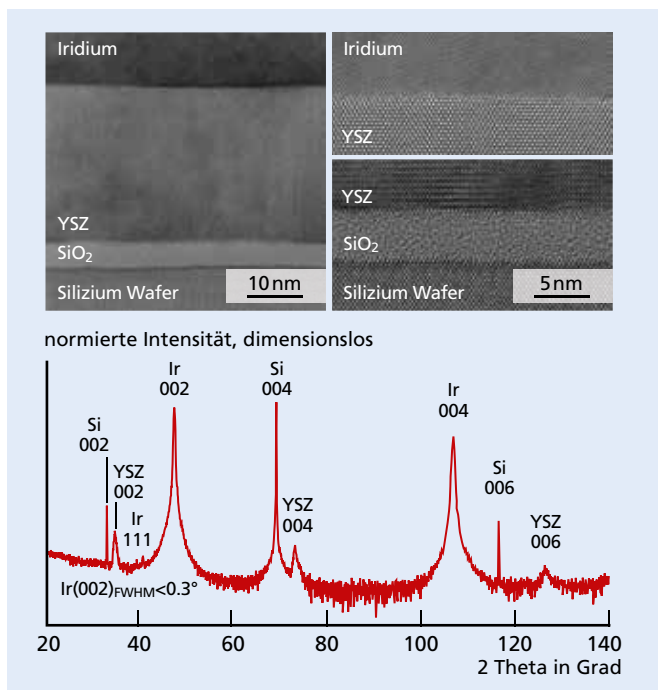
Einkristalline Metalloberflächen dienen als Wachstums-substrate beispielsweise zur Erzeugung von Piezo- und Ferroelektrika oder für die Herstellung hochorientierter Diamantschichten. Ihre Herstellung auf Wafer-Scale-Maßstab ist jedoch aufwändig und kostenintensiv. Der hohe Aufwand entsteht unter anderem dadurch, dass die gewünschte Heteroepitaxie der Metalle in der Regel nicht direkt auf Silizium-Wafern möglich ist. Zum Ausgleich von thermischem Mismatch sowie zur Gitteranpassung sind oxydische Pufferschichten erforderlich. Ein gängiges Verfahren zur Erzeugung einkristalliner Metalloberflächen auf diesen Pufferschichten ist das Elektronenstrahlverdampfen. Der Prozess ist jedoch langsam (0,002 - 0,05 nm/s), benötigt je nach Metall hohe Substrattemperaturen und bietet nur wenige Optimierungsmöglichkeiten. Zur Aufbringung von Oxydschichten wird oftmals die Laserablation angewendet, die zwar eine gute Steuerung der Schichtstöchiometrie erlaubt, aber ein aufwändiges und kostenintensives Verfahren darstellt.

### Heteroepitaktische Schichtstapel herstellen

Im Rahmen des Fraunhofer-Stiftungsprojekts DiaLe (Diamant für die Hochleistungselektronik) wurde stattdessen das rf-Magnetronspütern bezüglich seiner Eignung zur Deposition heteroepitaktischer Iridium- und Yttrium-stabilisierter Zirkonoxyd-(YSZ-)Schichten auf Silizium untersucht. Das Magnetronspütern ist, verglichen mit den herkömmlichen Verfahren, industriell weit verbreitet und bietet vielfältige Stellschrauben zur Prozessoptimierung. So ermöglicht ein Substrat-Biasing die Steuerung der Energie der schichtbildenden Teilchen beim Auftreffen auf die Substratoberfläche und erlaubt so eine präzisere Kontrolle über die Eigenschaften der sich ausbildenden Schichtstruktur als in einem reinen Verdampfungsprozess.

In den Arbeiten konnte erfolgreich gezeigt werden, dass sich durch den gezielten Einsatz eines Substrat-Biasings die Substrattemperatur, bei der Iridium heteroepitaktisch aufwächst, signifikant reduzieren und gleichzeitig die Abscheiderate gegenüber einem Verdampfungsprozess erhöhen ließ. Auch einkristalline YSZ-Pufferschichten konnten mit rf-Magnetronspütern auf Silizium hergestellt werden. Damit konnte der gesamte Schichtstapel Si-YSZ-Ir auf einer Fläche von bis zu 2 Zoll für Forschungs- und industrielle Einsatzzwecke in einem durchgängigen und wirtschaftlichen Prozess in hoher Qualität dargestellt werden.

Dr. Frank Meyer, Dr. Frank Burmeister



1 TEM-Bild eines Iridium/YSZ/Si-Schichtstapels (oben links), Details der Grenzflächen (oben rechts) und XRD-Spektrum des Schichtstapels (unten).

## ECHTZEITVERSCHLEISSMESSUNGEN AN EINEM GLEITLAGER

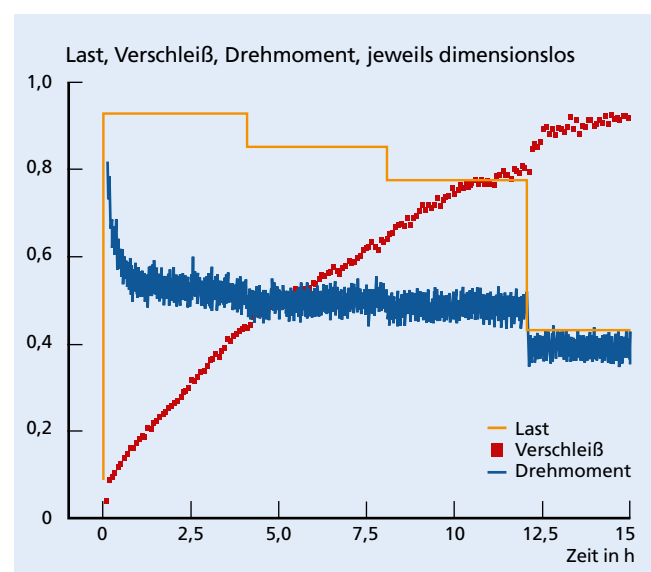
Ein Großteil der Anwendungen im Maschinenbau benötigt für das Erreichen der geforderten Lebensdauern Verschleißraten im Bereich weniger Nanometer pro Stunde, die sich topographisch nicht abbilden lassen. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass sich die Verschleißrate auch unabhängig von der Belastung über die Versuchszeit ändert. Hier bietet die Radionuklidtechnik (RNT) entscheidende Vorteile, denn sie ermöglicht während des Versuchs die hochaufgelöste Verschleißmessung in der Größenordnung weniger Nanometer pro Stunde in Echtzeit. Damit ist die Identifizierung stationärer Zustände, also konstanter Verschleißraten, möglich, die eine zuverlässige Extrapolation des Verschleißes über der Lebensdauer zulassen. Die Änderung der Verschleißrate und der Reibung über die Zeit erlaubt Rückschlüsse auf das Einlaufverhalten, das eng mit dem Verhalten der Randzoneneigenschaften verknüpft ist.

### Tribologische Prüfung unter realistischen Einsatzbedingungen

In der dargestellten Messung (Abbildung 1) untersuchten wir in einem Industrieprojekt den Einfluss verschiedener Betriebspunkte auf das Einlauf- und Verschleißverhalten eines Gleitlagers, das für hochbelastete Maschinenbauteile eingesetzt wird. Aus der Änderung des Drehmoments unter konstanten Belastungsbedingungen ist ein Einlauf zu erkennen, der sich jedoch nicht so stark ausgeprägt im Verschleißsignal widerspiegelt. Im Gegensatz dazu ist ein Absinken der Verschleißrate zu erkennen, wenn die Belastung auf das Lager sinkt. Die Verschleißrate ändert sich in den Betriebspunkten auch dann noch, wenn im Drehmoment keine Änderungen mehr zu erkennen sind. Diese hochaufgelösten Echtzeitverschleißmessungen sind im Prüfstand in einem Kraftbereich

von 100 N bis 245 kN in Druck- und in Zugrichtung bei einem Drehzahlbereich von 1 bis 5000 Umdrehungen pro Minute möglich. Auch reversierende Winkelbewegungen ab  $1^\circ$  kann der Prüfstand nachstellen: Damit ist er für Versuche an Bauteilen aus Großmotoren und Anwendungen in den Bereichen Windkraft, Marine und Wasserkraft interessant. Seine Kombination mit der RNT erlaubt die Prüfung von Bauteilen, die nah an die Bauteilgrößen und Belastungen im Produkt herankommen, und vermeidet so Abweichungen zwischen Modellexperiment und realem Bauteil. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die reale Anwendung kann so entscheidend verbessert werden.

Christian Zwifka, Dr. Dominic Linsler



1 Verschleißverhalten des Gleitlagers über der Versuchszeit in Abhängigkeit der Belastung.



## BAUTEILSICHERHEIT UND LEICHTBAU

### GESCHÄFTSFELDLEITER

Dr. Michael Luke

Telefon +49 761 5142-338

michael.luke@iwm.fraunhofer.de

### GRUPPEN



#### ERMÜDUNGSVERHALTEN

Mit unseren Werkstoff- und Schädigungsmodellen für ermüdungsgefährdete Strukturen berechnen wir deren Lebensdauer, um Festigkeitsreserven der Werkstoffe auszuschöpfen. Dabei berücksichtigen wir Randschichteigenschaften, insbesondere im Leichtbau, und analysieren Schadensfälle.

Dr. Majid Farajian | [majid.farajian@iwm.fraunhofer.de](mailto:majid.farajian@iwm.fraunhofer.de)



#### CRASHSICHERHEIT UND SCHÄDIGUNGSMECHANIK

Für die Crashsimulation entwickeln und implementieren wir Material- und Versagensmodelle für alle relevanten Werkstoffe und validieren diese durch geeignete Bauteilprüfungen. Dabei berücksichtigen wir relevante Einflüsse aus dem Fertigungsprozess auf das Materialverhalten.

Dr. Silke Sommer | [silke.sommer@iwm.fraunhofer.de](mailto:silke.sommer@iwm.fraunhofer.de)



#### CRASHDYNAMIK

Deformation und Versagen von Werkstoffen und Bauteilen werden bei Crash und Impact für Temperaturen von -40 bis 1 000 °C, Dehnraten bis 5 000 s<sup>-1</sup> von Mikrometer bis Meter untersucht. Dazu entwickeln wir Prüf-, Mess- und Analysemethoden für die Optimierung von Leichtbau, Sicherheitsbehältern und CAE-Methoden.

Frank Huberth | [frank.huberth@iwm.fraunhofer.de](mailto:frank.huberth@iwm.fraunhofer.de)



#### FÜGEVERBINDUNGEN

Wir charakterisieren und bewerten die mechanischen Eigenschaften mechanisch, thermisch und adhäsiv gefügter Werkstoffverbindungen und entwickeln Modellierungen für die Crashsimulation. Aus Mikrostrukturanalysen und Prozesssimulationen gewinnen wir wichtige Eigenschaftsinformationen.

Dr. Silke Sommer | [silke.sommer@iwm.fraunhofer.de](mailto:silke.sommer@iwm.fraunhofer.de)



#### VERBUNDWERKSTOFFE

Unsere Prüfkonzepte und Materialmodelle zum Einsatz- und Versagensverhalten von Verbundwerkstoffen berücksichtigen deren Mikrostruktur und Richtungsabhängigkeit. Wir leiten auf numerischem Weg experimentell schwer zugängliche Eigenschaften ab und ermitteln Belastungsgrenzen für Bauteile.

Dr. Jörg Hohe | [joerg.hohe@iwm.fraunhofer.de](mailto:joerg.hohe@iwm.fraunhofer.de)



#### BRUCHMECHANIK UND STRUKTURINTEGRITÄT

Mit bruchmechanischen Konzepten bewerten wir die Sicherheit, Gebrauchseignung und Lebensdauer komplexer und hoch belasteter Bauteile, Komponenten und Schweißkonstruktionen. Wir erarbeiten Lösungen zur Verbesserung der Bauteilsicherheit, zur Optimierung der Bauteilauslegung und Inspektionsintervalle.

Dr. Igor Varfolomeev | [igor.varfolomeev@iwm.fraunhofer.de](mailto:igor.varfolomeev@iwm.fraunhofer.de)

A portrait of a middle-aged man with grey hair and glasses, wearing a dark suit jacket over a white shirt. He is smiling slightly and looking towards the camera. The background is a blurred office setting with a window showing green foliage.

## UNSERE HIGHLIGHTS 2019

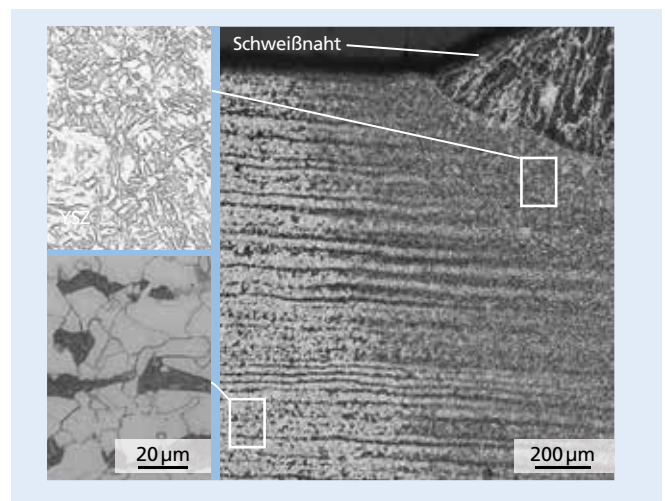
In diesem Jahr bildete die Bewertung von Defekten auf mikrostruktureller Skala den Schwerpunkt unserer Entwicklungsarbeiten. Mit schädigungsmechanischen Ansätzen wurde der Einfluss von Einzeldefekten und Defektfeldern auf das mechanische Verhalten von Aluminium- und Stahl-Guss- sowie Schmiede-Bauteilen unter Kriech-, Schwing- und Crash- oder Impaktbelastung bewertet. Dabei wurden Ergebnisse aus computertomografischen Untersuchungen verwendet, statistisch ausgewertet und für probabilistische Analysen aufbereitet.

Im Rahmen der Digitalisierung in der Werkstoffmechanik wurde intensiv an der Erstellung von Ontologien gearbeitet. Dies betrifft die Anwendungsfelder Ermüdungsfestigkeit von höchstfesten Stählen und faserverstärkte Kunststoffe. Hierbei kommt es insbesondere darauf an, die relevanten Fertigungsschritte und Metadaten für die strukturierte Datenablage in Wissensgraphen so zu beschreiben, dass sie für komplexe Abfragen nutzbar sind.

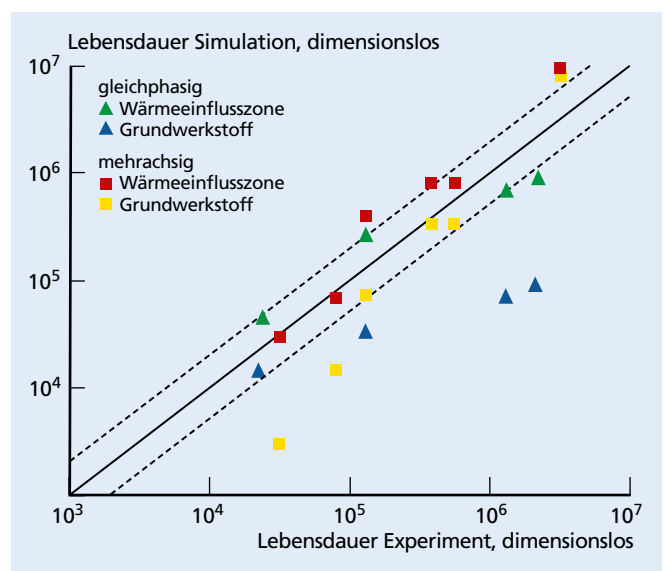
## SCHWEISSVERBINDUNGEN BEI MEHRACHSIGER BEANSPRUCHUNG: LEBENSDAUERMODELL VERFEINERT

Lasttragende Bauteile und Strukturen sind in Industriebereichen wie Automobil- und Schienenfahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Stahl- und Brückenbau komplexen Spannungszuständen ausgesetzt. Viele technische Schadensfälle lassen sich auf eine Materialermüdung infolge zyklischer mechanischer Beanspruchungen zurückführen. Für den zuverlässigen Einsatz ist die Beschreibung der Materialermüdung entscheidend, speziell die Beschreibung kritischer Komponenten. So stellt die Bewertung der Lebensdauer von Schweißverbindungen, als kritische Komponente in allen Industriebereichen, einen wichtigen Aspekt in der Produktentwicklung dar. Aufgrund der vielfältigen Einflussparameter auf das Schwingfestigkeitsverhalten ist eine Lebensdauerbewertung unter komplexer mehrachsiger Beanspruchung nach wie vor mit großen Unsicherheiten verbunden. Inwieweit das Schweißbeigenspannungsfeld und das Gefüge auf den mehrachsigen zyklischen Spannungszustand und dementsprechend auf die Schädigungsmechanismen Einfluss haben, ist bisher nur unzureichend erforscht.

