



Fraunhofer

IWM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM

JAHRESBERICHT
2018





5 mm

Eine am Fraunhofer IWM entwickelte Technologie ermöglicht es, Flachglas mithilfe eines präzise geführten Laserstrahls zu komplexen oder ungewöhnlichen Formen zu biegen. Die Forscherinnen und Forscher nutzen exakte Berechnungen und die besondere Eigenschaft von Glas, bei hoher Temperatur zähflüssig verformbar zu sein. Damit werden erstmals Glasprodukte mit besonders engen Radien zugänglich, die gleichzeitig in den unverformten Bereichen die hohe Oberflächenqualität von Flachglas aufweisen. Mit dieser Technik werden zukünftig neuartige Produkte für Architektur oder Design entstehen.

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 2,5 Milliarden Euro. Davon fallen mehr als 2,1 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

JAHRESBERICHT 2018

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

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

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



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

Liebe Leserinnen und Leser,

2018 war nicht nur geprägt durch materielle Investitionen, sondern auch durch unsere Vorreiterrolle im Bereich der digitalisierten Werkstofftechnik. Auf dem Workshop MaterialDigital, den wir 2018 ins Leben gerufen haben, skizzierten rund 100 Expertinnen und Experten aus Industrie und Forschung in angeregten Diskussionen den Weg zum digitalisierten Material und dessen Nutzen. Das Interesse an digitalen Repräsentationen von Werkstoffen und entsprechenden digitalen Workflows war so groß, dass es im Mai 2019 gleich mit einem zweiten Workshop dieser Art weitergehen soll (mehr dazu auf Seite 8). Ein wichtiger Baustein für unsere Zukunftsfähigkeit bei der Digitalisierung in der Werkstofftechnik ist der sogenannte Werkstoffdatenraum. Im Fraunhofer-Vorlauftorschungsprojekt URWERK entwickeln wir eine Basis-Ontologie, die komplexe Werkstoffhistorien abbildet und daraufhin unternehmensspezifisch angepasst werden kann.

Analog zur Digitalisierung von Werkstoffen arbeiten wir am Ausbau weiterer strategischer Institutsthemen. Für die werkstoffgerechte Prozess- und Bauteiloptimierung starten wir mit Fraunhofer-Partnern ein Vorlauftorschungsprojekt zur Prozessoptimierung der vollkeramischen Aufbau- und Verbindungstechnik für leistungsfähige Siliziumkarbid-Halbleiterbauelemente. Ihre hohe Zuverlässigkeit und Miniaturisierungspotenziale sind besonders interessant für die regenerative Stromerzeugung als auch die industrielle Motorsteuerung. Zum Thema »Entwicklung einsatzgerechter multifunktionaler Werkstoffe« haben wir den Zuschlag für ein weiteres Fraunhofer-internes Vorlauftorschungsprojekt zur Materialentwicklung hochwarmfester Aluminiumlegierungen für den additiven 3D-Druck von Leichtbaukomponenten bekommen – wichtig für Anwendungen im Automobilbau und der Luft- und Raumfahrt. Dass drei neue Fraunhofer-Initiativen mit unserer Beteiligung bewilligt wurden, ist schon außergewöhnlich. Es freut uns besonders, dass damit unsere strategischen Entwicklungslinien bestätigt werden.

Auch personell sind wir stabil aufgestellt und konnten mit Dr. Christoph Schweizer einen hervorragenden Wissenschaftler für die Leitung des Geschäftsfelds Werkstoffbewertung, Lebensdauerkonzepte gewinnen.

Im April feiern wir die Eröffnung des Fraunhofer IWM Wasserstofflabors und erörtern in einem Fachworkshop mit namhaften Expertinnen und Experten die Wirkung von Wasserstoff auf Werkstoffe und diskutieren Lösungsansätze, diese zu beherrschen (weitere Informationen dazu auf Seite 51).

Neben solch langfristigen Forschungsthemen geht es natürlich mit gleicher Intensität darum, Lösungen für industrielle Fragen zu erarbeiten, die schnell in die Anwendung kommen können. Ein solches FuE-Ergebnis des Fraunhofer IWM fand auf der Fachmesse GlassTec im Herbst 2018 große Beachtung seitens der Baubranche: Der Prototyp einer scharf und exakt um 90° gebogenen Isolierglasscheibe, den wir mit dem von uns entwickelten laserbasierten Glasbiegeverfahren hergestellt hatten, zeigte eindrucksvoll, wie fundiertes Werkstoffverständnis in industrielle Innovationen überführt werden kann (lesen Sie weiter auf Seite 26).

Lassen Sie sich von den vielen weiteren aktuellen Beispielen unserer Forschung anregen, die Sie im vorliegenden Jahresbericht finden. Nehmen Sie mit uns gemeinsam den Wandel in die Hand.

Eine inspirierende Lektüre wünscht Ihnen



Prof. Dr. Peter Gumbusch



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

INHALT

INSTITUTSPROFIL

- 6 Strategische Institutsthemen des Fraunhofer IWM
- 7 Kuratorium
- 8 Digitalisierung in der Werkstofftechnik
- 10 Das Institut in Zahlen
- 12 Organisation und Ansprechpartner

AUSGEWÄHLTE FORSCHUNGSERGEBNISSE

14 Geschäftsfeld Materialdesign

- 16 Die Adhäsionseigenschaften funktioneller Materialien charakterisieren
- 18 Atomistische Charakterisierung von Energiematerialien

20 Geschäftsfeld Fertigungsprozesse

- 22 Simulation der Schmelz- und Erstarrungsdynamik bei additiven Fertigungsverfahren
- 24 Temperaturabhängige Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen von Titan-Aluminiden
- 26 Biegen von Flachglas in kleinen Biegeradien

28 Geschäftsfeld Tribologie

- 30 Biologisch inspirierte, umweltfreundliche Schmierstoffe auf Wasserbasis
- 32 CO₂-Reduktion durch Supraschmierung: Designregeln für Schmierstoffe gefunden
- 34 Charakterisierung der Einflüsse regenerativer Kraftstoffe auf tribologische Eigenschaften von Motorkomponenten
- 36 Tribocharakterisierung von Schmierstoffen und Thermoplasten
- 37 Bauteilschädigungen durch Wasserstoffdiffusion

38 Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau

- 40 Modellierung des Instabilitätsverhaltens komplexer Strukturen bei Crashbelastung
- 42 Mikroprüfung von Werkstoffen und Verbänden über einen Bereich von fünf Dehnratendekaden
- 44 Modellparameter zur Crashesimulation mechanisch gefügter Verbindungen
- 46 Einfluss der Faser-Matrix-Grenzflächen auf die Delamination von UD-Verbunden
- 48 Werkstoffcharakterisierung für Simulationen geschweißter metallischer Komponenten
- 49 Weiterentwicklung analytischer Fehlerbewertungsmethoden

50 Geschäftsfeld Werkstoffbewertung, Lebensdauerkonzepte

- 52 Betriebsnahe Werkstoffqualifizierung von Stahl bei Druckwasserstoff
- 54 Rechnerische Lebensdauerbewertung von Aluminium unter Einbeziehung der Alterung

VERNETZUNG KERNKOMPETENZEN

- 56 Mitarbeit in Verbänden, Allianzen und Zentren der Fraunhofer-Gesellschaft
- 58 Übergreifende Vorlaufforschungsprojekte der Fraunhofer-Gesellschaft
- 60 Kernkompetenzen des Fraunhofer IWM, Mess- und Analysemöglichkeiten

ANHANG

- 66 Personen, Ausbildung, Ereignisse
- 68 Veröffentlichungen
- 72 Impressum

STRATEGISCHE INSTITUTSTHEMEN DES FRAUNHOFER IWM

Unser Leitmotiv ist, mit Lösungen zur optimierten Nutzung von Werkstoffeigenschaften und neuen Werkstofffunktionen innovative und zuverlässige technische Bauteile und Fertigungsverfahren bei unseren Auftraggebern zu ermöglichen. Um diesen Auftrag zu erfüllen, betreiben wir Forschung und Entwicklung (FuE) in vier strategischen Institutsthemen.

Aufklärung, Bewertung und Vorhersage des Einsatzverhaltens von Produkten im Lebenszyklus

Für die Bereiche Energieerzeugung, Mobilität und Produktion beschreiben wir Werkstoffmechanismen präzise auf der Basis von Ermüdungs-, Schädigungs-, Versagens- und Lebensdauermodellen. Unser Wettbewerbsvorteil: langjährige, kompetente Verknüpfung von Experiment und Simulation, mit der wir eigen- und weiterentwickelte Werkstoffmodelle validieren und relevante Inputdaten ermitteln. Je nach Fragestellung beziehen wir Mechanismen verschiedener Größenskalen ein. Langjährig etabliert sind Crash-, Festigkeits- und Sicherheitsbewertungen, Aufklärung von Reibungs- und Verschleißmechanismen sowie Schadensanalysen. Neuere Entwicklungen betreffen Wasserstoff- und Korrosionseinflüsse oder tribochemische Prozesse.

Werkstoffgerechte Prozess- und Bauteiloptimierung

Mit effizienter Kombination von Charakterisierung, Simulation und Modellexperimenten entwickeln wir Lösungen für Fertigungsprozesse, mit deren Hilfe die Eigenschaften von Werkstoffen und Bauteilen optimiert oder eingestellt werden können. Unsere Kompetenz besteht darin, die Entwicklung und Veränderung von Werkstoffeigenschaften in Fertigungsprozessen analysieren, beschreiben und vorhersagen sowie die Datenbasis zur Bauteiloptimierung erweitern zu können. Wir bauen durchgängige virtuelle Prozessketten auf, die zu hervorragenden Alleinstellungsmerkmalen beitragen. Unsere Verfahrensentwicklungen zum Trennen, Biegen, Prägen und Fügen von Glas werden kontinuierlich weiterentwickelt und modellhaft am Institut aufgebaut.

Entwicklung einsatzgerechter multifunktionaler Werkstoffe

Zur Lösung von Fragen der Zuverlässigkeit und Funktionalität ist es nötig, immer stärker mikrostrukturelle Werkstoffaspekte einzubeziehen sowie den Einfluss der Herstellung von Werkstoffen auf ihre Mikrostruktur zu bewerten. Wir entwickeln das Thema mikroskalige Materialaspekte, die bisher mit makroskaliger Bewertung und Optimierung noch nicht adressiert wurden. Daher betreiben wir zunehmend Werkstoffentwicklung auf der Basis von Multiskalensimulationen. Die Erforschung von Metamaterialien und programmierbaren Materialien befindet sich in der Aufbauphase, zeigt aber deutlich: effektive Materialentwicklung kann nur in enger Kombination von Herstellung und Bewertung erfolgen.

Digitale Repräsentation von Werkstoffen

Die Digitalisierung verspricht Wettbewerbsvorteile durch Vernetzung, Integration und neue Dienstleistungen. Die Herausforderungen sind dabei die systematische Digitalisierung von Werkstoffen oder die strukturierte Speicherung relevanter Werkstoffdaten. Als führendes Zentrum zur Simulation von Werkstoffen und ihrem Verhalten beschreiben wir die Zusammenhänge zwischen Prozessschritten, Materialmikrostruktur, Materialeigenschaften und Bauteilverhalten. Die Digitalisierung der Werkstoffmechanik eröffnet dabei neue Möglichkeiten zur Erweiterung und Integration unserer Methoden. Unser Ziel sind neue datenbasierte FuE-Leistungen, beispielsweise digitale Workflows von der »Prüfmaschine bis zum Projektbericht«.

Das Kuratorium des Fraunhofer IWM 2018

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, Robert Bosch GmbH, Renningen
- Prof. Dr. Lorenz Sigl,
Stellvertretender Kuratoriumsvorsitzender, Plansee SE,
Reutte, Österreich

- Dr. Markus Baur,
BMW Group, München
- 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. Markus Hermle,
Daimler AG, Sindelfingen
- 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

- Dr. Roland Langfeld,
Schott AG, Mainz
- Prof. Dr. Rolf Mülhaupt,
Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg
- Dr. Heike Riel,
IBM Research, Zürich, Schweiz
- Dr. Alexander Sagel,
KS Kolbenschmidt GmbH, Neckarsulm
- Dr. Silke Wagener,
Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG,
Weinheim
- MinRat Dr. Joachim Wekerle,
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau,
Baden-Württemberg, Stuttgart
- Dipl.-Ing. Jens Wemhöner,
Cerobear GmbH, Herzogenrath

Digitalisierung von Werkstoffen und Bauteilen erfolgreich nutzen

Die Digitalisierung in der Werkstofftechnik überträgt konsequent die Leitgedanken von Industrie 4.0 – Vernetzung, Transparenz und Nachvollziehbarkeit – auf die Werkstoffentwicklung, die Fertigung und den Bauteileinsatz: vorhandene Werkstoffinformationen werden verknüpft und besser zugänglich, neue Daten aus Experiment und Simulation sind in entsprechendem Kontext generiert.

Als Vernetzer und Treiber der Digitalisierung in der Werkstofftechnik bringt das Fraunhofer IWM Personen aus Industrie und Wissenschaft mit der Überzeugung zusammen, dass sich Entwicklungs- und Fertigungsprozesse durch digitale Workflows wesentlich effizienter gestalten lassen. Der erste Workshop MaterialDigital im April 2018 mit rund 100 Expertinnen und Experten aus Industrie und Forschung war dem Ziel gewidmet, Erfolgsfaktoren zu identifizieren und einen gemeinsamen Weg zur Digitalisierung der Werkstofftechnik aufzuzeigen.

Use-Cases zur Digitalisierung in der Werkstofftechnik

Vorreiter der deutschen Industrie bei der Digitalisierung in der Werkstofftechnik waren sich einig darüber, dass digitale Repräsentationen von Werkstoffen mannigfaltige Vorteile haben. Die beim Workshop aufgeführten Use-Cases kamen neben der Automobil- auch aus der Flugzeugbranche, wo eine computergestützte Materialentwicklung bereits von standardisierten Materialdaten und -modellen profitiert. Weitere Beispiele zeigten den Nutzen unternehmensübergreifender Materialdatenströme: Messdaten aus dem Einsatz von Bauteilen fließen in die Produktionen zurück, um diese exakter für die realen Belastungen auszuliegen und Overengineering zu vermeiden.

Neben den vielen Vorteilen kristallisierte sich im Workshop auch heraus, welche Anforderungen Plattformen, Standards und Soft-

warewerkzeuge erfüllen müssen, damit die gewünschte Vernetzung entlang eines Produktlebenszyklus über Unternehmensgrenzen hinaus Realität werden kann. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer machten deutlich, dass sie eine Weiterführung der begonnenen Diskussionen wünschen. Diesem Anliegen kommt das Fraunhofer IWM mit der Organisation des zweiten Workshops MaterialDigital, der im Mai 2019 stattfindet, gerne nach. Der Fokus wird auf den benötigten Werkzeugen und der Operationalisierung liegen (siehe Kasten).

Beispielaktivitäten am Fraunhofer IWM

Zahlreiche Bestrebungen am Fraunhofer IWM, auch im Rahmen eines vom Land Baden-Württemberg geförderten Projekts, zielen auf digitalisierte Werkstoffdatenräume oder virtuelle Werkstoffdatenermittlung. Digitale Werkstoff-Zwillinge werden entwickelt und semantische Verknüpfungen zwischen einzelnen Werkstücken und den zugehörigen Fertigungsprozessen erstellt. Erste Schritte für verschiedenste Hochtemperatur-Anwendungen sind hier bereits getan. Ein Demonstrator für additiv gefertigtes Metall deckt die Probenherstellung, die Werkstoffcharakterisierung und die anschließende Ermittlung von Materialeigenschaften ab und erlaubt komplexe Abfragen, die mit klassischen Datenbanken in dieser Flexibilität nicht möglich sind. Für mechanisch gefügte Verbindungen wurde eine Methode entwickelt, Modellparameter für unbekannt, nicht geprüfte Verbindungen vorherzusagen und mit allen relevanten Verbindungsdaten gebündelt für Analysen und Bewertungen zugänglich gemacht – eine Unterstützung zur Auswahl von Fügeverfahren im Designprozess und für erste Crashesicherheitsabschätzungen.

Workshop MaterialDigital2019

am 14. und 15. Mai 2019 in Freiburg

Fokus »Werkzeuge und Operationalisierung«: Einstieg, Entwicklungsstufen und Bewältigung des digitalen Veränderungsprozesses.

www.iwm.fraunhofer.de/MaterialDigital



Europaweite Austauschplattform für die Materialmodellierung

Das Fraunhofer IWM beteiligt sich maßgeblich am European Materials Modelling Council EMMC, dem europaweiten Netzwerk zur Materialmodellierung. Das Netzwerk berät die Europäische Forschungspolitik zum Thema Materialmodellierung und entwickelt dazu Empfehlungen und Roadmaps in sechs thematischen Bereichen. Dr. Adham Hashibon, Wissenschaftler am Fraunhofer IWM, leitet den Bereich »Datenräume und Marktplätze: Materialdatenmanagement und Kooperationsplattformen«. Hier wird der sogenannte MarketPlace aufgebaut, der zukünftig für die Community der Materialwissenschaften, Unternehmen für Simulationssoftware und Industrieunternehmen in der Materialentwicklung und -verarbeitung einen übersichtlichen Zugangspunkt zu allen Aktivitäten, Dienstleistungen und Produkten im Bereich der Materialmodellierung in Europa bietet.

MarketPlace

Der MarketPlace wird eine umfassende Austausch-, Informations- und Vertriebsplattform, die voraussichtlich 2021 online zur Verfügung stehen soll: Ein webbasiertes Portal, das Zugang zu unterschiedlicher Modellierungs- und Simulationssoftware, Materialdatenbanken sowie weiteren Dienstleistungen rund um die Materialmodellierung bietet, beispielsweise Zugänge zu High-Performance Computing, Tutorials oder Expertenforen. Bisher verstreute, OpenSource- oder kostenpflichtige Komponenten aus allen Bereichen der Materialmodellierung und integrierten rechnergestützten Materialentwicklung (ICME) werden gesammelt, angepasst und bereitgestellt. Und das über alle Größenskalen hinweg – von atomistischer bis hin zu makroskopischer, fertigungstechnischer Materialmodellierung. Eine gemeinsame Ontologie ermöglicht unter anderem den Aufbau individueller und nahtloser Modellierungsworkflows und stellt Interoperabilität sicher. Neue Vermarktungswege für Softwareanbieter oder Geschäftsmodelle für Modellierungs-Services werden möglich.

Anwendungsdemonstratoren

Das Fraunhofer IWM entwickelt und testet gemeinsam mit den Partnern aus der Industrie vier Modellierungsworkflows als Demonstratoren, wobei die fundierten Kenntnisse zu skalenergreifenden Werkstoff- und Bauteilsimulationen sowie das langjährige Werkstoffverständnis des Fraunhofer IWM einfließen. Die Demonstratoren sollen nach der Veröffentlichung des MarketPlace, ebenfalls 2021, von Interessierten als Grundlage für die Programmierung eigener Schnittstellen- und Modellierungsworkflows genutzt werden können.

Für Brennstoffzellen im Bereich der E-Mobility wird die Rheologie der Elektrodenpaste über Simulationen charakterisiert als auch der gesamte Rakelprozess simuliert, mit dem Elektrodenpaste im Siebdruckverfahren auf den Elektroden aufgebracht wird. Das Ziel ist dabei, mit möglichst wenig Verlust bei der Herstellung und geringem Pastenaufwand eine hohe Effizienz im Betrieb zu erreichen.

Ein weiterer Demonstrator ist die Simulation der Synthese von Nanopartikeln für katalytische Systeme zur Minderung von Stickoxid-Emissionen für Fahrzeuge, Schiffe und Kraftwerke. Das Ziel ist hier, über Simulationen die Prozessparameter zu beherrschen, um die gewünschten Partikelgrößen, -formen und -zusammensetzungen zu erhalten.

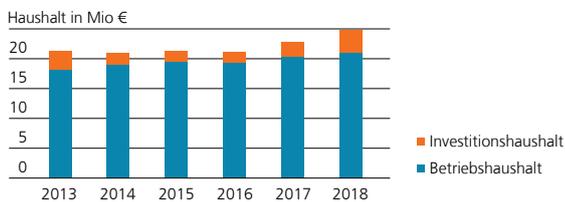
Der dritte Demonstrator wird das Spritzgießen keramisch gefüllter Binder-Polymere in die Werkzeugform simulieren, um damit Verzüge beim späteren Sintern zu beherrschen. Das Ziel ist, medizinische Keramikprodukte wie Dentalimplantate kostengünstig in hoher Qualität herzustellen.

Zudem wird der Aufschmelzprozess bei der Additiven Fertigung metallischer Superlegierungen für die Branchen Automotive und Luftfahrt mit einem Modellierungsworkflow simuliert. Dieser bezieht die nachfolgende Wärmebehandlung zur Verbesserung der Werkstoffeigenschaften mit ein.

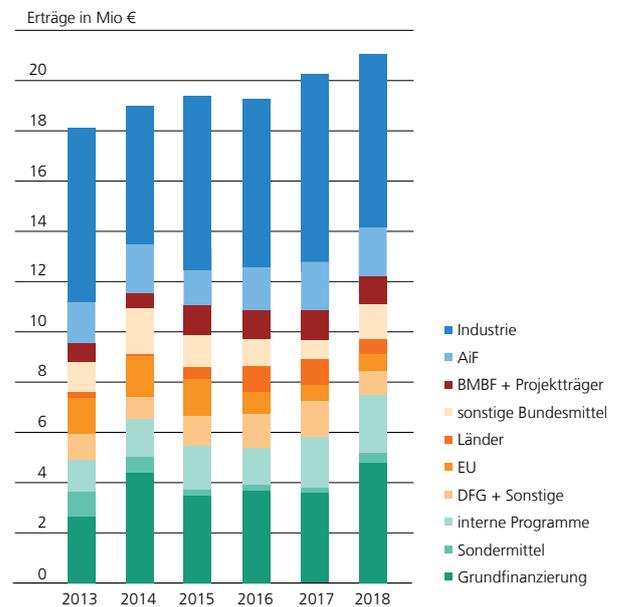
DAS INSTITUT IN ZAHLEN

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 21,2 Millionen Euro. Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Er wird finanziert durch externe Erträge aus Industrie und öffentlicher Hand sowie durch die institutionelle Förderung (Grundfinanzierung). Der Anteil der Industrieerträge am Betriebshaushalt 2018 liegt bei 41,8 Prozent. Der Investitionshaushalt 2018 beträgt 3,6 Millionen Euro.



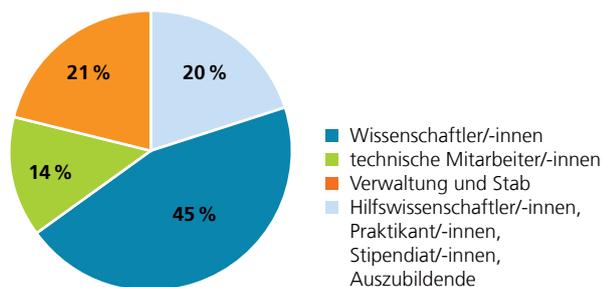
1 Entwicklung Investitionshaushalt und Betriebshaushalt.



2 Entwicklung Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM.

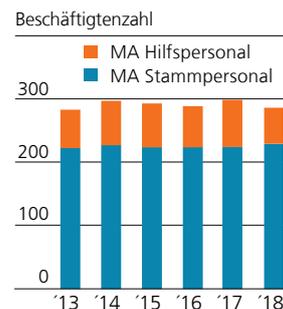
Personalentwicklung

Ende 2018 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 287 Personen beschäftigt. Davon sind 230 Mitarbeitende als Stammpersonal und 57 Mitarbeitende als Hilfspersonal (Hilfskräfte, Praktika, Abschlussarbeiten). Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus 128

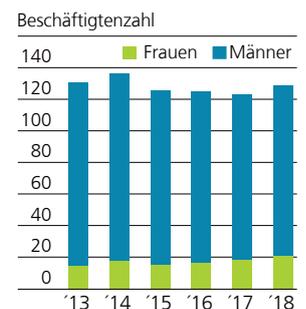


3 Personal am Fraunhofer IWM Ende 2018 nach Bereichen.

wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, 41 technischen Beschäftigten sowie 62 Angestellten in Verwaltung und Stab. 9 Auszubildende werden in vier Berufsbildern ausgebildet.



4 Entwicklung Personal am Fraunhofer IWM.

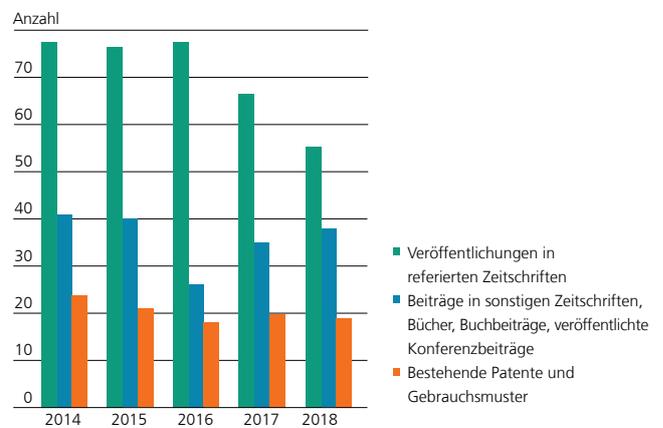


5 Entwicklung der Anzahl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am Fraunhofer IWM.

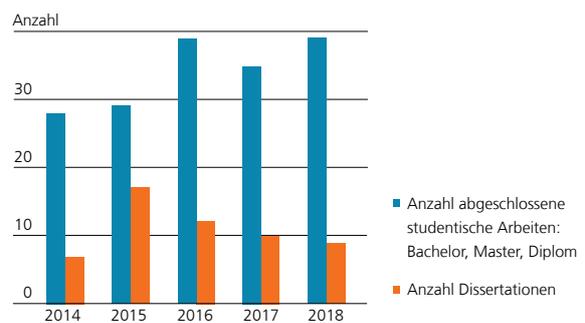
Die Fraunhofer-Institute betreiben anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für die Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Dabei ist neben dem wirtschaftlichen Erfolg die wissenschaftliche Exzellenz ein notwendiges Kriterium, um die Mission eines Instituts erfolgreich zu erfüllen.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

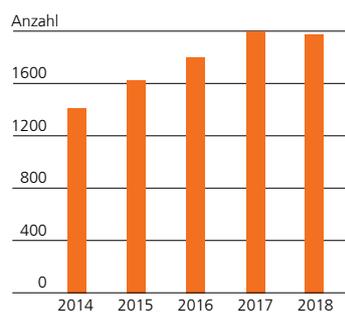
- Qualifikation von wissenschaftlichem Nachwuchs
- Wissenschaftlicher Output in Patenten und Veröffentlichungen
- Wissenschaftliche Anerkennung und Vernetzung



1 Publikationsleistung des Fraunhofer IWM.



2 Akademische Qualifizierung am Fraunhofer IWM.



3 Anzahl Zitationen von Veröffentlichungen des Fraunhofer IWM.

ORGANISATION UND ANSPRECHPARTNER DES FRAUNHOFER IWM

Institutsleiter	Prof. Dr. Peter Gumbsch	+49 761 5142-100	peter.gumbsch@iwm.fraunhofer.de
Stellvertretende Institutsleiter	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
Infrastruktur	Michael Schmid	+49 761 5142-111	michael.schmid@iwm.fraunhofer.de
Projektadministration, Einkauf	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
Informationstechnik	Klaus Merkel	+49 761 5142-217	klaus.merkel@iwm.fraunhofer.de
Qualitäts- und Besuchermanagement	Iris Wehrle (komm.)	+49 761 5142-360	iris.wehrle@iwm.fraunhofer.de
Personal und Dienstreisen	Kerstin A. Drüsedau	+49 761 5142-140	kerstin.druesedau@iwm.fraunhofer.de
Leitungsbereich	Prof. Dr. Peter Gumbsch	+49 761 5142-100	peter.gumbsch@iwm.fraunhofer.de
Unternehmensstrategie und Kommunikation	Thomas Götz	+49 761 5142-153	thomas.goetz@iwm.fraunhofer.de
Stab Institutsleitung	Dr. Rainer Kübler	+49 761 5142-213	rainer.kuebler@iwm.fraunhofer.de
Organisationsentwicklung	Elke Schubert	+49 761 5142-124	elke.schubert@iwm.fraunhofer.de

Geschäftsfelder und ihre Gruppen

Materialdesign	Prof. Dr. Christian Elsässer	+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
Fertigungsprozesse	Dr. Dirk Helm	+49 761 5142-158	dirk.helm@iwm.fraunhofer.de
Pulvertechnologie, Fluidodynamik	Dr. Torsten Kraft	+49 761 5142-248	torsten.kraft@iwm.fraunhofer.de
Umformprozesse	Dr. Dirk Helm	+49 761 5142-158	dirk.helm@iwm.fraunhofer.de
Bearbeitungsverfahren, Glasformgebung	Tobias Rist	+49 761 5142-430	tobias.rist@iwm.fraunhofer.de
Tribologie	Prof. Dr. Matthias Scherge	+49 761 5142-206	matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de
Verschleißschutz, 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
Bauteilsicherheit und Leichtbau	Dr. Michael Luke	+49 761 5142-338	michael.luke@iwm.fraunhofer.de
Ermüdungsverhalten	Dr. Majid Farajian	+49 761 5142-268	majid.farajian@iwm.fraunhofer.de
Crashsicherheit, Schädigungsmechanik	Dr. Dong-Zhi Sun	+49 761 5142-193	dong-zhi.sun@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, Strukturintegrität	Dr. Igor Varfolomeev	+49 761 5142-210	igor.varfolomeev@iwm.fraunhofer.de
Werkstoffbewertung, Lebensdauerkonzepte	Dr. Christoph Schweizer	+49 761 5142-382	christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de
Mikrostruktur, Eigenspannungen	Dr. Johannes Preußner	+49 761 5142-101	johannes.preussner@iwm.fraunhofer.de
Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik	Dr. Christoph Schweizer	+49 761 5142-382	christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

Geschäftsfeld

MATERIALDESIGN

GESCHÄFTSFELDLEITER

Prof. Dr. Christian Elsässer

Telefon +49 761 5142-286

christian.elsaesser@iw.fraunhofer.de



UNSERE HIGHLIGHTS 2018

Mit Dr. Thomas Straub (Meso- und Mikromechanik) und Dr. Daniel Urban (Materialmodellierung) haben wir zwei exzellente Wissenschaftler als neue Gruppenleiter gewonnen. Wir freuen uns zudem, dass Dr. Johannes J. Möller mit dem DGM-Nachwuchspreis ausgezeichnet wurde.

2018 haben wir vier größere, öffentlich geförderte Projekte erfolgreich abgeschlossen. Darin gestalteten und bewerteten wir ressourcenschonende Verbindungen für Permanentmagnete. Ein hierbei entwickelter MagnetPredictor kann mittels maschinellem Lernen aus Materialdaten komplexe Materialzusammensetzungen mit guten magnetischen Materialeigenschaften voraussagen. Zudem untersuchten wir mikroskalige Mechanismen zur magnetischen Härtung für die Gefügeoptimierung von Hartmagneten. Im Rahmen von geschäftsfeldübergreifenden Aktivitäten zur Bewertung von Einflüssen atomaren Wasserstoffs auf mechanische Eigenschaften metallischer Werkstoffe entstanden multiskalige Simulationsmethoden. Mit experimentellen und simulatorischen Methoden entwickelten wir mesoskalige Materialsysteme mit gezielt eingestellten mechanischen Verhalten im Rahmen des Fraunhofer-Forschungsclusters »Programmierbare Materialien«. Aktuell verstärkten wir unsere Aktivitäten im Bereich Quantentechnologie und insbesondere der Quantensensorik.

Im Workshop »Die Wirkung von Wasserstoff auf Werkstoffe beherrschen« im April 2019 diskutieren wir mit namhaften Expertinnen und Experten die Multiskalen-Betrachtung der Wechselwirkung von Wasserstoff mit Metallgefügen (siehe Seite 51).