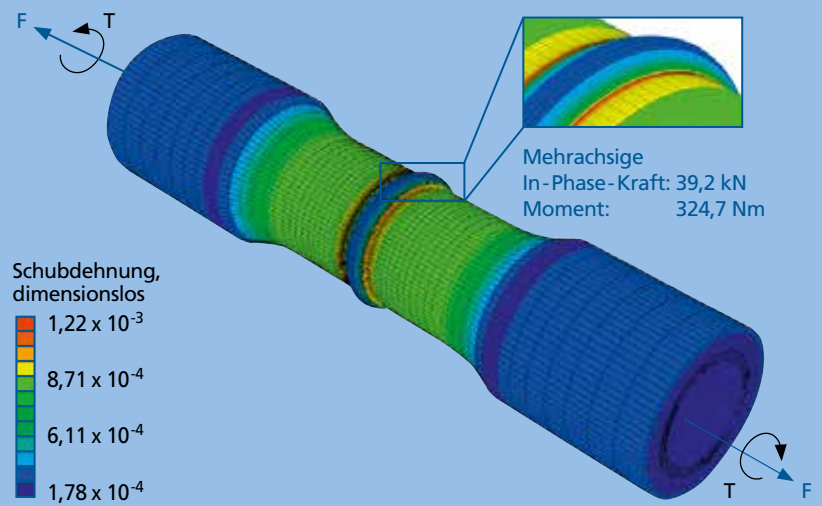
Die beschriebenen Umstände haben mit dazu geführt, dass bei schwingbeanspruchten Schweißkonstruktionen das Potenzial hochfester schweißbarer Stähle nicht zum Tragen kommt. In den aktuellen Regelwerken werden konservative Denkweisen zur Auslegung von Schweißverbindungen empfohlen, wofür die vermuteten hohen Eigenspannungen ganz wesentlich verantwortlich gemacht werden. Eine wissenschaftliche und aus praktischer Sicht ingenieurmäßige Lösung zu dieser Problematik ist die Entwicklung eines rechnerischen Nachweises des Schweißbeigenspannungsfelds und dessen Verhalten unter Betriebsbeanspruchungen. Ein solcher Nachweis ist ein unschätzbare Werkzeug für die Designer geschweißter Konstruktionen zur Quantifizierung der Gefahr der Eigenspannungen zur Bemessung leichterer



1 Mikrostruktur nach dem Schweißen im Grundwerkstoff (unten links), in der WEZ (oben links) und in der Schweißnaht.



2 Vergleich der rechnerisch und experimentell ermittelten Lebensdauer von Rundschweißverbindungen aus S355J2H.



3 FEM-Modell einer geschweißten Probe für die Schädigungssimulation.

Bauteile gegen Ermüdung. Anhand lokaler Ansätze beschreibt das Fraunhofer IWM den Einfluss schweißbedingter Gefügeveränderungen und Eigenspannungen auf die Ermüdungsschädigung quantitativ und entwickelt moderne Schädigungsmodelle.

### Ermüdungsschädigung in Rundschweißverbindungen

In Bezug auf die Lebensdauerbewertung von geschweißten Bauteilen und Strukturen sind geometrische Änderungen, Materialinhomogenität und Eigenspannungen drei wichtige Merkmale, die zu berücksichtigen sind. Bisher sind die Faktoren Materialinhomogenität und Eigenspannungen noch nicht explizit in den lokalen Ansätzen berücksichtigt worden.

In der Gruppe »Ermüdungsverhalten« wurden deshalb an Rohrschweißverbindungen aus S355J2H mit ferritisch-perlitischem Gefüge Ermüdungsversuche unter mehrachsiger Beanspruchung durchgeführt. Sowohl WIG- wie auch MAG-Schweißverfahren kamen bei der Herstellung der Schweißnähte zur Anwendung. Die Mikrostrukturuntersuchungen haben gezeigt, dass die Wärmeeinflusszone (WEZ) aus Ferrit, Bainit und Anteilen an nadelförmigen Martensit besteht (Abbildung 1). Im nächsten Schritt wurden die Schweißspannungen an der Oberfläche der Proben sowie in verschiedenen Tiefen unter Verwendung von Röntgenbeugungsverfahren ermittelt.

Die mechanische Beanspruchung der Schweißproben erfolgte zum einen unter reiner Torsion und zum anderen unter Zug-Torsions-Belastungen. Die Hälfte der Proben wurde im geschweißten Zustand und die andere Hälfte im spannungsarmgeglühten Zustand geprüft, um den Einfluss von Eigenspannungen auf das Ermüdungsverhalten zu untersuchen. Für die Berechnung der Lebensdauer geschweißter Proben

unter verschiedenen Belastungsszenarien wurde die Ermüdungsschädigung durch eine numerische Spannungsanalyse und durch den Einsatz des Konzepts der kritischen Ebene von Fatemi und Socie modelliert und simuliert. Der Einfluss von Mikrostruktur, lokaler Festigkeit und Eigenspannungen wurde in dieser Simulation mit berücksichtigt.

### Genauerer Lebensdauermodell mit lokaler WEZ-Festigkeit

Der Vergleich zwischen den berechneten und experimentell ermittelten Lebensdauern ist in Abbildung 2 dargestellt. Es wird hier gezeigt, dass nur durch die Berücksichtigung der lokalen Festigkeit der WEZ in der Modellierung eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment erreicht werden kann. Wenn in der Modellierung die Eigenschaften des Grundwerkstoffs für die WEZ übernommen werden, besitzt das Schädigungsmodell keine ausreichende Genauigkeit und Prognosefähigkeit. Dieses Ergebnis war auch zu erwarten, da alle Ermüdungsrisse am Schweißnahtübergang in der WEZ initiierten.

Für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen liefern die Ergebnisse dieser Untersuchungen die notwendigen Kenntnisse für die realistische Abschätzung der Schädigungswirkung von Mikrostruktur und Schweißspannungen. Dadurch können entsprechende Erweiterungen der Richtlinien und Regelwerke zur Bewertung von Eigenspannungen für die Bauteilberechnung und Bauteilbemessung in Form von Empfehlungen vorgeschlagen werden. Durch verbesserte, realitätsnahe und abgesicherte Bewertungsmethoden ist damit eine bessere Werkstoffausnutzung und Bauteilauslegung möglich, was insgesamt zur Ressourcenschonung und zu kostengünstigerer Konstruktion beiträgt.

Dr. Majid Farajian, Kimiya Hemmesi

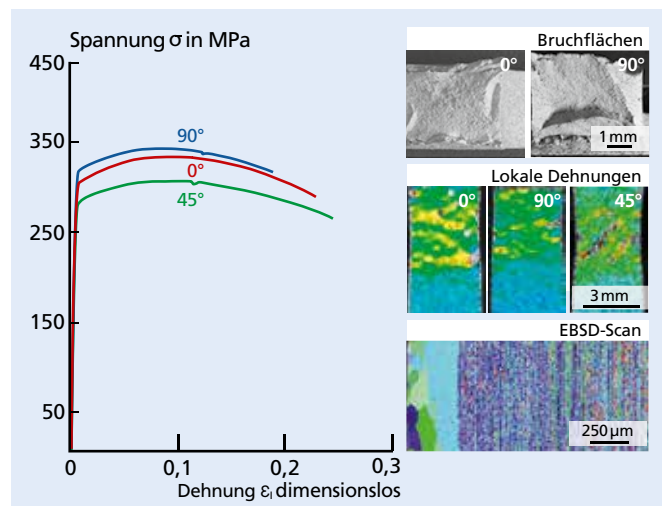


## MODELLIERUNG DES ANISOTROPEN VERHALTENS VON AL-STRANGPRESSPROFILIEN

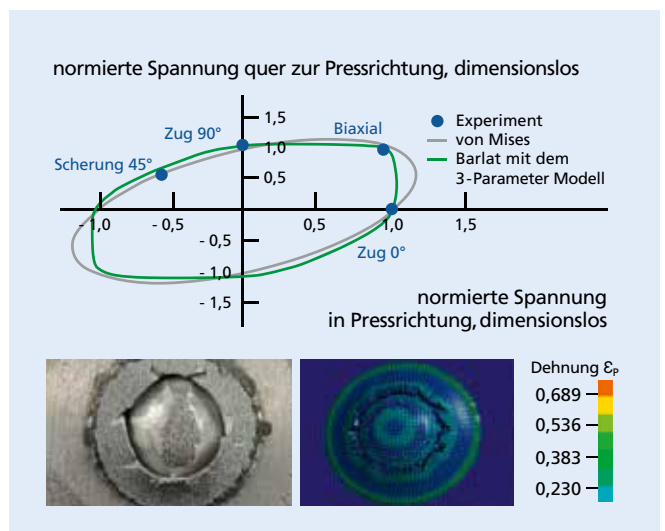
Als Leichtbauwerkstoff werden Aluminiumprofile und -bleche zunehmend in neueren Fahrzeugmodellen eingesetzt. Während der Produktentwicklung wird das Crashverhalten solcher Komponenten bezüglich ihrer Energieabsorption, Faltung und Rissbildung bewertet. Da Aluminiumwerkstoffe im Vergleich zu Stählen niedrigere Bruchdehnungen zeigen, ist eine genaue Versagensmodellierung mit einem übertragbaren Versagensmodell von zentraler Bedeutung. Dabei spielt neben der Belastungsart auch die Belastungsrichtung, bezogen auf die Walz- beziehungsweise Strangpressrichtung, eine Rolle. Da bei Crashsimulationen Fahrzeugmodelle noch vorwiegend mit groben Schalenelementen bis 5 mm diskretisiert sind, ist die Aussagefähigkeit der Modelle von numerischen Aspekten nicht zu trennen.

### Werkstoffcharakterisierung

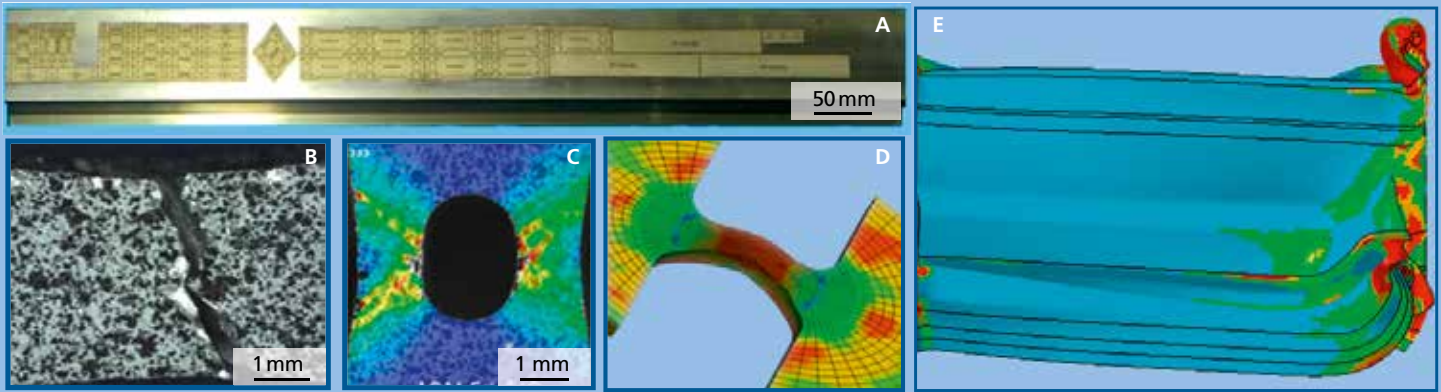
Bei anisotropen Materialien wie stranggepresstem Aluminium wird der Einfluss der Orientierung auf die plastische Verformung in der Regel unter einachsiger Zug untersucht. Allerdings muss dabei geprüft werden, ob im Rahmen der Kontinuumsmechanik eine plausible Übertragbarkeit eines Verformungsmodells bei beliebigen Spannungszuständen gewährleistet ist. Die Versagensmechanismen sind jedoch so vielfältig und komplex, dass realistische Ansätze zu relevanten Versagensvorhersagen aus einer solcherart reduzierten experimentellen Datenbasis schwierig sind. Aus diesem Grund wurden am Fraunhofer IWM für Al-Strangpressprofil-Proben Experimente mit einer großen Variation des Spannungszustands durchgeführt. Hierzu zählen insbesondere Kerbzug-, Scherzug-, Torsions- und Biaxialversuche. Bei der Versagenscharakterisierung wurden die Wechselwirkungen von Orientierung und Mehrachsigkeit (von Scherung bis hin zum Biaxialzug) untersucht und damit die notwendige umfangreiche Daten-



1 Technische Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Zugversuchen für drei Orientierungen.



2 Fließortkurven im normierten Spannungsraum und experimentelle Ergebnisse aus Zug-, Scher- und Biaxialversuchen in unterschiedlichen Richtungen (oben); Durchstoßprobe und Simulation (unten).



3 Anisotropes Verhalten von Al-Profilen: Probenentnahme (A), Zugprobe (B) Dehnungsverteilung in Lochzugprobe kurz vor Bruch (C), berechnete Verteilung der Triaxialität in einer Durchbiegeprobe (D), berechnetes Deformationsbild mit Dehnungsverteilung bei einem Stauchversuch an Profilabschnitt (E).

basis geschaffen. Lokale Dehnungsfelder sind dabei mit ARAMIS gemessen worden. Die Mikrostruktur wurde mithilfe metallografischer Verfahren und Electron Backscatter Diffraction (EBSD) quantitativ analysiert. Mikromechanismen des orientierungsabhängigen Versagens bei unterschiedlichen Spannungszuständen sind durch Fraktographie und Metallographie untersucht worden (Abbildung 1). Zur Validierung des Versagensmodells wurden spezielle Versuche unter komplexen Spannungszuständen mittels flachen Lochzug- und Durchbiegeproben durchgeführt. Die ermittelte Orientierungsabhängigkeit des Verformungsverhaltens ist auf eine ausgeprägte Vorzugsorientierung (Textur) zurückzuführen. Die durch Zugproben ermittelte Orientierungsabhängigkeit des Verformungs- und Versagensverhaltens lässt sich nicht auf Scherzug- und Kerbzugbelastung übertragen: REM-Aufnahmen der Bruchflächen von Längs- und Querproben zeigen keinen deutlichen Unterschied.

### Werkstoff- und Versagensmodelle sowie numerische Simulation

Die anisotropen Werkstoffmodelle basieren auf einer Kombination ausgewählter anisotroper Verformungsmodelle mit isotropen oder anisotropen Versagensmodellen. Die Versagensmodelle beruhen dabei auf einer von der Mehrachsigkeit abhängigen Bruchdehnung. Es wurden Modelle für Schalen- und Volumenelemente verwendet.

Bei ausreichender Komplexität konnte ein Verformungsmodell kalibriert werden, das die Orientierungsabhängigkeit des Fließbeginns für jeden Belastungszustand zufriedenstellend beschreibt (Barlat 2000 für Schalen; Barlat 91 für Solids) (Abbildung 2). Mit zunehmender Verformung, besonders kurz vor dem Bruch, ist eine Abweichung zwischen Simulation und Experiment zu beobachten, die auch durch

eine höhere Modellkomplexität und Anzahl von Parametern nicht abgeglichen werden kann. Dabei ist die Abweichung bei Schalenelementen am höchsten.

Das anisotrope Versagensmodell zeigt gegenüber dem isotropen Versagensmodell nur eine geringe Verbesserung der Voraussagen experimenteller Ergebnisse. Allerdings ist der Aufwand für die Ermittlung von Parametern des anisotropen Versagensmodells deutlich größer. Da der richtungsabhängige Bruch häufig durch Dehnungslokalisation ausgelöst wird, ist eine genaue Beschreibung des Verformungsverhaltens Voraussetzung für eine zuverlässige Modellierung der Bruchvorgänge. Dabei liegt der größte Entwicklungsbedarf einerseits in der Verbesserung numerischer Methoden mit feinen Volumenelementen zur genaueren Abbildung des Spannungszustands kurz vor Bruch. Andererseits sollten die Verformungsmodelle hin zu großen Verformungen verbessert werden und anisotrope Verfestigung abbilden können.

### Validierungssimulation

Als Validierungsversuche für die Simulation dienten Stauchversuche an Profilabschnitten unter statischer Belastung. Dabei wurde die beobachtete Materialinhomogenität aufgrund unterschiedlicher Wanddicken durch Skalierung der Modellparameter berücksichtigt. Auch wurde eine übliche Regularisierungsmethode zur Berücksichtigung des Einflusses der Elementkantenlänge auf Versagen angewandt. Die neu entwickelte, verifizierte Methode von experimenteller Charakterisierung über Modellentwicklung und -kalibrierung bis hin zur Modellvalidierung (Abbildung 3) kann in diesem Zusammenhang in der industriellen Anwendung direkt eingesetzt werden.