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



MATERIALMODELLIERUNG

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

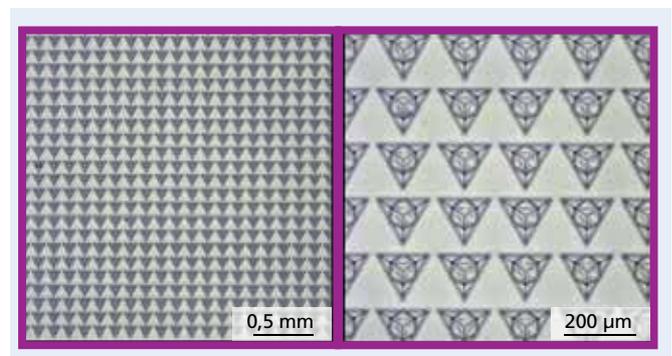
Dr. Daniel Urban | daniel.urban@iwf.fraunhofer.de

DIE ADHÄSIONSEIGENSCHAFTEN FUNKTIONELLER MATERIALIEN CHARAKTERISIEREN

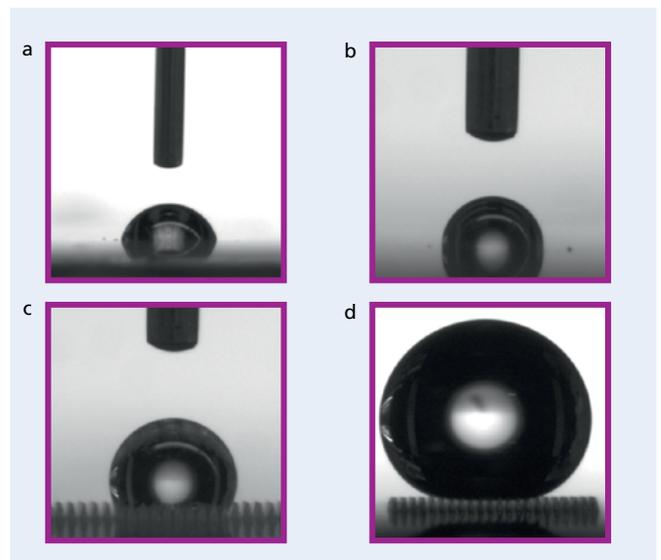
Die Oberflächenchemie und die Morphologie funktioneller Materialien vorherzusagen und gezielt herzustellen, ist in der Industrie von entscheidender Bedeutung. Viele Branchen profitieren davon, beispielsweise die Mikroelektronik und -systemtechnik, Biomedizin, Energie und Photonik sowie der Bereich der Tribologie. Die entsprechenden Produkte und Anwendungen sind stark beeinflusst durch kontaktmechanische Probleme wie die unkontrollierte Haftung und Reibung ihrer Oberflächen auf komplexen Formen und Geometrien. Diese Herausforderungen ergeben sich aus den ineinandergreifenden physikalisch-chemischen Eigenschaften der Gegenauflflächen und ihrer Grenzflächen. Diese Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften zu charakterisieren ist die Grundlage dafür, die Zuverlässigkeit, Reproduzierbarkeit und Leistung der Grenzfläche vorhersagbar zu gestalten. Eine aussagekräftige Charakterisierung erfordert unterschiedliche Betrachtungsweisen, die eine quantitative, ganzheitliche Sicht ermöglichen: über mehrere Längenskalen in allen drei Raumdimensionen hinweg, untermauert durch solide physikalische Modelle, die experimentell validiert wurden.

Charakterisierung von Prototypen zur Modellvalidierung

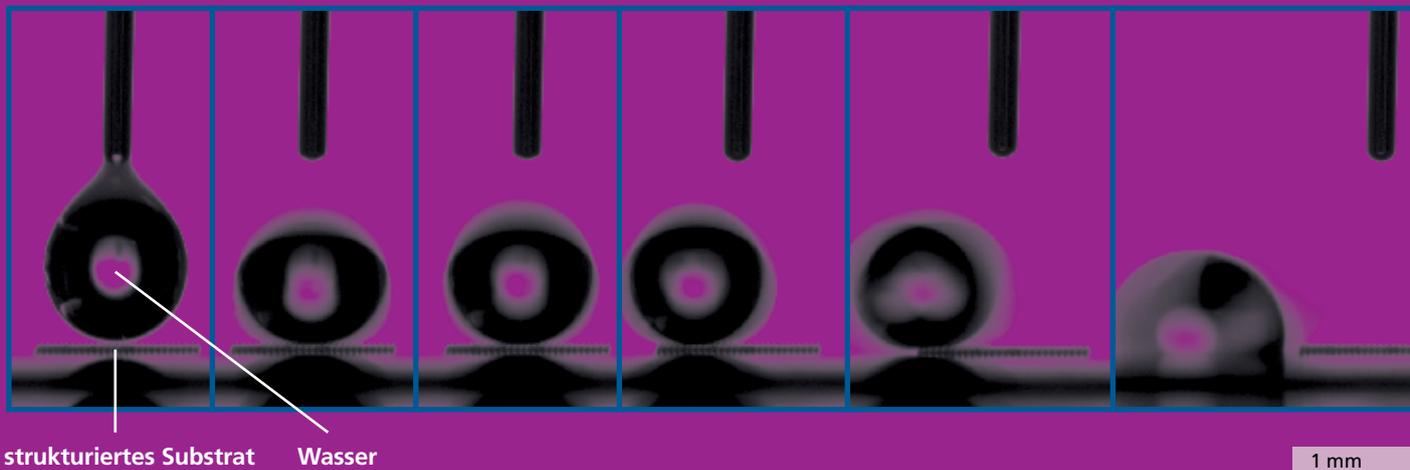
Für solcherart neue Materialien, die auf Nano-Ebene strukturiert sind, gibt es bisher keine standardisierten Richtlinien zur Charakterisierung. Auch wie die Material-Charakterisierung beim Design von Produkten und Prozessen unterstützen kann, ist noch nicht festgelegt. In vielen Fällen liefern Charakterisierungs- und Prüfprotokolle zwar Fachdaten, die jedoch nicht ausreichen, um eine fertige Interpretation oder ein vernetztes Verständnis über die Entwicklung der Materialeigenschaften während des komplexen Herstellungsprozesses zu gewährleisten. Dies hat zur Folge, dass viele dieser Produkte unter



1 Lithographisch hergestellte tetraedrische Oberflächenstruktur, rechts mit 20-facher Vergrößerung dargestellt.



2 Leicht hydrophiles Basismaterial (a), chemisch behandeltes Substrat wird leicht hydrophob (b), Strukturierung zeigt den Wenzel Benetzungszustand (c), mit HMDSO beschichtete Strukturierung zeigt den metastabilen Cassie-Baxter-Benetzungszustand (d).



3 Superhydrophobes »rollendes« Tröpfchenverhalten auf dem strukturierten Substrat nach HMDSO-Plasmapolymerisation.

ungünstiger Funktionsausbeute, geringer Produktivität und unzuverlässiger Endverbraucherleistung leiden können, mit oft verheerenden Folgen für die Anwendungen und Hersteller.

Mikroaktorik, technische Gerüste für die Geweberegeneration, nanostrukturierte superhydrophobe oder hierarchisch strukturierte Oberflächen sowie Mikro-, beziehungsweise Nanopartikel für die Wirkstoffabgabe als auch Beschichtungen für Biosensoren sind Beispiele für industrielle Anwendungen, bei denen das Problem der Adhäsion auf zugängliche und sinnvolle Weise angegangen werden muss. Um dieses Thema zu erforschen, bereitet das Fraunhofer IWM für das EU-Projekt OYSTER speziell zugeschnittene Mikroproben mittels Direct Laser Writing (DLW) vor. Die Strukturierungsfreiheit von DLW ermöglicht dem Fraunhofer IWM, eine Vielzahl komplizierter Mikrokomponenten, die ursprünglich von mehreren EU-Konsortialpartnern in teuren Prozessen entwickelt werden mussten, zu einem Bruchteil des Preises und in kürzester Zeit nachzubilden. Diese kurze Herstellungszeit beschleunigt die für die Modellvalidierung erforderlichen Bearbeitungszeiten durch erweiterte experimentelle Charakterisierung für die anschließende Modellvalidierung.

Die Beiträge des Fraunhofer IWM zum Projekt OYSTER tragen damit zur schnellen und zuverlässigen Herstellung neuartiger nanohergestellter, heterogener und nanostrukturierter Oberflächen bei, bei denen die freie Oberflächenenergie und die Adhäsionseigenschaften durch ein Strukturdesign mit einer Auflösung von etwa 100 nm eingestellt werden. Die Vorhersagbarkeit der Kopplungsprotokolle von OYSTER wird durch mehrere industrielle Fallstudien bestätigt, die zu einer verbesserten industriellen Nutzung führen werden.

Spezialentwicklung von Oberflächenbenetzbarkeit

Die freie Oberflächenenergie kann gezielt manipuliert werden, um die Haft- und Benetzungseigenschaften einer Oberfläche einzustellen. Die Gruppe für Meso- und Mikromechanik unterstützt dabei, Oberflächen mit definiertem Benetzungsverhalten zu erzeugen: von hydrophil bis superhydrophob und allen Zuständen, die dazwischen liegen.

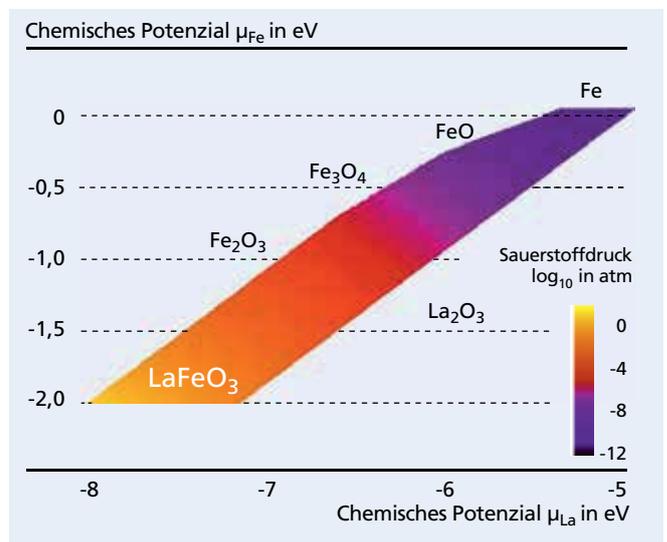
Matthew Berwind, Dr. Thomas Straub

ATOMISTISCHE CHARAKTERISIERUNG VON ENERGIEMATERIALIEN

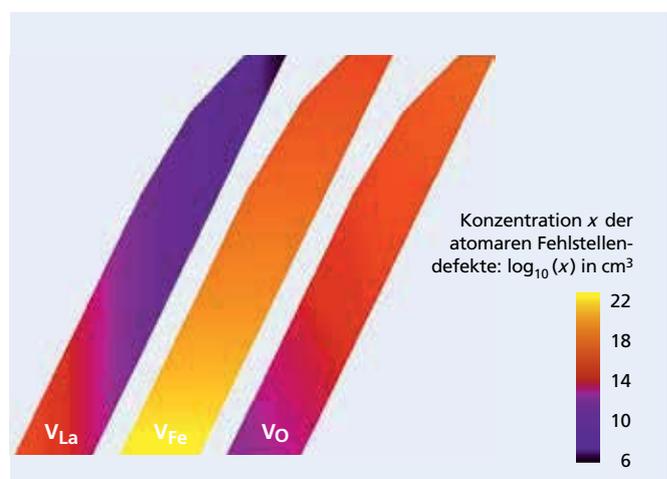
Die Ressourcenknappheit und der weltweit steigende Energiebedarf erfordern innovative Lösungen zur zukünftigen Sicherung der Energieversorgung. Um großtechnische Anlagen zur Gewinnung regenerativer Energie, die im Aufbau kosten- und ressourcenintensiv sind, effektiv zu nutzen, muss eine maximale Stromabnahme unabhängig von Tageszeit oder Wetterbedingungen gewährleistet sein. Den regenerativ erzeugten Überschussstrom für die Entwicklung und Inbetriebnahme von Festoxid-Elektrolysezellen nutzbar zu machen ist das Thema des BMBF-Kopernikus-Projekts »Power-to-X«. Diese Elektrolysezellen setzen Wasserdampf und Kohlendioxid in chemisches Synthesegas (Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid) um: durch atomare Ein- und Auslagerung sowie effektive Ladungstransferreaktionen in den Gasen an den Elektrodenoberflächen. Für die Effizienz dieser katalytischen Prozesse spielen atomare Defekte im Elektrodenmaterial eine zentrale Rolle. Mithilfe atomistischer Simulationen charakterisieren wir im Rahmen dieses Projekts die Eigenschaften von atomaren Defekten in der Perowskit-Materialklasse $(\text{La}, \text{Sr}, \text{Ca})(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Co})\text{O}_3$ für die Sauerstoffelektroden.

Einfluss atomarer Defekte auf Materialfunktionalitäten

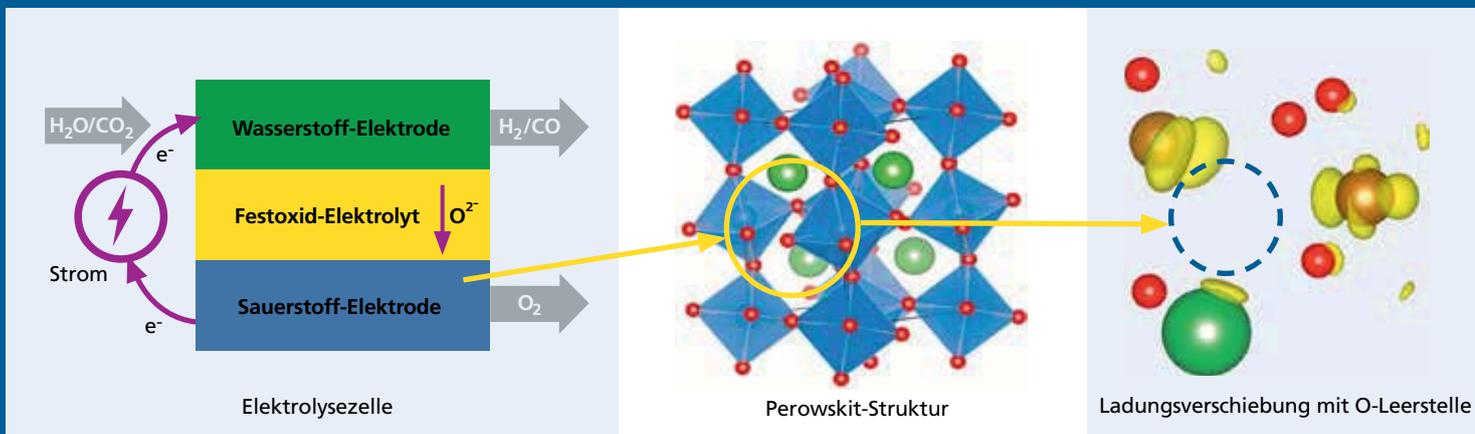
In jeder kristallinen Struktur liegen atomare Defekte oder »Punktdefekte« vor, die die Eigenschaften des Materials beeinflussen. Von technologischer Relevanz sind beispielsweise Fremdatom-Dotierungen in Halbleitermaterialien für Solarzellen, Gitterfehlstellen oder Zwischengitteratome in keramischen Elektrolyten für Festkörperionenbatterien, oder Sauerstoffleerstellen in Anoden für Brennstoff- und Elektrolysezellen. Mithilfe von auf der Dichtefunktionaltheorie DFT basierenden atomistischen Simulationsmethoden lassen sich Bildungsenergien und daraus Häufigkeiten aller denkbaren



1 Phasendiagramm von LaFeO_3 bei einer Temperatur der Sauerstoffatmosphäre von 1100 °C.



2 Konzentration x der atomaren Fehlstellendefekte V_{La} , V_{Fe} und V_{O} in LaFeO_3 im Stabilitätsbereich des Phasendiagramms von Abbildung 1.



3 Berechnung der elektronischen Eigenschaften defekthaltiger Materialien für Elektrolyse- und Brennstoffzellen.

Punktdefekttypen in beliebigen Verbindungen und Kristallstrukturen vorhersagen. Dabei werden neben der Temperatur die partiellen Gasdrücke der in der Verbindung vorliegenden Elementtypen berücksichtigt. Aussagen darüber, in welchem Bereich dieser Parameter die gewünschte Verbindung entsteht und ob Fremdphasen zu erwarten sind, können über das Phasendiagramm gewonnen werden, dessen Berechnung den Defektrechnungen vorausgeht. Über die Defektkonzentrationen sind schließlich die Stöchiometrieabweichungen innerhalb des Stabilitätsbereichs der Verbindung ermittelbar.

Im Rahmen der Fragestellungen zu Defekten in Anoden für Festoxid-Elektrolysezellen haben wir einen Simulations-Workflow entwickelt, der auf Kristalle beliebiger Struktur und Zusammensetzung anwendbar ist. Langjährige Erfahrung und Methodenkompetenz im Bereich atomistischer Simulationen in der Gruppe »Materialmodellierung« ermöglichen uns eine flexible Übertragung der Methodik auf andere Materialproblemstellungen, bei denen Punktdefekte eine Rolle spielen.

Phasenstabilität und Defekte in LFO-Perowskiten

Das Phasendiagramm in Abbildung 1 zeigt den Stabilitätsbereich der Perowskit-Verbindung LaFeO_3 in Abhängigkeit von den chemischen Potenzialen ihrer Bestandteile Lanthan und Eisen. Diese sind auf die Werte ihrer strukturellen Grundzustände bezogen und können anschaulich als Energien der elementaren Reservoirs interpretiert werden, mit denen die Verbindung während ihrer Synthese im Gleichgewicht steht. Die reichhaltige Verfügbarkeit eines Elementtyps spiegelt sich in einem nahe bei Null liegenden Wert des chemischen Potenzials wider. Für Sauerstoff kann das chemische Potenzial durch den experimentell zugänglicheren Druckwert der Ofenatmosphäre bei einer Kalzinierung bei

1100 °C Umgebungstemperatur ausgedrückt werden. Um die Grenzlinien zu den Fremdphasen zu ermitteln, haben wir deren Bildungsenergien mittels DFT-Rechnungen bestimmt und zur Energie von LaFeO_3 in Beziehung gesetzt. An jedem Punkt innerhalb eines solchen Phasendiagramms können die Bildungsenergien atomarer Defekte berechnet werden. Daraus lassen sich schließlich zu einer gegebenen Temperatur die Häufigkeiten der Defekte abschätzen. Für LaFeO_3 ergibt sich beispielsweise unabhängig vom Atmosphärendruck eine stark erhöhte Tendenz zur leichteren Bildung von Leerstellen auf Eisen-Plätzen als auf Lanthan- oder Sauerstoff-Plätzen (siehe Abbildung 2). Diese Erkenntnis war für die Interpretation von Messergebnissen an synthetisierten LaFeO_3 -Proben unserer Projektpartner sehr hilfreich.

Die Konzentrationen der Defekte bestimmt die Stöchiometrie des Materials. Eine detaillierte Kenntnis darüber, wie diese von den experimentellen Herstellungsbedingungen abhängen, ist für die Entwicklung und Optimierung katalytisch aktiver Elektroden für Festoxid-Brennstoff- und Elektrolysezellen entscheidend. So beeinflussen die Zusammensetzung des Materials und das Vorliegen von Defekten die Ladungsstufen der Metallionen, deren Werte und Flexibilität für den Ionenaustausch im Zellbetrieb entscheidend sind.

Dr. Daniel Mutter, Dr. Daniel Urban

Geschäftsfeld

FERTIGUNGSPROZESSE

GESCHÄFTSFELDLEITER

Dr. Dirk Helm

Telefon +49 761 5142-158

dirk.helm@iwf.fraunhofer.de



UNSERE HIGHLIGHTS 2018

Auf der »Euroblech« in Hannover stellten wir unser virtuelles Labor vor: Es füllt Lücken in Materialdatensätzen auf der Basis von Simulationen und dient so als Werkzeug zur Digitalisierung von Werkstoffen. Mit neuen partikelbasierten Simulationstechniken für die Additive Fertigung konnten wir Empfehlungen für Prozessparameter beim Pulverbettverfahren sowie Binder Jetting geben. Im Rahmen des DFG-Schwerpunkts 2122 quantifizieren wir für das selektive Lasersintern von Polymeren (Additive Fertigung) den Zusammenhang zwischen Prozessparametern, Materialdaten und Bauteilqualität.

Aufgrund großer Branchenrelevanz starteten wir ein Projekt zur Erweiterung der Schadensvorhersage für ausschussarme Fertigung in der Kaltmassivumformung von Stählen mit nichtmetallischen Einschlüssen als Schädigungsinitiatoren. Mit unseren Aktivitäten im European Materials Modelling Council EMMC-CSA arbeiten wir am erleichterten Zugang zu Modellierung von Werkstoffen für europäische Bauteilhersteller. Der mit unserem laserbasierten Biegeverfahren um 90° scharf und sehr exakt gebogene Prototyp einer Isolier-Glasscheibe fand auf der Glasstec in Düsseldorf große Beachtung vonseiten der Bauindustrie.

GRUPPEN



PULVERTECHNOLOGIE, 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



UMFORMPROZESSE

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

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



BEARBEITUNGSVERFAHREN, GLASFORMGEBUNG

Wir erarbeiten bruchmechanische Analysemethoden und Fertigungsverfahren für Glas-Heißformen, Ultrapräzisionsbearbeitung, Fügeverfahren 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

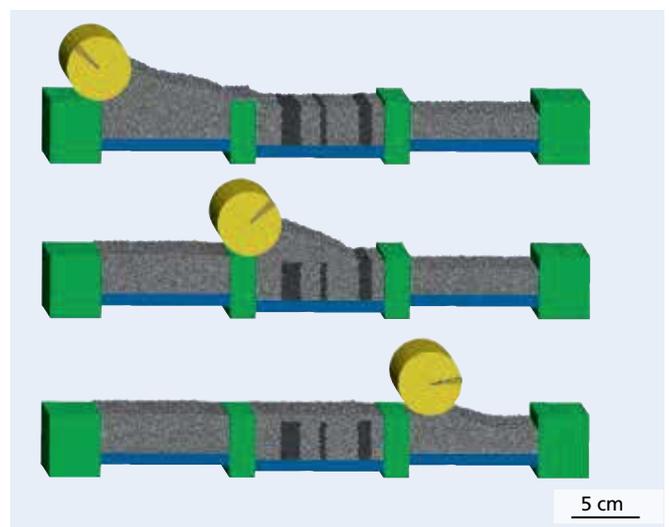
SIMULATION DER SCHMELZ- UND ERSTARRUNGSDYNAMIK BEI ADDITIVEN FERTIGUNGSVERFAHREN

Additive Fertigungsverfahren werden in Wissenschaft und Industrie immer bedeutsamer. Die Zuverlässigkeit derart gefertigter Bauteile reicht allerdings noch nicht für die Verwendung in strukturellen Leichtbauelementen. Gerade hier aber ermöglichen additive Fertigungsverfahren die Produktion hochkomplexer Objekte mit am Computer maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften und minimalem Materialaufwand. Zuverlässige additiv gefertigte Bauteile könnten daher zu einer weiteren dramatischen Gewichtsreduktion bei gleichzeitiger Steigerung der Funktionalität von Leichtbaukomponenten führen.

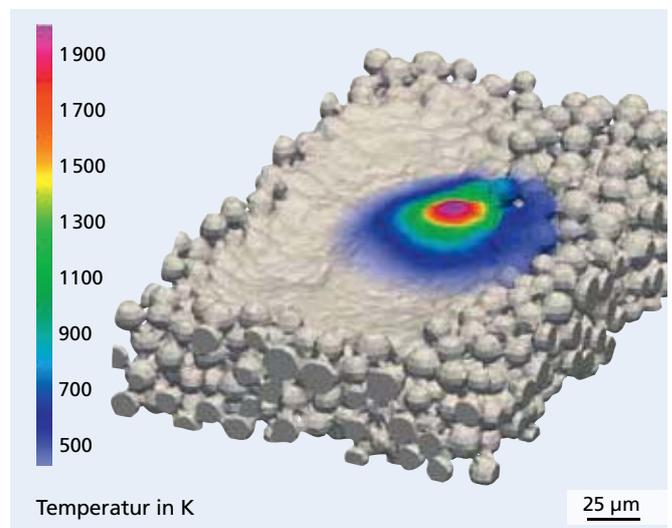
Ermüdungs-Parameter bei Pulverbettverfahren

Die Ermüdung mittels Pulverbettverfahren gefertigter Bauteile wird einerseits durch deren Oberflächenrauheit R_z bestimmt: Typischerweise liegt diese im Bereich von 25 bis 40 μm und ist damit signifikant größer als bei traditionellen Formgebungsverfahren wie dem Kokillenguss (R_z 3 bis 8 μm). Eine systematische Kontrolle der Rauheit wäre daher wünschenswert, kann allerdings momentan nicht realisiert werden. Andererseits sind sowohl eine unter Umständen lokal auftretende Restporosität als auch nicht miteinander verschmolzene Schichten der Ursprung von Rissen im Bauteil. Simulationswerkzeuge können hier helfen, relevante Prozessparameter zu identifizieren, zu adaptieren und somit die Erzeugung verbesserter Bauteile zu ermöglichen.

Derzeit gibt es noch keine etablierten Simulationstools für die Additive Fertigung. Dies gilt insbesondere für die Längenskala der Pulverpartikel, die relevant für die Bauteilrauheit ist. Am Fraunhofer IWM entwickelte partikelbasierte Simulationstechniken ermöglichen hier allerdings detaillierte Einblicke in den Prozess. Dies betrifft bei Pulverbettverfahren die Simulation des Aufrakelns des Pulvers, da die erreichten Packungsdichten



1 Simulation des Aufrakelns einer Pulverschicht mit einer gegenläufig rotierenden Walze.



2 Simulation des Schmelzens und Wiedererstarrens einer Pulverschicht, die in einer Rakelsimulation berechnet wurde. Das Temperaturfeld ist farbkodiert dargestellt.

entscheidend für die Dynamik des Schmelzvorgangs sind. Zudem liefert die Simulation der Schmelz- und Wiedererstarungsprozesse Vorhersagen zur Porosität und Oberflächenrauheit und damit letztlich Indikatoren für die Festigkeit des Bauteils.

Partikelbasierte Simulationen

Alle verwendeten Simulationsmethoden sind in der Software SimPARTIX[®] des Fraunhofer IWM implementiert. Die Software wird sowohl zur Projektarbeit im Haus eingesetzt als auch an Kunden lizenziert. Zur Modellierung des Rakelvorgangs wird die Diskrete-Elemente-Methode eingesetzt (Abbildung 1). Die Pulverpartikel werden dabei als Kugeln mit der im realen Pulver gemessenen Größenverteilung beschrieben. Die simulierten Partikel wechselwirken miteinander durch Hertz'sche Repulsion, viskose Dämpfung, Kohäsion sowie Gleit- und Rollreibung. Zudem wird die Bewegung des Rakels, beziehungsweise der Walze, vorgegeben. Die systematische Variation dieser Material- und Prozessparameter gibt Aufschluss über Ursachen von Inhomogenitäten im Pulverbett und hilft somit, diese zu vermeiden.

Zur Simulation des Schmelzens und Erstarrens wird die sogenannte Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Methode genutzt (Abbildung 2). Diese berechnet den lokalen Energieeintrag durch die Laserstrahlung, die Wärmeleitung im Material sowie die Strömung im Schmelzbad. Das Strömungsverhalten wird von der Schwerkraft und der Oberflächenspannung beeinflusst. Besonders relevant ist hierbei die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung, welche sogenannte Marangoni-Strömungen hervorruft. In Abbildung 3 wird der Einfluss der Marangoni-Strömung auf die resultierende Oberflächenrauheit in einer zweidimensionalen Simulation verdeutlicht: Das aufgeschmolzene Material fließt vom

3 Numerische Simulation des Laserschmelzens mit farbkodiertem Temperaturfeld; links ohne und rechts mit Marangoni-Strömung.

Zentrum zu den Rändern des Schmelzbades, erstarrt dort und hinterlässt Erhöhungen der Oberfläche. Dabei kann die Höhe der Aufwölbung ein Mehrfaches des Durchmessers der ursprünglich verwendeten Partikel betragen, und es entsteht eine inakzeptabel große Oberflächenrauheit. Da beim anschließenden Rakeln typischerweise nur wenige Partikellagen aufgebracht werden, können diese Regionen unter Umständen nicht vollständig mit den neuen Partikeln befüllt werden. Das Ziel jedoch ist, ein Partikelbett mit möglichst homogener Oberfläche als Ausgangssituation für den folgenden Schmelzprozess zu erhalten. Die Oberflächenrauheit des vorherigen Schmelzprozesses sollte also kleiner als der durchschnittliche Partikeldurchmesser sein.

Prozess- und Materialoptimierung

Partikelbasierte Simulationen erlauben die physikalische Modellierung von Rakelprozessen sowie der Schmelzbaddynamik. Damit eignen sie sich für systematische Analysen des Einflusses von Prozess- und Materialparametern auf das Ergebnis der additiven Bauteilfertigung. Pulver können auf ihre prinzipielle Eignung für Laserschmelzverfahren untersucht und zum Beispiel durch eine Anpassung der Größenverteilung optimiert werden. Ebenso können geeignete Laserparameter identifiziert werden, die für einen gegebenen Werkstoff zu einem ruhigen Schmelzbad und damit zu einem homogenen Bauteil führen. Darüber hinaus wird aber auch die Entwicklung neuer Materialien, beispielsweise Legierungen, durch die Simulation unterstützt. In diesem Fall können Materialparameter, die für eine gute Verarbeitbarkeit nötig sind, gezielt eingegrenzt und somit die Anzahl experimenteller Entwicklungszyklen reduziert werden.

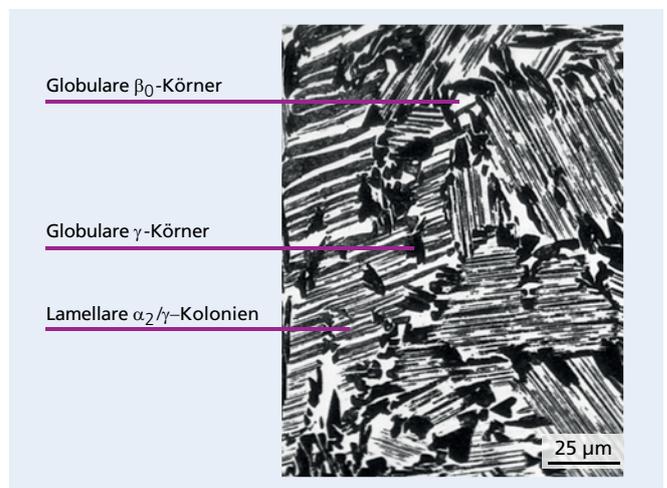
Dr. Claas Bierwisch

TEMPERATURABHÄNGIGE MIKROSTRUKTUR-EIGENSCHAFTS-BEZIEHUNGEN VON TITAN-ALUMINIDEN

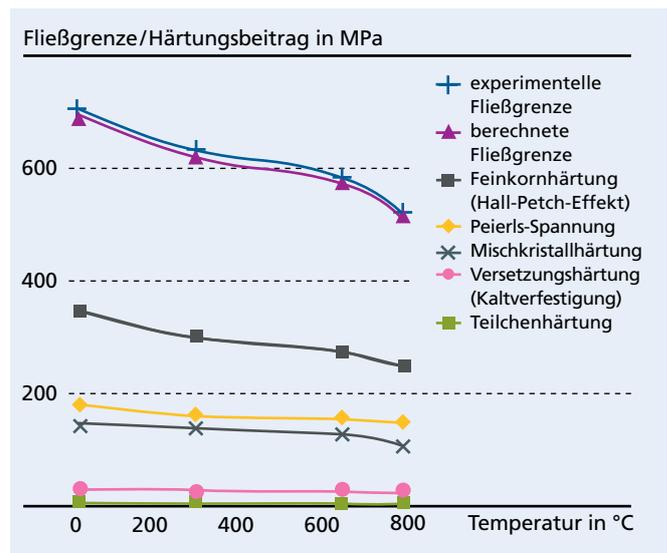
Turbinenräder von Abgasturboladern bestehen in der Regel aus hochwarmfesten Nickelbasislegierungen. Diese Legierungen enthalten sowohl kostenintensive Elemente, wie Ni, Cr, Al und Mo, als auch teure und kritische Elemente, wie W, Co, Nb und Ta, deren Vorkommen auf der Erde selten oder deren Gewinnung auf politisch instabile Regionen beschränkt ist. In einem vom Baden-Württembergischen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau geförderten Vorhaben entwickelte das Fraunhofer IWM ein integrales Verfahren zur systematischen Substitution von kritischen Legierungselementen und demonstrierte dessen Anwendbarkeit unter anderem am Beispiel von γ -Titan-Aluminiden (γ -TiAl).