Dr. Florence Andrieux, Dr. Dong-Zhi Sun

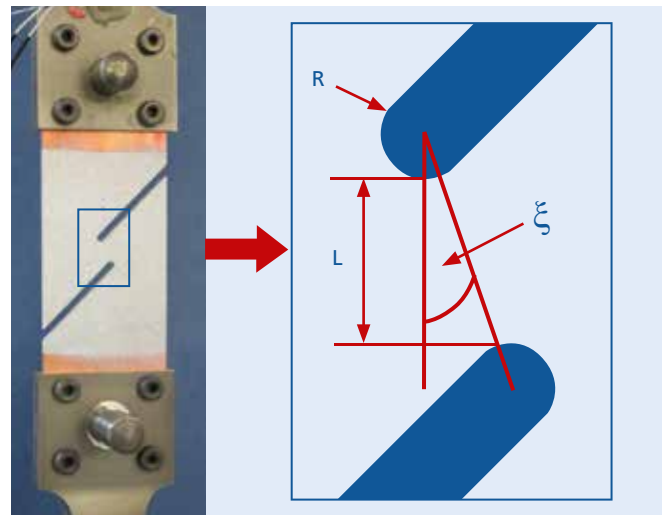


## SCHERPROBENGESTALTUNG FÜR DIE DEHNRATENABHÄNGIGE BLECHCHARAKTERISIERUNG

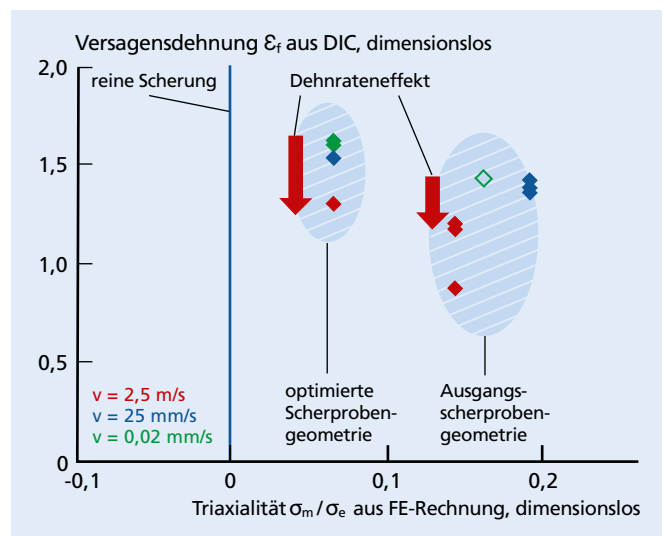
Scherbelastung ist für die Crashesicherheit ein besonders kritischer Lastfall, da duktiles Versagen plötzlich und ohne signifikante vorherige Einschnürung geschieht. Zusätzlich treten für hochfeste Stähle und verschiedene Aluminiumlegierungen deutlich niedrigere Versagensdehnungen unter crashartiger als unter quasistatischer Scherbelastung auf. Das ist besonders problematisch: Dieser Dehnrateneffekt ist unter Scherbelastung dem in der Regel beobachteten Dehnrateneffekt hin zu höheren Versagensdehnungen unter Zugbelastung entgegengesetzt. Daher ist eine dehnratenabhängige Schercharakterisierung von Blechwerkstoffen für die Erstellung von Versagenskurven in der Crashesimulation unumgänglich. Für viele metallische Blechwerkstoffe ist die Schercharakterisierung bereits unter quasistatischer Belastung eine Herausforderung, da das Versagen häufig in Kerben unter Zugbelastung auftritt. Darum existieren unterschiedlichste Prüfkonzepte und Probengeometrien. Sie sind allerdings in vielen Fällen nur für statische Belastung anwendbar und häufig auch nur für bestimmte Werkstoffklassen geeignet. Oft ist zur Umsetzung der Konzepte zusätzlich eine Verdünnung der Scherzone durch Dickenbearbeitung des Blechs erforderlich. Im Rahmen des AiF-Projekts »Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung« (IGF-Vorhaben Nr. 18943 N/1) haben wir in direktem Austausch mit Industriepartnern ein Prüfkonzept für eine einheitliche Schercharakterisierung erarbeitet, das für metallische Blechwerkstoffe verschiedenster Festigkeit, Duktilität und Blechdicken in einem weiten Dehnratenbereich geeignet ist.

### Werkstoff- und blechdickenabhängige Scherprobe

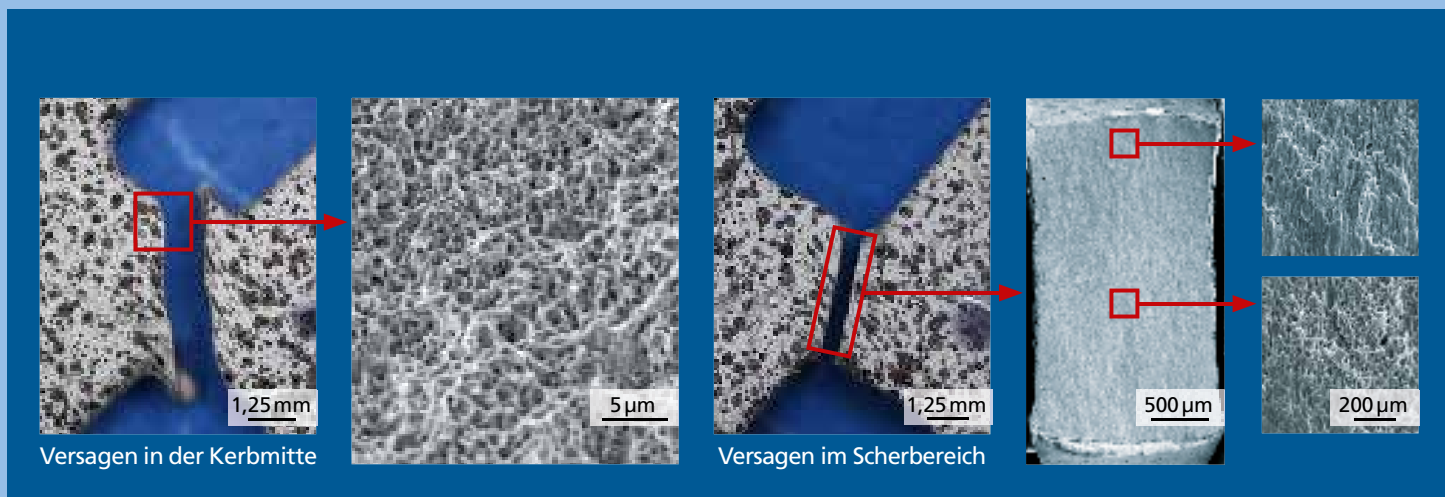
Für die dehnratenabhängige Schercharakterisierung eignen sich unsymmetrische Schrägkerb-Scherzugproben, die sowohl



1 Optimierung der Scherzonengeometrie bei einer 34 mm breiten Probe: Radius R, Scherlänge L und negativer Kerbüberlappwinkel  $\xi$ .



2 Verbesserung der Schercharakterisierung des Werkstoffs HX340LAD mit optimierten Scherproben (höhere Scherdehnungen und niedrigere Triaxialitäten vor Bruch).



3 Versagensorte bei Schrägkerb-Scherzugproben: in Kerbmitte mit Zugwaben (links), im Scherbereich mit Scherbruchfläche (rechts).

unter quasistatischer als auch unter dynamischer Belastung wie einachsige Zugproben einsetzbar sind. Sie erlauben eine einfache Probenfertigung ohne Blechdickenbearbeitung, haben einen eindeutigen Lastpfad, und die Scherzone ist für optische Dehnungsmessung einsehbar. Da das Scherverhalten abhängig ist vom Werkstoffverhalten, der Blechdicke und der Scherzonengeometrie, wurde mit numerischen und experimentellen Studien eine Optimierung von senkrechtem Kerbabstand, Kerbradius und Scherbreite durchgeführt (Abbildung 1).

Anhand der Untersuchungen für verschiedene hoch- bis höchstfeste Stahlblechwerkstoffe mit Blechdicken zwischen 1 und 2 mm haben wir eine Empfehlung für eine Scherzugprobengestaltung erarbeitet. Der Radius wird zu  $R = 1$  mm und der senkrechte Kerbabstand  $L$  wird in Abhängigkeit der Blechdicke  $t$  zu  $L/t = 2,7$  festgelegt. Mit zunehmendem Verfestigungsvermögen des Werkstoffs wird ein größerer negativer Kerbüberlappwinkel  $\xi$  vorgeschlagen, der überlagerte Zugspannungen und damit die Wahrscheinlichkeit für einen Kerbanriss reduziert. Maßgeblicher Kennwert aus dem einachsigen Zugversuch ist der Verfestigungsexponent  $n_{2-Ag}$ , der für drei verschiedene Duktilitätsklassen den negativen Kerbüberlappwinkel zu  $\xi = -10^\circ$  ( $n_{2-Ag} < 0,1$ ),  $\xi = -15^\circ$  ( $0,1 \leq n_{2-Ag} < 0,15$ ) und  $\xi = -20^\circ$  ( $n_{2-Ag} \geq 0,15$ ) festlegt. Eine wie bei dynamischen Zugversuchen übliche Probeneinspannung über Bolzenverbindungen fördert das Versagen in der Scherzone und nicht in den Kerben. Abbildung 2 zeigt: Diese Gestaltungsempfehlung haben wir an weiteren Stahlsorten, Aluminium und Kupfer erfolgreich validiert. Sie dient nun als Basis für eine einheitliche dehnratenabhängige Schercharakterisierung für verschiedenste metallische Blechwerkstoffe.

### Dehnratenabhängige Schercharakterisierung von hochfesten Stahlblechwerkstoffen

Mit den optimierten Scherprobengeometrien haben wir Experimente von quasistatischer bis crashartiger Belastung an hochfesten Stahlblechwerkstoffen durchgeführt. Die maximalen Dehnungen in der Scherzone kurz vor Bruch wurden durch Grauwertkorrelation mit lokalen Messlängen zwischen 0,1 und 0,2 mm ausgewertet. Insbesondere für duktile Werkstoffe mit hohem Verfestigungsvermögen hat sich mit den optimierten Scherzugproben eine signifikante Verbesserung in der Schercharakterisierung gezeigt. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen an Schrägkerb-Scherzugproben ohne Kerbversatz liegen die ausgewerteten Dehnungen vor Bruch deutlich höher und näher am Scherspannungszustand mit Triaxialität 0. Der negative Dehnrateneffekt auf die maximale Dehnung in der Scherzone vor Bruch hat sich auch mit den optimierten Scherprobengeometrien bestätigt (Abbildung 2). Im Sinne des Leichtbaus werden zunehmend neue Werkstoffe entwickelt, die sowohl eine hohe Festigkeit als auch ein hohes Verfestigungsvermögen aufweisen. Für diese Werkstoffe zeigt sich die deutlich eingeschränkte Tauglichkeit von Schrägkerb-Scherzugproben ohne Kerbüberlapp, wie die in ASTM B831 für Aluminiumbleche vorgeschlagene Geometrie. In einem zukünftigen Projekt, das bereits im DIN-Normenausschuss NA 062-01-42 AA »Zug- und Duktilitätsprüfung für Metalle« vorgestellt wurde, wird gemeinsam mit Projektpartnern die hier vorgestellte Scherprobengestaltung für weitere Werkstoffe abgesichert, der Blechdickenbereich erweitert und eine Prüfvorschrift für die dehnratenabhängige Schercharakterisierung metallischer Blechwerkstoffe erarbeitet.

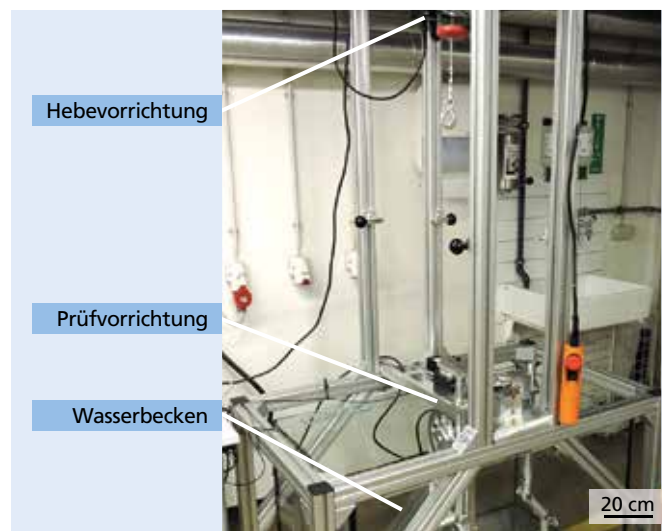
Silke Klitschke, Frank Huberth

## ZERSTÖRUNGSFREIE MESSUNG DER ELASTIZITÄTSKONSTANTEN ANISOTROPER VERBUNDWERKSTOFFE

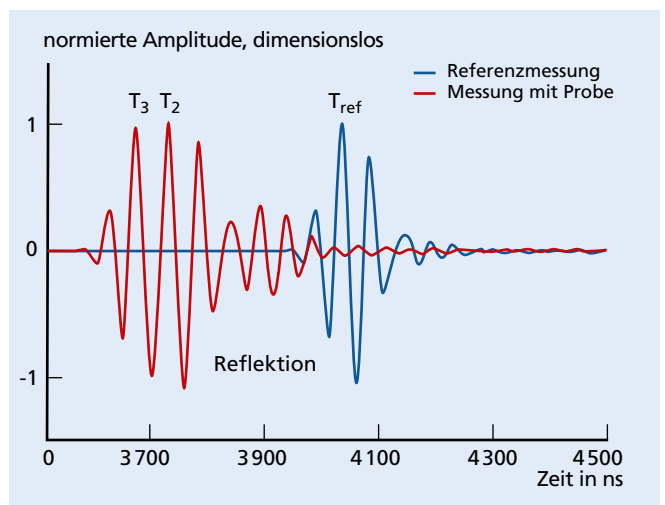
Das lineare Elastizitätsverhalten von anisotropen Werkstoffen ist im Allgemeinen durch 21 unabhängige Elastizitätskonstanten beschreibbar. Weist der Werkstoff gewisse Symmetrien auf, so lässt sich die Anzahl der unabhängigen Konstanten reduzieren. Für den Fall der für die meisten Verbundwerkstoffe relevanten orthotropen beziehungsweise transversalen Symmetrie verbleiben zum Beispiel noch 9 beziehungsweise 5 unabhängige Elastizitätskonstanten. Die Bestimmung dieser Konstanten wird normalerweise durch Zug- oder Scherversuche mit unterschiedlicher Materialorientierung durchgeführt. Dies erfordert einerseits einen erheblichen Materialeinsatz, andererseits lassen sich Out-of-plane-Konstanten oft nicht zuverlässig bestimmen. Weiterhin müssen zur Bestimmung der einzelnen Konstanten mehrere Proben geprüft werden, sodass Einflüsse und Inkonsistenzen durch Materialvariationen nicht ausgeschlossen werden können. Am Fraunhofer IWM wurde daher ein Ultraschallprüfstand aufgebaut, der es ermöglicht, alle 21 Elastizitätskonstanten von Verbundwerkstoffen zerstörungsfrei anhand einer einzigen Probe zu bestimmen.

### Messprinzip und Versuchsaufbau

Die Ermittlung der Elastizitätskonstanten in diesem Prüfstand basiert auf der Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen. Dazu wird eine flache Probe (etwa 5 x 5 cm) in ein Wasserbad getaucht und aus verschiedenen Richtungen durchschallt (Abbildung 3). An der Grenzfläche zum Probenkörper wird die eintreffende Welle gebrochen, und es breiten sich in der Probe je nach Orientierung bis zu zwei Quasi-Transversal und eine Quasi-Longitudinalwelle in unterschiedliche Richtungen aus. Mittels einer Referenzmessung ohne Probekörper können dann die Wellenlaufzeit und mithilfe des Snellius'schen Brechungsgesetzes die Phasenge-



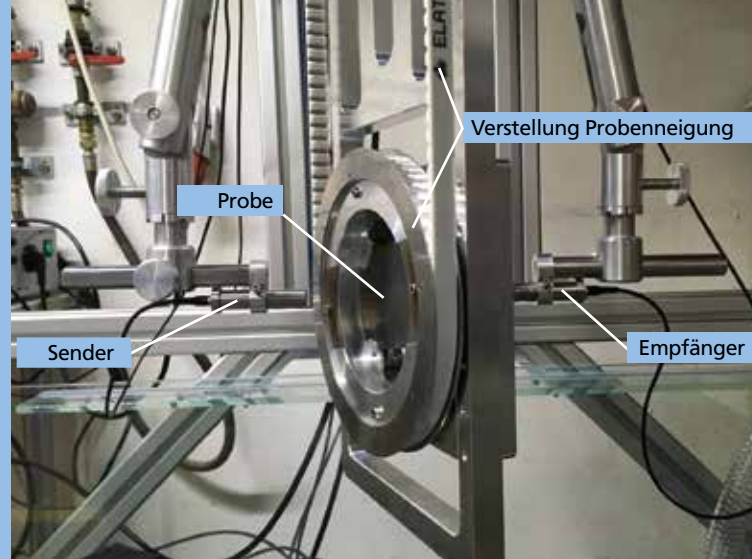
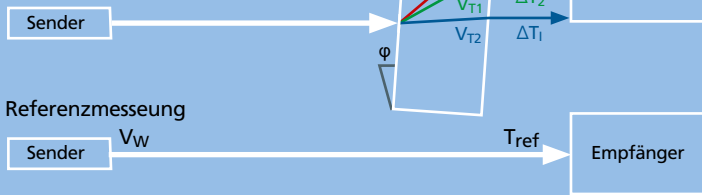
1 Ultraschallprüfstand mit ins Wasserbecken eingetauchter Prüfvorrichtung.



2 Referenzsignal ohne Probe (blau) und Signal mit Probe bei einem Einstrahlwinkel von  $8^\circ$  (rot): unterschiedliche Wellenformen überlagern sich.

$V_L$  Geschwindigkeit Longitudinalwelle  
 $V_T$  Geschwindigkeit Transversalwelle  
 $V_W$  Schallgeschwindigkeit Wasser  
 $\Delta T$  Signalverzögerung  
 $T_{ref}$  Signallaufzeit Referenzmessung  
 $\varphi$  Einstrahlwinkel

Messung mit Probe



3 Messprinzip Ultraschallprüfung (links) und Detailaufnahme der Realisierung im Prüfstand (rechts).

schwindigkeit sowie die Richtung der Wellenausbreitung in der Probe bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen Wellengeschwindigkeit und Elastizitätskonstanten wird über die Christoffelgleichungen hergestellt.

In dem am Fraunhofer IWM aufgebauten Prüfstand (Abbildung 1) können die Messungen mit unterschiedlicher Probenorientierung vollautomatisch durchgeführt werden. Hierfür wird die Probe über zwei Stellmotoren in zwei Winkeln (Einstrahlwinkel und Probenneigung) positioniert und für jede Positionierung eine vorgegebene Anzahl an Einzelmessungen durchgeführt. Die automatische Ansteuerung der Stellmotoren sowie der Messelektronik erfolgt über eine eigens programmierte Software.

### Signalverarbeitung und Auswertemethodik

Die besondere Herausforderung liegt in der nachfolgenden Signalverarbeitung zur Bestimmung der Wellenlaufzeit sowie in der Bestimmung der Elastizitätskonstanten aus den Wellengeschwindigkeiten. In dem gemessenen Signal sind Transversal- sowie Longitudinalwellen mitunter überlagert und schwer voneinander zu trennen. Erschwerend kommt hinzu, dass diese um weitere Anteile aus Reflexionen an der Probengrenzfläche überlagert sein können (Abbildung 2). Am Fraunhofer IWM wurde daher ein Algorithmus entwickelt und implementiert, mit welchem die verschiedenen Signalanteile getrennt und die entsprechenden Wellenlaufzeiten auch bei starker Überlagerung zuverlässig bestimmt werden können.

Da bei dieser Methodik wesentlich mehr Messdaten zur Verfügung stehen als Materialkonstanten zu bestimmen sind, können die Elastizitätskonstanten über einen Optimierungsalgorithmus bestimmt werden. In diesem Optimierungsansatz

wird der Fehler zwischen gemessenen Wellengeschwindigkeiten und Wellengeschwindigkeiten, die durch das Elastizitätsgesetz gegeben sind, minimiert. Somit wird sichergestellt, dass die Elastizitätskonstanten für alle Richtungen robust bestimmt werden können. Gleichzeitig muss über Nebenbedingungen gewährleistet werden, dass die bestimmten Elastizitätskonstanten physikalisch zulässig sind.

Zur Validierung wurden die mit dieser Methodik bestimmten Elastizitätskonstanten soweit möglich mit alternativen, in der Praxis etablierten Prüfverfahren verglichen. Hierbei konnte durch eine sehr gute Übereinstimmung die Qualität der durch die Ultraschall-Laufzeitmessung bestimmten Materialkennwerte nachgewiesen werden.

### Weitere Anwendungen und Ausblick

Das hier vorgestellte Prüfverfahren ist zerstörungsfrei – somit kann dieselbe Probe mehrfach geprüft werden. Dadurch ist der Einsatz nicht auf die hier beschriebene Ermittlung von Elastizitätskonstanten beschränkt. Insbesondere ist es durch mehrmalige Prüfung möglich, den Einfluss von Alterungs- oder Schädigungsprozessen quantitativ zu erfassen. Mit mechanischen Prüfmethoden ist dies aufgrund der aufgetragenen Prüflasten nur eingeschränkt möglich. Bei den bisher geprüften Materialien handelte es sich in erster Linie um anisotrope keramische Verbundwerkstoffe, konzeptuell lässt sich die Messung aber auch auf alle anderen Arten von anisotropen Verbundwerkstoffen sowie auf homogene isotrope Materialien übertragen.

Dr. Claudio Findeisen, Dr. Achim Neubrand

## CHARAKTERISIERUNG UND MODELLIERUNG VON KLEBVERBINDUNGEN

Polyurethan-(PU-)Klebstoffe zeichnen sich durch ihre besonders hohe elastische Verformbarkeit aus. Sie werden daher dort eingesetzt, wo größere Verformungen zwischen Fügepartnern auftreten und trotzdem eine Kraftübertragung dauerhaft erhalten bleiben muss, wie bei der Verklebung von Windschutzscheiben. Das Tragverhalten von PU-Klebverbindungen unterscheidet sich deutlich von dem der im Automobilbereich etablierten, steifen und festen Strukturklebungen. Für eine optimale Ausnutzung der Tragkräfte in der Fahrzeugauslegung werden geeignete kalibrierte Simulationsmodelle benötigt.

In der Fahrzeugsimulation werden für Klebverbindungen häufig effiziente Kohäsivzonen-Modelle verwendet. Zur Charakterisierung analysieren wir experimentelle Daten aus Scherzug-, Kreuzzug- und Schälzug-Verbindungsversuchen mit Blechfügeteilen und bewerten das Versagensverhalten. Die Parameter der eingesetzten Materialmodelle können nur teilweise direkt aus den Versuchen abgeleitet werden. Die genaue Kalibrierung aller Modellparameter erfolgt durch den Abgleich von Experiment und Simulation (Abbildung 1).

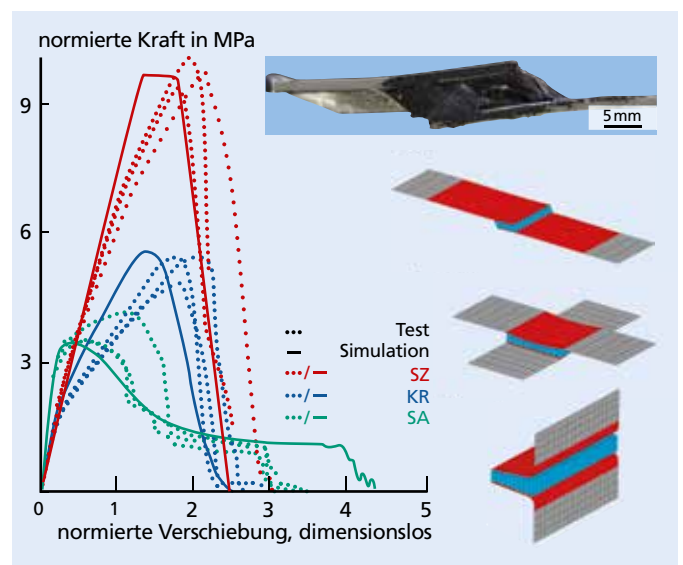
### Crash-Simulation und Langzeitverhalten

Bei PU-Klebverbindungen ist oft die Festigkeit unter höherer Belastungsgeschwindigkeit größer. Für die Charakterisierung des crashrelevanten Verbindungsverhaltens setzen wir spezielle kompaktere Probestypen ein, da die Masse die Messergebnisse stark beeinflusst. Bei der Auswahl und Kalibrierung der Simulationsmodelle berücksichtigen wir alle dehnratenabhängigen Effekte, die das Crashverhalten beeinflussen. Das Langzeitverhalten von Klebverbindungen analysieren wir in Kriechprüfständen und unter schwingender Beanspruchung, gegebenenfalls unter dem Einfluss der Umgebungstemperatur und Feuchtigkeit.

### Detailanalysen von Klebverbindungen

Zur Untersuchung des Einflusses von Poren auf das Tragverhalten von PU-Klebverbindungen haben wir Detailmodelle aus CT-Daten erstellt und die Beanspruchung nachsimuliert. Aufgrund des hohen elastischen Deformationsvermögens des PU-Klebstoffs wirken sich nur relativ große Poren auf das globale Tragverhalten einer Probe aus.

Dr. Monika Gall, Dr. Silke Sommer



1 Normierte Kraft-Verschiebungskurven von PU-Klebverbindungen unter Scherzug- (SZ), Kreuzzug- (KR) und Schälzugbelastung (SA) (links), SZ-Probe unter Belastung (Mitte), Simulationsmodelle (rechts).



## LEBENSDAUERBEWERTUNG VON BAUTEILEN MIT FERTIGUNGSBEDINGTEN FEHLERN

Rotorscheiben von Gasturbinen werden durch Gieß- und Schmiedeprozesse hergestellt, sodass fertigungsbedingte Fehler unvermeidlich sind. Ultraschallprüfungen ermöglichen quantitative Aussagen über die Fehlerlage und -größe. Als Maß der Fehlergröße gilt der Kreisscheibenreflektor (KSR), aus dem ein äquivalenter, das Defektfeld einhüllender Anfangsriß abgeleitet wird (Abbildung 1 oben). Mit zyklischen Rissfortschrittsberechnungen kann anschließend die Restlebensdauer des Bauteils ermittelt werden, wobei die Phase der Nukleation von Mikrorissen an einzelnen Defekten und deren Zusammenwachsen vernachlässigt werden. Durch die Berücksichtigung der Rissnukleationsphase werden jedoch eine verbesserte Lebensdauerprognose und eine wirtschaftlichere Auslegung für Bauteile mit Defekten angestrebt.

### Ermüdungsversuche an Proben mit Defekten

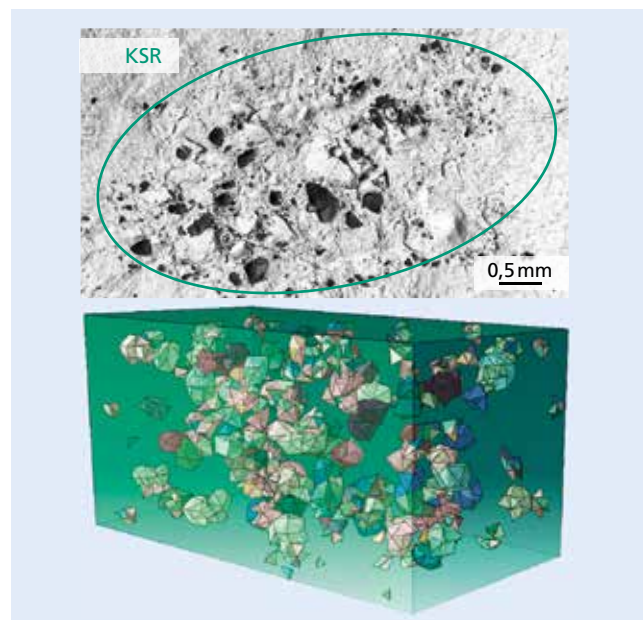
Aus Rotorscheiben mit großen Fehleranzeigen werden Proben mit Defekten entnommen und zyklisch bis zum Bruch geprüft. Die Auswertung der Probenbruchflächen liefert statistische Verteilungen der Defektgröße und -position, die als Input in die Simulation einfließen. Über Beachmarks auf der Probenbruchfläche kann der Anteil der Nukleation an der Gesamtlebensdauer ermittelt werden. Dieser beträgt je nach Defektyp und -größe sowie der Beanspruchung 30 bis 80 Prozent der Gesamtlebensdauer. Das zeigt großes Potenzial hinsichtlich der Verbesserung von Bauteilauslegungsmethoden.

### Schädigungssimulationen zur Bewertung der Rissnukleation an Defekten

Die Lebensdauerbewertung von Rotorscheiben mit fertigungsbedingten Fehlern erfolgt, indem ein statistisch repräsentatives Defektfeld in einem Werkstoffvolumen

modelliert wird (Abbildung 1 unten). Hierbei werden zum einen die statistischen Auswertungen der Defektverteilungen im Werkstoff und zum anderen die lokale Beanspruchung in verschiedenen Bauteilbereichen berücksichtigt. In Verbindung mit einem Materialmodell, das sowohl die Wechselplastifizierung als auch die Schädigungsentwicklung beschreibt, wird die Phase des Zusammenwachsens von an einzelnen Defekten entstehenden Mikrorissen zu einem Makroriss beschrieben.

Ali Aydin, Dr. Igor Varfolomeev



1 Probenbruchfläche mit einem Defektfeld nach einem Ermüdungsversuch (oben); entsprechendes FE-Simulationsmodell mit einem stochastisch verteilten und statistisch repräsentativen Defektfeld (unten).

## WERKSTOFFBEWERTUNG UND LEBENSDAUERKONZEPTE

### GESCHÄFTSFELDLLEITER

Dr. Christoph Schweizer

Telefon +49 761 5142-382

[christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de](mailto:christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de)

### GRUPPEN



#### MIKROSTRUKTUR UND EIGENSPANNUNGEN

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

*Dr. Johannes Preußner | [johannes.preussner@iwm.fraunhofer.de](mailto:johannes.preussner@iwm.fraunhofer.de)*



#### LEBENSDAUERKONZEPTE UND THERMOMECHANIK

Durch physikalisch basierte Werkstoff- und Lebensdauermodelle für die thermomechanische Ermüdungsbelastung ermöglichen wir eine verlässliche Bewertung des Einsatzverhaltens von Bauteilen, sodass unsere Kunden Entwicklungskosten und -zeit sparen können.

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



## UNSERE HIGHLIGHTS 2019

Um den Einfluss der Umgebung auf die Ermüdungseigenschaften metallischer Hochtemperaturwerkstoffe nachweisen beziehungsweise ausschließen zu können, führen wir Versuche im Vakuum und unter Schutzgasatmosphäre durch. Die Vakuumkammer wurde im vergangenen Jahr erstmalig für größere Testkampagnen erfolgreich eingesetzt und ist für die nächsten Jahre unter anderem für Schwellenwertmessungen an IN718 im Rahmen des AiF-Vorhabens »Hochtemperatur Schwellenwert« eingeplant.

Im Rahmen des AiF-Vorhabens »Simulation Schädigungsverhalten« wurden unsere bruchmechanisch basierten Kurzrissmodelle für kombinierte thermomechanische und hochzyklische Beanspruchungen weiterentwickelt und hinsichtlich der Besonderheiten von Aluminiumgusswerkstoffen erweitert.

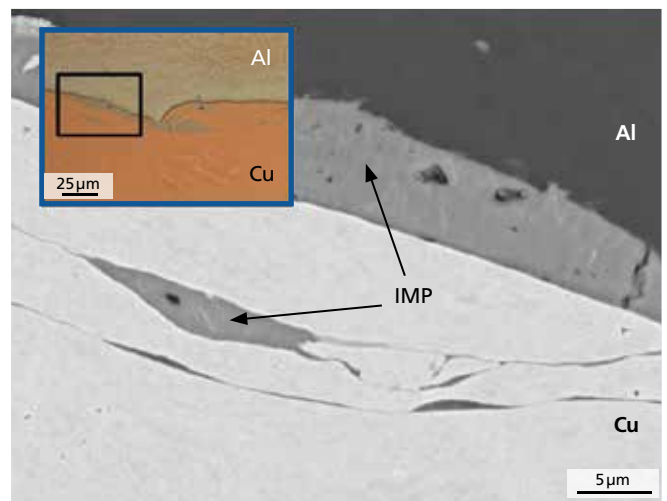
Im April 2019 wurde unser neues Hochdruckwasserstofflabor im Rahmen des Fachworkshops »Die Wirkungen von Wasserstoff auf Werkstoffe beherrschen« eröffnet. Mit dem Hochdruckautoklaven besitzen wir einen einzigartigen Prüfstand, der mechanische Werkstoffuntersuchungen bis zum maximalen Druck von 1 000 bar unter Wasserstoffatmosphäre erlaubt. Solche Versuche sind für Werkstoffuntersuchungen für die zukünftige Wasserstoffwirtschaft in Deutschland unabdingbar.

## MIKROSTRUKTURUNTERSUCHUNGEN MAGNETIMPULSGESCHWEISSTER CU-AL-MISCHVERBINDUNGEN

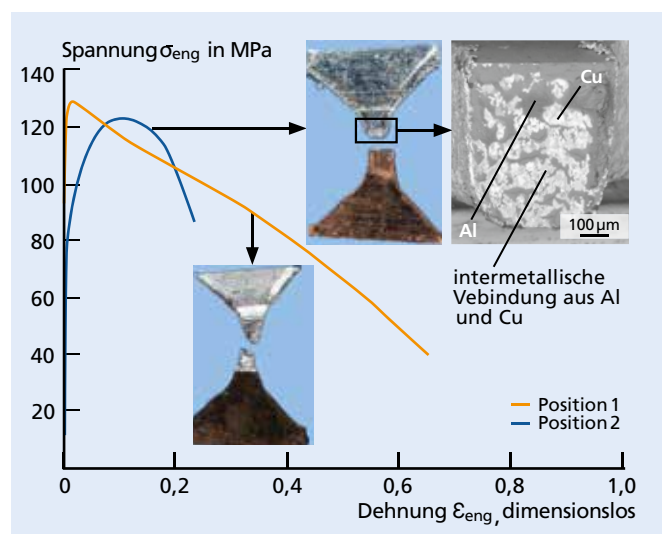
Kupfer ist aufgrund guter elektrischer Leitfähigkeit und guter Verformbarkeit das Standardmaterial für elektrische Leitungen, jedoch teurer und schwerer als Aluminium. Daher werden beide Stoffe parallel eingesetzt und müssen an entsprechenden Stellen technisch anspruchsvoll stoffschlüssig und leitfähig gefügt werden. Die damit verbundenen Fragestellungen sind insbesondere für die Elektromobilität ein wesentliches Thema.

### Magnetimpulsschweißen (MPW) von Al und Cu

Die spontane Ausbildung einer Oxidschicht auf Aluminium, die sich zwischen Aluminium und Kupfer bildenden intermetallischen Phasen und unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten erschweren thermische Fügeprozesse. Aus diesem Grund werden mechanische Fügeverfahren oder das Ultraschallschweißen eingesetzt. Ein weiteres Verfahren ist das Magnetimpulsschweißen, bei dem durch einen kurzen und hohen Stromimpuls durch eine Spule ein Flyer-Material auf eine hohe Geschwindigkeit (~ 400 m/s) beschleunigt wird und auf ein Target-Material trifft. Nach dem ersten Kontakt unter einem gewissen Kontaktwinkel deformieren die Fügepartner abhängig von der gewählten Werkstoffkombination global durch den Puls und lokal in der Kontaktzone durch die dort vorliegenden hohen Drücke. Bei optimalen Bedingungen kommt es zu einem stoffschlüssigen Verbund zwischen Flyer und Target, wobei auch prinzipiell als nicht schweißbar geltende Werkstoffkombinationen gefügt werden können. Der Fügevorgang wird als »Fügen in der kalten Phase« eingeordnet. In einem Projekt wurde durch das Fraunhofer IWU mittels Magnetimpulsschweißen ein Aluminium-Flyer (EN AW1050) mit einem Kupfer-Target (Cu-DHP) jeweils mit einer Dicke von 2 mm auf einer Breite von 100 mm gefügt und die Verbindung am Fraunhofer IWM mit verschiedenen experimentellen



1 Darstellung der Fügezone im Bereich sichtbarer intermetallischer Phasen (IMP) – das Material ist teilweise ineinander gefaltet.