Moderne γ -TiAl-Legierungen für Turbinenräder

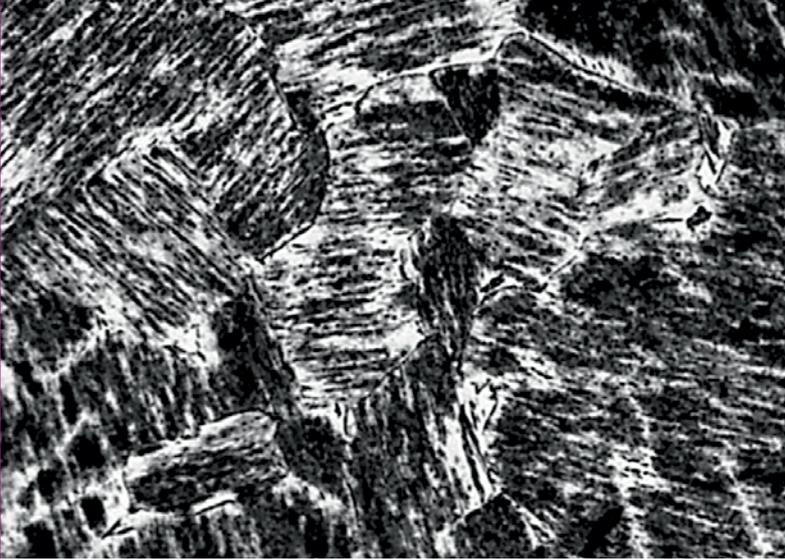
Die mechanischen Eigenschaften von γ -TiAl-Legierungen, wie zum Beispiel plastische Bruchdehnung bei Raumtemperatur und Kriechfestigkeit bei hohen Temperaturen, hängen nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern auch von den Eigenschaften der Einzelphasen, ihrem Volumenanteil und ihrer Anordnung ab. In dem Vorhaben wurde speziell auf die moderne γ -TiAl-Legierungsfamilie TNM (TiAlNbMoB) eingegangen, die für den Einsatz in Strahltriebwerken entwickelt wurde. Mittlerweile wurde auch das Potenzial der TNM-Legierung als Turbinenlaufradwerkstoff für Abgasturbolader in der Automobilanwendung getestet. Trotz der enthaltenen zirka 4 Prozent Niob werden bei Verwendung einer solchen Legierung insgesamt deutlich mehr als die Hälfte der kritischen Legierungselemente der derzeit eingesetzten Nickelbasislegierungen substituiert.



1 Gefüge der nahezu lamellaren γ -TiAl-Legierung TNM-B1.



2 Temperaturabhängige Fließgrenze inklusive berechneter Härtungsbeiträge einer nahezu lamellaren γ -TiAl-Legierung TNM-B1.



3 REM-Aufnahmen der Legierung TNM-B1 nach Wärmebehandlungen: vollständig lamellares Gefüge (links); Duplex-Gefüge (rechts).

Gezielt eingestellte Mikrostruktur für Hochtemperaturanwendungen

Bei mehrphasigen TNM-Legierungen kann ein Gefüge mit ausgewogenen mechanischen Eigenschaften nur mittels mehrstufiger Wärmebehandlung eingestellt werden. Die nahezu lamellare Mikrostruktur einer TNM-Legierung ergibt eine akzeptable Bruchdehnung bei Raum- sowie eine ausreichende Kriechfestigkeit bei Anwendungstemperatur. Das entsprechende Gefüge (Abbildung 1) besteht aus Kolonien, die aus α_2/γ -Lamellen und globularen γ und β_0 -Körnern aufgebaut sind. Mit dieser gezielt eingestellten Mikrostruktur werden unter anderem folgende anwendungsrelevante Materialeigenschaften verbunden: Der Lamellenabstand in den α_2/γ -Kolonien ist hauptsächlich für den Kriechwiderstand verantwortlich, während die Koloniegroße, vor allem der Volumenanteil an globularen γ -Körnern, die Duktilität unterhalb der sprödduktilen Übergangstemperatur bestimmt.

Mikrostrukturbasiertes Modell der mechanischen Eigenschaften

Basierend auf den werkstoffmechanischen Modellvorstellungen zur Beschreibung der Festigkeit wurden für diese Legierungs-kategorie Mikrostruktur-Eigenschafts-Beziehungen erarbeitet. Sie gestatten eine Vorhersage der temperaturabhängigen Fließgrenze anhand der Struktur des Materialgefüges. Die Fließgrenze ist die in der Regel konstruktiv wichtigste mechanische Eigenschaft: Sie korreliert mit vielen anderen mechanischen Eigenschaften. Der dem Modell zugrunde liegende Ansatz besagt, dass sich die Fließspannung des Gesamtmaterials aus den Fließspannungen seiner Einzelphasen zusammensetzt, die sich wiederum aus deren Härtungskomponenten berechnen lassen.

Das Modell basiert zum einen auf thermodynamischen Daten zur Phasenbildung und zum anderen auf Literaturdaten, beispielsweise physikalische Konstanten oder Werkstoffdaten der Einzelphasen. Als Eingangsgrößen sind geometrische Mikrostrukturparameter, wie Phasenanteile, Korngrößen und Lamellenabstände, einzusetzen, die auch aus einer metallographischen Untersuchung gewonnen werden können. Zum Management der Werkstoffdaten und zu deren zielgerichteten Auswertung wurde ein Datenbankprototyp aufgebaut, welcher mittels der programmierten Datenauswertungstools unter anderem effiziente Vergleichsmöglichkeiten zwischen unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften bietet. Zur Validierung des Modells dienten sowohl Literaturstellen, in denen zugleich mechanische Eigenschaften und Mikrostrukturparameter bestimmt wurden, als auch eine systematische Versuchsreihe an der Legierung TNM-B1 mit der Zusammensetzung Ti-43,5at.-% Al-4at.-% Nb-1at.-% Mo-0,1at.-% B. Dabei wurden durch gezielte Wärmebehandlungen verschiedenste Mikrostrukturen eingestellt (zwei Extremzustände in Abbildung 3) und anschließend anhand von Zugversuchen die Festigkeitseigenschaften bestimmt. Abbildung 2 zeigt die Fließgrenze sowie die berechneten einzelnen Härtungsbeiträge für einen nahezu lamellaren Zustand.

Neben experimentellen und metallographischen Untersuchungen zum Einfluss von Wärmebehandlungen auf die entstehende Morphologie wurde die Wirkung der chemischen Zusammensetzung auf die Härtungsmechanismen und die damit verbundenen Eigenschaftsänderungen analysiert. Das Modell ist in der Lage, in einem großen γ -TiAl-Legierungsbereich die temperaturabhängige Fließgrenze anhand der Mikrostruktur vorherzusagen.

Dr. Maksim Zapara, Eva Augenstein

BIEGEN VON FLACHGLAS IN KLEINEN BIEGERADIEN

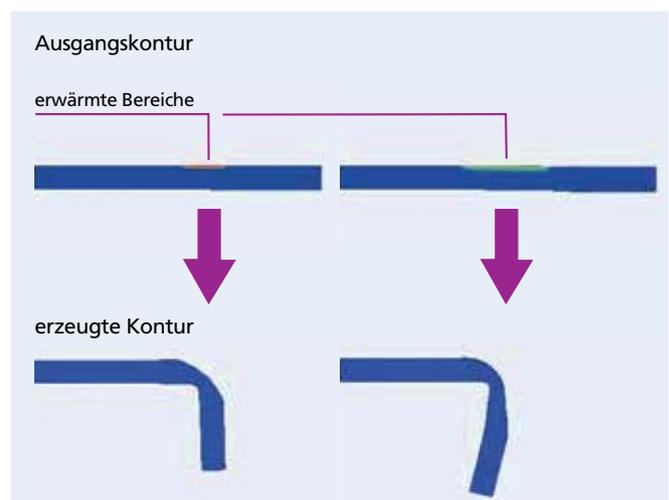
Dreidimensional geformte Glasprodukte, hergestellt aus Flachglas, sind für viele Produktdesigns interessant: von komplex geformten Inneneinrichtungsteilen über technische Oberflächen bis hin zu Anwendungen im Automobil. Mit den etablierten Formgebungsverfahren der Glasindustrie, dem Schwerkraftbiegen und dem Pressbiegen, lassen sich eine Vielzahl gewünschter Formen herstellen. Es gibt jedoch fertigungstechnische Grenzen: So lassen sich mit den genannten Biegeverfahren beispielsweise mit 4 mm dicken Gläsern Biegeradien nur bis zu einem minimalen Radius von 50 mm realisieren. Mit dem am Fraunhofer IWM entwickelten Verfahren sind hingegen bei gleicher Glasdicke Biegeradien bis zu unter 5 mm möglich. Mit diesem Glasbiegeverfahren sind stark akzentuierte Konturen darstellbar, beispielsweise mit scharf gebogenen Ecken.

Qualitätsoptimierung mit lokaler Erwärmung

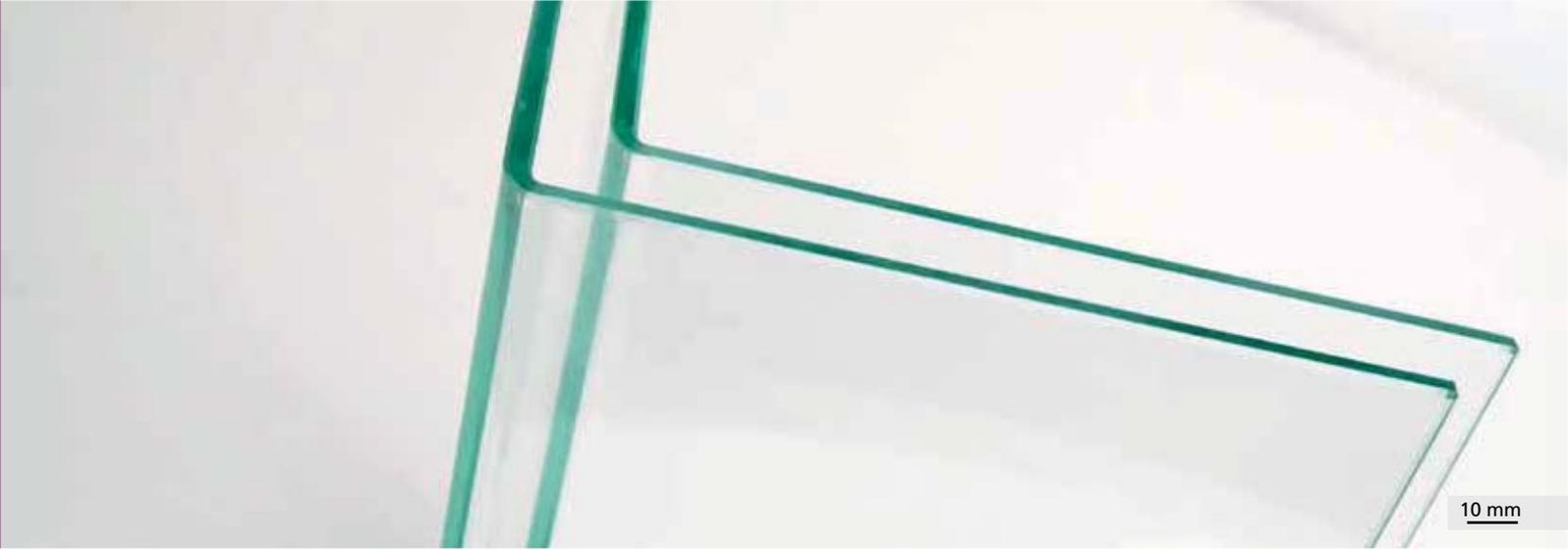
Die Herausforderung beim Flachglasbiegen besteht darin, das Glas entsprechend der gewünschten Kontur zu verformen, ohne dabei störende Abdrücke von Werkzeugkanten oder Kontaktmedien an der Oberfläche einzubringen. Außerdem soll sich die Materialstärke nur in geringem Maße ändern. Die üblichen Biegeverfahren erwärmen das Glas vollflächig auf Temperaturen, die eine Formgebung erlauben. Diese Temperatur liegt bei Kalk-Natron-Gläsern typischerweise um die 600 °C. Die vollflächige Erwärmung wirkt sich nachteilig auf die Ebenheit der in der Zielkontur ebenen Bereiche aus. Außerdem ist die Glasoberfläche an im Prozess genutzten Auflagen auf Druck belastet, was bei der Erwärmung zu Verformungen führt. Die Folgen daraus sind Welligkeiten sowie Abdrücke der Auflagen.



1 *Im Experiment (links) und in der Simulation (rechts) erzeugter Knick bei 4 mm Glasdicke und einem Biegeradius < 5 mm, jedoch mit Einschnürung.*



2 *Simulation des Biegeprozesses: Das Glas wird im Biegebereich zusätzlich lokal erhitzt – die Breite des Energieeintrags variiert, die Energieeinträge sind identisch.*



3 Zwei mit kleinem Biegeradius um 90° gebogene Flachgläser, Anordnung wie in einer Isolierglasscheibe: 12 mm Abstand.

Vorteilhafter ist es, nur den zu formenden Bereich auf die Biegetemperatur zu erwärmen – die Biegung erfolgt mithilfe der Schwerkraft und ohne Werkzeuge oder Auflagen. So vermeiden wir Abdrücke, und die Ebenheit des Glases außerhalb der Biegebereiche bleibt erhalten. Die lokale Erwärmung lässt sich sehr gut mittels geführter Laserstrahlung in das Glas einbringen. Die Ausgangstemperatur des Glases liegt dabei unter der Biegetemperatur beim klassischen Biegen.

Anhand numerischer Simulationen wird am Fraunhofer IWM das komplexe Materialverhalten untersucht, und es werden Prozessoptimierungen erarbeitet. Die Simulation berücksichtigt unter anderem die temperaturabhängige Viskosität des Glases, Temperaturübergänge von und zur Umgebung, den Energieeintrag durch den Laser sowie Wärmefluss innerhalb des Glases. Dadurch ist es möglich, auf einfache Weise den Einfluss von unterschiedlichen zeitlich und örtlich variablen Prozessparametern zu untersuchen und die Zahl der notwendigen Versuche zur Ermittlung der Prozessparameter deutlich zu reduzieren.

Verbundsicherheitsglas – mit kleinsten Biegeradien

Ein Fraunhofer-internes Förderprojekt hat zum Ziel, stark geknickte Glasscheiben herzustellen, die im Anschluss mit einem zweiten ebenfalls in passgenauer Geometrie geformten Glas laminiert werden. Dabei werden Gläser in 2 bis 4 mm Stärke eingesetzt, sodass der resultierende VSG-Aufbau etwa 5 bis 9 mm Dicke erhält. In ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass mit dem Verfahren des Fraunhofer IWM scharfe 90°-Winkel sogar mit geringeren Biegeradien als 5 mm herstellbar sind (Abbildung 1).

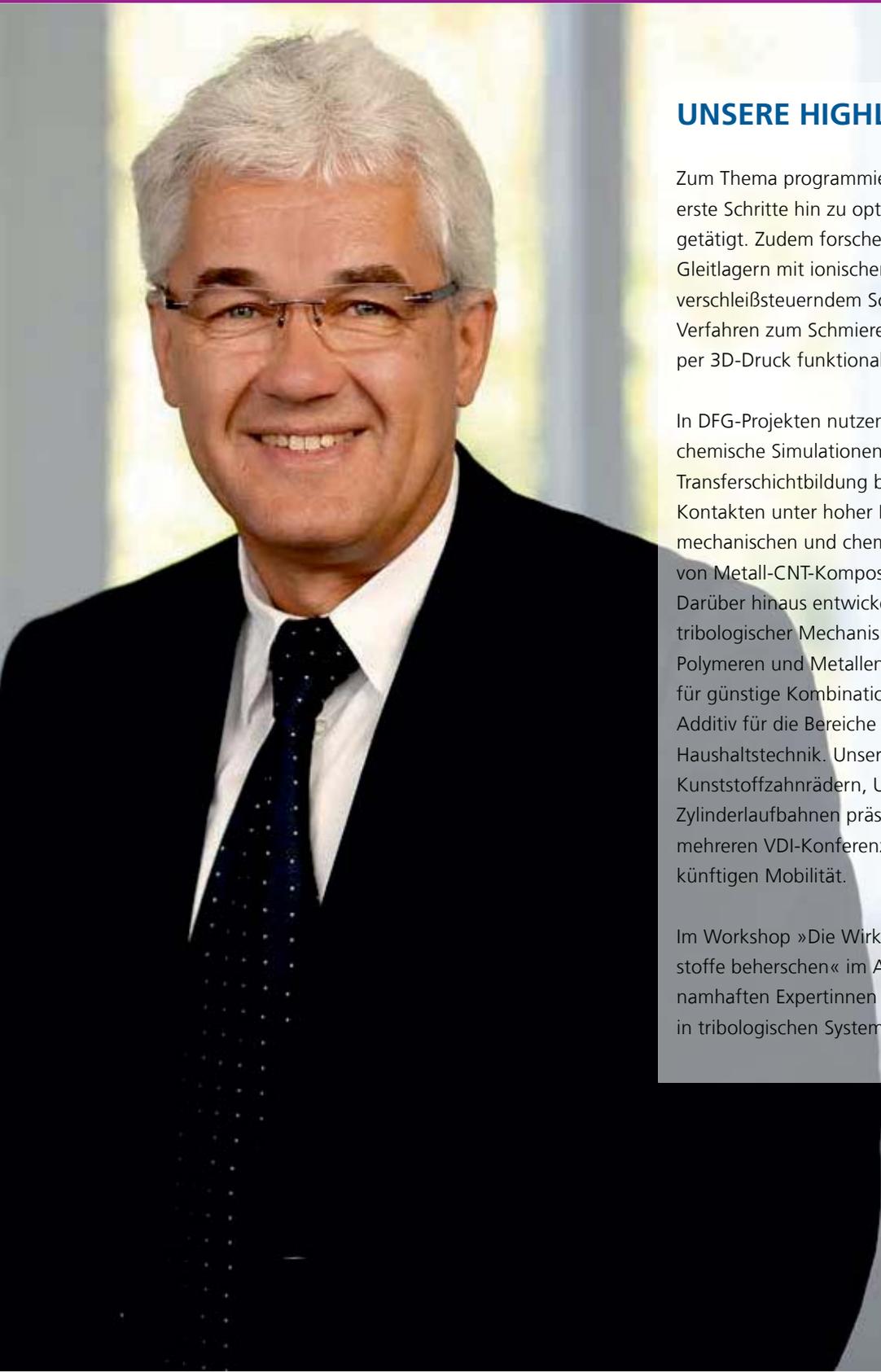
Die Herausforderungen liegen in der exakten Prozesssteuerung im Glasbiegeofen. Die geometrischen Ausmaße der zusätzlich per Laser erwärmten Biegezone bestimmen den Biegeradius und die Prozesszeit. Eine zu lange Erwärmung führt im späteren Verlauf des Prozesses zum Einschnüren des unter Schwerkraft umgeformten Glases (Abbildung 1). Mithilfe von Simulationsmodellen werden die Mechanismen des Materialverhaltens untersucht und wichtige Prozessgrößen wie Wärmeeintrag, Temperatur als auch Dauer der Wärme-einbringung abgeleitet und optimiert (Abbildung 2). Die in kleinen Biegeradien gebogenen Einzelscheiben (Abbildung 3) werden bei unserem Partner, dem Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP weiterverarbeitet: Es entstehen Verbundsicherheitsgläser, die für den Einsatz in Gebäuden im Überkopfbereich eingesetzt werden können. Zusätzlich ist eine Funktionalisierung der Lamine vorgesehen: Durch einlamierte Solarzellen entstehen gebäudeintegrierbare Glas-Glas-Solarmodule.

Die gebogenen Gläser eignen sich ebenso zur Herstellung neuartig geformter Isolierglasscheiben. Auf diese Weise können bruchfreie, geknickte Isoliergläser hergestellt und die Möglichkeiten für Design und Architektur erweitert werden. Die laser-gestützte Glasformgebung ist auch für andere Glasformen und -produkte geeignet und lässt sich anwendungsorientiert in bestehende Prozesse einbinden oder optimal anpassen.

Matthias Gremmelspacher, Tobias Rist

GESCHÄFTSFELDLEITER

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



UNSERE HIGHLIGHTS 2018

Zum Thema programmierbare Materialien haben wir erste Schritte hin zu optisch schaltbaren Materialien getätigt. Zudem forschen wir an galvanisch gekoppelten Gleitlagern mit ionischen Flüssigkeiten als reibungs- und verschleißsteuerndem Schmierstoff. Wir entwickeln ein Verfahren zum Schmieren von Blechen, deren Oberfläche per 3D-Druck funktionalisiert wurde.

In DFG-Projekten nutzen wir atomare und quantenchemische Simulationen, um die Mechanismen der Transferschichtbildung bei graphitgeschmierten Kontakten unter hoher Belastung aufzuklären und die mechanischen und chemischen Aspekte im Tribokontakt von Metall-CNT-Kompositmaterialien zu simulieren. Darüber hinaus entwickeln wir Messtechnik zur Klärung tribologischer Mechanismen bei Reibsystemen aus Polymeren und Metallen. Dies führt zu Empfehlungen für günstige Kombinationen aus Grundpolymer, Öl und Additiv für die Bereiche Automobil, Maschinenbau oder Haushaltstechnik. Unsere Expertise zur Tribologie von Kunststoffzahnradern, Umschlingungsgetrieben oder Zylinderlaufbahnen präsentierten wir in Vorträgen auf mehreren VDI-Konferenzen, unter anderem zur zukünftigen Mobilität.

Im Workshop »Die Wirkung von Wasserstoff auf Werkstoffe beherrschen« im April 2019 diskutieren wir mit namhaften Expertinnen und Experten über Wasserstoff in tribologischen Systemen (siehe Seite 51).

GRUPPEN



VERSCHLEISSSCHUTZ, TECHNISCHE KERAMIK

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

Dr. Andreas Kailer | andreas.kailer@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



POLYMERTRIBOLOGIE UND BIOMEDIZINISCHE MATERIALIEN

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

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



TRIBOLOGISCHE UND FUNKTIONALE SCHICHTSYSTEME

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

Bernhard Blug | bernhard.blug@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.

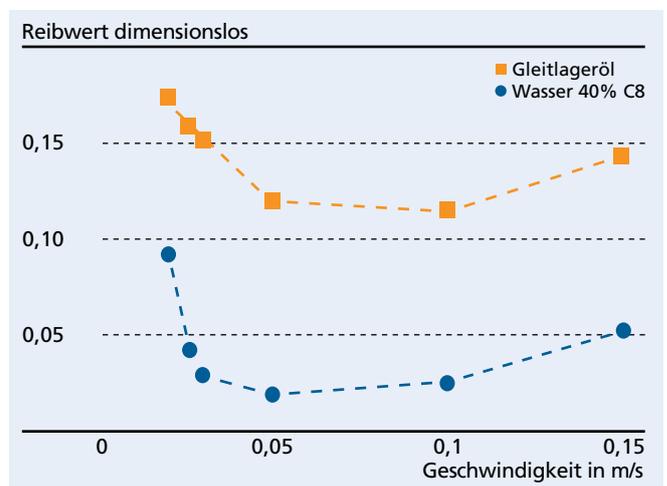
Prof. Dr. Matthias Scherge | matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de

BIOLOGISCH INSPIRIERTE, UMWELTFREUNDLICHE SCHMIERSTOFFE AUF WASSERBASIS

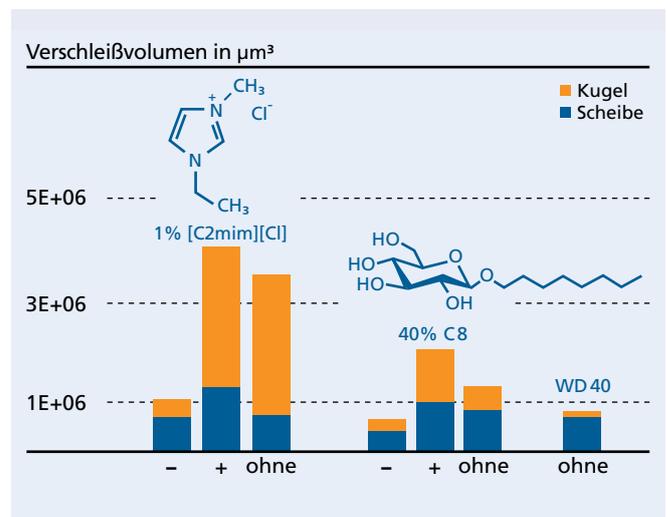
Reibung und Verschleiß verursachen weltweit Kosten von 250 Milliarden Euro und Emissionen von 8 120 Megatonnen CO₂ im Jahr. Nach heutigem Stand der Technik werden spezielle, auf die jeweiligen Anforderungen abgestimmte Schmierstoffe auf Mineralölbasis eingesetzt. Beispiele hierfür sind vielfältig eingesetzte Motor- und Getriebeöle. In Deutschland werden pro Jahr zirka 1 000 000 Tonnen Schmierstoffe verbraucht. Diese große Schmierstoffmenge ist mit erheblichen Belastungen für die Umwelt und mit hohen Kosten bei der Förderung, Herstellung und Entsorgung verbunden. Die Forschung des Fraunhofer IWM hat zum Ziel, Schmierstoffe auf Mineralölbasis durch wasserbasierte Schmierstoffe zu substituieren. Damit sollen niedrigere Reibungs- und Verschleißwerte realisiert werden. Das Ziel ist, den Einsatz umweltschädlicher Schmierstoffe zu verringern und zu effizienter Energienutzung und Nachhaltigkeit beizutragen.

Wasserschmierung millionenfach in Gleitlagern

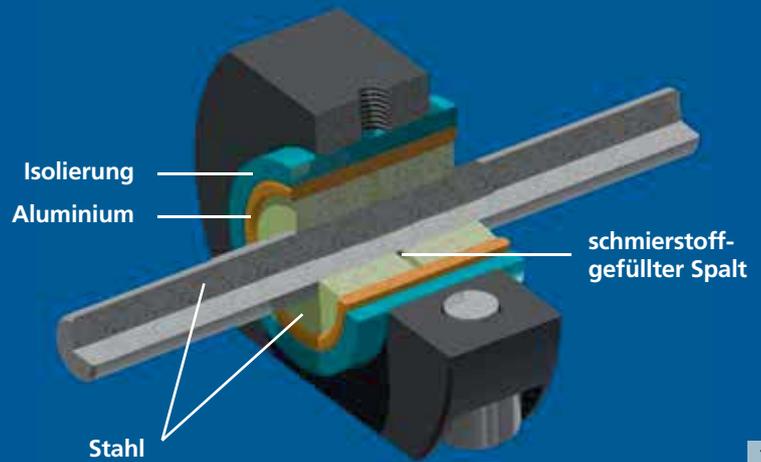
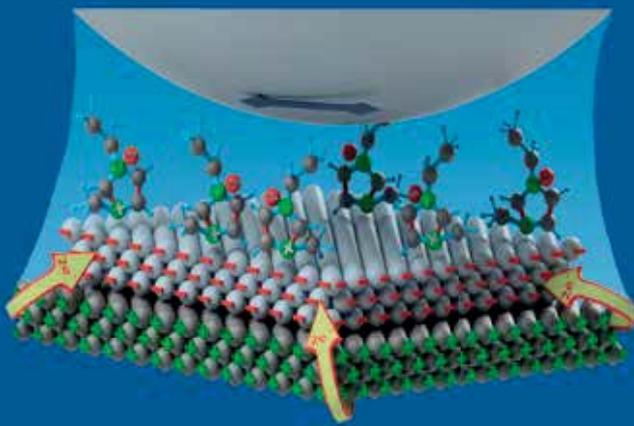
Im Anwendungsfokus stehen Gleitlager, da diese millionenfach in Elektromotoren und in der Feinwerktechnik eingesetzt werden. Als industrielle KMU-Projektpartner fungierten die Schmierstoffspezialisten der Dr. Tillwich GmbH Werner Stehr und die lolitec GmbH als Hersteller spezieller oberflächenaktiver ionischer Flüssigkeiten (ILs). In enger Kooperation mit der Universität Freiburg (IMTEK) wurden die grundlegenden Mechanismen und Wirkungen der wasserbasierten Schmierung untersucht. Das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg finanzierte dazu zwei aufeinander aufbauende Projekte. Zunächst wurden Grundlagen der Wasserschmierung erarbeitet, um die Realisierbarkeit in Anwendungen abzuschätzen. Dazu wurden spezielle oberflächenaktive Substanzen identifiziert, die sich als Additiv im Wasser eignen. Im Nachfolgeprojekt wurden die zuvor identifizierten Substanzen anwendungsnah an einem selbstentwickelten Tribometer für Radialgleitlager untersucht.



1 Reibwertermittlung. Nachweis der Reibwertreduzierung mit wasserbasiertem Schmierstoff im Vergleich zu einem Gleitlageröl in einem oszillierenden Modellreibversuch.



2 Verschleißbestimmung: Nachweis der Verschleißreduzierung mit wasserbasierten Schmierstoffen bei kathodisch induziertem Potenzial im Vergleich zu einem Gleitlageröl.



3 Galvanisch gesteuerte Anlagerung von Schmierstoffadditiven im Reibkontakt (links), ein Gleitlagerdesign mit galvanischer Kopplung (rechts).

Tribochemie und Korrosionsschutz

Die Nachteile von Wasser als Schmierstoff bestehen in der geringen Viskosität und hohen Korrosivität. Der innovative Lösungsansatz bestand daher in der kombinierten Verwendung von speziell additiviertem Wasser mit galvanisch induzierten elektrochemischen Potenzialen. Kernidee bei ersterem ist die Nutzung der tribologischen Wirkung oberflächenaktiver Fluide mit richtungsabhängigen Eigenschaften, die in Belastungsrichtung eine hohe, in Reibrichtung jedoch eine sehr niedrige Viskosität aufweisen. Dazu kommen Substanzen zum Einsatz, die unter Scherbedingungen eine flüssigkristalline Ordnung in der wässrigen Flüssigkeit annehmen (lyotrope Orientierung). Bei der galvanischen Induktion können korrosive Reaktionen, wie Oxidation, vermieden werden. Ein solches Potenzial wird auf einer Stahloberfläche beispielsweise durch Kopplung mit Aluminium in einem elektrisch leitfähigen wässrigen Medium erzeugt.

Die molekulare Wechselwirkung der Schmierstoffadditive mit der Oberfläche wird zusätzlich durch die induzierten Potenziale gesteuert. Dadurch lassen sich möglichst günstige Reibungs- und Verschleißbedingungen einstellen (Abbildung 3 links). Durch die Anlagerung der Moleküle auf der Stahloberfläche wird Verschleiß reduziert. Durch eine spezifische Molekülorientierung wird der Scherwiderstand in Gleitrichtung verringert.

Diese Oberflächeninteraktionen wurden mit einem Atomaren Kraftmikroskop AFM auf Nanoebene analysiert, um geeignete Zusatzmittel für Wasser zu identifizieren. Die gefundenen Zusatzmittel wurden tribologisch bei unterschiedlichen elektrochemischen Potenzialen untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Gleitlagerprüfstand mit einer galvanisch gekoppelten Lagerung entwickelt, um anwendungsnahe Prüfungen durchzuführen (Abbildung 3 rechts).

Additive mit höchster Energieeffizienz

Bei Reibversuchen mit oszillierender Gleitbeanspruchung wurden bei der Mischung von Wasser mit 40 Prozent nichtionischen Tensiden auf Zuckerbasis (Alkylpolyglucoside, C8) deutlich niedrigere Reibwerte als mit einem in der Praxis eingesetzten Gleitlageröl realisiert (Abbildung 1). Besonders wichtig bei der Anwendung im Gleitlager ist die Reduktion der Reibung über einen weiten Geschwindigkeitsbereich – sie wurde mit den verwendeten wasserbasierten Schmierstoffen deutlich nachgewiesen.

Beim Vergleich der Verschleißwerte wird die Effektivität der galvanischen Kopplung deutlich: Bei der Verwendung einer 40 Prozent C8 und 1 Prozent ionischen Flüssigkeit ([C2mim][Cl]) wird bei kathodischem Potenzial geringerer und bei anodischem Potenzial höherer Verschleiß als bei einer nicht polarisierten Probe erzeugt (Abbildung 2). Dadurch wird ein ähnlich geringer Verschleiß erzielt wie mit einem vollständig additivierten Gleitlageröl.

Entwicklung gebrauchsfähiger wasserbasierter Schmierstoffe

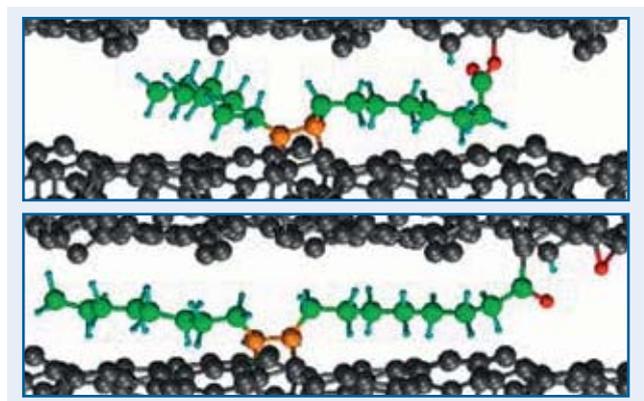
Die anwendungsnahe Gleitlagerprüfung mit den wasserbasierten Fluiden hat vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Jetzt müssen aus diesen Fluiden vollständig additivierte Schmierstoffe entwickelt werden. Dazu ist ein Kooperationsprojekt mit den genannten Partnern beantragt. Zusätzlich besteht durch die Entwicklung des Gleitlagerprüfstands mit kontinuierlicher Verschleißmessung die Möglichkeit, direkt für Industriekunden tribologische Untersuchungen durchzuführen.