2 Spannungs-Dehnungs-Kurven von Mikrozugproben entnommen aus unterschiedlichen Stellen der Fügezone: Position 1 befindet sich nahe erstem Kontaktpunkt der Fügung.

### 3 Mit hohen Aufprallgeschwindigkeiten gefügte Verbindung aus Aluminium (oben) mit Kupfer (unten).

und numerischen Methoden analysiert und bewertet. Dabei ist die Identifikation der lokalen Bindungsbereiche und die Analyse der Mikrostruktur ein wichtiger Aspekt.

#### Struktur der Fügung und lokale Festigkeit

Nach dem Fügeprozess können im Bereich der Fügezone Verwirbelungen auftreten, die ähnlich beim Explosivplattieren vorzufinden sind. Während des Magnetimpulsschweißens bilden sich sowohl ebene als auch wellige Fügezonen aus. Wird Kupfer mit Aluminium gefügt, so kann sich in thermischen Prozessen ein breiter Saum intermetallischer Phasen ausbilden. Dies ist ungünstig, da entlang dieses Saums schnell Risse wachsen und die Verbindung schädigen beziehungsweise trennen können. Bei den hier vorliegenden Fügepartnern wird die ungünstige Kombination unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften schnell deutlich: Im Vergleich zu den weichen Grundwerkstoffen mit Härtewerten von etwa 40 HV1 (Aluminium) beziehungsweise 100 HV1 (Kupfer) können die intermetallischen Phasen Härtewerte bis über 1000 HV aufweisen (Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>). Nach dem Hochgeschwindigkeitsfügen sind in den Fügezonen intermetallische Phasensäume zu erkennen, die hier allerdings nur abschnittsweise auftreten und maximal eine Dicke von etwa 10 µm aufweisen (Abbildung 1). Bei den Verbindungen wurden lokal Mikrohärtewerte bis über 600 HV gemessen.

Anhand einer Vielzahl von aus der Fügezone entnommenen Mikroproben mit einer Gesamtlänge von 3,5 mm und einem Prüfquerschnitt von rund 0,8 x 0,5 mm<sup>2</sup> wurde die Festigkeit der Verbindung auch bei unterschiedlichen Prozessparametern an unterschiedlichen Entnahmestellen lokal untersucht. Die gemessenen technischen Spannungs-Dehnungs-Kurven zweier ausgewählter Proben sind in Abbildung 2 dargestellt. Zum Vergleich: Die einzelnen Grundwerkstoffe weisen eine Dehn-

grenze ( $R_{p0,2}$ ) von 180 MPa (Cu-DHP) beziehungsweise 110 MPa (Al-Legierung) auf. Die maximal erreichbare Zugspannung der hier ausgewählten Positionen in der Fügung unterscheidet sich nur geringfügig, jedoch ist die Bruchdehnung der Probe von Position 1 (nahe erstem Kontaktpunkt beider Bleche) deutlich erhöht. Hier versagt die Verbindung im Aluminium. Die Probe von Position 2 (weiter vom ersten Kontaktpunkt beider Bleche entfernt) weist eine niedrigere Bruchdehnung auf. Eine fraktographische Analyse zeigt, dass diese Probe in der Fügezone gebrochen ist. An noch weiter entfernten Stellen zum ersten Kontaktpunkt des Flyers auf dem Target ist schließlich keine Festigkeit, das heißt keine Verbindung mehr vorhanden. Bei geringerer Prozessenergie wird eine reduzierte Verbindungsfläche beobachtet, wobei die jeweiligen Fügezonen vergleichbare lokale Eigenschaften zeigen. Gleiche Fügezonen zeigen lediglich etwas geringere Maximalspannungen in Mikrozugversuchen, die an mit geringerer Prozessenergie gefügten Proben durchgeführt wurden.

#### Prozessdynamik simulieren

Im Projekt wird neben der Untersuchung der Fügezone über die Mikrozugproben auch eine makroskopische Modellierung der dynamischen Verformungsvorgänge durchgeführt. Diese Modellierung basiert auf einer detaillierten Charakterisierung der Fügepartner. Eine mikroskopische, partikelbasierte Prozessmodellierung macht Einflüsse der Fügeparameter auf das Prozessergebnis verständlich. Desweiteren werden hochauflösende mikroskopische Analysen angewendet, um die Fügezone eingehend zu charakterisieren und Bindemechanismen zu verstehen.

Dr. Johannes Preußner, Frank Huberth



## LEBENSDAUERVORHERSAGE DÜNNWANDIGER GEKÜHLTER HOCH-TEMPERATURKOMPONENTEN VERBESSERT

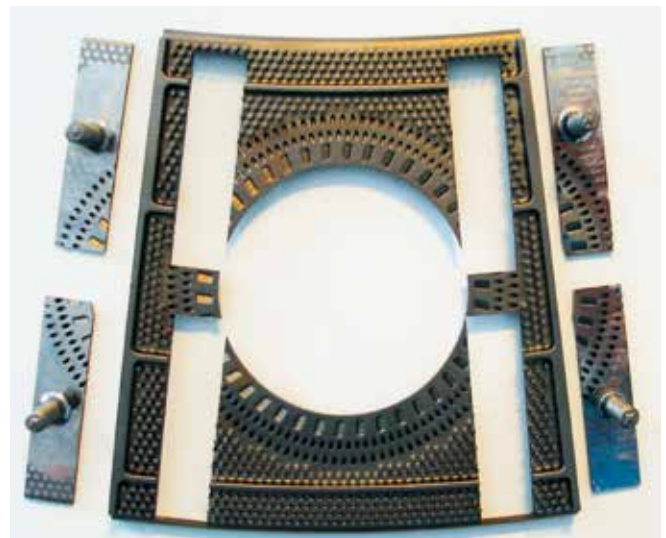
Um hohe Wirkungsgrade sowie eine Reduzierung der Emissionen in Flug- und stationären Gasturbinen zu erreichen, spielen effektive Kühlstrategien eine immer wichtigere Rolle. Flugtriebwerkshersteller wie Rolls-Royce Deutschland (RRD) reduzieren durch eine optimierte Prall-Effusionskühlung die Oberflächentemperatur der heißgasbeaufschlagten Wandschindeln in der Brennkammer und realisieren dabei eine strömungsoptimierte Konfiguration der Luftbeimischung. Durch die Möglichkeiten der additiven Fertigung lassen sich darüber hinaus komplexe Schindel- und Effusionslochgeometrien realisieren und damit die Kühleffektivität weiter steigern. Gleichzeitig lassen sich die Bauteile in einem einzigen Fertigungsschritt kostenoptimiert herstellen.

### Gekühlte Bauteile unterliegen thermomechanischer Ermüdungsbeanspruchung

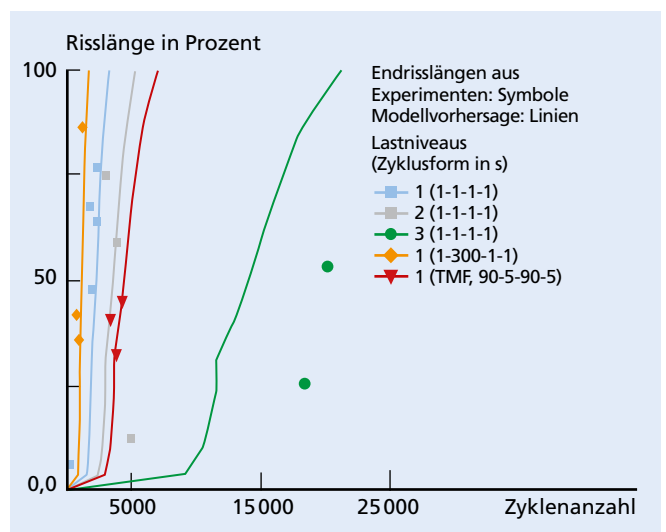
Die durch den Flugzyklus bedingten häufigen An- und Abfahrvorgänge der Triebwerke führen zu einer thermomechanischen Ermüdungsbeanspruchung (engl. thermomechanical fatigue, TMF) der Wandschindeln. Die höchstbelasteten Stellen treten in Bereichen der Schindelanbindung auf, da dort hohe Zwangsbedingungen die Freiheitsgrade einschränken. Auch andere, mit Effusionslöchern versehene Bereiche unterliegen einer zyklischen Belastung, und es ist zu klären, inwiefern Effusionslöcher die Lebensdauer der Bauteile beeinflussen.

### Prüfstand zur Aufbringung bauteilnaher Belastungen

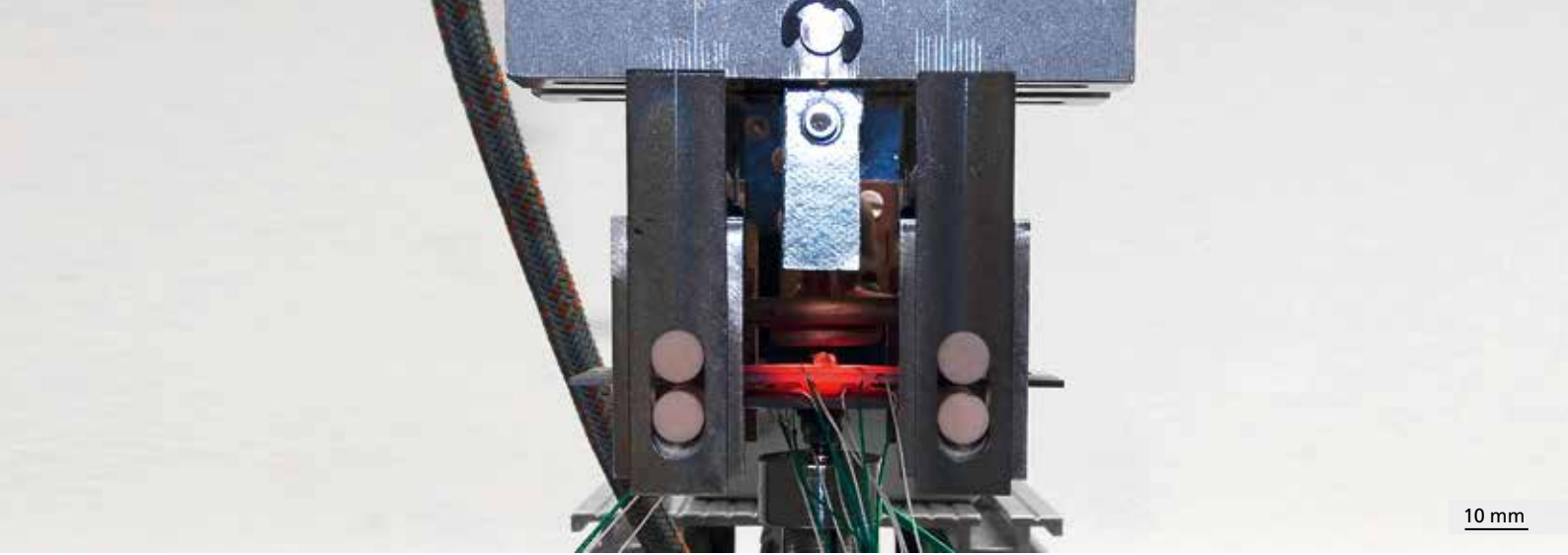
Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanzierten Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo) wurden gemeinsam mit RRD Einflüsse auf die Ermüdungslebensdauer von Brennkammerschindeln untersucht. Innerhalb des Vorhabens wurde hierfür ein 3-Punkt-



1 Vier Proben (rechts und links), aus einem Brennkammerhitzeschild entnommen (Mitte).



2 Für verschiedene Versuchsbedingungen vorhergesagte Rissverläufe (Linien) und die im Prüfstandsversuch erreichten Endrisslängen.



10 mm

### 3 Zentraler Bereich des 3-Punkt-Biegeprüfstands mit eingebauter Probe im Hochtemperaturversuch.

Biegeprüfstand entwickelt, der es erlaubt, Proben unter kontrollierten bauteilnahen mechanischen und thermischen Randbedingungen zu testen (Abbildung 3). Die Proben können dabei entweder direkt aus den Bauteilen entnommen (Abbildung 1) oder durch additive Fertigung hergestellt werden, sodass die Geometrie im Bereich der Anbindung und die Werkstoffmikrostruktur dem realen Bauteil entsprechen.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Analyse der Schädigungsentwicklung unter thermomechanischer Ermüdung in lebensdauerkritischen Bereichen wie Effusionslochrändern und Radiusübergängen an der Bolzenanbindung sowie auf der Bestimmung des Klemmkraftverlusts der Bolzenanbindung. Der Prüfstand ist in eine Universalprüfmaschine integriert, sodass sich Kräfte und Verschiebungen sowie das Risswachstum messtechnisch erfassen lassen. Insbesondere das verbesserte Verständnis über das Rissverhalten an Bereichen wie Effusionslochrändern ist ein wichtiger Bestandteil der Messergebnisse. Die Versuche wurden mit drei unterschiedlich hohen Verschiebungsamplituden (Lastniveau 1 bis 3) bei erhöhter, zeitlich konstanter Temperatur durchgeführt. Dabei wurde eine trapezförmige Zyklusform mit einer Rampenzeit für Be- und Entlasten sowie einer Haltezeit bei minimaler und maximaler Last von jeweils 1 s gewählt (1-1-1-1-Zyklus).

Als weitere Variation wurde eine erhöhte Haltezeit von 300 s bei maximaler Last gewählt (1-300-1-1-Zyklus), um zeitabhängige Einflüsse zu untersuchen. Darüber hinaus wurden Versuche mit wechselnder Temperatur innerhalb eines Zyklus durchgeführt (TMF mit Zyklusform 90-5-90-5), um die Bauteilbelastung noch besser im Versuch abzubilden. Abbildung 2 zeigt anhand der Symbole die in den Versuchen erreichte normierte Endrisslänge über der erreichten Zyklenzahl für die verschiedenen Versuchsparameter.

### Verbessertes Lebensdauermodell

Die zahlreichen Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen konnten für die Weiterentwicklung eines existierenden Lebensdauermodells genutzt werden. Hierfür wurden bruchmechanische numerische Studien zum Rissverhalten an den experimentell beobachteten Anrissstellen durchgeführt. Die Risse laufen typischerweise durch Bereiche hoher Spannungsgradienten. Das Ziel war, durch validierte viskoplastische Verformungsmodelle die auftretenden Spannungen und Dehnungen gut mittels der Finite-Elemente-Methode abzubilden und für die Vorhersage des Rissfortschritts den Spannungsverlauf entlang definierter Risspfade zu berücksichtigen. Durch das Nachrechnen der oben genannten Prüfstandsversuche konnte das Modell erfolgreich validiert werden. Die in Abbildung 2 dargestellten Linien stellen den vorhergesagten Rissverlauf dar und decken sich gut mit den experimentellen Ergebnissen. Die weiterentwickelte Methode konnte schließlich zur Vorhersage komplexer Bauteile angewandt werden.

Inzwischen konnten sich die bauteilnahen Biegeversuche als wichtige und sinnvolle Ergänzung zu einachsigen Versuchen etablieren, da sie bauteilspezifische Besonderheiten besser berücksichtigen. Es lassen sich beispielsweise durch Variation der Bauteilgeometrie, der Werkstoffauswahl und der Mikrostruktur frühzeitig im Entwicklungsprozess und unter realitätsnahen Bedingungen die Auswirkungen derartiger Veränderungen auf das Lebensdauerverhalten bewerten. Ein weiterer Vorteil ergibt sich daraus, dass sich solche Versuche wesentlich effizienter als zum Beispiel in zeit- und kostenintensiven Komponententests durchführen lassen.

Dr. Michael Schlesinger, Dr. Christoph Schweizer

# KERNKOMPETENZ

## WERKSTOFF- UND BAUTEILCHARAKTERISIERUNG

Frank Huberth | Telefon +49 761 5142-472 | frank.huberth@iw.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 einsetzungsgerechter 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 Analyse-möglichkeiten**

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

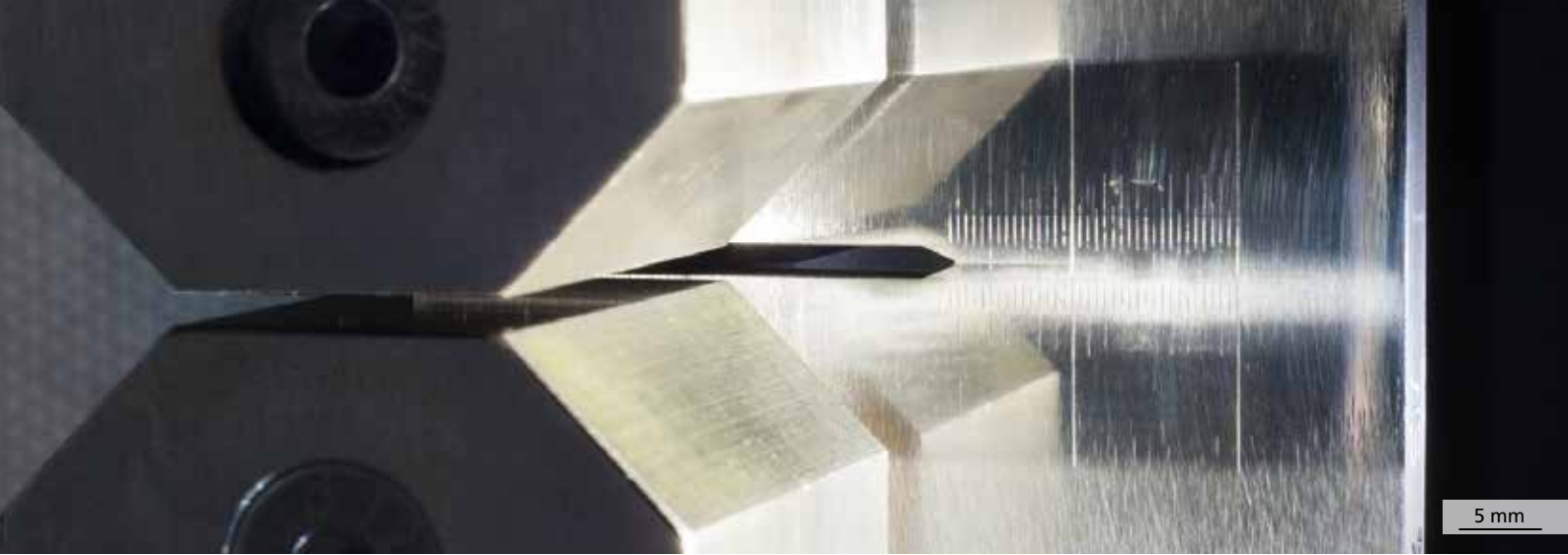
#### **Statische, zyklische und dynamisch schlagartige Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung**

- 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



Rissfortschritts-Versuch an einer C(T)-Probe (rechts) in einer Resonanzprüfmaschine.