Dr. Tobias Amann, Dr. Andreas Kailer

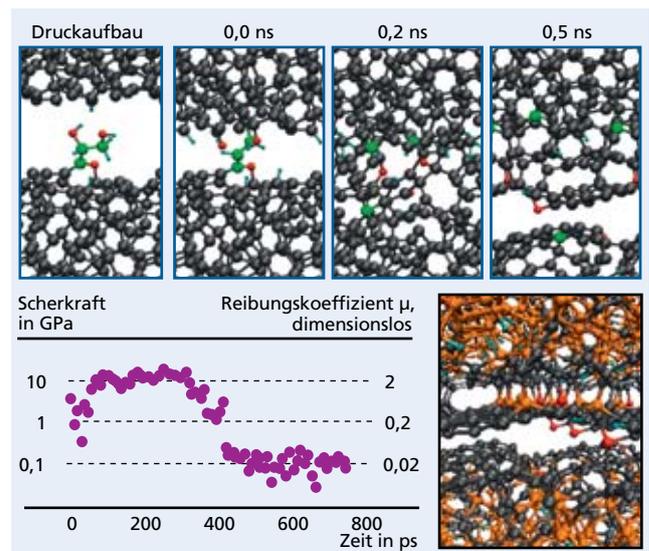
CO₂-REDUKTION DURCH SUPRASCHMIERUNG: DESIGNREGELN FÜR SCHMIERSTOFFE GEFUNDEN

Minimierung von Reibung ist eine Grundvoraussetzung für nachhaltige Mobilität. Würde beispielsweise die Reibung in Personenkraftwagen auf superkleine Werte reduziert (Reibungskoeffizient $\mu < 0,01$), könnte der Kraftstoffverbrauch um 61 Prozent und die jährlichen globalen CO₂-Emissionen um fast eine Milliarde Tonnen gesenkt werden. Die Beschichtung von tribologischen Oberflächen mit diamantähnlichem Kohlenstoff (DLC) stellt in diesem Zusammenhang eine wichtige Maßnahme zur Reibungsreduktion dar. Insbesondere wasserstofffreier DLC (tetraedrischer amorpher Kohlenstoff, ta-C) hat in der Automobilindustrie große Aufmerksamkeit auf sich gezogen. In Grenzreibungsexperimenten zeigten ta-C-Beschichtungen eine überlegene tribologische Leistungsfähigkeit im Vergleich zu hydriertem DLC (a-C:H). So wurde in Stift-Scheibe-Experimenten von a-C:H/a-C:H-Paarungen, die mit einer Mischung von Polyalphaolefinen und Glycerin-Monooleat geschmiert wurden, $\mu > 0,12$ gemessen, während sich bei ta-C / ta-C-Paarungen unter denselben Bedingungen $\mu = 0,03$ ergab. Derartige Grundlagenexperimente haben ein beträchtliches industrielles Interesse an der Schmierung von ta-C-Beschichtungen mit organischen Schmierstoffen hervorgerufen.

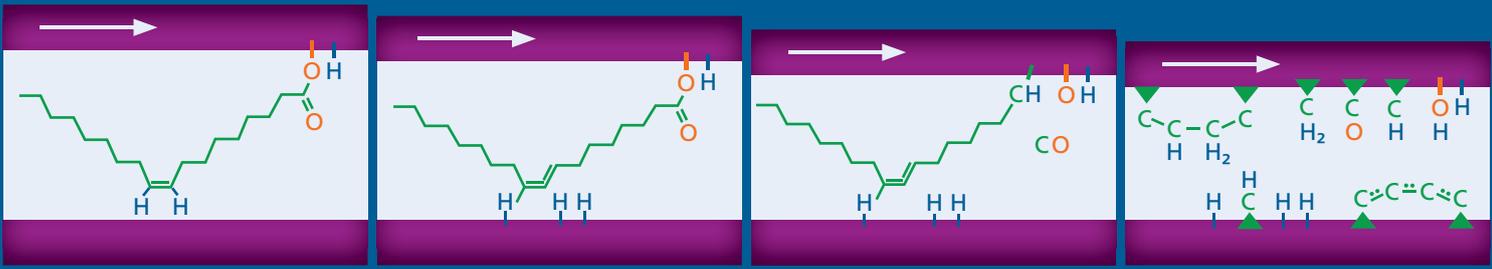
Neue Experimente mit ungesättigten Fettsäuren (zum Beispiel Ölsäure) oder polyhydrischen Alkoholen (zum Beispiel Glycerin) zwischen ta-C-Oberflächen weisen den Weg zur Supraschmierung ($\mu \sim 0,005$). Begleitende spektroskopische Charakterisierungen liefern Hinweise auf die Fragmentierung der Schmierstoffmoleküle, die Passivierung von ta-C mit Wasserstoff und Hydroxylgruppen sowie auf die Bildung atomar dünner aromatischer Kohlenstoffstrukturen. Damit werden die beiden ta-C-Reibpartner innert und atomar glatt, was die extreme Reibreduktion erklärt.



1 Ölsäure chemisorbiert auf 2 ta-C Reibpartnern (oben), gefolgt von der mechano-chemischen Abspaltung eines Hydroxyls, das als H- und Epoxygruppe auf ta-C verbleibt (unten).



2 Zerlegung eines Glycerinmoleküls (oben) führt zu niedriger Reibung (unten links) infolge der Aromatisierung der Oberflächen (unten rechts).



3 Schemazeichnung zur Erklärung der Supraschmierung (von links nach rechts): Zerlegung von Ölsäure in H-, OH-, Epoxy- und Ketogruppen sowie aromatische Bereiche passivieren die ta-C-Oberflächen.

Was fördert die Supraschmierung?

Trotz dieser wichtigen experimentellen Untersuchungen zu den strukturellen Details der Schmiermechanismen bleiben die tribochemischen Prozesse, die der Fragmentierung des Schmiermittels und der Bildung von passivierenden funktionellen Gruppen auf ta-C zugrunde liegen, im Dunkeln. Noch weniger ist darüber bekannt, wie funktionelle Gruppen die Superschlammierung fördern. Dieser Mangel an Verständnis macht es derzeit noch unmöglich, geeignete Schmiermittel ohne zahlreiche heuristische Experimente systematisch zu entwickeln.

Im Rahmen des BMWi-Projekts »Pegasus II« galt es, mittels atomistischer Simulation zu klären, wie der optimale Schmierstoff zur Schmierung von ta-C aufgebaut sein muss. Hierzu wurden quantenchemische Molekulardynamiksimulationen von ungesättigten Fettsäuren und Glycerol zwischen zwei ta-C-Oberflächen durchgeführt (Abbildung 1 und 2). Es stellte sich heraus, dass sich diese multizentrischen Moleküle (eine COOH-Gruppe und eine C=C-Gruppe bei der Ölsäure beziehungsweise 3 Hydroxylgruppen beim Glycerol) über ihre funktionellen Gruppen an beiden Reibpartnern chemisch verankern (Abbildung 1 oben) und dann so während des Gleitens unter Zugspannung gesetzt werden. Diese mechano-chemische Belastungssituation führt zur vollständigen Zerlegung der Moleküle und damit zur Freisetzung passivierender O- und H-Atome. Für Glycerol konnte auf den sehr kurzen Simulationszeitskalen sogar die Bildung aromatischer Terminierungen und Supraschlammierung beobachtet werden (Abbildung 2). Dabei wird das Glycerol schon zu Beginn der Simulation vollständig zerlegt, was zu einer anfänglichen Kaltverschweißung der Reibpartner führt (siehe Abbildung 2 oben zum Zeitpunkt 0,2 ns). Kommt es während der mechanischen Durchmischung des durch das Glycerol eingebrachten Sauerstoffs zu dessen räumlicher

Konzentration, so bildet sich ein Scherband aus, das die Aromatisierung der Oberflächen begünstigt (Abbildung 2 oben zum Zeitpunkt 0,5 ns). Der anfänglich hohe Reibwert (Abbildung 2 unten links) sinkt infolge der Bildung zweier graphen-ähnlichen Oberflächenterminierungen stark ab. Analoge Simulationen mit Alkanen oder gesättigten Fettsäuren zeigen diese mechano-chemischen Prozesse nicht, weil in diesen Molekülen nicht genügend funktionelle Ankergruppen zur Verfügung stehen. In diesem Fall lagert der Schmierstoff nur auf eine Oberfläche an und bildet einen molekularen Flaum, der zwar auch Reibung reduziert – allerdings nicht auf Supraschlammniveaue.

Chemische und aromatische Oberflächenpassivierung

Diese Simulationen machen deutlich, dass chemische und aromatische Oberflächenpassivierungen für die Superschlammierung verantwortlich sind (Abbildung 3). Beide erfordern, dass der Schmierstoff mehrere Reaktivzentren besitzen muss, die dessen mechano-chemische Fragmentierung bewirken. Diese Designregel ist nicht auf Ölsäure und Glycerol beschränkt, sondern sollte auf andere Schmiermittel übertragbar sein, zum Beispiel Glycerol-Monooleat (mit vier reaktiven Zentren: zwei Hydroxyl-, einem Carboxyl- und einer Doppelbindungsgruppe). Daher ermöglichen unsere Ergebnisse nicht nur die Vorhersage der tribologischen Eigenschaften von ta-C, die mit verschiedenen Molekültypen geschmiert werden, sondern liefern auch Richtlinien für das Design neuartiger organischer Reibungsmodifizierer, die die Bildung von supraschlammierenden Schichten auf kohlenstoffbasierten Materialien fördern. Die Ergebnisse präsentiert ein Artikel in Nature Communications 10 (2019), DOI 10.1038/s41467-018-08042-8.

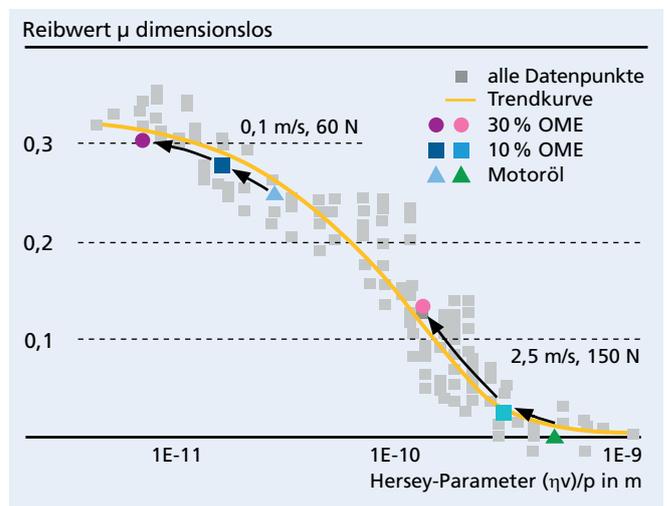
Dr. Gianpietro Moras, Prof. Dr. Michael Moseler

CHARAKTERISIERUNG DER EINFLÜSSE REGENERATIVER KRAFTSTOFFE AUF DIE TRIBOLOGIE VON MOTORKOMPONENTEN

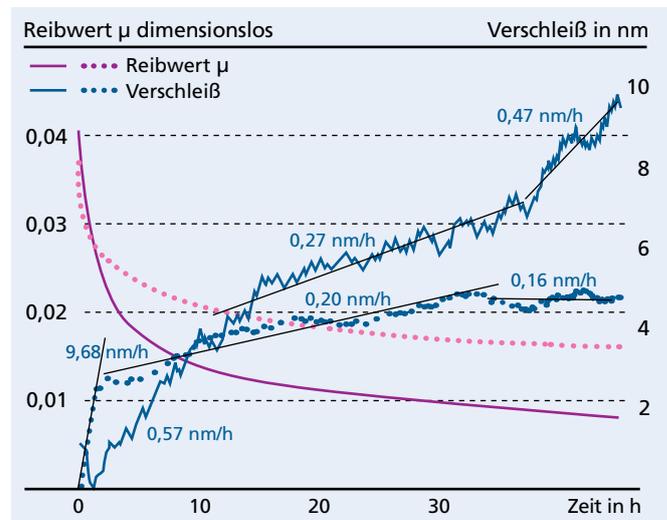
Durch Emissionsprobleme und durch das Aufkommen elektrischer Antriebe geraten Verbrennungsmotoren als Antrieb immer stärker unter Druck. In einigen europäischen Ländern wurde bereits ein Datum, nach dem Verbrennungsmotoren verboten werden sollen, festgelegt. Trotz des Trends zur Elektromobilität werden Verbrennungsmotoren aber weiterhin wichtig bleiben und noch lange im Einsatz sein, insbesondere im Transportbereich (LKW, Schiffe). Klimaschonende, synthetisch erzeugte Kraftstoffe, welche aus CO₂ und Wasserstoff mit regenerativ erzeugtem Strom gewonnen werden sollen, könnten den Verbrennungsmotor »retten«. Dies wirft jedoch die Frage nach der Kompatibilität der vorhandenen Motor-komponenten mit einer erhöhten oxidativen Wirkung einiger regenerativer Kraftstoffe auf. Neben dem kraftstoffführenden System muss insbesondere der Brennraum aufgrund des erhöhten Temperaturniveaus und der Kraftstoffverschmutzung des Schmieröls hinsichtlich einer möglichen korrosiven Beeinflussung betrachtet werden. Als Teil der von der Fraunhofer-Gesellschaft und dem Land Baden-Württemberg geförderten »Profilregion Mobilitätssysteme Karlsruhe« wurden die tribologischen Auswirkungen einer Verdünnung des Schmierstoffs durch Oxymethylenether (OME) untersucht und mögliche korrosive Effekte auf das System mit oberflächenanalytischen Methoden ermittelt.

Die Reibung bestimmen hauptsächlich Viskositätseffekte

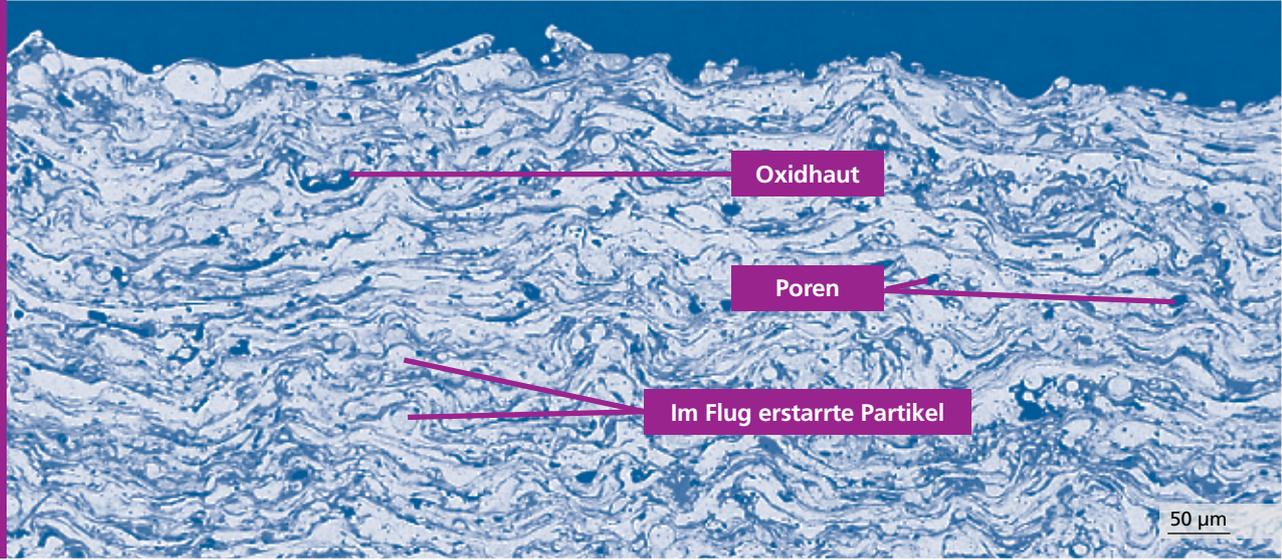
Um im Vorfeld von kostenintensiven motorischen Erprobungen zunächst die tribologischen Eigenschaften zu betrachten, wurden Tribometer-Tests mit unterschiedlichen OME-Konzentrationen in einem kommerziell verwendeten Motoröl durchgeführt. Die Öl-Kraftstoff-Mischungen enthielten 10, 20, 30 oder 50 Volumenprozent OME. Das Stiftmaterial für die tribologischen Experimente wurde speziell ausgewählt, um



1 Stribeck-Diagramm des Reibungskoeffizienten als Funktion von Last, Gleitgeschwindigkeit und Viskosität.



2 Reibwerte und Verschleiß der Eisenspritzschicht als Funktion der Prüfzeit für unverdünntes Motoröl (gestrichelt) und für Öl mit 20 % OME-Verdünnung (durchgezogene Linie).



3 Lichtmikroskopische Aufnahme der Mikrostruktur der in den tribologischen Experimenten eingesetzten Eisenspritzschicht.

einen DLC-beschichteten Kolbenring darzustellen, während das Scheibenmaterial eine moderne Zylinderlaufbuchsenoberfläche eines Verbrennungsmotors darstellen sollte. Die für das Scheibenmaterial auf Grauguss (EN-GJL-250) aufgebraute Spritzschicht wurde aus einem kohlenstoffarmen Stahl (EN 10016-2) abgeschieden und hatte nach der Abscheidung eine Dicke von bis zu 500 µm. Die wasserstoffhaltige PACVD DLC-Beschichtung wurde von der Gruppe »Tribologische und funktionale Schichtsysteme« beigesteuert. Zur Quantifizierung des Verschleißes im Modellsystem »DLC-thermische Spritzschicht« wurde die Radionuklidtechnik (RNT) eingesetzt, und so wurden die Verschleißraten der Spritzschicht hochaufgelöst in Echtzeit bestimmt.

Der Einfluss der OME-Verdünnung des Öls auf die Reibung lässt sich primär auf Viskositätseffekte zurückführen. Durch die Beimischung von OME wird die Viskosität reduziert und damit die Tragfähigkeit des Schmierfilms abgesenkt (siehe Abbildung 1). Weil sich bei hohen OME-Konzentrationen das Tribosystem in der Mischreibung aufhält, steigt der Reibwert mit zunehmender OME-Verdünnung an. Außerdem kann auch ein erhöhter Verschleiß der DLC-Schicht nach Versuchsende festgestellt werden. Die Echtzeit-Verschleißdaten der Eisenspritzschicht zeigen ebenfalls erhöhte Verschleißraten, allerdings verhält sich die Spritzschicht relativ gutmütig und kann als unkritisch eingeschätzt werden. Auf dem Gegenkörper können bei hohen OME-Verdünnung allerdings erste Anzeichen von abrasivem Verschleiß beobachtet werden, was auf den höheren Grenzreibungsanteil zurückzuführen ist.

Keine korrosive Wirkung von OME

Um zu untersuchen, ob der erhöhte Sauerstoffgehalt des OME zu einer erhöhten Tribokorrosion führt, wurde mittels Rönt-

genphotoelektronenspektroskopie (XPS) in den Reibspuren, die mit reinem Motoröl und unter OME-Anteil gefahren wurden, oberflächennahe Tiefenprofile gemessen. In allen Reibspuren konnte unabhängig vom OME-Gehalt im Schmiermittel ein vergleichbarer Verlauf der Sauerstoffkonzentration detektiert werden. Dies ist in guter Übereinstimmung mit den bestimmten Verschleißraten, welche bei einem korrosiven Einfluss der OME-Verdünnung deutlich ansteigen müssten. Somit ist von keiner korrosiven Wirkung von OME bei diesem Tribosystem auszugehen.

Des Weiteren liegt eine Korrelation zwischen der Sauerstoffkonzentration und der Konzentration der Additive bei einer Tiefe von über 30 nm vor. Bei größer werdender OME-Konzentration werden zunehmend Oxide von bestimmten Additivelementen, nämlich Ca, Zn und P, registriert, welche gleichzeitig auch zum Anstieg der Sauerstoffkonzentration bei größeren Sputtertiefen führten. Zusammenfassend konnte durch oberflächenchemische Analysen keine Korrosion der Stahlspritzschicht nachgewiesen werden, sodass der Einsatz von OME als Kraftstoff sinnvoll erscheint. Eine Anpassung des Additivpakets auf neue regenerative Kraftstoffe ist dennoch zu empfehlen. Somit kann die hier erprobte Paarung von a-C:H-beschichteter Stift im Kontakt mit einer Eisenspritzschicht als aussichtsreiches Tribosystem für einen motorischen Betrieb mit OME gesehen und sollte in motorischen Versuchen genauer geprüft werden.

Prof. Dr. Martin Dienwiebel

TRIBOCHARAKTERISIERUNG VON SCHMIERSTOFFEN UND THERMOPLASTEN

Tribologisch belastete Komponenten werden im Maschinen- und Automobilbau zunehmend aus Thermoplasten gefertigt, da sie leichter sind und ruhiger laufen können als Metallkomponenten. Für eine Bewertung des tribologischen Einsatzverhaltens und der Zuverlässigkeit der Bauteile muss die Wechselwirkung von Schmierstoff und Kunststoff berücksichtigt werden. Reibung und Verschleiß geschmierter Systeme mit Kunststoffkomponenten zeigen häufig ein unerwartetes Verhalten.

Übergang von der Haft- zur Gleitreibung

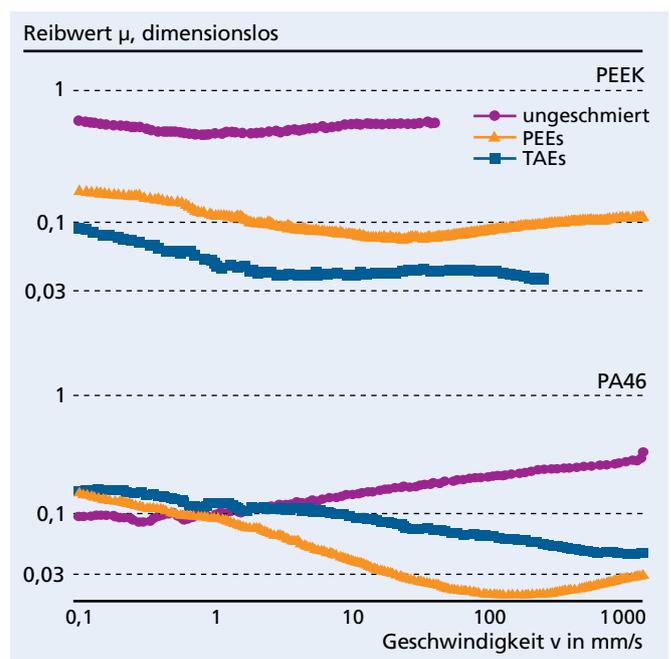
Im Bereich der »Grenzreibung«, bei geringen Geschwindigkeiten und hohen Pressungen, prägen physikalisch-chemische Wechselwirkungen die Tribologie. Versuche zum Verhalten eines Tribosystems in der »Grenzreibung« geben zum einen wichtige Hinweise zu dessen Einsatzverhalten, zum anderen dienen sie gewissermaßen als »Sonde«, mit der man die Wechselwirkung des Schmierstoffs mit den Reibpartnern untersuchen kann. Wir haben den Übergang von der Haft- zur Gleitreibung verschiedener geschmierter Thermoplast-Stahl-Systeme in einer Tribometerzelle eines Rheometers untersucht und den Verlauf des Reibwerts für diese Systeme, beginnend bei sehr geringen Gleitgeschwindigkeiten, über einen weiten Geschwindigkeitsbereich bis in die Mischreibung ermittelt.

Vorhersage tribologischer System-Eigenschaften durch Ober- und Grenzflächenenergien

Die Ober- und Grenzflächenenergien der Reibpartner, ermittelt aus Kontaktwinkelmessungen, haben sich als hilfreich für eine erste Vorhersage des tribologischen Verhaltens erwiesen: Die Reibpartner Polyether-Ether-Keton (PEEK) und Stahl bilden mit den Schmierstoffen Trimellitsäureesteröl (TAEs) und Pentaerythritester (PEEs) spreitende Systeme: Hier

ist es energetisch günstiger, wenn der Schmierstoff zwischen Polymer und Stahl dringt. Je höher der Energiegewinn ausfällt, desto geringer ist der Reibwert – das gilt in diesem Fall für den Schmierstoff PEE (Abbildung 1 oben). Um diese Korrelation zu bestätigen, verglichen wir bei geringen Gleitgeschwindigkeiten die beiden nicht-spreitenden tribologischen Systeme Polyamid 46 (PA46) auf Stahl mit TAEs und PEEs. Dabei lieferte das System mit TAE und nicht PEE die bessere Energiebilanz und erwartungsgemäß den geringeren Reibwert (Abbildung 1 unten). Somit ermöglichen Kontaktwinkelmessungen eine effiziente Vorauswahl von Reibpartnern und Schmierstoffen für weiterführende, aufwändigere Versuche.

Dr. Christof Koplin, Dr. Raimund Jaeger



1 Stribeck-Kurven für die Thermoplasten PEEK und PA46 in Kontakt mit Stahl, ungeschmiert sowie geschmiert mit TAEs und PEEs.

BAUTEILSCHÄDIGUNGEN DURCH WASSERSTOFFDIFFUSION

Im Zuge der wachsenden Bedeutung von Power-to-Gas und Brennstoffzellenanwendungen müssen oftmals metallische Bauteile vor Wasserstoffversprödung geschützt werden. Beispiele sind Bipolarplatten in SOFC- Brennstoffzellen, die korrosiven Sauer- und Wasserstoffatmosphären ausgesetzt sind, sowie wasserstoffinduzierte, lebensdauerbegrenzende »white etching cracks« in Lagern von Windkraftturbinen. Eine Möglichkeit, um Strukturbauteile vor Wasserstoff zu schützen, ist die derartige Applikation dünner Schichten auf PVD-Basis. Um im Zuge der Schichtentwicklung deren Barriereigenschaften messen und vergleichend bewerten zu können, wurde ein Gaspermeationsprüfstand aufgebaut.

Erforschung geeigneter Schichtmaterialien

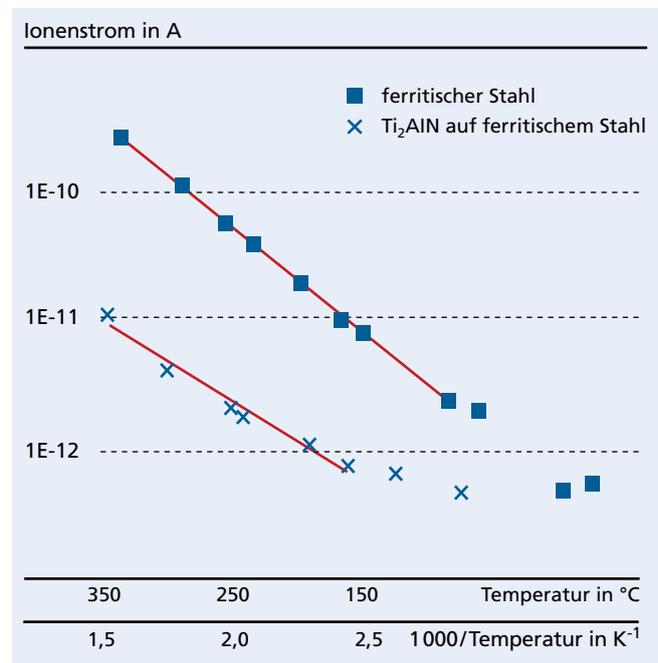
Anhand von Recherchen und atomistischen Simulationen wurden nanolaminare, ternäre Nitride als potenzielle Materialien mit guten Barriereigenschaften identifiziert. Bei diesen »MAX-Phasen«-Materialien wechseln sich atomare Metall- mit Nitrid-Lagen ab. Sie vereinen metallische mit keramischen Eigenschaften und kombinieren gute chemische Beständigkeit mit hoher mechanischer Schadenstoleranz. Ein Vertreter ist Ti_2AlN , zu dessen Abscheidung ein reaktiver Sputterprozess erarbeitet wurde, mit dem sehr phasenreine MAX-Phasen mit kristallografischer Vorzugsorientierung erzeugt werden können.

Aufbau des Permeationsprüfstands

Das zu prüfende Blech wird vakuumdicht als »Membran« zwischen zwei Kammern eingespannt. Auf der Hochdruckseite wird das zu detektierende Gas (Wasserstoff beziehungsweise Deuterium) eingelassen, auf der Niederdruckseite (10^{-8} mbar) werden durch das Blech hindurchdiffundierte Gasmoleküle massenspektrometrisch detektiert. Über einen Heizstrahler kann

die Temperatur des Blechs von Raumtemperatur bis 300 °C variiert werden. Durch die Analyse der Ionenströme werden Rückhalteraten bestimmt (in Abbildung 1 zirka 1,5 Größenordnungen). Damit können Barriereigenschaften von Schichten gegen Wasserstoffdiffusion quantifiziert werden und gezielte Schichtentwicklungen erfolgen.

Dr. Frank Burmeister, Lukas Gröner



1 Gemessene Diffusionsströme von Deuterium: Vergleich der Diffusion durch ein blankes Blech (geschlossene Symbole) mit einem MAX-Phasen-beschichtetem Blech (offene Symbole).

Geschäftsfeld

BAUTEILSICHERHEIT UND LEICHTBAU

GESCHÄFTSFELDLEITER

Dr. Michael Luke

Telefon +49 761 5142-338

michael.luke@iwm.fraunhofer.de



UNSERE HIGHLIGHTS 2018

Im Rahmen der Digitalisierung in der Werkstofftechnik nahmen unsere Beratungen zur Werkstoffdatenanalyse von Metallen, Polymeren, Keramiken und Verbundwerkstoffen zu. Wir lieferten Beiträge zu deterministischen und probabilistischen Werkstoff- und Bauteilsimulationen unter Berücksichtigung von Mikrostrukturmerkmalen, Defekten, Eigenspannungen, Dehnraten und Fügeparametern. Datenlücken konnten wir experimentell sowie mit Simulationen schließen, und wir passten Datensätze für nachfolgende schädigungs- und bruchmechanische Analysen an.

Für mechanisch gefügte Multi-Material-Verbindungen im Leichtbau ermittelten und strukturierten wir Modellparameter für die Crashesimulation aus experimentellen Daten in der Weise, dass damit Auswertungen mithilfe maschinellen Lernens möglich sind. Zudem erweiterten wir Simulationsmodelle zur gekoppelten Beschreibung des elektrischen Kurzschluss- und Crashverhaltens von Batteriezellen für Elektrofahrzeuge und quantifizierten experimentell das mechanische Deformations- und Versagensverhalten von Batteriegehäusen.

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@iwmm.fraunhofer.de



CRASHSICHERHEIT, 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. Dong-Zhi Sun | dong-zhi.sun@iwmm.fraunhofer.de



CRASHDYNAMIK

Deformation und Versagen von Werkstoffen und Bauteilen werden von uns bei Geschwindigkeiten bis hin zu Crash und Impact untersucht. Dazu entwickeln wir Prüf-, Mess- und Analysemethoden für die Optimierung von Leichtbaukomponenten, Sicherheitsbehältern und CAE-Methoden.

Frank Huberth | frank.huberth@iwmm.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@iwmm.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@iwmm.fraunhofer.de



BRUCHMECHANIK, 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@iwmm.fraunhofer.de

MODELLIERUNG DES INSTABILITÄTSVERHALTENS KOMPLEXER STRUKTUREN BEI CRASHBELASTUNG

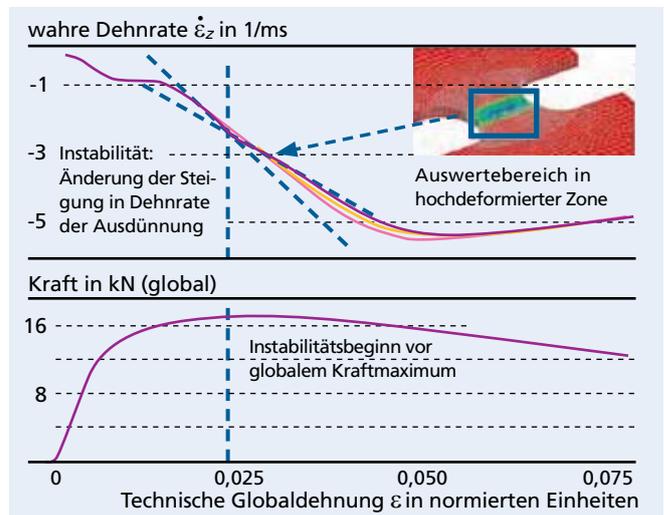
In den letzten Jahren konzentrierte sich die Verbesserung von Crashsimulationen auf spannungszustandsabhängige Versagensmodelle. Jedoch hängt das Materialversagen auch stark vom Instabilitätsverhalten (Dehnungslokalisation) ab. Zudem basiert – aufgrund der limitierten Diskretisierung – die Versagensmodellierung komplexer crashbelasteter Strukturen auf elementgrößenabhängigen Versagensparametern, die an das Instabilitätsverhalten gekoppelt sind. Somit sind detaillierte Untersuchungen zur Instabilitätsmodellierung ein logischer und konsequenter Schritt in der Weiterentwicklung genauerer Simulationsmethoden.

Instabilität und Versagen komplexer Strukturen

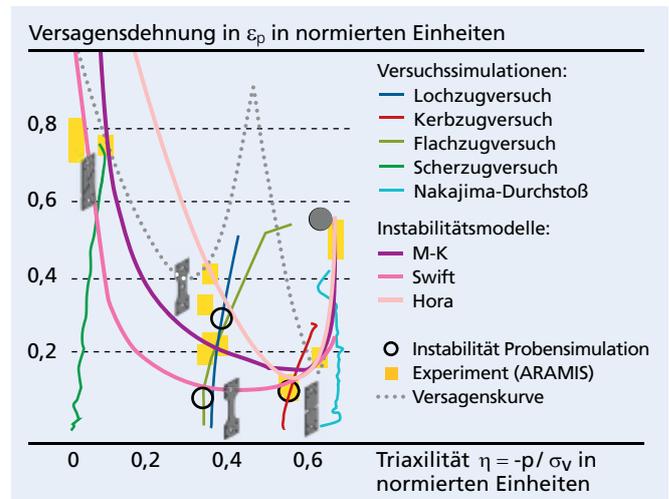
Die bei aufwendigen Simulationen aus Kosten- und Effizienzgründen vorgenommenen Vereinfachungen sollen das Modellgesamtvhalten wenig beeinflussen. Hierfür wird in der Praxis fallweise vorgeschlagen, die Instabilitätskurve als Versagenslimit zu verwenden. Dabei handelt es sich zwar grundsätzlich um unterschiedliche werkstoffmechanische Phänomene, allerdings können die kritisch überlasteten Bereiche bei Überschreiten des Instabilitätslimits oft kaum mehr tragende Funktionen in der Gesamtstruktur übernehmen. Je nach Crashszenario und Materialien wird dadurch das Globalverhalten meist wenig beeinflusst, wobei Abweichungen in den lokalen Versagemustern auftreten können (Abbildung 3).

Einflüsse und Ermittlung der Instabilität auf lokalem Niveau

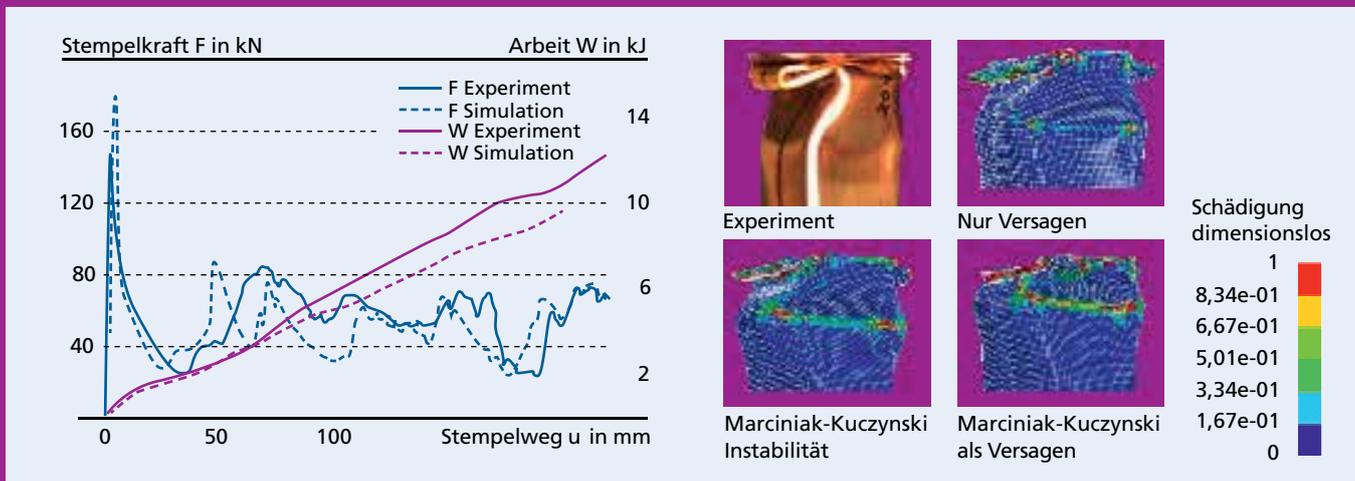
Die Instabilität beziehungsweise Schädigungsprozesse haben bei duktilen Werkstoffen auch einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung lokaler Spannungszustände. Bisher wurden Instabilitätsuntersuchungen primär in der Blechumformung unter geringeren Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt.



1 Exemplarische Simulationsauswertungen zur Instabilitätsmittlung am Kerbzugversuch unter quasistatischer Belastung des hochfesten Dualphasenstahls HCT980X.



2 Vergleich zwischen analytischen Instabilitätsmodellen mit 3D-Probensimulationen, experimentelle Auswertung und Versagenskurve für einen Dualphasenstahl.



3 Vergleich des lokalen Versagensverhaltens und globalen Kraftverlaufs bei Stauchung eines lasergeschweißten Hohlprofils; Simulationen ohne Vordeformationen in Kantenbereichen.

Für Crashanwendungen relevante Wechselwirkungen des Belastungszustands und der Dehnrates auf Instabilität und Schädigung sind kaum systematisch untersucht. Die Instabilitätsmittlung verschiedener Belastungszustände basiert auf der Analyse des gemessenen Dehnungsfeldes oder des Kraftmaximums. Das Schnittlinienverfahren zur experimentellen Instabilitätsbestimmung von Grenzformänderungskurven ist ausschließlich für statische Versuche erprobt und nicht immer eindeutig. Deshalb wurden alternative Auswertungen zur Instabilitätsmittlung auf Basis des Dehnratenfeldes verwendet, die für dynamische Crashbelastungen eher geeignet sind. Am Fraunhofer IWM wurden zeitbasierte Methoden auf Basis der Ausdünnungsrate zur experimentellen Ermittlung der Instabilitätskurve erfolgreich eingesetzt.

Instabilitätsmodellierung und virtuelle Probenversuche

Da das Instabilitätsverhalten experimentell relativ aufwendig zu ermitteln ist, sind effizientere, alternative Methoden zweckmäßig. Dazu können analytische Ansätze (nach Swift, Marciniak-Kuczynski, Hora oder andere) verwendet und mit entsprechenden Probensimulationen verifiziert werden (Abbildung 1), um dadurch das für die untersuchten Werkstoffe bestmögliche analytische Modell zu identifizieren (Abbildung 2). Hierfür sind ausschließlich Fließkurven nötig, weil die Instabilität im Wesentlichen durch das plastische Deformationsverhalten determiniert ist. Da die analytischen Modelle für Umformanwendungen bei entsprechend geringen Dehnraten entwickelt wurden, kann mit den ergänzenden Probensimulationen der Dehnrateneinfluss ebenfalls untersucht werden.

Ein Vergleich experimentell ermittelter Instabilitätsmessungen für Stahlsorten zeigt gute Übereinstimmung mit den Probensimulationen (Abbildung 2). Die ermittelten Instabilitätspunkte

aus den Probensimulationen dienen zur Identifikation des geeignetsten analytischen Instabilitätsmodells. Damit ist das Verhalten über den gesamten Mehrachsigen-, aber auch Dehnratenbereich beschreibbar. Auf Basis der entwickelten Methodik ist es ohne zusätzliche Versuche und mit adäquatem Simulationsaufwand möglich, entsprechende Instabilitätskurven zu berechnen, die auch zur Kalibrierung des Elementgrößeneinflusses verwendbar sind. Es konnte gezeigt werden, dass die Ermittlung des Instabilitätsverhaltens aus den lokalen transienten Entwicklungen der Dehnraten tendenziell besser geeignet ist als die bisher üblichen ortsbezogenen dehnungsbasierten Methoden. Zudem ist die verwendete zeitbasierte Methode der lokalen Dehnratenentwicklung für unterschiedlichste Probengeometrien sowie Belastungsgeschwindigkeiten einsetzbar und somit flexibel.

Instabilitätseinfluss bei komplexen Bauteilen

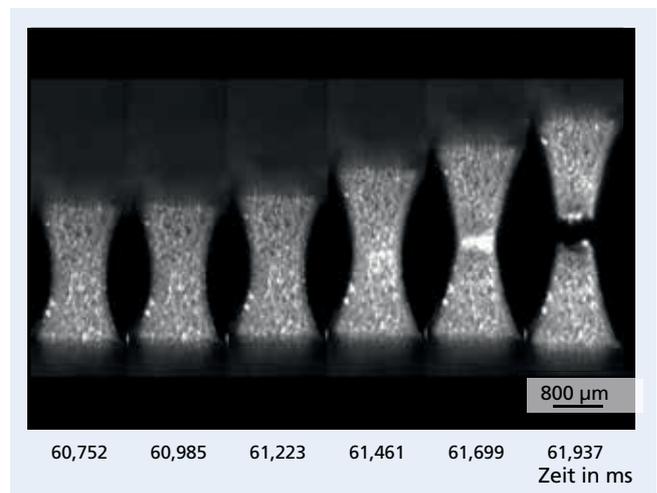
Die entwickelte Methodik wurde im Rahmen eines Industrie-Projekts erarbeitet, wobei auch der Instabilitätseinfluss auf Simulationsmodelle komplexer Bauteile (Stauchungsversuche lasergeschweißter Hohlprofile, Abbildung 3) untersucht wurde. Dabei zeigten sich bei Verwendung des Instabilitätslimits als Versagenskurve signifikante Auswirkungen auf die lokalen Bauteilfeststellen, wobei die Einflüsse unterschiedlicher Instabilitätsmodelle bei gegebener Versagenskurve auf die örtliche Rissbildung moderat sind. Das Bauteilglobalverhalten wird kaum beeinflusst.

Dr. Andreas Trondl, Dr. Dong-Zhi Sun

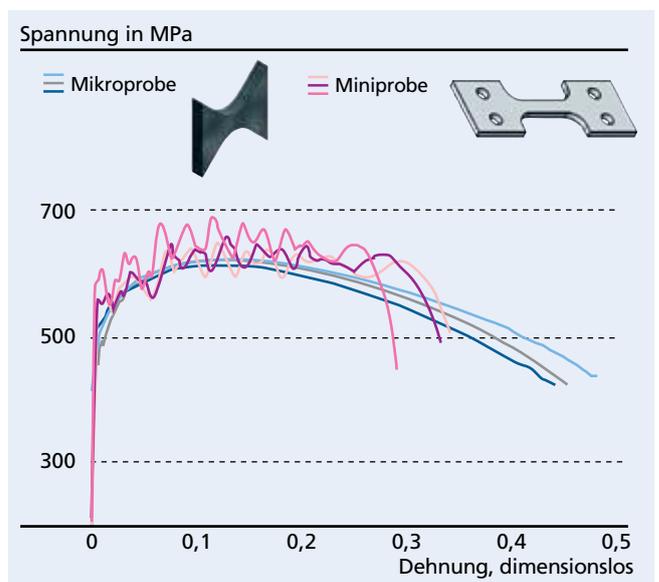
MIKROPRÜFUNG VON WERKSTOFFEN UND VERBÜNDEEN ÜBER EINEN BEREICH VON FÜNF DEHNRATENDEKADEN

Die Belastungsgeschwindigkeit beeinflusst das mechanische Verhalten eines Werkstoffs. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wird in der Regel durch die Dehnrates $d\varepsilon/dt$ als zeitliche Ableitung der aus der Belastung resultierenden Dehnung beschrieben. Für makroskopische Betrachtungen ist die dehnratenabhängige Werkstoffcharakterisierung am Institut seit Langem etabliert, besonders in der Crashdynamik. Diese Expertise wird aktuell für den Bereich der Mikroprüfung erweitert, um die Dehnrateneffekte lokal analysieren zu können.

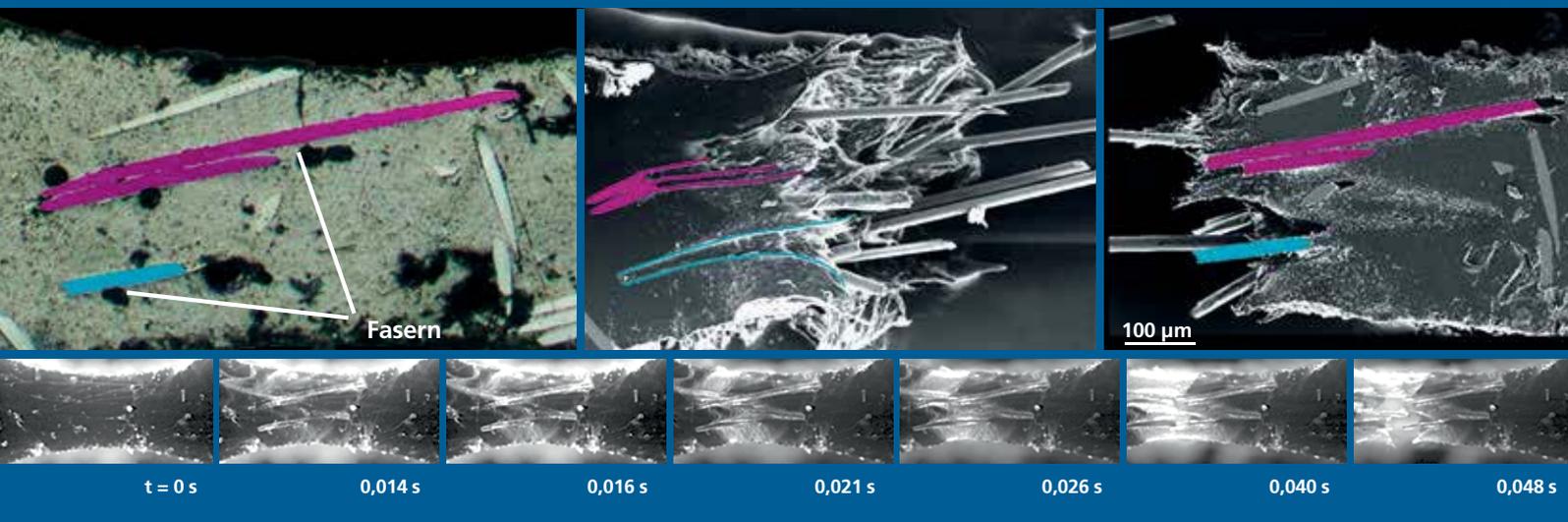
Unter quasistatischer Belastung mit Dehnraten in der Größenordnung von kleiner als $0,001 \text{ s}^{-1}$ werden dazu für metallische Werkstoffe Normzugprüfungen nach DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt. Um einen weiten Dehnratenbereich abzudecken, mussten bisher verschiedene Versuchsanlagen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen eingesetzt werden. Im Bereich der crashartigen Belastungen mit Dehnraten bis zirka 250 s^{-1} sind dies üblicherweise schnelle servohydraulische Prüfanlagen mit Geschwindigkeiten bis zirka 20 m/s . Das experimentelle Vorgehen in diesem Dehnratenbereich ist eine wesentliche Expertise der Gruppe »Crashdynamik« und wurde in der FAT-Richtlinie »Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation« (AiF Nr. 14205) dargestellt und darauf basierend in der Norm »BS ISO 26203-2 Metallic materials – Tensile testing method at high strain rates – Part 2: Servo-hydraulic and other test systems« umgesetzt. Für höhere Belastungsgeschwindigkeiten, und daraus resultierende Dehnraten, werden Versuchsanlagen wie Gasdruckbeschleuniger oder sogenannte Bar-Systeme, wie Split Hopkinson Bar, eingesetzt. Da sich die Dehnrates aus der Belastungsgeschwindigkeit und der spezifischen Messlänge der Probengeometrie ergibt, kann auch durch Verkleinerung der Probe eine höhere Dehnrates bei gleicher Belastungsgeschwindigkeit erreicht werden.



1 Hochgeschwindigkeits-Bildserie: Mikrozugversuch an Stahl bei 1 m/s Belastungsgeschwindigkeit und $300000 \text{ Bildern/Sekunde (fps)}$.



2 Vergleich der Ergebnisse bei einem Dualphasenstahl: Zugversuche bei Nenndehnrate $\dot{\varepsilon} 250 \text{ s}^{-1}$.



3 Mikrozugversuch PP-LGF; Schliffbild Probe (oben links), REM-Aufnahmen der Bruchenden (oben Mitte und oben rechts) und Hochgeschwindigkeitsbildserie des Versuchs (10 000 Bilder/Sekunde).

Mikroprüfung Versuchskonzept und Messtechnik

Um die Werkstoffuntersuchungen über einen großen Dehnratenbereich auf einer Anlage zu realisieren, wurden beide Ansätze, variable Belastungsgeschwindigkeit und reduzierte Probengröße, in einer Versuchsanlage mit dem neuen Versuchsaufbau IWM DynMicro umgesetzt.

Die Versuchsanlage ist an Dualphasenstahl erprobt und mit makroskopischen Untersuchungen an Miniflachzugproben mit 14 mm Messlänge bei vergleichbaren Nenndehnraten verifiziert. Die Mikroproben haben einen Prüfbereich von 1,5 x 0,8 mm bei der Blechdicke von 0,5 mm. Der in den Mikroversuchen betrachtete Dehnratenbereich umfasst Nenndehnraten von $0,001 \text{ s}^{-1}$ bis 1000 s^{-1} . Da dieser Werkstoff eine sehr feine Mikrostruktur aufweist, konnte in den Mikroversuchen das Werkstoffverhalten vergleichbar zu den Miniflachzugproben wiedergegeben werden. Bei einer Nenndehnraten von 250 s^{-1} zeigt das Kraftsignal im Mikrozugversuch deutlich geringere Oszillationen verglichen mit der quasilokalen Kraftmessung mit der patentierten Fraunhofer IWM-Kraftmesszelle an den Miniflachzugproben. Auch die Versuche mit 1000 s^{-1} liefern ohne zusätzliche Optimierung der Kraftmessung verwertbare Ergebnisse.

Dehnrateneffekt und Mikromechanik von LFT-Werkstoffen im Mikroversuch

Mikrozugversuche ermöglichen nicht nur hohe Dehnraten, sondern auch die transiente Untersuchung des lokalen heterogenen Werkstoffverhaltens, abhängig von der Mikrostruktur. Dieses wird am Beispiel eines glasfaserverstärkten Demonstratorbauteils aus einem Werkstoff mit Polypropylenmatrix (PP-LGF) demonstriert. Dieser langfaserverstärkte Thermoplast wird in vielen Strukturen eingesetzt, die hohen Belastungen und

Belastungsgeschwindigkeiten ausgesetzt sind, insbesondere im Automobil. Diese Untersuchungen zur Mikromechanik von Fasern und Matrix bei verschiedenen Dehnraten sind Teil eines aktuellen Forschungsprojekts. Dabei wird das lokale Faser-Matrix-Verhalten, insbesondere die Orientierung der Fasern und die Schädigung von Fasern und Matrix, betrachtet. Die Proben wurden dafür an verschiedenen Positionen auch über die Wanddicke entnommen und präpariert, um im Bauteil die dann zum Teil sichtbaren Fasern beobachten zu können. Einen Blick in die vollständige Struktur erlauben Micro-CT-Untersuchungen, die für einige ausgewählte Proben erfolgen. Die Ergebnisse zeigen deutlich unterschiedliche Faser-Matrix-Interaktionen, abhängig von der Dehnraten. Das wurde einerseits anhand von Hochgeschwindigkeitsvideos mit einer Mikrooptik während des Versuchs und andererseits anhand von REM-Untersuchungen der geprüften Mikroproben nachgewiesen. Wir bildeten den gesamten Querschnitt der Mikroprobe während des Versuchs und in der REM-Analyse ab. So ergeben sich keine »weißen Flecken« in der Bewertung der Schädigungsentwicklung und des Versagens. Interessante lokale Schädigungsbereiche wurden separat vergrößert.

Diese Mikro-Untersuchungen für den beschriebenen Dehnratenbereich sind aktuell nur am Fraunhofer IWM möglich. Diese Kompetenz wird weiter ausgebaut für andere Werkstoffgruppen und Werkstoffverbände, insbesondere für Fügezonen und Folien sowie für unterschiedliche Spannungszustände und kleinere Probenvarianten.

Frank Huberth, Jörg Lienhard

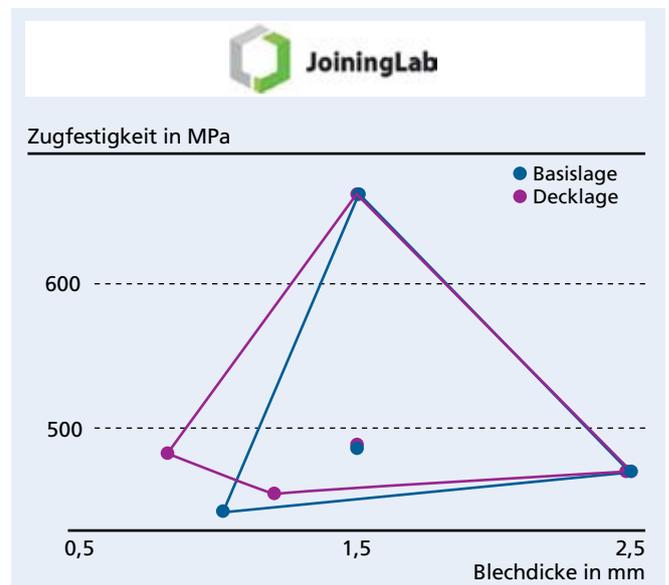
MODELLPARAMETER ZUR CRASHSIMULATION MECHANISCH GEFÜGTER VERBINDUNGEN

Innovative Leichtbaukonzepte zur Reduktion des Fahrzeuggewichts integrieren eine Vielzahl verschiedener Materialien und nutzen deren Eigenschaften optimal aus. In diesem Zuge gewinnen mechanische Fügeverfahren wie Halbhohlstanznieten (HSN), Vollstanznieten (VSN), Bolzensetzen (BS) und Fließbloßschrauben (FLS) im Karosseriebau zunehmend an Bedeutung.

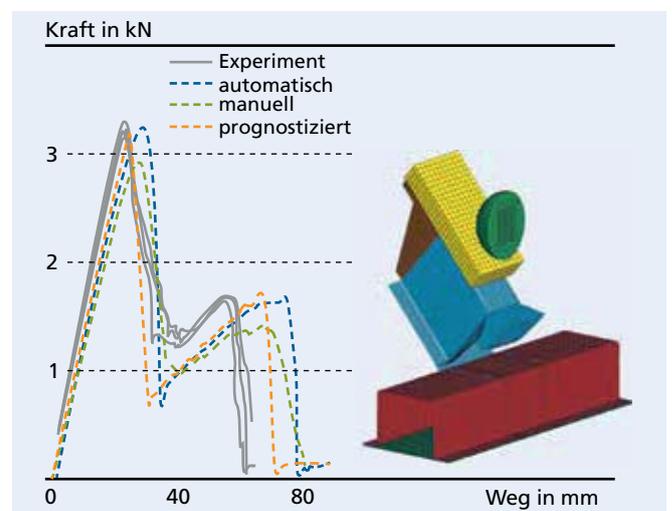
Bei der numerischen Simulation von Crashlastfällen, die ein wesentlicher Bestandteil der Auslegung und Entwicklung von Fahrzeugstrukturen ist, müssen Fügestellen berücksichtigt werden. Eine detailgetreue Abbildung von Fügeverbindungen in Simulationen eines Gesamtfahrzeugs ist jedoch aus Gründen der Komplexität nicht umsetzbar. Zur Beschreibung von Verbindungen kommen darum vereinfachte Modelle, sogenannte Ersatzmodelle, zum Einsatz, die das Verbindungsverhalten mit hinreichender Genauigkeit abbilden. Eines dieser Ersatzmodelle ist das CONSTRAINED_SPR3 Modell 2 (C-SPR3_M2), das wir am Fraunhofer IWM entwickelt haben.

Kalibrierung des Ersatzmodells

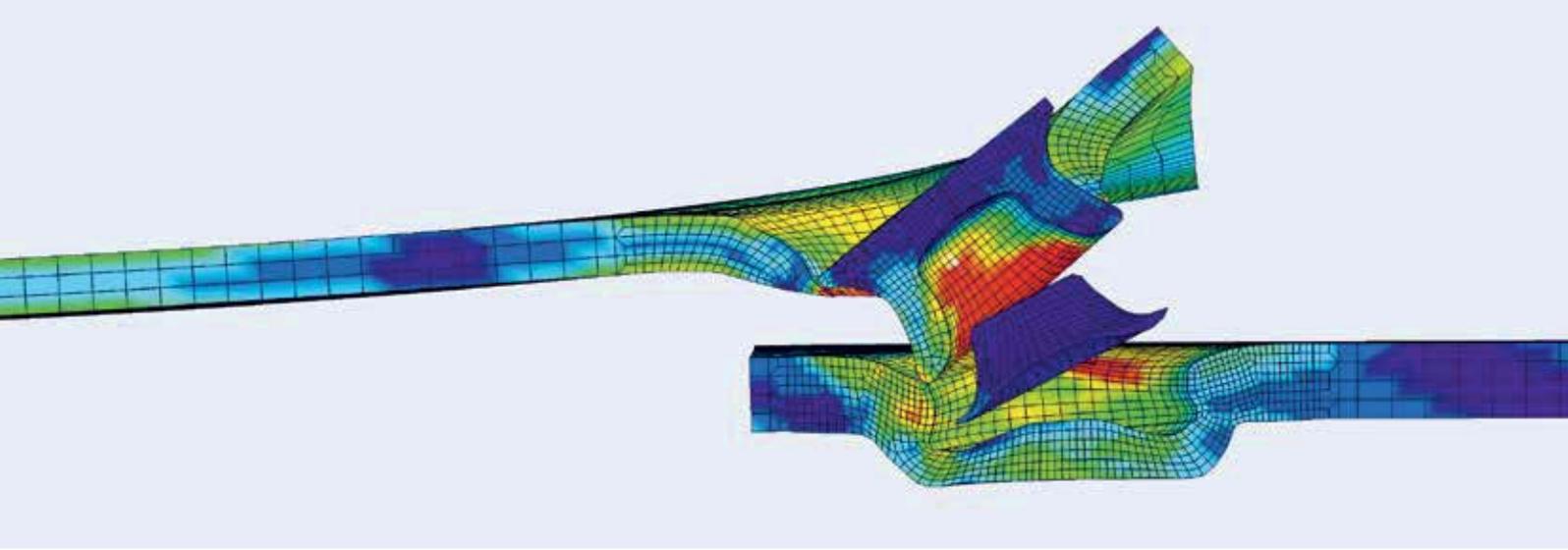
Das mechanische Verhalten einer gefügten Verbindung ist von der Belastungssituation abhängig. Verbindungskenngrößen wie die Tragfähigkeit, der Zeitpunkt des Schädigungsbeginns und der Trennung der Verbindung sowie die Energieaufnahme werden von der Verbindungsgeometrie, Belastungsart und Belastungsgeschwindigkeit bestimmt. Im Ersatzmodell werden diese Zusammenhänge durch ein parametrisiertes Modell beschrieben. Die Kalibrierung der Modellparameter wurde in der Vergangenheit manuell durch Simulationen von Versuchen an Verbindungsproben und einem »Reverse-Engineering«-Ansatz vorgenommen. Das ist zum einen zeitaufwendig und damit kostenintensiv. Zum anderen ist es nicht möglich, alle



1 Trainingsdatenmenge zur Prognose von Modellparametern ungeprüfter Verbindungen mit der Software JoiningLab.



2 Kraft-Wegkurven der T-Stoßsimulationen unter Querbelastung (links) und deformierte Geometrie im FE-Modell des T-Stoßes (rechts).



3 Detailsimulation einer mittels HSN gefügten einfachüberlappten Scherzugprobe.

Kombinationen von Blechdicken- und Materialpaarungen, die in einer modernen Fahrzeugkarosserie auftreten, experimentell unter allen relevanten Randbedingungen zu prüfen.

JoiningLab: Prognose von Modellparametern und viel mehr

Im Rahmen des AiF-Projekts »Daten- und prognosebasierte Generierung von Modellparametern für die Crashesimulation mechanisch gefügter Verbindungen« (FOSTA P1094 / IGF Nr. 18468 BG) haben wir mit unseren Projektpartnern, der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (GFal) und dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Paderborn (LWF), Methoden entwickelt, die Kalibrierung des C-SPR3_M2 zu automatisieren und außerdem Modellparameter für unbekannte, nicht geprüfte Verbindungen vorherzusagen. Diese Methoden wurden von der GFal in der Software JoiningLab implementiert und somit zur Anwendung zugänglich gemacht.

Die Software JoiningLab ermöglicht, alle relevanten Verbindungsdaten der mechanischen Fügeverfahren (HSN, VSN, FLS und Schließringbolzensetzen) zu bündeln und zu verwalten. Des Weiteren stellt sie Tools zur Analyse und Bewertung von Daten zur Verfügung (zum Beispiel Ähnlichkeitsuntersuchungen). Modellparametersätze für die Ersatzmodellierung C-SPR3_M2 können automatisch aus Kraft-Verschiebungskurven bestimmt und im LS-Dyna® Inputformat ausgegeben werden. Eine Prognosefunktionalität ermöglicht, mittels Regressionsalgorithmen Modellparameter ungeprüfter Verbindungen vorherzusagen. Hierzu wird ein Trainingsdatensatz aus den in der Datenbank hinterlegten Verbindungsdaten ausgewählt (Abbildung 1). Anhand einer Kreuzvalidierung, dessen Ergebnis in Form eines Balkendiagramms ausgegeben wird, kann die Qualität der Prognose anschließend bewertet werden. Außerdem wird mithilfe

eines Ampelsystems Rückmeldung über die Qualität und die Genauigkeit der Prognose gegeben. Auf Basis der gewählten Trainingsdaten können nun Eigenschaften und Modellparameter ungeprüfter Verbindungen vorhergesagt werden.

Validierung auf Proben- und Bauteilebene

Zur Validierung der erarbeiteten Methoden zur automatisierten Anpassung und zur Prognose von Modellparametern wurden quasistatische und dynamische Experimente auf LWF-KS-2-Proben- und Bauteilebene am LWF in Paderborn durchgeführt. Es wurde unter anderem eine Halbhohlstanznietverbindung von Aluminium EN AW-6016 mit Stahl HC340LA als ausgewählte Verbindung für die Validierung untersucht. Als Musterbauteil wurde eine mittels HSN gefügte in Quer- und Längsrichtung belastete T-Stoßprobe betrachtet. In Abbildung 2 sind die Kraft-Wegkurven der Versuche und Simulationen unter Querbelastung mit manuell und automatisch angepassten sowie prognostizierten Modellparametern dargestellt. Sowohl die automatische Anpassung als auch die Prognose gibt das gemessene Verbindungsverhalten in guter Näherung wieder. Die im Versuch auftretenden Kraftniveaus und die Reihenfolge, mit der sich die Fügepunkte des Bauteils unter Last lösen, werden durch die Ersatzmodellierungen gut abgebildet.

Mit der Software JoiningLab steht ein Tool zur effizienten Kalibrierung des C-SPR3_M2 und zur Vorhersage des Verbindungsverhaltens ungeprüfter Verbindungen zur Verfügung. Dies kann eine Grundlage zur Auswahl von Fügeverfahren im Designprozess sein und ermöglicht eine erste, abschätzende Crashesicherheitsbewertung mechanisch gefügter Bauteile ohne Hardwaretestergebnisse.

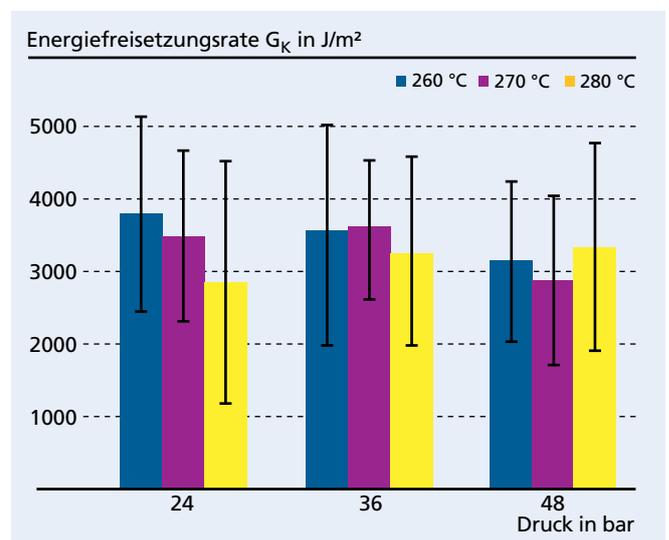
Philip Rochel, Dr. Silke Sommer

EINFLUSS DER FASER-MATRIX-GRENZFLÄCHEN AUF DIE DELAMINATION VON UD-VERBUNDEN

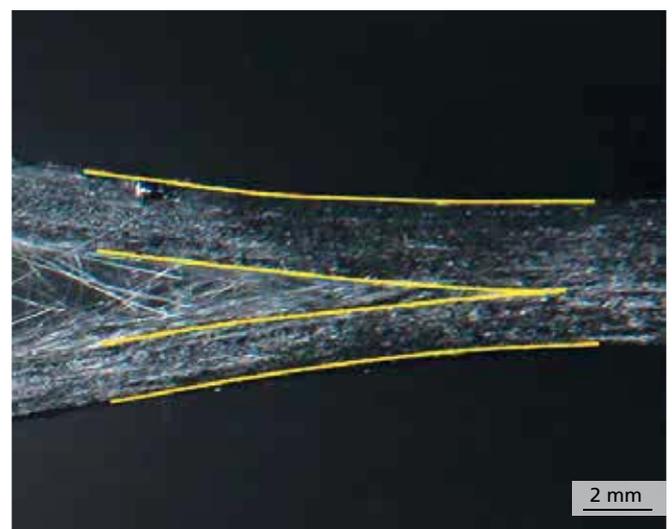
Für kosteneffektiven Leichtbau in der Automobil- sowie der Transportbranche wächst der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe stetig an. Während für diskontinuierlich faserverstärkte Strukturen duomere wie auch thermoplastische Kunststoffe Verwendung finden, dominieren im Bereich der kontinuierlichen Faserverstärkung derzeit duomere Matrixsysteme, wie Epoxidharze. Bei letztgenannten kann die alternative Nutzung thermoplastischer Kunststoffe helfen, Taktzeiten und damit Produktionskosten zu senken. Eine vielversprechende Prozesstechnologie ist das Automated Tape Placement (ATP), bei welcher unidirektionalverstärkte (UD) Tapes entsprechend der Geometrie des späteren Bauteils sowie dessen Lasten geschichtet und anschließend konsolidiert werden. Zur Auslegung derart gefertigter Bauteile sind das Delaminationsverhalten des Schichtverbunds sowie der Einfluss schwankender Prozessparameter auf dasselbe von zentraler Bedeutung. Das Delaminationsverhalten bezüglich verschiedener Versagensmoden wird beispielsweise im Double-Cantilever-Beam(DCB)-Test bezüglich des Modus I und im End-Notched-Flexure(ENF)-Test bezüglich des Modus II bewertet.