#### 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.

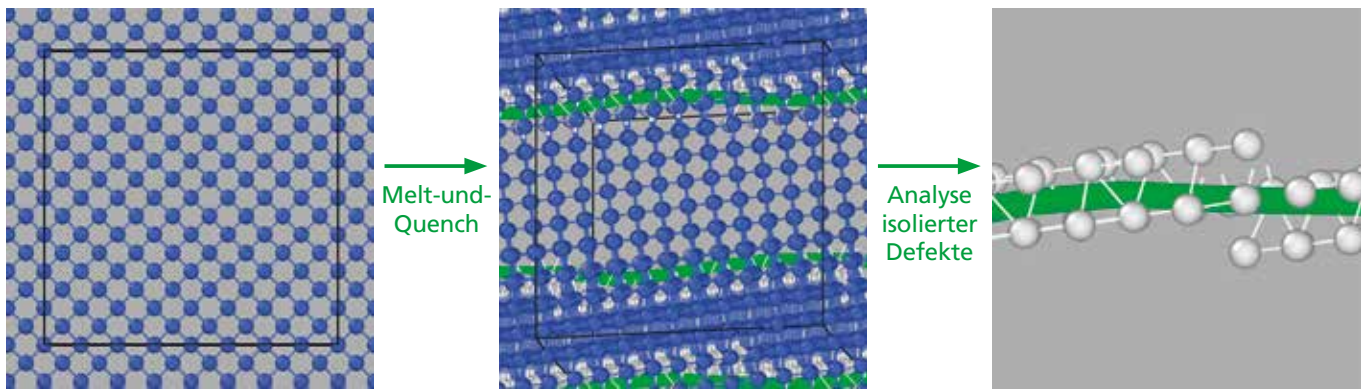
Das Kompetenzspektrum des Fraunhofer IWM reicht von der Quantenmechanik, Molekulardynamik bis zu Computational Physics, von Homogenisierungsmethoden bis zu Kontinuumsmodellen. Im Rahmen der Kontinuumsmechanik, der Materialtheorie, der Bruchmechanik und der Thermodynamik beschreiben wir das Verhalten 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 Bauteilherstellungsprozesses 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





*Analysekette zur Simulation polykristalliner bzw. amorpher Materialien: Von uns entwickelte Kraftfeldmethoden (multiskale Modellierung) erlauben das Generieren realistischer Strukturmodelle mittels Melt-und-Quench-Verfahren. Defekte können dann isoliert und genau analysiert werden.*

## 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@iwm.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 Schichthaftung 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, ortsaufgelöst, 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



*Mit dem neu entwickelten In situ-Tribometer lassen sich direkt im Betrieb Verschleiß und Reibwerte von Gleitlagern messen.*

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, Notlauf-eigenschaften, 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 Mikrobau-teilen, 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 VERBÜNDEN, ALLIANZEN UND ZENTREN DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

## **Fraunhofer-Verbund MATERIALS**

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS bündelt seit 20 Jahren die Kompetenzen der materialwissenschaftlich orientierten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft. Er ist einer von acht Fraunhofer-Forschungsverbänden, in denen sich fachlich verwandte Institute organisieren. Seit Oktober 2019 ist Prof. Dr. Peter Gumbsch Verbundvorsitzender.

Fraunhofer-Materialwissenschaft und Werkstofftechnik umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über die Fertigungsverfahren im quasiindustriellen Maßstab, die Charakterisierung der Eigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens. Entsprechendes gilt für die aus den Materialien hergestellten Bauteile und deren Verhalten in Systemen. In all diesen Feldern werden neben den experimentellen Untersuchungen in Labors und Technika gleichrangig die Verfahren der numerischen Simulation und Modellierung eingesetzt, dies über alle Skalen vom Molekül bis zum Bauteil 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.

Mit Schwerpunkt setzt der Verbund sein Know-how in den Geschäftsfeldern Energie & Umwelt, Mobilität, Gesundheit, Maschinen- & Anlagenbau, Bauen & Wohnen, Mikrosystemtechnik und Sicherheit ein. Über maßgeschneiderte Werkstoff- und Bauteilentwicklungen sowie die Bewertung des kundenspezifischen Einsatzverhaltens werden Systeminnovationen realisiert. Mit strategischen Vorschauen unterstützt der Verbund die Entwicklung von Materialien und Technologien für die Zukunft.

*Prof. Dr. Peter Gumbsch*

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

## **Allianz AdvanCer**

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

*Dr. Andreas Kailer*

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

## **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)

## **Allianz Generative Fertigung**

Generative Fertigungstechniken sind konventionelle Techniken bei der Herstellung maßgeschneiderter, komplexer Bauteile und Kleinserien in Flexibilität, Arbeits- und Materialaufwand überlegen. Die Allianz widmet sich der Entwicklung, Anwendung und Umsetzung generativer Fertigungsverfahren und Prozesse.

*Dr. Raimund Jaeger*

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

## **Allianz Leichtbau**

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

*Dr. Michael Luke*

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



*Institutsleiter Prof. Dr. Peter Gumbsch (Mitte) im Gespräch mit Mitarbeitenden des Fraunhofer IWM.*

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

Die Fraunhofer-Allianz bearbeitet institutsübergreifende Aufgaben zur Entwicklung und Verbesserung von Simulationsverfahren. Sie bündelt zudem Kompetenzen aus dem IuK-Bereich, das Werkstoff- und Bauteil-Know-how sowie Wissen aus der Oberflächen- und Produktionstechnik.

*Dr. Claas Bierwisch*

[www.nusim.fraunhofer.de](http://www.nusim.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 CLUSTER OF EXCELLENCE PROGRAMMIERBARE MATERIALIEN CPM

## Koordination

Prof. Dr. Chris Eberl | Telefon +49 761 5142-495 | [chris.eberl@iwm.fraunhofer.de](mailto:chris.eberl@iwm.fraunhofer.de)

## Geschäftsstelle

Wiebke Beckmann | Telefon +49 761 5142-293 | [geschaeftsstelle@cpm.fraunhofer.de](mailto:geschaeftsstelle@cpm.fraunhofer.de)

Programmierbare Materialien sind Materialien, deren Struktur so aufgebaut ist, dass sich ihre Eigenschaften gezielt kontrollieren und reversibel ändern lassen. Sie können damit technische Systeme aus vielen Bauteilen und Werkstoffen durch ein einzelnes, lokal konfiguriertes Material ersetzen – ein Paradigmenwechsel im Umgang mit Werkstoffen. Zudem gestatten sie zukünftig gänzlich neue Funktionen, beispielsweise modulare, anwendungsbezogene Funktionalitäten in Materialien.

Das Exzellenzcluster entwickelt Programmierbare Materialien exemplarisch in sechs Themenschwerpunkten, die sich auf Transporteigenschaften, mechanische Materialeigenschaften, Produktentwicklung und Fertigung fokussieren. Das Forschungsfeld »Programmierbare Materialien« ist ein strategisches Thema der Fraunhofer-Gesellschaft.

### Die Rolle des Fraunhofer IWM im Exzellenzcluster

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«.

Im Themenfokus »Programmierbare Formänderung und Mechanik« wird die Entwicklung programmierbarer Materialien auf der Basis mechanischer Elementarzellen erforscht: die Suche nach funktionalen Elementarstrukturen, Beherrschung ihrer Programmierung sowie Optimierung der Produktionsprozesse der Elementarzellen. Die innere Struktur der Materialien muss so auf der Mesoskala vorausberechnet und hergestellt werden, dass das programmierte Material ein anwendungsspezifisches Verhalten aufweist, beispielsweise ein variables E-Modul oder eine gezielte lokale Gestaltänderung (shape morphing).

Im Themenfokus »Programmierbare Reibung« werden die Möglichkeiten, Reibung durch externe Trigger zu steuern,

erforscht. Dadurch soll sich beispielsweise während des Betriebs einer Kupplung autonom ein für den aktuellen Betriebszustand optimaler Reibwert einstellen. Die Vision ist, Reibsysteme so zu programmieren dass sie über die gesamten Anwendungsparameter immer im optimalen tribologischen Zustand betrieben werden und so Effizienz und Lebensdauer der Anwendung signifikant erhöhen.

### Ein »virtuelles Institut« mit schnellen Prozessen

Ein Exzellenzcluster zielt nicht nur auf die temporäre Durchführung eines einzelnen Projekts, sondern verfolgt vielmehr eine Roadmap zur langfristigen Entwicklung eines komplexen Technologietrends für zunächst fünf Jahre. Es verteilt sich über mehrere Standorte und wirkt dabei wie ein »virtuelles Institut« mit schnellen Innovations- und Anpassungsprozessen in Akquise, Forschung, Entwicklung, Produktion und Organisation.

Um Programmierbare Materialien zu konzipieren und produzieren, führt das Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM im Kern die Kompetenzen der Fraunhofer-Institute IWM, IAP, IWU, ICT und IBP zusammen. Das Ziel ist die Programmierung von Materialien zur gezielten Veränderung oder Anpassung, beispielsweise in seiner Form, oder in seinen mechanischen oder thermischen Eigenschaften. Zudem soll eine wissenschaftliche Gemeinschaft entwickelt werden: über gemeinsame Veröffentlichungen, interne Vernetzung sowie über eine öffentliche Konferenzserie, deren Auftakt in Berlin mit der ProgMatCon2020 vom 27. bis 29. April 2020 stattfindet (siehe Seite 9).

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

# ANHANG

**Preise und Ehrungen**

Werkstoffmechanikpreis 2019 des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik an Dr. Daniel Mutter für »Atomistische Simulationen zur Bestimmung von Struktur-Eigenschaftsbeziehungen in keramischen Feststoffelektrolyten für Li-Ionenbatterien«  
6.6.2019, Freiburg

**Dissertationen**

Sarah Becker\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Mikrostrukturentwicklung unter reversierender Reibbelastung bei variierender elastischer und plastischer Dehnung

Clemens Bojnicic-Kninski\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Entwicklung von optischen Systemen für die kombinatorische Materialablagerung und die großflächige Detektion im Rahmen von Hochdurchsatzverfahren

Ebru Chihan  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Structure evolution in tribological interfaces studied by multilayer model alloys

Bashir Fakih  
Technische Universität Ilmenau  
Tribologisch und elektrisch induzierte Effekte im Kommutator-Bürste-Kontakt im permanent erregten Gleichstrommotor

Adrien Gola\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Deformation of metallic multilayers: an atomistic study of the relationship between structure and deformation mechanisms

Jörg Lienhard  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Auswirkung von Dehnrate und lokaler Temperaturentwicklung auf das Crashverhalten langfaserverstärkter Thermoplaste

Christian Lutz\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Bio-inspired dry adhesives from carbon nanofibers and their potential use in space technology

Tobias Maiwald-Immer\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Physikalisch basierte mehrskalige Simulation der additiv gefertigten Nickel-Legierung Inconel 718

Michael Schober  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
On the characterization and modeling of interfaces in fiber reinforced polymer structures

Paul Schreiber\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Die tribologischen Eigenschaften Silicium-basierter Keramiken in Isooctan unter Berücksichtigung der Umgebungsatmosphäre

Fabian Seifried\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Entwicklung metallischer PVD-Schichten für NiTi-Substrate mit großer Verformbarkeit

Markus Sudmanns\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Entwicklung einer Kontinuumsbeschreibung für die Vernetzungsmobilität in Vernetzungsnetzwerken

Johannes Tlatlik  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Untersuchung und Modellierung von sprödem Versagen und lokalem Rissarrest bei ferritischen Stählen unter dynamischer Beanspruchung

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

Enes Aydin  
Hochschule Offenburg  
Validierung des Synergiepotentials von organischen Reibverminderern und Z-DTP/AF-DTP in Motorölen (B)

Felix Berndorfer\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Materialklassifizierung anhand von Oberflächenverschiebungsdaten (B)

Jana Böhm  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Machine learning techniques for property-structure-process correlations in materials science (M)

Robert Böhm  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Material modeling and multiaxial fatigue assessment of round-bar samples for a constructional steel (M)

Aaron Boll\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Datenanalyse von Reibexperimenten (B)

Kuo-I Chang  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
An adaptive surrogate modeling approach to cup drawing using Gaussian process regression (M)

Kerstin Dittmann  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Ermittlung der Festigkeit und Zähigkeit des Faser-Matrix-Interfaces von Verbundwerkstoffen (M)

Adrien Duval  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tribologie biokompatibler Schmierstoffe auf polymeren Oberflächen (M)

Johannes Ebert  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Experimentelle Analyse und Lebensdauerbewertung von Rissinitiierung in hochverfestigten Randschichten nach dem Hochfrequenzhämmern (B)

Fabien Ebling\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Investigation of nonconventional composite laminates and their tensile strength for notched and un-notched specimens (M)

Hao Fan\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Modelling and simulation of an interpenetrating metal/ceramic composite (M)

Bastian Fesser  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Konstruktion eines Prüfaufbaus zur Untersuchung von hochtemperaturbeaufschlagten Abgas Komponenten (M)

Jonas Franke\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Lasergestützte Oberflächenmodifizierung der Titanlegierung Ti-6Al-4V für tribologische Anwendungen (B)

Felix Gleich\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Modellierung und Analyse von Versetzungsnetzwerken mithilfe der Graphentheorie (M)

Saskia Göhrig\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Auswirkungen auf den Verschleiß – Potenziale der Oberflächenbearbeitung (M)

Elisabeth Günther\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tribologische Eigenschaften von verbundgestrahltem Aluminium (M)

Christian Hammer  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Blechfunktionalisierung – Lokale Einstellung der Reibung beim Umformen durch tribologische Funktionalisierung mit druckbaren Schmierstoffen (B)

Yaqi Hao  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Ansätze zur Beeinflussung der Reibung von funktionalisierten Oberflächen mittels Licht (M)

Yu Hao  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Simulation of hydrogen diffusion in metallic materials (M)

Emilia Hashamova  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tribological investigation of a new »Kumadai«-LPSO-Magnesium alloy (B)

Leonie Hillen\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Untersuchungen zum Einfluss der Wellenlänge auf die additive Fertigung von Kupfer mittels LPBF (M)