Charakterisierung der Bruchzähigkeit

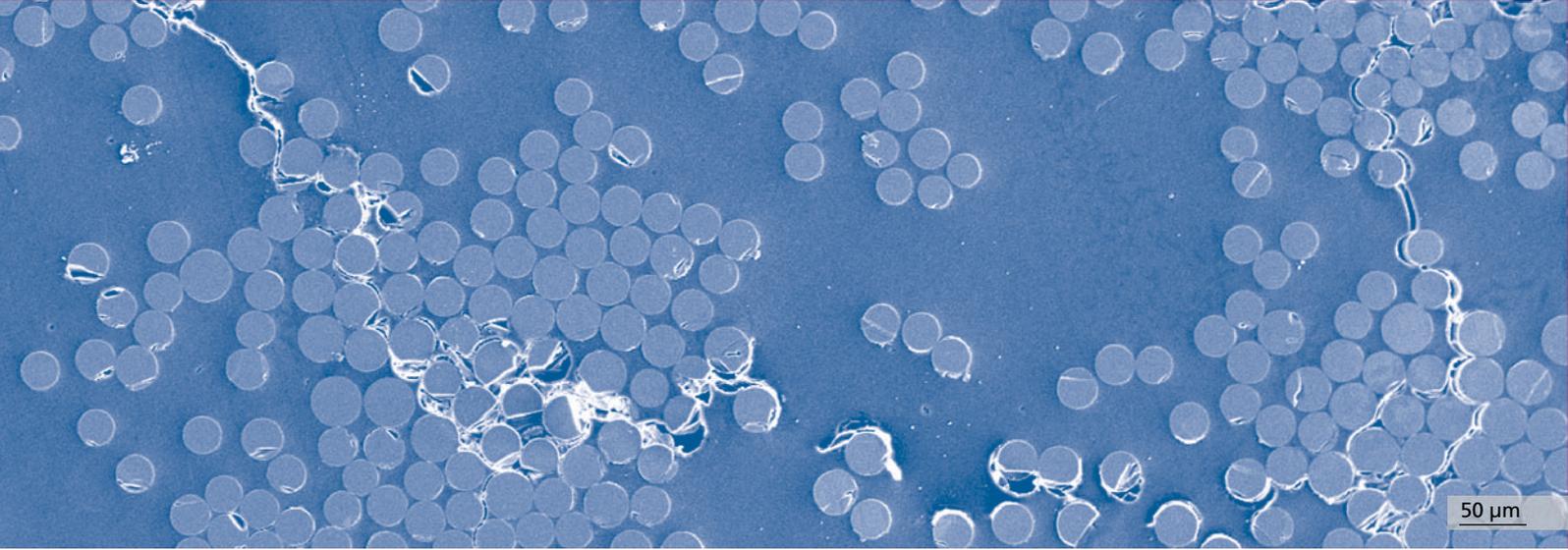
Ziel des DCB-Versuchs ist es, die interlaminaire Bruchzähigkeit im Modus I zwischen zwei Laminatschichten in Richtung der Faserverstärkung zu bestimmen. Hierzu wird das Versuchsmaterial mithilfe einer Teflonfolie so präpariert, dass sich zwei Schichten an einer bestimmten Stelle während des Konsolidierungsprozesses nicht miteinander verbinden und so ein Anriss entsteht. Die Probe wird während des Tests so belastet, dass sich die Flanken des Anrisses öffnen und der Riss in das Material vordringt. Während des Versuchs wird die anliegende Last aufgezeichnet und die Risslänge vermessen, wodurch die



1 Ergebnisse der DCB-Versuche: ermittelte kritische Energiefreisetzungsrates in Abhängigkeit variiertes Konsolidierungsprozessparameter.



2 DCB-Probe während des Versuchs: starke Faserbrückenbildung und asymmetrischer Rissverlauf.



3 REM-Aufnahme von Mikrorissen, welche in Faserbündeln initiieren und über Faser-Matrix-Grenzflächen zusammenwachsen.

Bruchzähigkeit in Form der kritischen Energiefreisetzungsrates G_{IC} bestimmt werden kann. Diese entspricht dem Quotienten aus der für das Risswachstum aufgebrauchten Energie und der neu entstandenen Rissfläche.

Abbildung 1 stellt die Ergebnisse dieser Versuche in Abhängigkeit der Prozessparameter Konsolidierungstemperatur (270 °C, 280 °C und 290 °C) und Konsolidierungsdruck (24 bar, 36 bar und 48 bar) in Form des arithmetischen Mittelwerts und der Standardabweichung dar. Deutlich zu erkennen ist hier die signifikante Streuung über alle untersuchten Prozessparametersätze hinweg. Hier drängt sich die Frage auf, ob das geprüfte Material tatsächlich eine derartige Streuung aufweist und wodurch diese Streuung verursacht wird. Nähere Betrachtungen des Risswachstums sowie der dabei auftretenden Effekte sind daher von grundlegender Bedeutung, um zu klären, welchen Einfluss die Mikrostruktur des Werkstoffs auf das im makroskopischen Versuch beobachtete Bruchverhalten hat.

Zusammenhang zwischen ermittelter Risszähigkeit und Mikrostruktur

Abbildung 2 zeigt eine DCB-Probe gegen Ende des Versuchs bei einem Risswachstum von etwa 45 mm. Auffallend sind hier vor allem zwei Dinge: zum einen ein asymmetrischer, außerhalb der Probenmitte liegender Rissverlauf (Rissflanken gelb hervorgehoben) und zum anderen eine große Anzahl ausgezogener Fasern. Der Riss breitet sich demnach auch über Laminatschichtgrenzen hinweg aus, was zur Bildung von Faserbrücken führt, welche die Rissflanken miteinander verbinden. Das hier beobachtete Delaminationsverhalten entspricht nicht den Annahmen der Prüfnorm, da einerseits die Bruchfläche nicht eben ist und andererseits versagende Faserbrücken Energie dissipieren, welche in den entsprechenden Prüfnormen so nicht berücksichtigt ist.

Mit Blick auf die Mikrostruktur liegen die Fasern in dicht gepackten Bündeln vor, welche untereinander keiner Fernordnung unterliegen (Abbildung 3). Im Vergleich zu einem duromeren Prepreg-System ist das hier untersuchte Material während des Konsolidierungsprozesses fließfähig, wodurch die interlaminaren Grenzflächen verschwimmen und Fernordnungen aufgelöst werden. Da der Faserverlauf innerhalb des Verbunds daher eine Komponente in Bauteildickenrichtung aufweisen kann, kommt es zur Faserbrückenbildung. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass Mikrorisse innerhalb der Faserbündel weit vor der Hauptrissfront entstehen und sich über Faser-Matrix-Grenzflächen ausbreiten, bis sie zusammenwachsen (Abbildung 3). Hierbei ist auffällig, dass das Versagen zunächst von den Faser-Matrix-Grenzflächen ausgeht und erst nach vollständig versagten Grenzflächen auf die Matrix übergeht. Auf diese Weise entsteht ein makroskopisch sehr unebener Riss entlang der Fasern.

Michael Schober, Dr. Jörg Hohe

WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG FÜR SIMULATIONEN GESCHWEISSTER METALLISCHER KOMPONENTEN

Die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen fällt gegenüber dem unbehandelten Ausgangswerkstoff stark ab. Gründe hierfür sind unter anderem die durch den Schweißauswurf entstehenden geometrischen Kerben sowie die aufgrund von Schrumpfung und Zwängung während des Abkühlvorgangs der Schweißnähte entstehenden lokalen Zugeigenspannungen. Besonders kerb- und eigenspannungsempfindliche hochfeste Stähle weisen im geschweißten Bereich keine wesentlich höheren Ermüdungsfestigkeitswerte gegenüber niederfesten Baustählen auf. Dies bedeutet, dass dadurch Leichtbaukonstruktionen zur Material- und Ressourcenschonung oft nur bedingt als Schweißkonstruktionen ausgeführt werden können. Möglichkeiten zur gezielten Verbesserung dieser Schwachpunkte sind unter anderem Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung wie Hochfrequenzhämmern, die die Kerbwirkung reduzieren und schädliche Zugeigenspannungen entfernen. Im Rahmen des AiF-Projekts »High Frequency Mechanical Impact – Simulation« (FVS 09.080 / IGF Nr. 19227N/1) erfolgte deshalb eine ausführliche Materialcharakterisierung der Wärmeinflusszonen von Schweißverbindungen zur numerischen Prozess- und Schädigungssimulation.

Werkstoffmodellierung für die Prozesssimulation

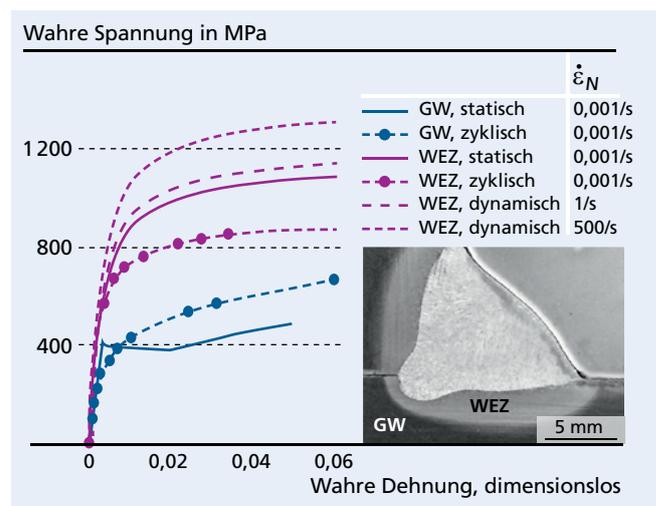
Bei der mechanischen Oberflächenbehandlung von Schweißnähten durch Hochfrequenzhämmern schlägt ein gehärteter Metallmeißel mit hoher Geschwindigkeit auf die Naht. Zur Berücksichtigung der dehnratenabhängigen Streckgrenze der Wärmeinflusszonen wurden dynamische Zugversuche mit hoher Geschwindigkeit durchgeführt (siehe Abbildung 1). Dabei wurden Stahlproben zuvor mittels Gleeble-Simulator gemäß eines aus dem realen Schweißprozess gemessenen Temperaturprofils aufgeheizt und abgekühlt. Dadurch konnte

das Gefüge im Gleichmaßbereich der Proben exakt an das Gefüge der Wärmeinflusszone der Naht angepasst werden.

Werkstoffmodellierung für die Schädigungssimulation

Entfestigungsvorgänge während zyklischer Belastung von harten Werkstoffzuständen führen zu deutlich höheren nicht-linearen Dehnungen während des Ermüdungsvorgangs. Um dies zu berücksichtigen, wurden dehnratenabhängige Low-Cycle-Fatigue-Versuche durchgeführt. Die einzelnen zyklischen Spannungs-Dehnungs-Hysteresen bei Halblebensdauer wurden zur Anpassung eines viskoplastischen Materialmodells verwendet, welches das zyklische Werkstoffverhalten der Wärmeinflusszonen abbildet.

Jan Schubnell, Dr. Majid Farajian



1 Statische und dehnratenabhängige zyklische und dynamische Spannungs-Dehnungs-Diagramme von S355J2H aus dem Grundwerkstoff (GW) und der Wärmeinflusszone (WEZ) mit jeweiliger Nenndehnrate $\dot{\epsilon}_N$.

WEITERENTWICKLUNG ANALYTISCHER FEHLERBEWERTUNGSMETHODEN

Werden in einem Bauteil fertigungs- beziehungsweise betriebsbedingte Fehler nicht ausgeschlossen oder liegen Fehleranzeigen vor, wird deren Einfluss auf die Bauteilfestigkeit mit bruchmechanischen Methoden bewertet. Hierbei spielen analytische bruchmechanische Methoden sowie entsprechende, in der Fachwelt anerkannte Regelwerke eine entscheidende Rolle. Die 2001 erschienene FKM-Richtlinie »Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile« stellt methodische Grundlagen sowie Berechnungswerkzeuge zur Verfügung, die in einem breiten Industrieranwendungsbereich bei der Auslegung und Bewertung von fehlerbehafteten Bauteilen zunehmend Anwendung finden.

Um steigenden Anforderungen an die Genauigkeit der analytischen Fehlerbewertungsmethoden Rechnung zu tragen, wurden Bewertungsmethoden insbesondere im Hinblick auf Bauteile mit kleinen Rissen sowie hohen thermischen Spannungen erweitert und in die 4. Ausgabe der FKM-Richtlinie 2018 überführt.

Berücksichtigung von Constraint und thermischen Spannungen

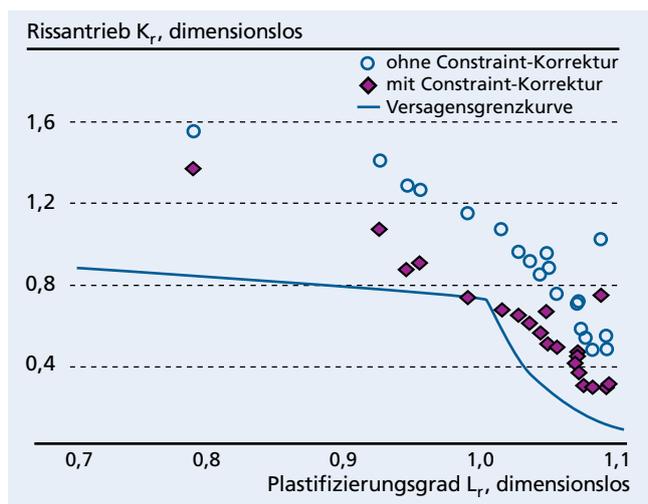
Charakteristisch für kleine innenliegende oder Oberflächenrisse, die in den meisten Anwendungen im Fokus stehen, ist eine geringere Spannungsmehrachsigkeit (Constraint) an der Rissspitze verglichen mit den Standardproben. Dadurch führen die an tief gerissenen Standardproben ermittelten Risszähigkeitskennwerte zu Überkonservativitäten bei der Bauteilbewertung. Diese lassen sich mittels einer geeigneten Constraint-Korrekturfunktion reduzieren (Abbildung 1). Weitere Überkonservativitäten können sich bei Vorliegen hoher thermischer Spannungen ergeben, wie sie bei An- und Abfahrvorgängen in Kraftwerken oder Turbomaschinen

entstehen. Hierbei wurden drei alternative Ansätze in die Richtlinie übernommen, die eine Fehlerbewertung mit abnehmender Konservativität ermöglichen.

Bruchmechanische Software

Die genannten methodischen Ansätze wurden zusammen mit erweiterten bruchmechanischen Lösungen und Berechnungsoptionen sowie einer integrierten Werkstoffdatenbank im Fehlerbewertungsprogramm IWM-VERB, Version 8.2, implementiert.

Florian Dittmann, Dr. Igor Varfolomeev



1 Verbesserte Versagensbewertung am Beispiel von Zugproben mit Oberflächenrisse.

Geschäftsfeld

WERKSTOFFBEWERTUNG, LEBENSDAUERKONZEPTE

GESCHÄFTSFELDLEITER

Dr. Christoph Schweizer

Telefon +49 761 5142-382

christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de



UNSERE HIGHLIGHTS 2018

Auf Basis betriebsnaher Schweißproben-Belastungstests unter variabler thermozyklischer Beanspruchung erweiterten wir unsere Lebensdauermodelle um Reihenfolgeeffekte, die zukünftig zu echtzeitfähigen Lebensdauermodellen weiterentwickelt werden sollen. Auf diese Weise können Betriebsdaten, zum Beispiel aus Kraftwerken, für sogenanntes Predictive Maintenance genutzt werden. Als Teil des Fraunhofer IWM-Wasserstofflabors kombinieren wir erfolgreich die Hohlprobenprüftechnik mit Simulationsmodellen, um beispielsweise den Einfluss der Kerbwirkung auf die Wasserstoffdiffusion zu bewerten.

Im Rahmen der Digitalisierung in der Werkstofftechnik haben wir die ersten Schritte für verschiedenste Hochtemperatur-Anwendungen getan. Um die Digitalisierung in der Werkstofftechnik auch für unsere eigenen Prozesse voranzutreiben, begannen wir im Bereich Mikrostrukturanalytik unsere Mikroskop-Aktivitäten – teils in Eigenentwicklung – zu automatisieren und Software-Tools zu entwickeln, die Bilderkennung, -verarbeitung und -analyse ermöglichen. So erhalten wir auf sehr schnellem Weg noch detailliertere quantitative und qualitative Aussagen zu Gefüge- und Defektparametern als bisher.

Im Workshop »Die Wirkung von Wasserstoff auf Werkstoffe beherrschen« im April 2019 diskutieren wir mit namhaften Expertinnen und Experten die Qualifizierung von Bauteilen für den Kontakt mit Wasserstoff sowie die Wasserstoffversprödung beim Schweißen (siehe Seite 51).

GRUPPEN



MIKROSTRUKTUR, EIGENSPANNUNGEN

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

Dr. Johannes Preußner | johannes.preussner@iwm.fraunhofer.de



LEBENSDAUERKONZEPTE, 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

Workshop

»Die Wirkung von Wasserstoff auf Werkstoffe beherrschen« am 10. und 11. April 2019 in Freiburg

Das Fraunhofer IWM stellt gemeinsam mit prominenten Vertretungen aus Industrie und Wissenschaft Lösungen für aktuelle Fragen beim Einsatz von Werkstoffen im Kontakt mit Wasserstoff vor und diskutiert über zukunftsweisende Konzepte. www.iwm.fraunhofer.de/Wasserstofflabor

Das neue Fraunhofer IWM Wasserstofflabor

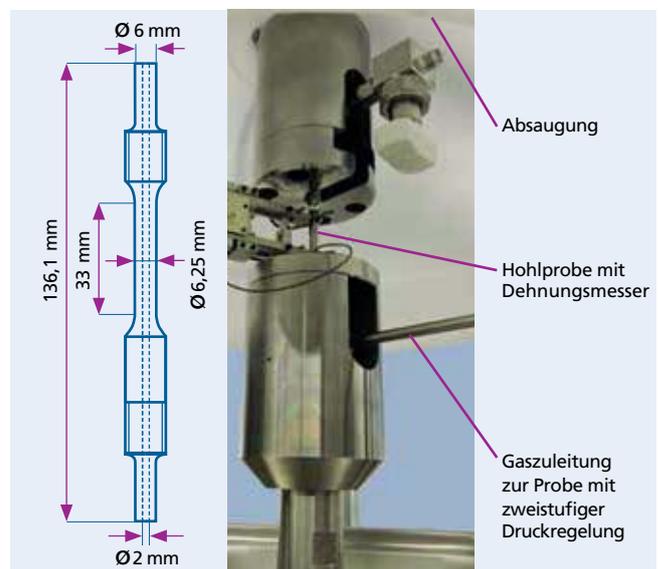
Im Rahmen nachhaltiger Energiekonzepte entsteht der Bedarf zur Qualifizierung von Bauteilen für den Kontakt mit Wasserstoff. Fertigungs- oder betriebsbedingt kann atomarer Wasserstoff im Material einlagern, seine Eigenschaften negativ verändern und Untersuchungen zur Degradationssicherheit notwendig machen. In den vergangenen zwei Jahren haben wir eine erhebliche Erweiterung unserer Möglichkeiten in diesem Bereich aufgebaut. Damit ermöglichen wir zielsichere mechanistische Beschreibungen von Schädigungsabläufen, Bewertungen des Werkstoff- und Bauteilverhaltens sowie Ableitung von Designrichtlinien, Risikoeinschätzungen und Lebensdauervorhersagen. Unsere fortschrittliche Beschreibung und Bewertung der Wirkung von Wasserstoff auf Werkstoffe mit experimentellen Methoden und theoretischen Modellen berücksichtigt Mechanismen auf makroskopischer, mikrostruktureller und atomarer Werkstoffskala.

BETRIEBSNAHE WERKSTOFFQUALIFIZIERUNG VON STAHL BEI DRUCKWASSERSTOFF

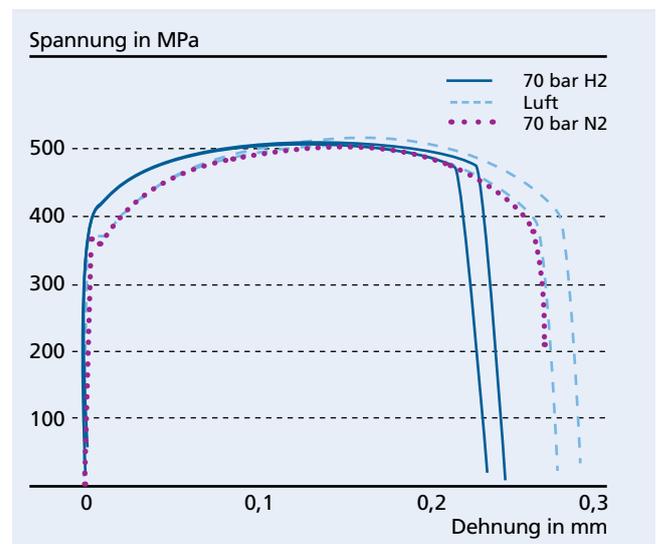
Die Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe, hervorgerufen durch atomaren Wasserstoff im Gefüge, führt zu einem spröden, meist unerwarteten und gefährlichen Werkstoffversagen. Wasserstoffversprödung betrifft nicht nur hochfeste Stähle, sondern ist auch ein zentrales Thema der Energiewende: Überschussstrom der erneuerbaren Energien soll zur Wasserstoffelektrolyse und anschließenden Speicherung für die spätere Rückverstromung verwendet werden. Die Werkstoffe der Gasinfrastruktur, wie Rohrleitungen, sind dabei gasförmigem Wasserstoff ausgesetzt. Das Fraunhofer IWM ist an dem BMBF-Forschungsprojekt Hypos-PIMS (Pipeline Integrity Management System) des Programms Zwanzig20 beteiligt, welches Bestandsrohrfernleitungen für den Transport von Wasserstoff qualifizieren soll. Das Ziel ist, die zulässigen Betriebsbedingungen, wie Rohrinnendruck und mögliche Wasserstoffzumischung im Erdgasnetz, für einen sicheren und zuverlässigen Wasserstofftransport zu finden. Dafür wurden Bestandswerkstoffe untersucht und darauf aufbauend ein Bewertungstool für die Integrität der Rohrleitungen entwickelt. Für die Werkstoffqualifizierung unter betriebsnahen Bedingungen stehen mit der Autoklaventechnik und der Hohlprobentechnik zwei anwendungsrelevante Versuchstechniken zur Verfügung.

Werkstoffscreening mit Hohlprobentechnik

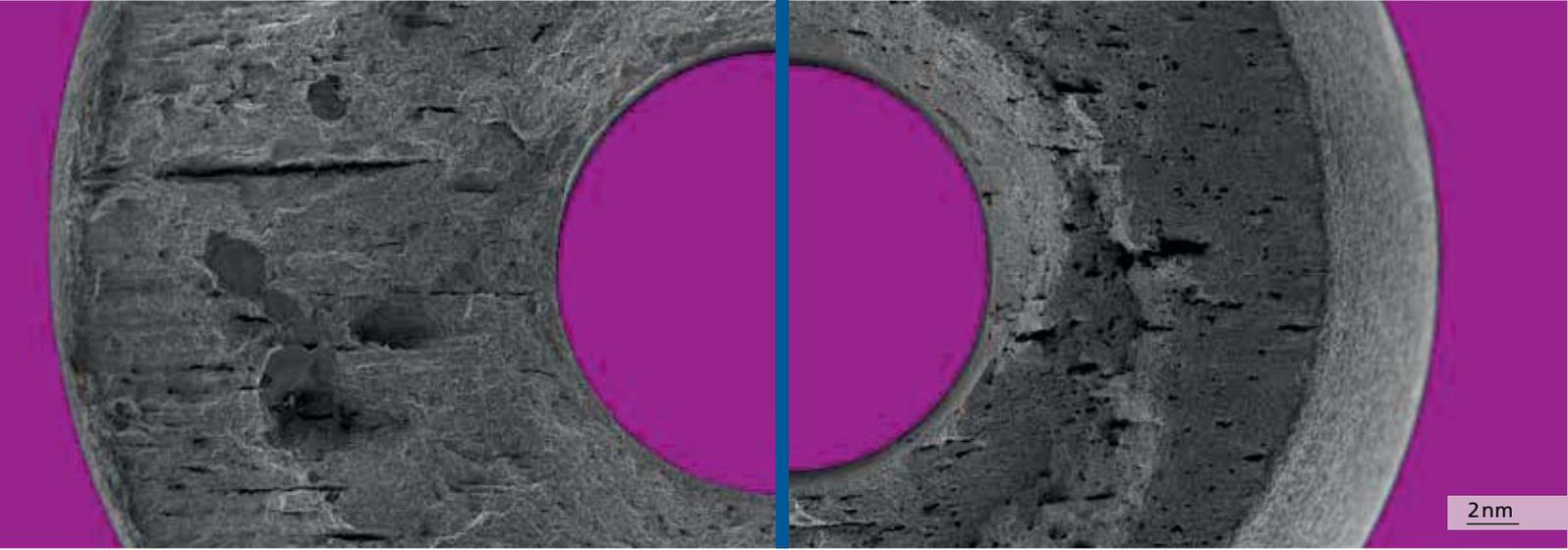
Die Hohlprobentechnik verwendet zylindrische Proben mit Langlochbohrung. Die Probengeometrie ist in Abbildung 1 links dargestellt. Von innen werden die Proben mit dem Versuchsgas gefüllt. Häufig sind dies Wasserstoff, Stickstoff und Methan, wobei auch beliebige Gasgemische möglich sind. Dazu werden die Proben erst mit dem Versuchsgas durchgespült, um Verunreinigungen zu entfernen, und anschließend mit Drücken bis maximal 200 bar befüllt. Die Druckregelung erfolgt für eine hohe Genauigkeit zweistufig mit mechani-



1 Geometrie einer Hohlprobe (links); Hohlprobenprüfstand (rechts).



2 Spannungs-Dehnungs-Kurven für Zugversuche an Hohlproben mit der Abzugsrate von 3,5 $\mu\text{m}/\text{min}$ und drei verschiedenen Gasinnenfüllungen.



3 Bruchflächenhälften zweier Hohlproben, geprüft mit 70 bar Wasserstoff-Innendruck (links) und an Luft (rechts), im Rasterelektronenmikroskop.

schen Druckminderern, welche passend zum ausgewählten Druckregelbereich gewählt werden. Eine Übersicht über den Aufbau findet sich in Abbildung 1 rechts.

Die Probe ist während des ganzen Versuchs über eine Versorgungsleitung mit einem Gastank verbunden, um in Zugversuchen mit Zunahme des Innenvolumens den Druck in der Probe konstant zu halten. Eine permanente Absaugung der Prüfmaschineumgebung verhindert die Bildung von Knallgas im Falle eines Probenbruchs. Der Versuchsaufbau erlaubt die Werkstoffqualifizierung in Zugversuchen über die Feindehnungsmessung. Ein Vorteil ist der einfache Aufbau, der kostengünstige Werkstoffscreenings erlaubt, um vielversprechende Werkstoffe für eine nachfolgende umfassendere Qualifizierung zu identifizieren. Die Proben können auch einfach temperiert werden: Heizung durch Induktion, Kühlung in der Klimakammer oder Tests in Flüssigstickstoff sind möglich. Durch den gewählten Aufbau ist eine kostengünstige Werkstoffqualifizierung unter einsatzrelevanten Betriebsbedingungen möglich.

Bruchdehnung nimmt ab

Es wurden langsame Zugversuche, sogenannte Slow-Strain-Rupture-Tests (SSRT), in Anlehnung an ASTM G 129, durchgeführt. Bei einer Wasserstoffversprödung metallischer Proben nimmt im langsamen Zugversuch die Bruchdehnung gegenüber Proben ohne Wasserstoffversprödung erheblich ab. Die Versuche wurden mit 70 bar Wasserstofffüllung, 70 bar Stickstofffüllung und ohne Füllung bei Umgebungsdruck an Luft durchgeführt. Als Werkstoff wurde StE 360, ein alter Rohrleitungsstahl aus den 1950er Jahren, verwendet, wie er heute noch in vielen Erdgas-Rohrleitungen verbaut ist. Der Stahl ähnelt in der Zusammensetzung einem heutigen Baustahl.

Die Ergebnisse der SSRTs zeigen eine deutlich reduzierte Bruchdehnung für wasserstoffgefüllte Proben im Vergleich zu denen mit Stickstofffüllung oder an Luft (siehe Abbildung 2). Das Verformungsverhalten bis zur Zugfestigkeit ist nicht verändert. Eine verbreitete Vorstellung ist, dass nur atomarer Wasserstoff vom Werkstoff aufgenommen wird und zur Schädigung führt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Wasserstoff – obwohl er zunächst als gasförmiges Molekül auf der Innenseite der Probe anliegt – absorbiert wird und seine gefährliche Wirkung entfaltet.

Wasserstoffanreicherung durch Zugspannungen

Weiterhin besagt die Theorie, dass eine Wasserstoffanreicherung in Zonen hoher Zugspannung und plastischer Verformung erfolgt und dort eine besondere Gefährdungslage existiert. In Zugversuchen ist daher theoretisch erst ab der Einschnürung mit einem starken Effekt der Wasserstoffversprödung zu rechnen. Dies wird durch die Ergebnisse bestätigt, da erst mit beginnender plastischer Deformation Abweichungen der Spannungs-Dehnungs-Kurven der Proben mit Wasserstoff- und Stickstofffüllung auftreten. Der Wasserstoffeinfluss spiegelt sich auch in einer veränderten Bruchmorphologie und Brucheinschnürung wider, wie Abbildung 3 zeigt. Für die Verwendung bestehender Erdgasleitungen für den Wasserstofftransport bedeuten die Ergebnisse, dass die Wasserstoffversprödung beim Transport wasserstoffreicher Gase berücksichtigt werden muss.

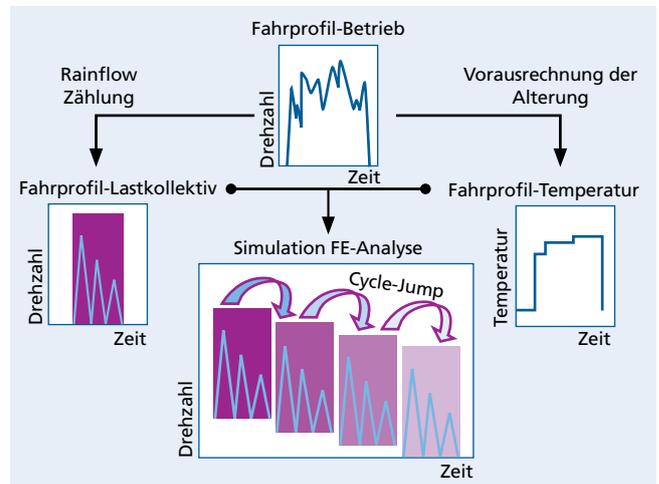
Dr. Ken Wackermann, Dr. Wulf Pfeiffer

RECHNERISCHE LEBENSDAUERBEWERTUNG VON ALUMINIUM UNTER EINBEZIEHUNG DER ALTERUNG

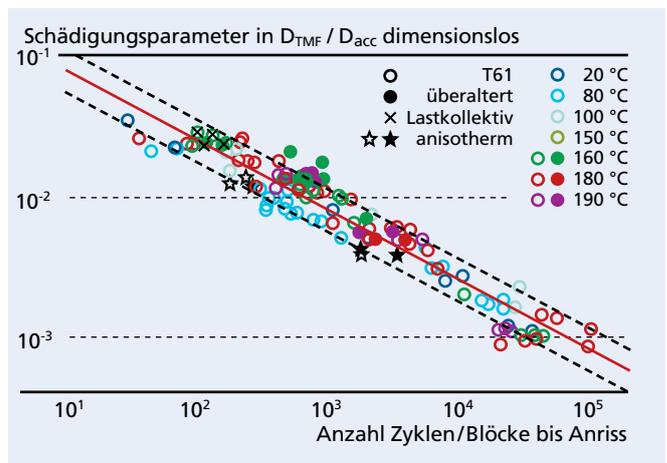
Abgasturbolader (ATL) erfahren weiterhin eine steigende Bedeutung im Gesamtsystem des Kolbenmotors, um Effizienz, Komfort und Wirtschaftlichkeit zu steigern. Der ATL wird dabei stetig zunehmenden Belastungen ausgesetzt. Für die Verdichterräder im ATL wird nahezu ausschließlich die Aluminiumlegierung EN AW-2618A verwendet. Um die im Betrieb auftretende und mit einem Festigkeitsabfall verbundene Überalterung der Legierung in die rechnerische Bauteilbewertung einbeziehen zu können, wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens die Mikrostrukturveränderung bei Überalterung experimentell charakterisiert. Eine auf diesen Erkenntnissen aufbauende Methode für die Bauteilbewertung wurde weiterentwickelt.

Experimentelle Werkstoffcharakterisierung

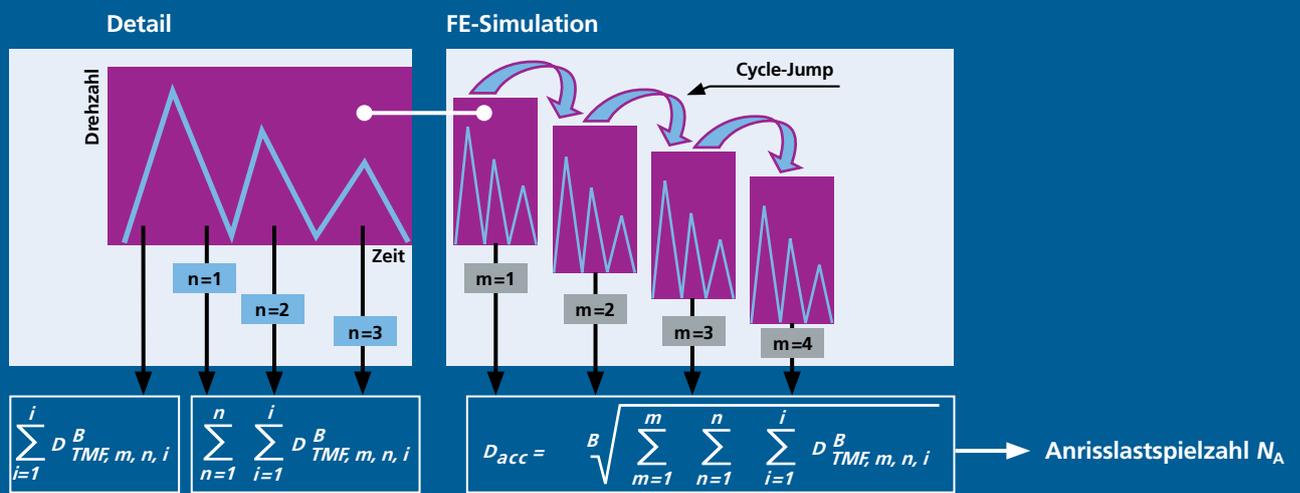
In Anlehnung an die Betriebsbelastungen, wie erhöhte Temperatur, Kriechen und zyklische Belastung infolge von Betriebspunktwechsel, wurde ein Versuchsprogramm definiert. Die mechanische Festigkeit des Werkstoffs EN AW-2618A ist wesentlich durch eine Ausscheidungsverfestigung mit teilweise metastabilen, stäbchenförmigen Phasen mit wenigen Nanometern Durchmesser geprägt. Die optimale Festigkeit der Legierung wird durch eine entsprechende Wärmebehandlung gezielt eingestellt (T61-Zustand). Die stäbchenförmigen Ausscheidungen sind unterschiedlich groß, wie Untersuchungen des Projektpartners Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) zeigten. Ist die Temperatur hoch genug, so wachsen größere Stäbchen auf Kosten der kleinen im Betrieb weiter, was zu einem Festigkeitsverlust führt. Bei erhöhter Temperatur wird weiterhin eine zyklische Entfestigung beobachtet, die mit der Bildung von persistenten Gleitbändern korreliert und sich mit der akkumulierten viskoplastischen Dehnung beschreiben lässt.



1 Die FE-Analyse mit Cycle-Jump zur Voraussage der Alterung und zyklischen Entfestigung basiert auf dem Lastkollektiv und dem Temperaturzyklus.



2 Schädigungsparameter D_{TMF} und D_{acc} über experimenteller Anrisslastspielzahl einstufiger Ermüdungsversuche beziehungsweise Anzahl ertragener Lastkollektive mehrstufiger Versuche. Darstellung der Alterungszustände, Temperaturen, Haltezeiten sowie kraft- und dehnungskontrollierten Belastungen.



3 Berechnung Anrisslastspielzahl N_A in Abhängigkeit der Rainflow Zählung (i und n) und den Blöcken zum gewählten Lebensdauerzeitpunkt (m) unter Einbeziehung des Alterungszustands und der zyklischen Entfestigung des Werkstoffs in Block m .

Alterung und zyklische Plastizität

In Bauteilen sind Beanspruchungen oberhalb der temperaturabhängigen Fließgrenze des Werkstoffs nicht immer vermeidbar. Viskoplastische Verformungsmodelle vom Chaboche-Typ haben sich bewährt, um die wesentlichen Effekte der Hochtemperatur-Plastizität, wie temperaturabhängige Verfestigung, Dehnratenabhängigkeit und Relaxation, zu beschreiben. Für die Modellierung der Legierung EN AW-2618A wurde ein bestehendes Chaboche-Modell um die inneren Variablen für den Stäbchenradius und die akkumulierte viskoplastische Dehnung erweitert. Über einen Cycle-Jump-Ansatz konnte die kontinuierliche Veränderung der Werkstoffeigenschaften über der Bauteillebensdauer (Alterung) berücksichtigt werden. Durch Extrapolation der beiden inneren Modellvariablen zu einem gewählten Lebensdauerzeitpunkt wurden dann die lokalen Verformungen infolge eines bestimmten Lastkollektivs (Block) berechnet (Abbildung 1). Die Spannungs-Dehnungs-Temperaturverläufe für verschiedene Blöcke werden danach dem Postprocessing für die Lebensdauerberechnung zugeführt.

Ermüdung und Lastkollektive

Für die Bewertung der Legierung EN AW-2618A konnte das bereits vorgestellte D_{TMF} -Konzept (Khalil, O. et al., Aluminium-Radialverdichterräder, Heft 911, FVV, Frankfurt a. M., 2010) aufgegriffen und weiter verfeinert werden. Der Schädigungsparameter D_{TMF} beinhaltet Einwirkungsgrößen (Spannungsschwingbreite, plastische Dehnungsschwingbreite) und Größen, die den Werkstoffwiderstand beschreiben (zyklische Fließgrenze, Verfestigungsexponent). Die zyklische Fließgrenze ist hier abhängig von den inneren Variablen der Werkstoffalterung formuliert. Der D_{TMF} -Wert einer Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleife kann unmittelbar aus

den experimentell gemessenen Größen berechnet werden. Er wurde für zahlreiche einstufige Ermüdungsversuche mit verschiedenen Alterungszuständen, Dehnungs- beziehungsweise Spannungsschwingbreiten und Temperaturen ausgewertet (Abbildung 2). Für Lastkollektive wird der auf D_{TMF} aufbauende Schädigungsparameter D_{acc} verwendet, dem eine Akkumulationsregel der einzelnen D_{TMF} -Beiträge zugrunde liegt. Die Berechnungsmethode im Rahmen einer FE-Analyse skizziert Abbildung 3. Ausgehend von Blöcken, in denen die Materialeigenschaften im Hinblick auf Alterung und zyklische Entfestigung konstant sind, wird der Schädigungsparameter entsprechend des Lastkollektivs summiert. Die Schädigung von Block zu Block wird entsprechend dem Cycle-Jump summiert und die Anrisslebensdauer zur Visualisierung berechnet.

Bewertung mit Werkstoffalterung

Die vorliegenden Methoden ermöglichen die rechnerische Bewertung unter Berücksichtigung der Werkstoffalterung. Trotz dieser Verbesserung ist es notwendig, den Bereich der rechnerischen Lebensdauerbewertung von ATL-Verdichterrädern weiterzuentwickeln. Folgende Themen sind dabei aus akademischer und industrieller Sicht interessant: eine Erhöhung der Untersuchungstemperaturen über 200 °C, getrieben durch Abgasrückführung und steigende Verdichtungsverhältnisse, eine Erhöhung der untersuchten Lastwechselzahlen in den Bereichen bis 10^8 Zyklen zur Absicherung kleinerer Lastwechselbeanspruchungen sowie eine Absicherung der Methode für gekerbte Konfigurationen, da diese am Bauteil unvermeidlich sind.

Philipp von Hartrott, Dr. Mario Metzger

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.

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

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

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

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

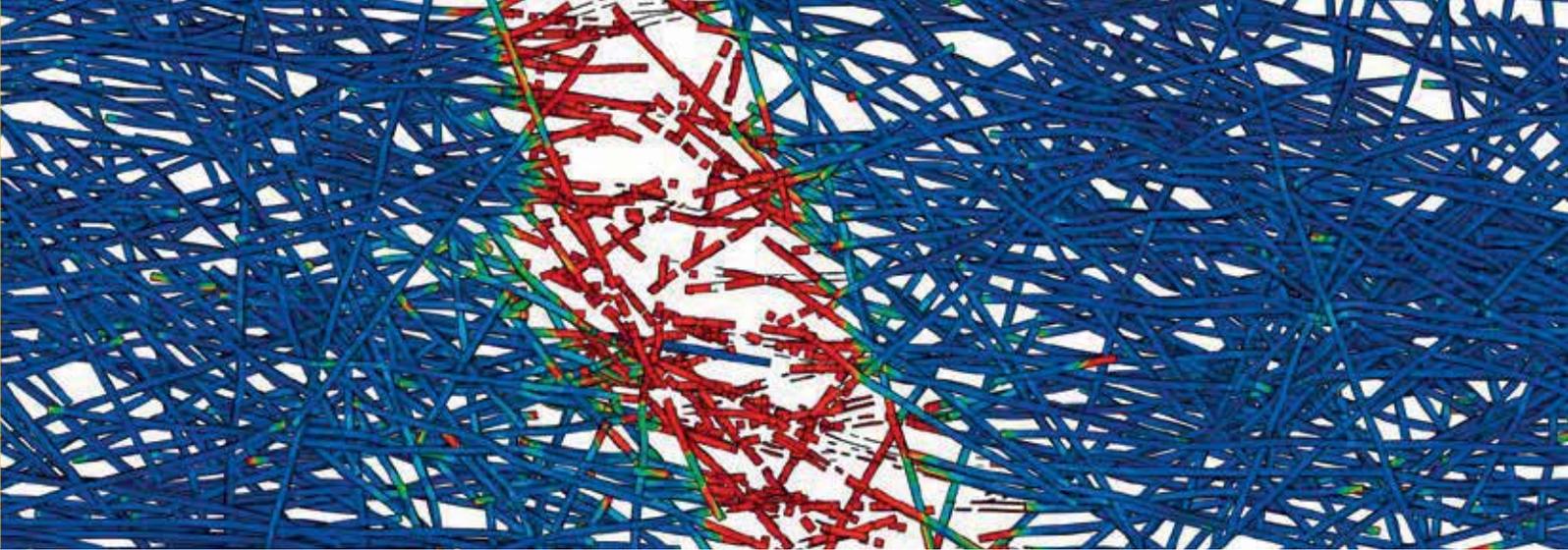
www.generativ.fraunhofer.de

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.fraunhofer.de/de/institute-einrichtungen/verbuendeallianzen/Leichtbau.html



Simulation von Schädigung und Versagen in den Fasern eines LFT-Werkstoffs.

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

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

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 CO₂-Ausstoßminderung.

Prof. Dr. Martin Dienwiebel

www.profilregion-ka.de

ÜBERGREIFENDE VORLAUFFORSCHUNGSPROJEKTE DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Biomimetischer Synthesekautschuk in innovativen Elastomerkompositen – BISOYKA

Fünf Fraunhofer-Institute verbessern synthetischen Kautschuk, um ihn leistungsfähig wie Naturkautschuk zu machen.

Untersucht wird, wie die natürlichen Proteine und Lipide für bestimmte Eigenschaften sorgen und wie sie im synthetischen Kautschuk genutzt oder ersetzt werden können. Das Fraunhofer IWM arbeitet dabei an experimentellen Verfahren zur Untersuchung der Abriebbeständigkeit der Elastomerkomposite.

Dr. Raimund Jaeger

Ceramic Subsea Systems – CS³

Für wartungsarme, langlebige Komponenten von Subsea-Anwendungen realisieren vier Fraunhofer-Institute Systemlösungen und Prüfverfahren. Mit neuen Diamantkeramik- und Hartmetall-Werkstoffen sollen Bauteileigenschaften erreicht werden, die einen sicheren Betrieb in bis zu 6000 m Tiefe ermöglichen. Das Fraunhofer IWM entwickelt Verbindungstechniken sowie Herstellungs- und Simulationsmethoden zu extrem korrosionsbeständigen Diamant-Keramiken, die hohen Temperaturen und Drücken standhalten.

Dr. Andreas Kailer

Laser-Mehrlagen-Engstspaltschweißen für Schlüsselkomponenten zukünftiger energieeffizienter und ressourcensparender Hochtemperatur-Prozesse – Laser-Fuchs

Drei Fraunhofer-Institute entwickeln und qualifizieren das Laser-Mehrlagen-Engstspaltschweißen für dickwandige Hochtemperaturkomponenten aus Nickelbasiswerkstoffen. Das Fraunhofer IWM charakterisiert dabei das mechanische Verhalten von hergestellten Schweißverbindungen unter praxisrelevanten Beanspruchungen und entwickelt ein Lebensdauer-Prognose-Tool, mit dem sowohl der Zeitpunkt der Rissinitiierung als auch das Risswachstum in geschweißten Bauteilen unter flexibler Fahrweise vorhergesagt werden kann.

Dr. Gerhard Maier

Leichtbaustrukturen aus SiC/SiC-Keramik – CMC-Engine

Keramikfaserverstärkte Keramik-Werkstoffe (CMC) sollen die Schlüsselkomponenten für Gasturbinen der nächsten Generation sein. Die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für ihren Einsatz im Heißgasbereich künftiger Flugzeugtriebwerke legen vier Fraunhofer-Institute: Dies betrifft die gesamte Kette von der Materialherstellung über die Charakterisierung und Modellierung der Materialien bis hin zur Bearbeitung und Bewertung des Einsatzverhaltens von Bauteilen aus CMC.

Dr. Jörg Hohe

Skalierbare Perowskit-Technologie – PeroTec

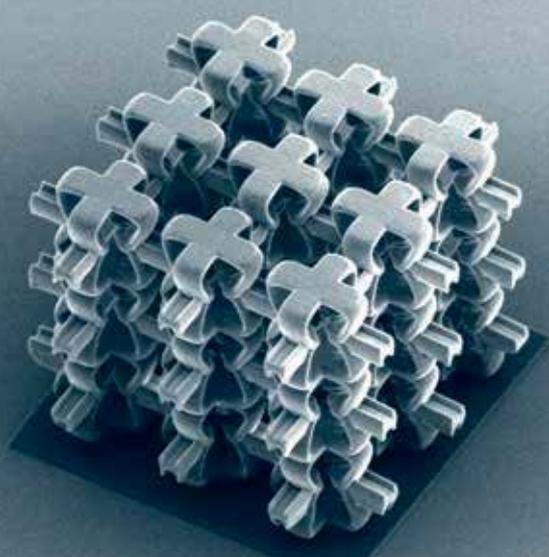
Drei Fraunhofer-Institute schaffen die technologischen Voraussetzungen für neuartige, photovoltaisch aktive Perowskit-Materialien für Anwendungen im Quadratmeter-Maßstab. Dazu müssen die Perowskit-Materialien großflächig geschützt vor Wasser, Sauerstoff und Ionendrift im Bauteil integriert und elektrisch kontaktiert werden, um eine neuartige lokal produzierbare Solarzelle zu demonstrieren.

Dr. Rainer Kübler

Akustisches Design von Kunststoff-Bauteilen – PolymerAkustik

Im Rahmen zunehmender ganzheitlicher Betrachtung von Strukturen und Bauteilen gewinnt ihr akustisches Verhalten für das Produktdesign an Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Bauteile aus unverstärkten und faserverstärkten Kunststoffen, da aufgrund des geringen spezifischen Gewichts ihr akustisches Verhalten oftmals problematisch ist. Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts entwickeln fünf Fraunhofer-Institute numerische Methoden, die das gezielte Design der Mikrostruktur solcher Materialien im Hinblick auf die Optimierung ihrer akustischen Eigenschaften zulassen.

Dr. Jörg Hohe



20 μm

Auxetic Cube: Das Metamaterial aus 3D-strukturiertem Polymer reagiert intelligent auf unterschiedliche Belastungen – bei leichtem Druck gibt es nach, ab einer bestimmten Druckstärke bleibt es steif.

Fraunhofer-Discoverprojekt

Druckbare nanoskalige Festschmierstoffe zur lokalen Einstellung der Reibung beim Umformen – Blechfunktionalisierung

Für die Blechumformung entwickelt das Fraunhofer IWM druckbare, nanoskalige Festschmierstoff-Systeme, um die tribologischen Eigenschaften der Bleche und den Werkstofffluss beim Tiefziehen werkzeug- und maschinenunabhängig steuern zu können. Zukünftig soll das System mithilfe digitaler Werkstoffzwillinge zu regeln sein.

Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Fraunhofer-Forschungscluster

Programmierbare Materialien

Programmierbare Materialien sind form- und funktionsdynamische Materialien, Materialverbände oder Oberflächen, deren Eigenschaften gezielt kontrolliert und reversibel verändert werden können. Sie bestehen aus dreidimensionalen Mikrostrukturen von Polymeren, Metallen oder Keramiken. Mit solchen Materialien eröffnet sich das einzigartige Potenzial für neuartige Systemlösungen, bei denen eine wesentlich erweiterte Funktionalität durch gezielte Materialveränderungen erreicht wird.

Prof. Dr. Peter Gumbsch

Fraunhofer-Leitprojekt

Machine Learning for Production – ML4P

Maschinelle Lernverfahren haben für die optimale Gestaltung von Fertigungsprozessen ein großes Potenzial. Zusammen mit anderen Fraunhofer-Instituten besteht das Ziel des Projekts darin, ein toolgestütztes Vorgehensmodell für den Einsatz von maschinellen Lernverfahren in Fertigungsprozessen zu entwickeln und im Bereich von drei Anwendungsdomänen zu demonstrieren. Das Fraunhofer IWM wird das toolgestützte Vorgehensmodell anwenden, um eine kognitive Glasbiegemaschine zu entwickeln.

Dr. Dirk Helm

Projekt der Fraunhofer-Zukunftsstiftung

Diamant für Hochleistungsanwendungen der Zukunft – DiaLe

Die Expertise der Fraunhofer-Gesellschaft zu künstlichen Diamanten soll für die Leistungselektronik eingesetzt und ausgebaut werden. Das Fraunhofer IWM entwickelt die Technologie zur Abscheidung von präzise orientierten, einkristallinen Metall- und Oxidschichten auf Substratoberflächen wie Silizium, auf denen dann bei Projektpartnern einkristalline Diamantschichten abgeschieden werden können.

Dr. Frank Burmeister

KERNKOMPETENZ

WERKSTOFF- UND BAUTEILCHARAKTERISIERUNG

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

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

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

zuwenden. 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.

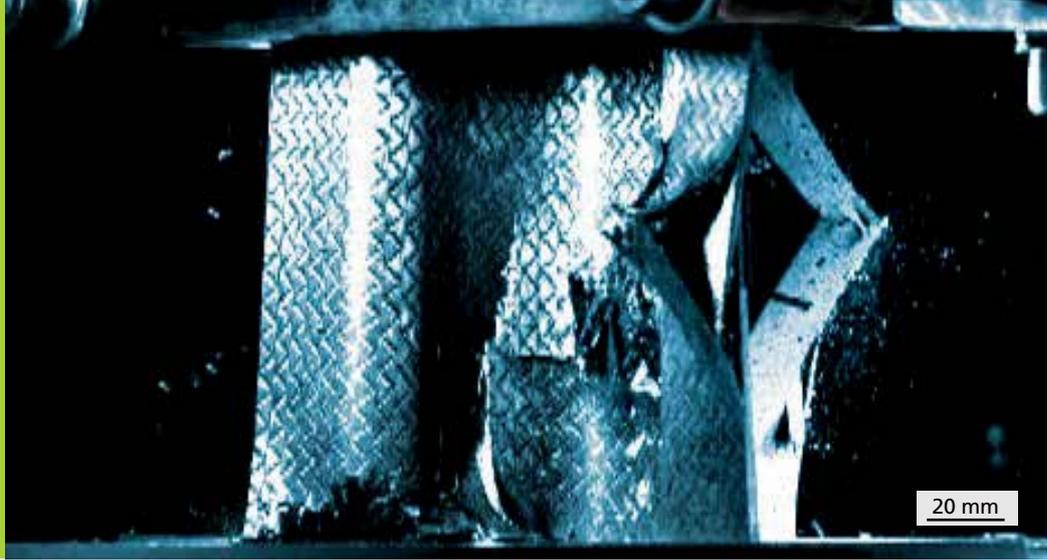
Statische, zyklische und dynamisch schlagartige Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung

- 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 Torsionszylinder
- 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



Dynamischer Stauchversuch an einem Hutprofil, aus kohlenfaserstoffverstärkten Kunststoff, im RTM-Verfahren (Resin Transfer Moulding) hergestellt.

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@iwf.fraunhofer.de

Werkstoffeigenschaften in Modelle umsetzen

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

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

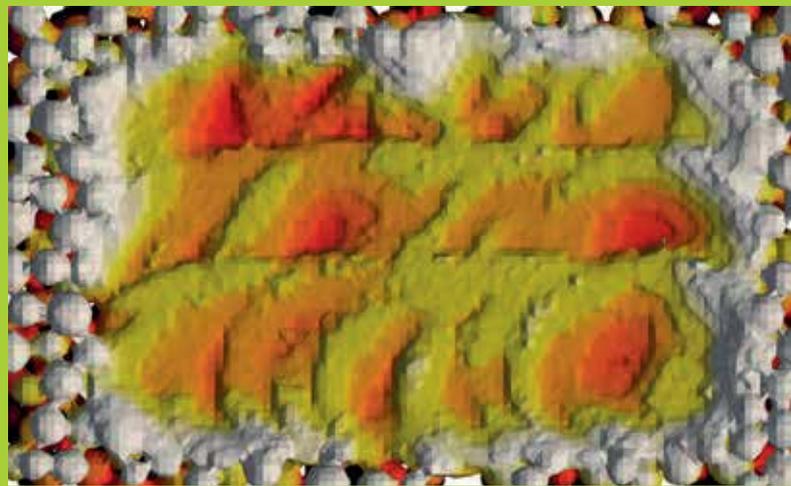
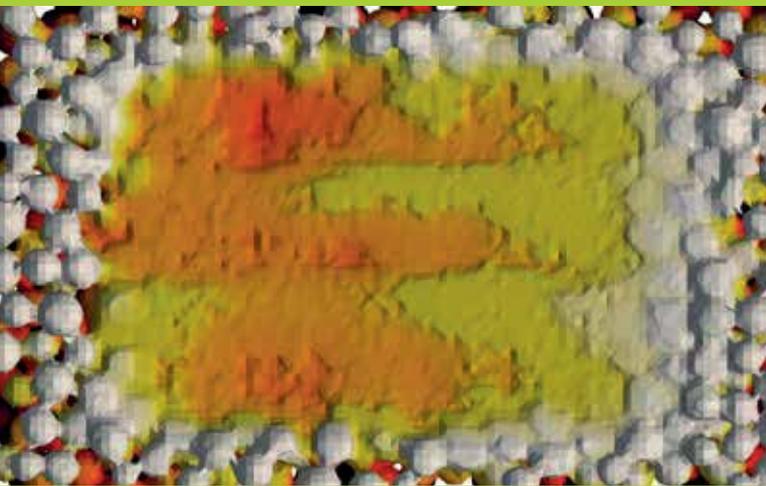
Das Fraunhofer IWM beschreibt entsprechendes Verformungs-, Schädigungs-, Bruch- und Funktionsverhalten von Werkstoffen und modelliert Mechanismen auf der Makro-, Mikro-, Meso- und Nanoskala bei Belastung von Bauteilen oder Materialsystemen wie Festkörpern, Flüssigkeiten, Pulvern oder Verbundwerkstoffen.

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

Entscheidend für signifikante Verbesserungen und Innovationen bei Funktionalität, Zuverlässigkeit, Lebensdauer oder Wirtschaftlichkeit sind die integrale Betrachtungsweise beziehungsweise die Kopplung von Informationen aus verschiedenen Skalen und das Verfolgen der Veränderung von Werkstoffeigenschaften über mehrere Prozessschritte hinweg. Integrated Computational Materials Engineering (ICME) oder Integrierte Computergestützte Materialentwicklung ist das Werkzeug zur quantitativen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Prozessschritten, Materialmikrostruktur, Materialeigenschaften und Bauteilverhalten. Mit ICME kann die Veränderung der Werkstoffeigenschaften während des gesamten Bauteilentstehungsprozesses und während des Betriebs verfolgt und numerisch beschrieben werden. Auf dieser Basis kann das Fraunhofer IWM Schwachstellen in der Prozesskette und während der Lebensdauer ermitteln und beseitigen.

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



Höhenprofile von Schmelz- und Erstarrungssimulationen eines Pulverbetts bei Additiver Fertigung ohne (links) und mit (rechts) Marangoni-Effekt, welcher zu einer Ausbildung von Schuppenstrukturen entlang des Laserpfades führt.

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
- Schweißsimulation
- Simulation von Fügeprozessen
- Schichtwachstumssimulation
- Partikel- und Strömungssimulation
- Simulation pulvertechnologischer Fertigungsschritte (Pulverschütten, Matrizenpressen, Sintern, Foliengießen)

KERNKOMPETENZ

TRIBOLOGIE UND OBERFLÄCHENDESIGN

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

Oberflächen für mehr Funktionalität und Leistungsfähigkeit

Beanspruchungen im Einsatz greifen häufig an den Oberflächen von Bauteilen an. Zudem bestimmen die Bauteiloberflächen oftmals die Funktionalität des damit verbundenen technischen Systems. Das Fraunhofer IWM verfügt über fundiertes Know-how sowie umfangreiche Methoden und Verfahren, um die Oberflächen von Bauteilen und Komponenten hinsichtlich der jeweils geforderten Eigenschaften einzustellen, beispielsweise für einen niedrigen Reibwert, eine bestimmte Oberflächenenergie oder eine gewünschte optische Anmutung.

Am Anfang einer kundenspezifischen Entwicklung steht meist die Aufklärung oberflächenbedingter Versagensmechanismen mithilfe moderner Versuchsstände oder der Aufbau von neuen, der jeweiligen Fragestellung angepassten Analysemethoden zur Oberflächencharakterisierung. 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 zum Beispiel Wärmebehandlungen bewertet, Schichteigenschaften vorhergesagt und Aussagen zur Langzeitstabilität der Schichten getroffen werden. So verkürzen sich die Zeiten für nachfolgende Schicht- und Verfahrensentwicklungen beziehungsweise ermöglichen diese erst. Das Fraunhofer IWM untersucht unterschiedlichste Fragestellungen, beispielsweise aus dem Bereich der Lagerherstellung, um schnell stabile Reibungsverhältnisse zu erreichen, Notlaufeigenschaften sicherzustellen oder eine möglichst lange Lebensdauer zu erreichen. Im Anlagen- und Maschinenbau beantwortet das Fraunhofer IWM Fragen nach Korrosionsmechanismen, Wirkungsgradverbesserungen sowie der Einsatzmöglichkeit von Materialpaarungen. Für die Spritzguss- und Optikherstellung werden Verfahren zur schadensfreien Entformung entwickelt, Online-Temperaturmessungen für Formwerkzeuge oder Oberflächen für Formgebungswerkzeuge, die gewünschte Bauteiloberflächeneigenschaften realisieren können. Neben der Qualifizierung von Schichten erarbeitet das Fraunhofer IWM leistungsfähige Beschichtungsmethoden zur gezielten Einstellung geforderter Schichteigenschaften wie Reibverhalten, Leitfähigkeit und Korrosionsstabilität.

Mess- und Analysemöglichkeiten

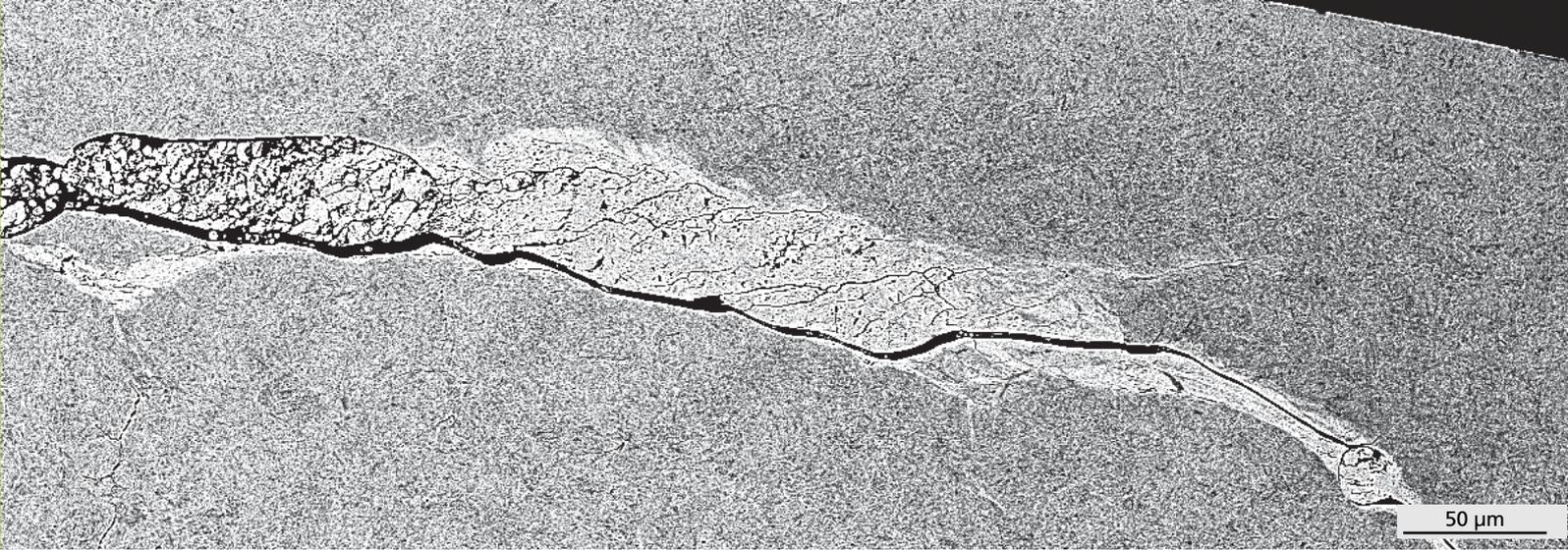
Das Fraunhofer IWM arbeitet mit der modernsten am Markt verfügbaren Geräteausstattung und entwickelt darüber hinaus spezifische Versuchsstände für individuelle Kundenanfragen.

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

- Kontur- und Oberflächentopographiemessungen mit Rasterkraft-

mikroskop (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



Atomarer Wasserstoff im tribologischen System: sogenannte White Etching Cracks unterhalb der wälzbeanspruchten Lagerlaufbahn.