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

Marius Hirsch Hochschule Konstanz Konstruktion eines Ventilprüfstands zur Prüfung von Pkw-Ventilen unter realitätsnahen Prüfbedingungen (B)	Marcus Krause Hochschule Offenburg Ermittlung und Analyse der dynamischen Bruchzähigkeit eines Reaktordruckbehälterstahls und Abschätzung bruchmechanischer Kennwerte aus dem Kerbschlagbiegeversuch (B)	Balaji Ragupathi Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Analysis of local mechanical strength of magnetic pulse welding joints of dissimilar metals (M)	<b>Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftler</b>  Matthias Baldofski Freudenberg New Technologies SE Co. KG 1.1.-31.12.2019
Hannes Holey Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Implementation of the non-proportional hardening term in the chaboche plasticity model for multiaxial cyclic loading (M)	Katharina Krupp* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Das tribologische Verhalten von Ti6Al4V unter Einfluss verschiedener Hublängen und Reihenfolgen (B)	Fabian Schmidt Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Gewichtsoptimierung eines mittels selektivem Laserschmelzen hergestellten paralympischen Sitzschlittens aus AlSi10Mg (M)	Shahenda Fouad German University of Cairo, New Cairo City, Ägypten 1.3.-31.7.2019
Philipp Holler Hochschule Furtwangen Schnelle Fügeprozesse für Glas-Glas Module (M)	Daren Liu* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) The influence of inclusions on dislocation behavior under cyclic loading (M)	Luisa Schorn* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Lasergestützte Oberflächenmodifizierung von GJL-250 für tribologische Anwendungen (B)	Decai Kong CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinquangdao, China 25.11.-23.12.2019
Karthikenyam Jayagopi Hochschule Offenburg Aufbau und Automatisierung einer Heißpräganlage zur experimentellen Untersuchung der Einbringung von lokalen Strukturen auf Glasoberflächen (B)	Nicola Magino* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Data driven analysis and homogenization of dislocation networks (M)	Malte Schütte Universität Duisburg-Essen Tribologische Untersuchungen an Aluminium / Stahl-Gleitpaarungen (M)	Yuling Lang CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinquangdao, China 25.11.-23.12.2019
Hauke León Jiménez Reichow Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Untersuchung verschiedener Einflussgrößen auf das Synergiepotenzial eines organischen Reibverminderers und Dithiophosphat in Motorölen (B)	Philipp Mayer* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Einfluss von Prüfstand und Probenpräparation auf das Verhalten lasertexturierter Oberflächen geschmierter Gleitkontakte (M)	Sebastian Senst Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Realisierung der Kopplung von Quatzkristallmikrowaage und Rasterkraftmikroskop zur qualitativen und quantitativen in situ-Messung von Adsorptionsphänomenen eines Reibverminderers aus Öl (M)	Chuang Liu Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China 1.1.-24.10.2019
Indre Jödicke* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Charakterisierung des nichtlokal – lokal Übergangs in einem versetzungsbasierten Kontinuumsmodell der Kristallplastizität (M)	Marcel Morisak Hochschule Furtwangen University HFU Entwicklung eines Konzeptes zu Forschungsmaschinen (B)	Susanne Sutschet* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Stick-Slip-Effekt im reversierenden tribologischen Kontakt von hochreinem Kupfer und Saphir (B)	Aya Matsushita Kumamoto University, Kumamoto, Japan 21.8.-17.9.2019
Stephan Kaiser Hochschule Offenburg Strukturintegrierter Seitenaufprallschutz für ein Niedrigenergiefahrzeug in ein Multimaterialtürkonzept in Leichtbauweise (B)	Dirk Obergfell* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dampfdruckabtragschneiden als Ergänzung zum Stanzen von dünnen Blechen (M)	Jonas Wagner* Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Vakuumtribologie an gasphasen-abgeschiedenen Additivschichten – Vacuum tribology with gas phase deposited lubricant additives (B)	Haibo Qiao CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinquangdao, China 25.11.-23.12.2019
Johannes Kohl Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Numerische Prozessanalyse des Hochgeschwindigkeitsschneidens von Stangenmaterial sowie dessen Einflusses auf den Folgeumformprozess (M)	Patrick Petre Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Einfluss des Randzonengefüges auf das Reibungs- und Verschleißverhalten eines Gleitlagers (B)	Johanna Waltenspiel Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Calculation of mechanical properties of metal-metal interfaces at the atomic scale (B)	Dr. Daniele Savio Freudenberg New Technologies SE Co. KG 1.9.-31.12.2019
	Daniel Pfalzgraf Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Theoretische Untersuchung der Diffusion von Lithiumionen in einem Festkörperelektrolyt-Material auf atomarer Skala (B)	Mohamed Yassine Hochschule Offenburg Schritte zur Digitalisierung einer produktionsähnlichen Glasformgebungsmaschine (B)	Dr. Paul Schwarz Freudenberg New Technologies SE Co. KG 17.10.-31.12.2019
			Dr. Jiri Svoboda Academy of Sciences of the Czech Republic, Brno, Tschechische Republik 29.7.-9.8.2019
			Yaping Tan Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China 1.10.-31.12.2019
			Dr. Koichi Tanaka Denso Corporation, Kariya, Japan 1.1.-31.12.2019
			Dr. Bin Zhao School of Mechanical Engineering, Shangdong, China 1.1.-31.12.2019

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

**Vorlesungen WS 2018/2019**

**Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg**

Theory and modelling of materials: Electronic structure of condensed matter I  
Prof. Dr. Christian Elsässer

Continuum Mechanics II  
Dr. Dirk Helm

Computational materials engineering  
Prof. Dr. Michael Moseler

**Duale Hochschule  
Baden-Württemberg DHBW  
Karlsruhe**

FEM – Simulation  
Frank Huberth

**Hochschule Offenburg**

Konstruktionselemente  
Dr. Raimund Jaeger

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

**Vorlesungen SS 2019**

**Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg**

Mechanische Eigenschaften  
Prof. Dr. Chris Eberl

Theory and modelling of materials: Electronic structure of condensed matter II  
Prof. Dr. Christian Elsässer

Continuum Mechanics I  
Dr. Dirk Helm

Computational physics: Density functional theory  
Dr. Leonhard Mayrhofer  
Prof. Dr. Michael Moseler

Quantum Transport  
Dr. Michael Walter

**Hochschule Offenburg**

Werkstofftechnik I  
Dr. Ken Wackermann

Schadenskunde  
Rolf Zeller

**Karlsruher Institut für  
Technologie (KIT)**

Angewandte Werkstoffsimulation  
Dr. Claas Bierwisch;  
Prof. Dr. Peter Gumbsch;  
Dr. Dirk Helm; Dr. Silke Sommer;  
et al.

Nanotechnologie für Ingenieure und Naturwissenschaftler  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel; et al.

Nanotribologie und -mechanik  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Physik für Ingenieure  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel;  
Prof. Dr. Peter Gumbsch; et al.

Praktikum Tribologie  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel; et al.

Mechanik heterogener Festkörper  
Dr. Ingo Schmidt

**Universität Siegen**

Composites II – Werkstoffverbunde  
Dr. Jörg Hohe

**Von Fraunhofer IWM  
organisierte Fachveranstaltungen**

Laboreröffnung und Fachworkshop Wasserstoff  
10.-11.4.2019, Freiburg

Workshop MaterialDigital 2019  
14.-15.5.2019, Freiburg

Snowstorm Konferenz  
15.5.2019, Karlsruhe

**Öffentlichkeitswirksame  
Veranstaltungen**

Girls' Day 2019  
28.4.2019, Freiburg

Fraunhofer-Fest  
28.9.2019, Freiburg

**Messen mit Fraunhofer IWM-  
Beteiligung**

KIT-Karrieremesse  
14.-15.5.2019, Karlsruhe

**Erteilte Patente 2019**

Eckmann, S.; Fingerhuth, J.; Mohrmann, R.  
Vorrichtung und Verfahren zur mechanischen oder thermomechanischen und überlagerten thermischen Belastung metallischer Prüfkörper  
DE 10 2015 211 557 B

Fromm, A.; Wendt, G.; Jänchen, R.  
Verfahren und Vorrichtung zur Detektion von Störungen und Inhomogenitäten bei thermischen Füge- und Formprozessen  
EP 3 168 032 A1; 3168032

Schiebel, F.; Eberl, Ch.; Berwind, M.; Gumbsch, P.  
Mikromechanische Komponente und Verfahren zu ihrer Herstellung  
CN 106604809 B

Gremmlspacher, M.; Gumbsch, P.; Kübler, R.; 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  
EP 3 448 821 A1



Abdul Hamid, Z.M.; Florea, M.; Fliegner, S.; Schober, M.; Hohe, J.; Rühle, J.

**Chemical modification of fiber-matrix interfaces of glass fiber reinforced thermoplastics and methods for interface characterization**

Advanced Engineering Materials 21/6 (2019) 1800590 1-11

Alvares, E.D.M.; Preußner, J.

**Assessment of diffusional mobilities in bcc Cu-Sn and bcc Cu-Zn alloys**

AIMS Materials Science 6/6 (2019) 1153-1163

Berwind, M.F.; Kamas, A.; Eberl, C.

**A hierarchical programmable mechanical metamaterial unit cell showing metastable shape memory**

Advanced Engineering Materials 20/11 (2018) 1800771 1-6

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

**Real-time GPU-based digital image correlation sensor for marker-free strain-controlled fatigue testing**

Applied Sciences 9/10 (2019) Artikel-Nr. 2025, 15 Seiten

Brügner, O.; Walter, M.

**Temperature and loading rate dependent rupture forces from universal paths in mechanochemistry**

Physical Review Materials 2/11 (2018) 113603 1-6

Burk, L.; Walter, M.; Asmacher, A.C.; Gliem, M.; Moseler, M.; Mühlhaupt, R.

**Mechanochemically aminated multilayer graphene for carbon/polypropylene graft polymers and nanocomposites**

eXPRESS Polymer Letters 13/3 (2019) 286-301

Chellali, M.R.; Nandam, S.H.; Li, S.; Fawey, M.H.; Moreno-Pineda, E.; Velasco, L.; Boll, T.; Pastewka, L.; Kruk, R.; Gumbsch, P.; Hahn, H.

**Amorphous nickel nanophases inducing ferromagnetism in equiatomic Ni-Ti alloy**

Acta Materialia 161 (2018) 47-53

Chen, W.; Amann, T.; Kailer, A.; Rühle, J.

**Thin-film lubrication in the water/octyl  $\beta$ -D-glucopyranoside system: Macroscopic and nanoscopic tribological behavior**

Langmuir 35/22 (2019) 7136-7145

Chen, X.; Schneider, R.; Gumbsch, P.; Greiner, C.

**Microstructure evolution and deformation mechanisms during high rate and cryogenic sliding of copper**

Acta Materialia 161 (2018) 138-149

Cihan, E.; Strömer, H.; Leiste, H.; Stüber, M.; Diewiebel, M.

**Low friction of metallic multilayers by formation of a shear-induced alloy**

Scientific Reports 9 (2019) Artikel-Nr. 9480, 10 Seiten

Diehl, M.; Kertsch, L.; Traka, K.; Helm, D.; Raabe, D.

**Site-specific quasi in situ investigation of primary static recrystallization in a low carbon steel**

Materials Science and Engineering: A 755 (2019) 295-306

Ernould, C.; Schubnell, J.; Farajian, M.; Maciolek, A.; Simunek, D.; Leitner, M.; Stoschka, M.

**Application of different simulation approaches to numerically optimize high-frequency mechanical impact (HFMI) post-treatment process**

Welding in the World 63/3 (2019) 725-738

Fernandez-Corbaton, I.; Rockstuhl, C.; Ziemke, P.; Gumbsch, P.; Albiez, A.; Schwaiger, R.; Frenzel, T.; Kadic, M.; Wegener, M.

**New twists of 3D chiral metamaterials**

Advanced Materials 31/26 (2019) 1806705 1-7

Fiedler, J.; Parsons, D.F.; Burger, F.; Thiyam, P.; Walter, M.; Brevik, I.; Persson, C.; Buhmann, S.; Boström, M.

**Impact of effective polarisability models on the near field interaction of dissolved greenhouse gases at ice and air interfaces**

Physical Chemistry Chemical Physics PCCP 21/38 (2019) 21296-21304

Fiedler, J.; Spallek, F.; Thiyam, P.; Persson, C.; Boström, M.; Walter, M.; Buhmann, S.Y.

**Dispersion forces in inhomogeneous planarly layered media: A one-dimensional model for effective polarizabilities**

Physical Review A 99/6 (2019) 062512 1-10

Gammer, C.; Richard, M.-I.; Eberl, C.

**Measurement of local strain**

MRS Bulletin 44/6 Advances in in situ nanomechanical (2019) 459-464

Ghassemizadeh, R.; Moore, B.; Momose, T.; Walter, M.

**Stability and ir spectroscopy of zwitterionic form of  $\beta$ -alanine in water clusters**

The Journal of Physical Chemistry B 123/20 (2019) 4392-4399

Greiner, C.; Gagel, J.; Gumbsch, P.

**Solids under extreme shear: Friction-mediated subsurface structural transformations**

Advanced Materials 31/26 (2019) 1806705 1-19

Guk, S.; Augenstein, E.; Zapara, M.; Kawalla, R.; Prah, U.

**Auswirkung des GKZ-Glühens auf die Verschärfung bzw. Reduzierung unterschiedlich ausgeprägter Perlitzeiligkeit im gewalzten Draht-HTM**

Journal of Heat Treatment and Materials 74/3 (2019) 202-211

Guk, S.; Augenstein, E.; Zapara, M.; Kawalla, R.; Prah, U.

**Effect of spheroidization annealing on pearlite banding**

Materials Science Forum 949 (2019) 40-47

Held, A.; Moseler, M.

**Ab initio thermodynamics study of ambient gases reacting with amorphous carbon**

Physical Review B 99/5 (2019) 054207 1-16

Jana, R.; Savio, D.; Deringer, V.L.; Pastewka, L.

**Structural and elastic properties of amorphous carbon from simulated quenching at low rates**

Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering MSMSE 27/8 (2019) 085009 1-14

Javaheri, E.; Hemmesi, K.; Tempel, P.; Farajian, M.

**Fatigue assessment of the welded joints containing process relevant imperfections**

Welding in the World 63/2 (2019) 249-261

Koplin, C.; Abdel-Wahed, S.; Jaeger, J.; Scherge, M.

**The transition from static to dynamic boundary friction of a lubricated spreading and a non-spreading adhesive contact by macroscopic oscillatory tribometry**

Lubricants 7/1 (2019) Artikel-Nr. 6, 14 Seiten

Krugel, G.; Körner, W.; Urban, D.F.; Gutfleisch, O.; Elsässer, C.

**High-throughput screening of rare-earth-lean intermetallic 1-13-X compounds for good hard-magnetic properties**

Metals 9/10 (2019) 1096 1-13

Kürten, D.; Khader, I.; Raga, R.; Casajús, P.; Winzer, N.; Spallek, R.; Scherge, M.

**Hydrogen assisted rolling contact fatigue due to lubricant degradation and formation of white etching areas**

Engineering Failure Analysis 99 (2019) 330-342

- Kurz, J.; Amann, T.; Kailer, A.  
**Tribological investigations of silicon nitride lubricated by ionic liquid aqueous solutions**  
 Tribology Transactions 62/2 (2019) 295-303
- Kurz, N.; Ding, A.; Urban, F.D.; Lu, Y.; Kirste, L.; Feil, N.M.; Žukauskaitė, A.; Ambacher, O.  
**Experimental determination of the electroacoustic properties of thin film AlScN using surface acoustic wave resonators**  
 Journal of Applied Physics 126/7 (2019) 075106 1-10
- Kuwahara, T.; Romero, P.A.; Makowski, S.; Weihnacht, V.; Moras, G.; Moseler, M.  
**Mechano-chemical decomposition of organic friction modifiers with multiple reactive centres induces superlubricity of ta-C**  
 Nature Communications 10 (2019) Artikel-Nr. 151, 11 Seiten
- Lebedev, V.; Yoshikawa, T.; Giese, C.; Kirste, L.; Zukauskaite, A.; Graff, A.; Meyer, F.; Burmeister, F.; Ambacher, O.  
**Formation of icosahedron twins during initial stages of heteroepitaxial diamond nucleation and growth**  
 Journal of Applied Physics 125/7 (2019) 075305 1-10
- Lechermann, F.; Körner, W.; Urban, D.F.; Elsässer, C.  
**Interplay of charge-transfer and Mott-Hubbard physics approached by an efficient combination of self-interaction correction and dynamical mean-field theory**  
 Physical Review B 100/11 (2019) 115125 1-9
- Lechthaler, B.; Ochs, G.; Mücklich, F.; Dienwiebel, M.  
**Evolution of the true contact area of laser textured tungsten under dry sliding conditions**  
 Frontiers in Mechanical Engineering 5 (2019) Artikel-Nr. 3, 6 Seiten
- Li, S.; Pastewka, L.; Gumbsch, P.  
**Glass formation by severe plastic deformation of crystalline Cu|Zr nano-layers**  
 Acta Materialia 165 (2019) 577-586
- Lienhard, J.; Huberth, F.  
**Strain rate dependent thermo-mechanical aspects of glass fiber reinforced thermoplastic based on experimental data**  
 International Journal of Impact Engineering 131 (2019) 57-65
- Möller, J.J.; Bitzek, E.; Janisch, R.; Ul Hassan, H.; Hartmaier, A.  
**Fracture ab initio: A force-based scaling law for atomistically informed continuum models**  
 Journal of Materials Research 33/22 (2018) 3750-3761
- Morand, L.; Helm, D.  
**A mixture of experts approach to handle ambiguities in parameter identification problems in material modeling**  
 Computational Materials Science 167 (2019) 85-91
- Mutter, D.; Urban, D.F.; Elsässer, C.  
**Computational analysis of compositionstructure-property-relationships in NZP-type materials for Li-ion batteries**  
 Journal of Applied Physics 125/21 (2019) 215115 1-10
- Romero, P.; Mayrhofer, L.; Stoyanov, P.; Merz, R.; Kopnarski, M.; Dienwiebel, M.; Moseler, M.  
**Atomistic insights into lubricated tungsten/diamond sliding contacts**  
 Frontiers in Mechanical Engineering 5 (2019) Artikel-Nr. 6, 11 Seiten
- Schmitt, S.; Stricker, M.; Gumbsch, P.; Schulz, K.  
**A mechanism-based homogenization of a dislocation source model for bending**  
 Acta Materialia 164 (2019) 663-672
- Schubnell, J.; Discher, D.; Farajian, M.  
**Determination of the static, dynamic and cyclic properties of the heat affected zone for different steel grades**  
 Materials Testing 61/7 (2019) 635-642
- Shahrivar, K.; Morillas, J.R.; Luengo, Y.; Gavilan, H.; Morales, P.; Bierwisch, C.; De Vicente, J.  
**Rheological behavior of magnetic colloids in the borderline between ferrofluids and magnetorheological fluids**  
 Journal of Rheology 63/4 (2019) 547-558
- Shi, Y.; Neubrand, A.; Koch, D.  
**Characterization of hardness and stiffness of ceramic matrix composites through instrumented indentation test**  
 Advanced Engineering Materials 21/5 (2019) 1800806 1-8
- Stauch, C.; Ballweg, T.; Haas, K.; Jaeger, R.; Stiller, S.; Shmeliov, A.; Nicolosi, V.; Malebennur, S.; Woetzel, J.; Beiner, M.; Luxenhofer, R.; Mandel, K.  
**Silanization of silica nanoparticles and their processing as nano-structured micro-raspberry powders – a route to control the mechanical properties of isoprene rubber composites**  
 Polymer Composites 40/S1 (2018) E732-E743
- Stauffert, O.; Izadnia, S.; Stienkemeier, F.; Walter, M.  
**Optical signatures of pentacene in soft rare-gas environments**  
 The Journal of Chemical Physics 150/24 (2019) 244703 1-9
- Svoboda, J.; Riedel, H.  
**Modeling of spontaneous transformation of nitrides to Z phase accounting for stress relaxation by diffusion and interface activity**  
 Computational Materials Science 161 (2019) 24-34
- Walter, M.; Vogel, M.; Zamudio-Bayer, V.; Lindbad, R.; Teichenbach, T.; Hirsch, K.; Langenberg, A.; Rittmann, J.; Kulesza, A.; Mitric, R.; Moseler, M.; Möller, T.; von Issendorff, B.; Lau, J.T.  
**Experimental and theoretical 2p core-level spectra of size-selected gas-phase aluminum and silicon cluster cations: Chemical shifts, geometric structure, and coordination-dependent screening**  
 Physical Chemistry Chemical Physics PCCP 21/12 (2019) 6651-6661
- Wang, X.; Mayrhofer, L.; Höfer, M.; Estrade, S.; Lopez-Conesa, L.; Zhou, H.; Lin, Y.; Peiró, F.; Fan, Z.; Shen, H.; Schäfer, L.; Moseler, M.; Bräuer, G.; Waag, A.  
**Facile and efficient atomic hydrogenation enabled black TiO2 with enhanced photo-electrochemical activity via a favorably low-energy-barrier pathway**  
 Advanced Energy Materials 9/33 (2019) 1900725 1-14
- Weber, B.; Suhina, T.; Junge, T.; Pastewka, L.; Brouwer, A.M.; Bonn, D.  
**Molecular probes reveal deviations from Amontons' law in multi-asperity frictional contacts**  
 Nature Communications 9/1 (2019) Artikel-Nr. 888, 7 Seiten
- Yoshikawa, T.; Herrling, D.; Meyer, F.; Burmeister, F.; Nebel, C.E.; Ambacher, O.; Lebedev, V.  
**Influence of substrate holder configurations on bias enhanced nucleation area for diamond heteroepitaxy: Toward wafer-scale single-crystalline diamond synthesis**  
 Journal of Vacuum Science & Technology B 37/2 (2019) 021207 1-8
- Zhou, Y.; Moseler, M.; Müser, H.  
**Solution of boundary-element problems using the fast-inertial-relaxation-engine method**  
 Physical Review B 99/14 (2019) 144103 1-8

VERÖFFENTLICHTE KONFERENZBEITRÄGE

Amann, C.; Kadau, K.; Gumbsch, P.  
**On the transferability of probabilistic fracture mechanics results for scaled 50 Hz and 60 Hz heavy duty gas turbine rotor disks**  
ASME Turbo EXPO2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition 2018, Vol. 7A: Structures and Dynamics; ASME, New York, NY, USA (2018) Paper No. GT2018-75561, V07AT32A001 1-8

Amann, T.; Chen, W.; Baur, M.; Kailer, A.; Rühle, J.  
**Entwicklung von galvanisch gekoppelten Gleitlagern mit niedrigen Reibungs- und Verschleißwerten – Verwendung von komplexen Fluiden als Schmierstoff und als Additiv in Wasser zur tribologischen Optimierung**  
VDI-Berichte 2348, 3. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen 2019, Gestaltung - Berechnung - Einsatz; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2019) 33-44

Aydin, A.; Varfolomeev, I.; Amann, C.  
**Modellierungsansatz für die Bewertung der Rissinitiierung an Schmiededefekten**  
in Tagungsband 51. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit 2019; Vormwald, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2019) 177-186

Baumgartner, J.; Schnabel, K.; Huberth, F.  
**Fatigue assessment of EMPT-welded joints using the reference radius concept**  
Procedia Engineering 213; Lefebvre, F.; Souquet, P. (Eds.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande (2018) 418-425

Bierwisch, C.  
**Numerical simulations of melt pool dynamics in powder-bed additive manufacturing processes**  
in Proc. of International Congress on Particle Technology – PARTEC 2019; Heinrich, S. (Hrsg.); VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf (2019) 4 Seiten

Devaney, R.J.; Oesterlin, H.; O'Donoghue, P.E.; Leen, S.B.  
**Cyclic plasticity and low cycle fatigue damage characterisation of thermally simulated X100Q heat affected zone**  
MATEC Web of Conferences Vol.165, 12th International Fatigue Congress FATIGUE 2018; Henaff, G. (Ed.); EDP Sciences, Les Ulis, France (2018) Artikel-Nr. 03002, 8 Seiten

Dietemann, B.; Kraft, T.; Bierwisch, C.  
**A scheme for rigid bodies within highly viscous liquids**  
SPHERIC 2019: Proceedings of the 14th SPHERIC International Workshop 2019; Loren-Aguilar, P.; Bate, M.R.; Rasull, H.; Ali, A.; Wurster, J. (Eds.); University of Exeter, Exeter, UK (2019) 17-23

Fischer, C.; Mittag, S.; Kuhlen, K.; Schweizer, C.; Seifert, T.; Dittrich, R.; Kollmeier, H.-P.  
**Simulation Schädigungsverhalten**  
Heft R587, FVV-Informationstagung Motoren Frühjahrstagung 2019, Abschluss- und Zwischenberichte der Forschungsstellen Motoren; Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. FVV, Frankfurt (2019) 35 Seiten

Garcia Trelles, E.; Schweizer, C.; Eckmann, S.  
**Towards a temperature dependant and probabilistic lifetime concept for molecular ductile cast iron materials undergoing isothermal and thermomechanical fatigue loading**  
MATEC Web of Conferences Vol.165, 12th International Fatigue Congress FATIGUE 2018; EDP Sciences (Ed.); Curran Associates, Inc., New York, USA (2018) Artikel-Nr. 19006, 8 Seiten

Gatti, F.; Amann, T.; Kailer, A.; Rabenecker, P.; Baltes, N.; Rühle, J.  
**Makroskopische Reibwertsteuerung durch elektrochemische Potentiale mit ionischen Flüssigkeiten**  
Reibung, Schmierung und Verschleiß: Forschung und praktische Anwendungen: 59. Tribologie-Fachtagung, Band 2, Schmierstoffe & Schmierungstechnik; Gesellschaft für Tribologie e. V. GfT, Aachen (2018) 68/1-68/4

Goldbeck, G.; Ghedini, E.; Hashibon, A.; Schmitz, G.J.; Friis, J.  
**A reference language and ontology for materials modelling and interoperability**  
in Proc. of NAFEMS World Congress NWC 2019; NAFEMS Ltd, Hamilton, UK (2019) NWC\_19\_86, 13 Seiten

Hauber, M.; Lienhard, J.; Klitschke, S.; Pan, Y.; Huberth, F.  
**Dynamische Be- und Entlastungsuntersuchungen zum Dehnungs- und Dehnrateneinfluss auf das Schädigungsverhalten von Werkstoffen**  
in Tagungsband Werkstoffprüfung 2018 – Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand. Prüftechnik – Kennwertermittlung – Schadensvermeidung; Moninger, G. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2018) 267-272

Heese, R.; Walczak, M.; Morand, L.; Helm, D.; Bortz, M.  
**The good, the bad and the ugly: Augmenting a black-box model with expert knowledge**  
Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2019: Workshop and Special Sessions, Lecture Notes in Computer Science Vol. 11731; Tetko, I.V.; Kůrková, V.; Karpov, P.; Theis, F. (Eds.); Springer Nature, Cham (2019) 391-395

Huberth, F.; Lienhard, J.; Klitschke, S.; Bimi, P.; Ragupathi, B.; Stadtmüller, P.  
**Rateneffekte und Skaleneffekte bei der Werkstoffprüfung auf der Mikroskala**  
in Tagungsband Werkstoffprüfung 2018 - Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand. Prüftechnik - Kennwertermittlung - Schadensvermeidung; Moninger, G. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2018) 261-266

Huberth, F.; Lienhard, J.; Ragupathi, B.; Hauber, M.  
**Dynamic micro-testing over a large range of strain rates for homogeneous and heterogeneous local material characterization**  
WIT Transactions on Engineering Sciences, Volume 124; Materials Characterisation 2019, 9th International Conference on Computational Methods and Experiments in Materials and Contact Characterisation 2019; Hernández, S.; Northwood, D.O.; De Hosson, J.; Vilar, R. (Eds.); WIT Press, Southampton, UK (2019) 143-150

Huberth, F.; Sun, D.-Z.; Klitschke, S.; Trondl, A.; Lienhard, J.; Hauber, M.; Discher, D.; Sommer, S.  
**Werkstoffcharakterisierung – Rateneffekte, Skaleneffekte, Schädigung, Instabilität und adiabatische Erwärmung**  
in Tagungsband 15. Deutsches LS-DYNA Forum 2018; DYNAMore GmbH, Stuttgart (2018) 170-178

Janarthanam, H.; Sommer, S.; Carl, E.-R.; Preußner, J.; Huberth, F.  
**Numerical prediction of damage in punching process using shear modified Gurson model**  
in Proc. of 4th ESTAD European Steel Technology and Application Days; Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2019) 11 Seiten

Keßler, B.; Brenner, B.; Dittrich, D.; Standfuß, J.; Beyer, E.; Leyens, C.; Maier, G.  
**Laser multi-pass narrow-gap welding – a promising technology for joining thick-walled components of future power plants**  
MATEC Web of Conferences Vol. 269, International Conference on Advanced Welding and Smart Fabrication Technologies IIW 2018; EDP Sciences (Ed.); Curran Associates, Inc., New York, USA (2019) Artikel-Nr. 02011, 7 Seiten

Keßler, B.; Dittrich, D.; Standfuß, J.; Brenner, B.; Leyens, C.; Maier, G.  
**Laser-multi-pass narrow-gap welding – an innovative joining technology**  
in Proc. of 45th MPA-Seminar – Fit for Future – Advanced Manufacturing Technologies, Materials and Lifetime; MPA Universität Stuttgart; Stuttgart (2019) 198-213

Klitschke, S.; Trondl, A.; Huberth, F.  
**Influence of strain rate on deformation and failure behavior of sheet metals under shear loading**  
in Proc. of 12th European LS-DYNA Conference 2019; DYNAMore GmbH, Stuttgart (2019) Artikel-Nr. 128, 10 Seiten

Kürten, D.; Kailer, A.; Khader, I.  
**Hydrogen assisted rolling contact fatigue**  
VDI-Berichte 2348, 13. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen 2019, Gestaltung - Berechnung - Einsatz; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2019) 273-286

Lienhard, J.; Huberth, F.  
**Strain rate dependent in-situ micro damage analysis**  
in Proc. of 10th International Symposium on Impact Engineering - ISE 2019; Major, Z.; Klement, E.P.; Miron, M.-C.; Miron, V.M. (Eds.); TRAUNER Verlag + Buchservice GmbH, Linz, Österreich (2019) 223-224

Mohrmann, R.; Oesterlin, H.  
**Residual lifetime estimation by scatter band analysis of an E911 pipe bend of an USC power plant**  
in Proc. of 45th MPA-Seminar 2019 - Fit for Future – Advanced Manufacturing Technologies, Materials and Lifetime; MPA Universität Stuttgart, Stuttgart (2019) 56-66

Mohseni Mofidi, S.; Bierwisch, C.  
**SPH simulations of magnetorheological abrasive flow machining at a microscopic scale**  
in Proc. of International Congress on Particle Technology - PARTEC 2019; Heinrich, S. (Hrsg.); VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf (2019) 4 Seiten

Rochel, P.; Sommer, S.; Günther, M.; Herfert, D.; Meschut, G.; Giese, P.  
**Daten- und prognosebasierte Generierung von Modellparametern für die Crashsimulation mechanisch gefügter Verbindungen**  
in Tagungsband 15. Deutsches LS-DYNA Forum 2018; DYNAMore GmbH, Stuttgart (2018) 12 Seiten

Scherge, M.; Winkler, H.-J.; Böttcher, R.; Dienwiebel, M.  
**Tribologie motorischer Spritzschichten unter dem Einfluss regenerativer Kraftstoffe – Tribology of motorized spray coatings under the influence of renewable fuel**  
VDI-Berichte 2317; 9. VDI-Fachtagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel 2018: Der Kurbelbetrieb im Spannungsfeld unterschiedlicher Anforderungen; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2018) 7-16

Schmiedel, C.; Bierwisch, C.; Uhlmann, E.; Menzel, P.; Mohseni-Mofidi, S.; Breinlinger, T.; Nutto, C.  
**Verbundprojekt SmartStream: Intelligente Bearbeitung durch die Verwendung schaltbarer Fluide**  
Sensitive Fertigungstechnik – Tagungsband der 4. Fachtagung 2017; KombiFin Technologie, Kombinierte Finishtechnologien für die Produkte von Morgen; Goldau, H.; Stolze, R. (Hrsg.); Shaker, Aachen (2019) 123-132

Tlatlik, J.; Siegele, D.  
**Investigation and modeling of local crack arrest in ferritic-bainitic steels under dynamic loading**  
Procedia Structural Integrity 13; Sedmak, A.; Radaković, Z.; Rakin, M. (Eds.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande (2018) 243-248

Varfolomeev, I.; Maier, G.; Moroz, S.; Oesterlin, H.; Keßler, B.; Dittrich, D.  
**Einfluss von Eigenspannungen und fertigungsbedingten Defekten auf die Lebensdauer dickwandiger, lasergeschweißter Röhre aus Alloy 617occ**  
in Tagungsband 51. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit 2019; Vormwald, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2019) 263-272

## BÜCHER, BUCHBEITRÄGE

Buck, M.; Straub, T.; Eberl, C.  
**Experimental investigation of damage detection and crack initiation up to the very high cycle fatigue regime**  
Fatigue of materials at very high numbers of loading cycles; Christ, H.-J. (Ed.); Springer Spektrum, Wiesbaden (2018) 365-393

Dienwiebel, M.; Stoyanov, P.  
**In situ digital holography for 3D topography analysis of tribological experiments**  
Advanced Analytical Methods in Tribology. Microtechnology and MEMS; Dienwiebel, M.; De Barros Bouchet, M.-I. (Eds.); Springer Nature Switzerland AG, Cham, Schweiz (2018) 289-305

Rist, T.; Gremmelspacher, M.; Baab, A.  
**Feasibility of bent glasses with small bending radii**  
Engineered Transparency 2018; Glass in Architecture and Structural Engineering; Schneider, J.; Weller, B. (Hrsg.); Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (2018) 235-241

Zerbst, U.; Madia, M.; Schork, B.; Hensel, J.; Kucharczyk, P.; Ngoula, D.; Tchuindjang, D.; Bernhard, J.; Beckmann, C.  
**Fatigue and fracture of weldments – The IBESS approach for the determination of the fatigue life and strength of weldments by fracture mechanics analysis XXIV**  
Springer International Publishing, Cham, Schweiz (2019) 157 Seiten

## ZEITSCHRIFTEN

Fromm, A.; Burmeister, F.; Jänchen, R.; Kiese, R.  
**Dünnschichtbasierte Inline-Qualitätskontrolle für Verpackungsprozesse**  
Konstruktion 3 (2019) IW4-6

Gatti, F.; Amann, T.; Kailer, A.; Abicht, J.; Rabenecker, P.; Baltes, N.; Rühle, J.  
**Makroskopische Reibwertsteuerung durch elektrochemische Potentiale mit ionischen Flüssigkeiten**  
Tribologie und Schmierungstechnik 66/4-5 (2019) 59-65

Kertsch, L.; Helm, D.  
**Neue Wege in der Simulation von Warmumformung und Wärmebehandlung aushärtbarer Kupferlegierungen**  
Metall 72/11 (2018) 447-449

Kürten, D.; Khader, I.; Kailer, A.  
**Wasserstofffreisetzung im Wälzkontakt**  
Tribologie und Schmierungstechnik 66/4-5 (2019) 44-50

Schackert, S.; Schweizer, C.; Vormwald, M.; Bosch, A.  
**Lebensdauerbewertung geschweißter Rohrleitungen aus dem austenitischen Stahl 1.4550 mithilfe von Kurzrischwachstumsmodellen**  
Schweißen und Schneiden 17/5 (2019) 286-292

Urban, D.  
**High-temperature operation of the components and constructions made from newly developed chromium steels**  
Chernye Metally 7 (2018) 67-68

Wackermann, K.  
**Das neue Wasserstofflabor am Fraunhofer IWM – Die Wirkung von Wasserstoff auf Werkstoffe beherrschen**  
HZwei 18/3 (2019) 42-43

Wackermann, K.; Schweizer, F.; Pfeiffer, W.  
**Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe: Adsorption, Diffusion und Werkstoffeigenschaften**  
gwf Gas+Energie 160/2-3 (2019) 56-74

Wanzenberg, E.; Henel, M.; Brauer, H.; Tamaske, E.; Neumann, H.; Großmann, A.; Wackermann, K.  
**Forschungsvorhaben »H2-Pims«: Wasserstoff im Erdgas sicher transportieren**  
3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme 6 (2019) 84-93

---

## Impressum

---

### Redaktion

Katharina Hien  
Thomas Götz

### Bildquellen

Titelbild: © Gebhard I Uhl, Freiburg

Seite 11: © Fraunhofer IPT

### Gestaltung und Produktion

Erika Hellstab  
Marianne Förderer

Seite 18, 19, 24, 25, 32, 33, 42, 43,  
54, 55, 67: © Stock-Müller, Freiburg

### Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut  
für Werkstoffmechanik IWM  
Wöhlerstraße 11  
79108 Freiburg  
Telefon +49 761 5142-154  
Fax +49 761 5142-510

Seite 61: © Achim Käflein, Freiburg

Alle übrigen Abbildungen:  
© Fraunhofer IWM

[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.