- 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, ortsauflösend, tiefenabhängig sowie Phasenanalysen mit konfokalem Raman-Mikroskop, FTIR-Spektrometer, ICP-OES (optische Emissionsspektroskopie), Glimmentladungsspektrometer (GDOES), energiedispersive Röntgenanalyse, Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) und Quadrupolmassenspektrometer
- 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 zur Messung der Wasserstoffdiffusion und Prüfstand zur Korrosion in heißen Salzschnmelzen
- Anwendungsspezifisch angepasste Oberflächenkonditionierung mit Beschichtungen, Strahlprozessen (Metalle, Keramiken) und Wärmebehandlungsverfahren

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

- Untersuchung des tribologischen Verhaltens mit anwendungsspezifisch angepassten Triboprüfständen:

- Kolbenring-Liner-Simulator mit RNT (Radionuklid-Technologie), Stift-Scheibe-Tribometer mit RNT Technologie, Gleitlager- und Komponentenprüfstand mit RNT, Stift-Scheibe-, Wälzverschleiß und Kugellagerprüfstand, oszillierende Gleitverschleißprüfeinrichtung, Mikrotribometer, Tribokorrosionsprüfstand, Hysitron Triboindenter TI 950, Oberflächentester Tetra BASALT MUST, BASALT HOMAT, selbstentwickelte UHV-Mikrotribometer und Multiskalentribometer, Eistribometer, Rheometer, Motorenprüfstand
- Messung der mechanischen Eigenschaften von Randschichten und Beschichtungen wie Schichtdicke, Härte, Haftung, Eigenspannungen und E-Modul mit Schichtdickenmessung (Wirbelstrom, magnetinduktiv), ScanningScratchTest (SST), Abriebtest, Nanoindenter, Rockwell-Eindruck, Kugeleindruck, Zygo-Interferometer zur Verwölbungsmessung, Kugelschlag-Test und Mikromechanikprüfstände

Beschichtung und Konditionierung von Oberflächen

- Erarbeitung und Aufbringung anwendungsspezifisch angepasster Beschichtungen, gegebenenfalls in Kombination mit geeigneter Oberflächenkonditionierung mit reaktivem Magnetron-Sputtern (HF, DC, Puls-DC) mit HF-Substratbiasing (Substrattemperaturen bis 1 000 °C), Ionenstrahltechniken, Elektronenstrahlverdampfer, PECVD-Anlagen, Plasma-CVD-Beschichtungsanlage CCP/ICP, Mehrkammerbeschichtungsanlage für Multilagenbeschichtungen und Hybridschichten, Plasmaätzanlage, nasschemische Beschichtungsanlage (Spin-Coating, Rakelbeschichtung, Tauchbeschichtung), Ionenätzanlage zur Probenpräparation und Oberflächenbearbeitung, Ultra-Präzisionsdreh-, -schleif und -fräsmaschine zur Diamantbearbeitung von Formgebungswerkzeugen, Kugelstrahlanlage zur Verfestigung und Strukturierung von Oberflächen

Preise und Ehrungen

Werkstoffmechanik-Preis 2018 der KSPG AG an Natalie Oberle für ihre Masterarbeit »In-situ-Bestimmung tribologisch induzierter Wasserstoff-permeation mit elektrochemischen Methoden«
07.06.18, Freiburg

IMU-Stipendium zur Nachwuchsförderung 2018 des Industrieverbands Massivumformung an Kristap Döring für seine Bachelorarbeit »Mikrostruktureigenschaften in Kaltumformstählen in Abhängigkeit vom Glühprozess und den Legierungselementen«
14.06.18, Lünen

DGM-Nachwuchspreis an Dr. Johannes J. Möller für seine Arbeiten im Bereich atomistischer Simulationen der Werkstoffeigenschaften von Metallen
25.09.18, Darmstadt

Dissertationen

Matthias Bier
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Modellierung des mechanischen Verhaltens von Stanznietsklebverbindungen mit Berücksichtigung der Prozesssimulation

Claudio Findeisen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Charakterisierung und Modellierung von instabilen Metamaterialien

Johanna Gagel*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchung von charakteristischen Versetzungsstrukturen und Versetzungstransportprozessen in Reibkontakten mit Versetzungsdynamik-Simulationen

Matthias Kachel
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Einfluss des Mikro- und Nasstrahlens auf die Haftung und die tribologischen Eigenschaften von Schichtsystemen auf die Haftung und die tribologischen Eigenschaften diamantähnlicher Kohlenstoffschichten (a-C:H) auf Stahl (100Cr6)

Jamel Khamassi*
Technische Universität Darmstadt
Untersuchung der Adhäsion von Thrombozyten mittels Partikelsimulation und mikrofluidischer Experimente

Zhilong Liu*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Microstructure evolution under tribological loading and its elementary mechanisms

Jan Pagenkopf
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Bestimmung der plastischen Anisotropie von Blechwerkstoffen durch ortsaufgelöste Simulationen auf Gefügeebene

Severin Stefan Schmitt*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Entwicklung einer versetzungs-basierenden Kontinuumstheorie mittels mechanismusbasierter Homogenisierung

Lukas Schulenberg
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Mehrskalenmodellierung langfaserverstärkter Thermoplaste – Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Deformations- und Versagensverhalten

Studentische Arbeiten Bachelor (B), Master (M)

Mesut Altuntas*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Reibungs- und Verschleißmodell für Kunststoffe im geschmierten Gleitverschleiß (M)

Ebert Daniel Macedo Alvares
Universidade Federal de São Carlos
Thermodynamic-kinetic modeling and simulation of microstructure development in copper based alloys (M)

Benedikt Ames*
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Impact of electron spin on photoelectron spectra within density functional theory (B)

Ali Ammar*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchung des Geometrie- und Materialeinflusses auf das Verhalten von Doppelhalbsicken (M)

Philipp Bähr
Hochschule Offenburg
Untersuchung des Verformungs- und Versagensverhaltens von zweischnittigen mechanisch gefügten Verbindungen mit Hilfe der numerischen Simulation (M)

Tobias Bähr*
Hochschule Offenburg
Konstruktion eines HCF-Extensometers (B)

Maximilian Baur
Hochschule Offenburg
Entwicklung und Konstruktion eines anwendungsnahen Versuchs zur Qualifizierung von Reibpaarungen für hoch beanspruchte Komponenten in BHKW-Motoren (B)

Mark Bernauer
Hochschule Offenburg
Optimierung der Vor- und Nachbereitung von Bauteilen und Haltern für einen DLC-Serienbeschichtungsprozess (M)

Christoph Breuner*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Reibungseigenschaften von Reptilenschuppen (M)

Fabian Demant*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Grundlagenuntersuchung: Einfluss der örtlichen Strahlmodulation auf die Prozessstabilität des Laserstrahlmikroschweißens von Kupfer (M)

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

Kristap Döring
Hochschule Furtwangen
Mikrostruktureigenschaften in Kaltumformstählen in Abhängigkeit vom Glühprozess und den Legierungselementen (B)

Antje Dollmann*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
High Entropy Alloy-CoCrFeMnNi unter milder tribologischer Last (M)

Aniruthan Mala Elangovan
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Adiabatic shear banding and fracture during high speed shear cutting: Numerical study (M)

Mahan Ghodsi*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Analyse der Schlagzähigkeit von additiv gefertigten kraniomaxillofazialen Druckerzeugnissen unter Berücksichtigung der Druckbettausrichtung (M)

Jannik Hamann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Tribologische Untersuchungen von Frettingkontakten mittels Kontaktwiderstandsmessung (M)

Marcus Hamann-Schroer*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Simulation eines Kugelstrahlprozesses und Laserprozessgas auf das tribologische Verhalten einer linearen Lasertexturierung auf Ti6Al4V (B)

Thomas Heidebrecht
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Entwicklung einer Methodik zur FE-Simulation eines Kugelstrahlprozesses mit hoher Kugelpopulation (M)

Thomas Heim*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Investigation and characterization of the microstructure and the mechanical properties of aluminium alloys processed by selective laser melting (M)

Michael Hilbmann*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchung der Rolle von Inklusionen beim Ermüdungsverhalten kleiner Volumina mittels Versetzungsdynamiksimulationen (M)

Matthias Jung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Approximation und Bewertung von Kerbfaktoren an Kehlrihten auf Basis berührungsloser 3D-Vermessung (M)

Chantal Kurpiers*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Korngrenzeinfluss auf Reibung und Mikrostrukturentwicklung von hochreinem Kupfer unter tribologischer Last (M)

Mansour Mazaheri*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Tribologische Charakterisierung von metastabilen VAIN- und VAICN-Dünnschichten bei hoher Temperatur (M)

Mahinour Mobasher
German University Cairo
Abrasion and friction of elastomers developed for tire industry (B)

Andreas Morkel*
Tribologische Charakterisierung von Beschichtungen für Luftfahrt-Anwendungen (M)

Bich Diep Nguyen*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Diskrete Versetzungsdynamiksimulation: Versetzungsinteraktion durch Korngrenzen (B)

Natalie Oberle
Hochschule Offenburg
In-situ-Bestimmung tribologisch induzierter Wasserstoffpermeation mit elektrochemischen Methoden (M)

Yiwen Pan
Universität Stuttgart
Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Dehnrate und adiabatischer Erwärmung auf das Scherversagen hochfester Blechwerkstoffe unter Crashbelastung (M)

Patrik Pontner
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Experimentelle Untersuchung von Rissinitiation und -ausbreitung in hochverfestigten Randschichten durch High Frequency Mechanical Impact (HFMI) an hoch- und niederfesten Stählen (M)

Julio Reyes-Altamirano*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Herstellung komplexer Aluminium-Nitrid-Strukturen mittels Robocasting (M)

Jonas Ritter*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Modelling the mechanical behaviour of porous cohesive granular material using discrete elements: Application to snow failure (M)

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

Adrian Rombach
Hochschule Offenburg
Konstruktion und Inbetriebnahme einer Prüfungsrichtung zur Messung der umgebungsbedingten kritischen Spannungsintensität KIEAC in einer Reinwasserstoffatmosphäre nach ASTM E 1681 (M)

Jonathan Roth
Fachhochschule Aachen
Untersuchung von 3D-Rissnetzwerken unter überlagerter thermischer Ermüdungsbeanspruchung (B)

Vitali Schilow
Hochschule Offenburg
Experimentelle und simulative Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher Lastangriffe auf die Tragfähigkeit von zweischichtigen Punktschweißverbindungen (M)

Pakorn Thongraya
Technische Universität Darmstadt
Tribologische Erprobung und Bewertung von geeigneten Beschichtungen für Hochtemperaturanwendungen (M)

Dennis Tritschler
Hochschule Offenburg
Simulation der wasserstoffunterstützten Schädigung metallischer Werkstoffe an Rissen und Kerben bei Last (M)

Valentin Verrier*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Feature Auswahl für die Datenanalyse der Rissbewertung (M)

Christian Wacker
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Umsetzung eines flächigen Kontakts in einem als Tribometer verwendeten Triboindenter (B)

Sebastian Wandel*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Bio-inspirierte Oberflächenstrukturierung des Stahls 100Cr6 für tribologische Anwendungen (M)

Kolja Zoller*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Versetzungsquell- und Multiplikationsmechanismen in einem homogenisierten Kontinuumsmodell der Kristallplastizität (M)

Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftler

Giulia Fiaschi
Universität Modena und Reggio Emilia, Italien
12.03. - 15.06.18

Dr. Fabian Kaiser
Freudenberg New Technologies SE & Co. KG
01.01. - 15.06.18

Saeed Mirzaei
Masaryk University, Tschechien
01.07. - 30.09.18

Ardeshir Sarmast
Tehran Raymond Consulting Engineers
01.10. - 31.12.18

Prof. Dr. Silvia Titotto
Federal University of ABC, Humboldtstipendium, Brasilien
28.05. - 17.06.18

Lei Wang
Lanzhou University of Technology, China
01.01. - 31.08.18

Dr. Bin Zhao
School of Mechanical Engineering Shangdong, China
01.07. - 31.12.18

Vorlesungen WS 2017/2018

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Theory and Modeling of Materials: Superconductivity I (Phenomenology)
Prof. Dr. Christian Elsässer

Continuum Mechanics II
Dr. Dirk Helm

Computational Materials Engineering
Prof. Dr. Michael Moseler

Wissenschaftliches Programmieren
Dr. Michael Walter

Duale Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe

Simulationstechnik FEM
Frank Huberth

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nanotechnologie für Naturwissenschaftler und Ingenieure
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Tribologie
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen: Verformung und Bruch
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Prozesssimulation in der Umformtechnik
Dr. Dirk Helm

Tribologie
Prof. Dr. Matthias Scherge

Universität Siegen

Composites I – Verbundwerkstoffe
Dr. Jörg Hohe

Vorlesungen SS 2018

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Mechanische Eigenschaften
Prof. Dr. Chris Eberl

Werkstofftechnologien
Prof. Dr. Chris Eberl

Theory and Modeling of Materials – Superconductivity II (Microscopic Theory)
Prof. Dr. Christian Elsässer

Continuum Mechanics I
Dr. Dirk Helm

Hochschule Offenburg

Schadenskunde
Rolf Zeller

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Anleitung zum wissenschaftlichen Arbeiten am IAM-CMS
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

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.

Seminar zu studentischen Arbeiten
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Angewandte Werkstoffsimulation
Dr. Claas Bierwisch;
Dr. Dirk Helm;
Dr. Silke Sommer;
Dr. Matthias Weber

Seminar zu studentischen Arbeiten
Prof. Dr. Peter Gumbsch;
Prof. Dr. Matthias Scherge; et al.

Mechanik heterogener Festkörper
Dr. Ingo Schmidt

Universität Siegen

Composites II – Werkstoffverbunde
Dr. Jörg Hohe

Von Fraunhofer IWM organisierte Fachveranstaltungen

Schulung Faserverbundwerkstoffe Modul 8 »Zertifizierte Qualifizierung zum Composite Engineer (Faserverbund Fachingenieur)« der Fraunhofer-Allianz Leichtbau 27.02. - 01.03.18, Freiburg

Industrieworkshop »MaterialDigital« des Fraunhofer IWM 11. - 12.04.18, Freiburg

8th KMM-VIN Industrial Workshop (IW 8) »Modelling of Composite Materials and Composite Coatings« des European Virtual Institute on Knowledge-Based Multifunctional Materials 09. - 10.10.18, Freiburg

EMMC-CSA »Workshop on Marketplaces and Interoperability« IntOP 2018 des European Materials Modelling Council 06. - 07.11.18, Freiburg

Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen

Girls' Day 2018 25.04.18, Freiburg

Messen mit Fraunhofer IWM-Beteiligung

Experience Additive Manufacturing 2018 25.-27.9.18, Augsburg

Glasstec 2018 23.-26.10.18, Düsseldorf

Euroblech 2018 23.-26.10.18, Hannover

Erteilte Patente 2018

Kübler, R.; Rist, T.; Hötger, B. Verfahren zum Heraustrennen von Einzelscheiben aus einer Verbundglastafel und Verwendung einer Vorrichtung dafür Patent-Nr. DE102010012265B4

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

- Amann, T.; Gatti, F.; Oberle, N.; Kailer, A.; Rühle, J.
Galvanically induced potentials to enable minimal tribochemical wear of stainless steel lubricated with sodium chloride and ionic liquid aqueous solution
 Friction 6/2 (2018) 230-242
- Amann, T.; Kailer, A.; Oberle, N.; Li, K.; Walter, M.; List, M.; Rühle, J.
Macroscopic superlow friction of steel and diamond-like carbon lubricated with a formanisotropic 1,3-diketone
 ACS Omega 2/11 (2017) 8330-8342
- Amann, T.; Waidele, M.; Kailer, A.
Analysis of mechanical and chemical mechanisms on cavitation erosion-corrosion of steels in salt water using electrochemical methods
 Tribology International 124 (2018) 238-246
- 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
- Badorrek, J.; Walter, M.; Laborie, M-P.
Tuning intermolecular interaction between lignin and carbon nanotubes in fiber composites – a combined experimental and ab-initio modeling study
 Journal of Renewable Materials 6/3 (2018) 325-335
- Beckmann, C.; Kennerknecht, T.; Preußner, J.; Farajian, M.; Luke, M.; Hohe, J.
Micromechanical investigation and numerical simulation of fatigue crack formation in welded joints
 Engineering Fracture Mechanics 198 (2018) 142-157
- Beckmann, C.; Preußner, J.; Kennerknecht, T.; Farajian, M.; Luke, M.; Hohe, J.
Mikrostrukturbasierte Beschreibung: Rissentstehung in Schweißverbindungen – Novel microstructural based description: crack formation in welded joints
 Konstruktion, referierter Fachaufsatz Werkstofftechnik 3 (2018) 64-69
- Böttcher, R.; Winkler, H.-J.; Dienwiebel, M.; Scherge, M.
Tribology of wire arc spray coatings under the influence of regenerative fuels
 Lubricants 6/3 Special Issue Applied Nanotechnology (2018) Art. 60, 9 Seiten
- Bosch, A.; Vormwald, M.; Schackert, S.; Schweizer, C.
Fatigue life assessment of welded joints made of the stainless steel X6CrNiNb18-10 for thermomechanical and variable amplitude loading
 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 49/3 (2018) 316-33
- Buchs, G.; Bercieux, D.; Mayrhofer, L.; Gröning, O.
Confined electron and hole states in semiconducting carbon nanotube sub-10 nm artificial quantum dots
 Carbon 132 (2018) 304-311
- Butala, M.M.; Doan-Nguyen, V.V.T.; Lehner, A.J.; Göbel, C.; Lumley, M.A.; Arnon, S.; Wiaderek, K.M.; Borkiewicz, O.J.; Chapman, K.W.; Chupas, P.J.; Balasubramanian, M.; Seshadri, R.
Operando studies reveal structural evolution with electrochemical cycling in Li-CoS₂
 The Journal of Physical Chemistry C 122/43 (2018) 24559-24569
- Codrignani, A.; Frohnappfel, B.; Magagnato, F.; Schreiber, P.; Schneider, J.; Gumbsch, P.
Numerical and experimental investigation of texture shape and position in the macroscopic contact
 Tribology International 122 (2018) 46-57
- Cui, K.; Mali, K.S.; Wu, D.; Feng, X.; Müllen, K.; Walter, M.; De Feyter, S.; Mertens, S.F.L.
Reversible anion-driven switching of an organic 2D crystal at a solid-liquid interface
 Small 13/46 (2017) 1702379 1-8
- Fiedler, J.; Thiyam, P.; Kurumbail, A.; Burger, F.A.; Walter, M.; Persson, C.; Brevik, I.; Parsons, D.F.; Boström, M.; Buhmann, S.Y.
Effective polarizability models
 The Journal of Physical Chemistry A 121/51 (2017) 9742-9751
- Förg, A.; Konrath, G.; Popa, S.; Kailer, A.; Killinger, A.; Gadow, R.
Tribological properties of high velocity suspension flame sprayed (HVSFS) ceramic coatings
 Surface and Coatings Technology 349 (2018) 901-908
- Gagel, J.; Weygand, D.; Gumbsch, P.
Discrete dislocation dynamics simulations of dislocation transport during sliding
 Acta Materialia 156 (2018) 215-227
- Gola, A.; Gumbsch, P.; Pastewka, L.
Atomic-scale simulation of structure and mechanical properties of Cu(1-x)Ag(x)Ni multilayer systems
 Acta Materialia 150 (2018) 236-247
- Greiner, C.; Liu, Z.; Schneider, R.; Pastewka, L.; Gumbsch, P.
The origin of surface microstructure evolution in sliding friction
 Scripta Materialia 153 (2018) 63-67
- Gröner, L.; Kirste, L.; Oeser, S.; Fromm, A.; Wirth, M.; Meyer, F.; Burmeister, F.; Eberl, C.
Microstructural investigations of polycrystalline Ti₂AlN prepared by physical vapor deposition of Ti-AlN multilayers
 Surface and Coatings Technology 343 (2018) 166-171
- Guillon, O.; Elsässer, C.; Gutfleisch, O.; Janek, J.; Korte-Kerzel, S.; Raabe, D.; Volkert, A.
Manipulation of matter by electric and magnetic fields: Toward novel synthesis and processing routes of inorganic materials
 Materials Today 21/5 (2018) 527-536
- Han, X.; Courseau, J.; Khamassi, J.; Nottrodt, N.; Engelhardt, S.; Jacobsen, F.; Bierwisch, C.; Meyer, W.; Walter, T.; Weisser, J.; Jaeger, R.; Bibb, R.; Harris, R.
Optimized vascular network by stereolithography for tissue engineered skin
 International Journal of Bioprinting 4/2 (2018) Art. 134, 17 Seiten
- Heckman, N.M.; Berwind, M.; Eberl, C.; Hodge, A.M.
Microstructural deformation in fatigued nanotwinned copper alloys
 Acta Materialia 144 (2018) 138-144
- Hees, T.; Zhong, F.; Koplín, C.; Jaeger, R.; Mülhaupt, R.
Wear resistant all-PE single-component composites via 1D nanostructure formation during melt processing
 Polymer 151 (2018) 47-55
- Hohe, J.; Paul, H.; Beckmann, C.
A probabilistic elasticity model for long fiber reinforced thermoplastics with uncertain microstructure
 Mechanics of Materials 122 (2018) 118-132
- Kertsch, L.; Helm, D.
A thermodynamically consistent model for elastoplasticity, recovery, recrystallization and grain coarsening
 International Journal of Solids and Structures 152-153 (2018) 185-195
- Klemenz, A.; Gola, A.; Moseler, M.; Pastewka, L.
Contact mechanics of graphene-covered metal surfaces
 Applied Physics Letters 112/6 (2018) 061601 1-12
- Körner, W.; Krügel, G.; Urban, D.F.; Elsässer, C.
Screening of rare-earth-lean intermetallic 1-11 and 1-11-X compounds of YNiIn₂-type for hard-magnetic applications
 Scripta Materialia 154 (2018) 295-299
- Kuwahara, T.; Moras, G.; Moseler, M.
Role of oxygen functional groups in the friction of water-lubricated low-index diamond surfaces
 Physical Review Materials 2/7 (2018) 073606 1-11
- Leitner, M.; Murakami, Y.; Farajian, M.; Remes, H.; Stoschka, M.
Fatigue strength assessment of welded mild steel joints containing bulk imperfections
 Metals 8/5 (2018) 306 1-15
- Li, K.; Zhang, S.; Liu, D.; Amann, T.; Zhang, C.; Yuan, C.; Luo, J.
Superlubricity of 1,3-diketone based on autonomous viscosity control at various velocities
 Tribology International 126 (2018) 127-132

- Lienhard, J.; Schulenberg, L.
Strain rate dependent multiaxial characterization of long fiber reinforced plastic
 Composites Part B: Engineering 141 (2018) 164-173
- Liu, D.; Li, K.; Zhang, S.; Amann, T.; Zhang, C.; Yan, X.
Anti-spreading behavior of 1,3-diketone lubricating oil on steel surfaces
 Tribology International 121 (2018) 108-113
- Liu, L.; Zhang, Z.; Dienwiebel, M.
The running-in tribological behavior of Pb-free brass and its effect on microstructural evolution
 Tribology Letters 65/4 (2017) Art. 160, 9 Seiten
- Liu, Z.; Patzig, C.; Selle, S.; Höche, T.; Gumbsch, P.; Greiner, C.
Stages in the tribologically-induced oxidation of high-purity copper
 Scripta Materialia 153 (2018) 114-117
- Ma, Y.-S.; Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Zhang, K.-S.
Influences of initial porosity, stress triaxiality and Lode parameter on plastic deformation and ductile fracture
 Acta Mechanica Sinica 30/5 (2017) 493-506
- Matthey, B.; Kunze, S.; Hörner, M.; Blug, B.
SiC-bonded diamond materials produced by pressureless silicon infiltration
 Journal of Materials Research 32/17 (2017) 3362-3371
- Metzger, M.; Seifert, T.
Computational assessment of the microstructure-dependent plasticity of lamellar gray cast iron - Part IV: Assessment of the yield surface after plastic loading
 International Journal of Solids and Structures 141-142 (2018) 173-182
- Meyer, F.; Oeser, S.; Graff, A.; Reisacher, E.; Carl, E.-R.; Fromm, A.; Wirth, M.; Groener, L.; Burmeister, F.
Effect of substrate bias on the growth behavior of iridium on A-plane sapphire using radio frequency sputtering at low temperatures
 Thin Solid Films 650 (2018) 65-70
- Möller, J.; Körner, W.; Krugel, G.; Urban, D.F.; Elsässer, C.
Compositional optimization of hard-magnetic phases with machine-learning models
 Acta Materialia 153 (2018) 53-61
- Möller, J.; Mrovec, M.; Bleskov, I.; Neugebauer, J.; Hammerschmidt, T.; Drautz, R.; Elsässer, C.; Hickel, T.; Bitzek, E.
{110} planar faults in strained bcc metals: Origins and implications of a commonly observed artifact of classical potentials
 Physical Review Materials 2/9 (2018) 093606 1-16
- Moras, G.; Klemenz, A.; Reichenbach, T.; Gola, A.; Uetsuka, H.; Moseler, M.; Pastewka, L.
Shear melting of silicon and diamond and the disappearance of the polyamorphic transition under shear
 Physical Review Materials 2/8 (2018) 0836011-6
- Nakanishi, K.; Aria, A.; Berwind, M.; Weatherup, R.S.; Eberl, C.; Hofmann, S.; Fleck, N.
Compressive behavior and failure mechanisms of freestanding and composite 3D graphitic foams
 Acta Materialia 195 (2018) 187-196
- Reiser, J.; Hoffmann, A.; Hain, J.; Jäntschi, U.; Klimenkov, M.; Hohe, J.; Mrotzek, T.
Thermal management materials based on molybdenum (Mo) and copper (Cu): Elucidation of the rolling-induced evolution of thermo-physical properties (e.g. CTE)
 Journal of Alloys and Compounds 776 (2019) 387-416
- Rockenhäuser, C.; Schriever, S.; v.Hartrott, P.; Piesker, B.; Skrotzki, B.
Comparison of long-term radii evolution of the S-phase in aluminum alloy 2618A during ageing and creep
 Materials Science and Engineering: A 716 (2018) 78-86
- Savio, D.; Falk, K.; Moseler, M.
Slipping domains in water-lubricated microsystems for improved load support
 Tribology International 120 (2018) 269-279
- Scherge, M.
The running-in of lubricated metal-metal contacts – a review on ultra-low wear systems
 Lubricants 6/2 (2018) Art. 54, 9 Seiten
- Scherge, M.; Böttcher, R.; Spagni, A.; Marchetto, D.
High-speed measurements of steel-ice friction: Experiment vs. calculation
 Lubricants 6/1 (2018) Art. 26, 8 Seiten
- Schubert, R.; Kraft, T.; Bierwisch, C.
Convergence study of the Immersed Domain method for periodic particle configurations
 Powder Technology 337 (2017) 104-110
- Schubnell, J.; Farajian, M.; Däuwel, T.; Shin, Y.
Numerical fatigue life analysis of a high frequency mechanical impact treated industrial component based on damage mechanics models
 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 49/1 (2018) 113-127
- Sudmanns, M.; Gumbsch, P.; Schulz, K.
Plastic flow and dislocation strengthening in a dislocation density based formulation of plasticity
 Computational Materials Science 151 (2018) 317-327
- 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 (2018) Art. 888, 7 Seiten
- Weber, M.; Helm, D.
Prediction of the behaviour of copper alloy components under complex loadings by electro-thermomechanical coupled simulations
 Materials Science and Technology 2018) 9 Seiten
- Würdemann, R.; Walter, M.
Charge transfer excitations with range separated functionals using improved virtual orbitals
 Journal of Chemical Theory and Computation 14/7 (2018) 3667-3676
- Zhang, W.; Schröder, C.; Schlüter, B.; Knoch, M.; Duszka, J.; Sedlak, R.; Mülhaupt, R.; Kailer, A.
Effect of mechanochemically functionalized multilayer graphene on the tribological properties of silicon carbide/graphene nanocomposites in aqueous environment
 Tribology Letters 66/4 (2018) Art. 121, 12 Seiten
- Ziegler, T.; Hernandez Marquez, J.; Jaeger, R.; Phommahavong, S.
Wear mechanisms and abrasion rates in selective laser sintering materials
 Polymer Testing 67 (2018) 545-550

VERÖFFENTLICHTE KONFERENZBEITRÄGE

Abdul Hamid, Z.M.; Hohe, J.; Gall, M.; Flieger, S.; Gumbsch, P.
Fatigue damage and degradation model for carbon fibre reinforced polymer materials
PAMM 17/1 Special Issue: 88th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Könke, C.; Trunk, C. (Eds.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2017) 259-260

Andrieux, F.; Sun, D.-Z.
Modeling of anisotropic behavior of aluminum profile for damage prediction
in Proc. of 16th International Aluminum Alloys Conference (ICAA16) 2018; Wells, M.; Brochu, M. (Eds.); Metallurgy and Materials Society of CIM, Montreal, Canada (2018) Paper 401049, 10 Seiten

Andrieux, F.; Sun, D.-Z.; Burbli, A.
Damage modelling of an aluminum cast alloy accounting for pore morphology
in Proc. of 10th Aluminium Two Thousand International Congress; 6th International Conference on Extrusion and Benchmark ICEB 2017; Università di Bologna (Ed.); Interall Srl, Modena, Italien (2017) 8 Seiten

Bierwisch, C.
A surface tension and wetting model for the δ -SPH scheme
SPHERIC 2018: Proceedings of the 13th SPHERIC International Workshop 2018; Quinlan, N.J.; Tong, M.; Moghimi, M.H.; McLoone, M. (Eds.); National University of Ireland, Galway, Ireland (2018) 95-102

Bierwisch, C.
Partikelbasierte Simulationen der Schmelz- und Erstarrungsdynamik in Pulverbettverfahren
in Tagungsband DGM-Fachtagung Werkstoffe und Additive Fertigung; Hoyer, P.; Leyens, C.; Niendorf, T.; Ploshikhin, V.; Schulze, V.; Witt, G. (Hrsg.); Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Sankt Augustin (2018) 134-139

Bosch, A.; Schackert, S.; Vormwald, M.; Schweizer, C.
Fatigue life of welded joints of AISI 347 stainless steel under thermo-mechanical and variable amplitude loading
in Proc. of ASME Pressure Vessels & Piping Conference PVP 2018; American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2018) Art. PVP2018-8470, 10 Seiten

Dittmann, F.; Varfolomeev, I.
Erweiterte Berechnungsverfahren im Rahmen des bruchmechanischen Festigkeitsnachweises: Berücksichtigung von Constraint und thermischen Spannungen
in Tagungsband DVM-Tagung »Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise«; Bacher-Höchst, M.; Esderts, A. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2018) 75-82

Friedmann, V.; Maier, G.; Schweizer, C.; Quintus, C.
Creep-fatigue lifetime modelling of bellows made of AISI 316
in Proc. of 8th International Conference on Low Cycle Fatigue LCF 8; Beck, T.; Charkaluk, E. (Eds.); DVM e.V., Berlin (2017) 153-158

Gall, M.; Sommer, S.; Zerling, F.; Wagner, T.; Schlimper, R.
Characterization of a polyurethane adhesive and comparative calibration of different material models in LS-DYNA
in Tagungsband 15. Deutsches LS-DYNA Forum 2018; DYNAMore GmbH, Stuttgart (2018) 20 Seiten

Hohe, J.; Beckmann, C.; Kennerknecht, T.; Preußner, J.; Farajian, M.; Luke, M.
Experimental investigation and numerical simulation of fatigue crack formation in polycrystalline materials
PAMM 17/1 Special Issue: 88th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Könke, C.; Trunk, C. (Eds.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2017) 245-246

Huberth, F.; Bimi, P.; Klitschke, S.; Lienhard, J.
Dynamic micro testing over more than 5 decades of strain rates
in Proc. of 2nd International Conference on Impact Loading of Structures and Materials ICILSM 2018; Northwestern Polytechnical University (Ed.); Northwestern Polytechnical University X'ian, Xi'an, China (2018) Art.116, 4 Seiten

Huberth, F.; Klitschke, S.; Gall, M.; Sommer, S.; Schnabel, K.; Baumgartner, J.
Crash and durability of aluminum and mixed steel aluminum joints made by electromagnetic pulse welding
in Proc. of 8th International Conference on High Speed Forming ICHSF 2018; Technische Universität Dortmund, Dortmund (2018) 10 Seiten

Iwainsky A.; Herfert, D.; Günther, M.; Sommer, S.; Rochel, P.; Meschut, G.; Hein, D.; Giese, P.
Daten- und prognosebasierte Generierung von Modellparametern und Erweiterung einer Softwarebenutzeroberfläche für die Crashesimulation mechanisch gefügter Verbindungen
in EFB-Tagungsband Nr. 045 Gemeinsame Forschung in der mechanischen Fügetechnik 2017; 7. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium 2017; FOSTA; EFB; DVS (Hrsg.); Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover (2017) 69-76

Kertsch, L.; Helm, D.
Thermodynamically consistent modelling of recrystallization and grain coarsening in precipitation-hardened alloys
PAMM 17/1 Special Issue: 88th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Könke, C.; Trunk, C. (Eds.); WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2017) 425-426

Klitschke, S.; Reichert, T.; Trondl, A.; Huberth, F.
Charakterisierung hochfester Karosserieblechwerkstoffe unter quasi-statischer und crashartiger Scherbelastung
in Tagungsband Werkstoffprüfung 2017, Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis, 35. Vortrags- und Diskussionstagung; Frenz, H.; Langer, J.B. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2017) 179-184

Klitschke, S.; Trondl, A.; Huberth, F.; Liewald, M.
Adiabatic heating under various loading situations and strain rates for advanced high-strength steels
IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 418/1; 37th International Deep Drawing Research Group Conference - Forming of High Performance Sheet Materials and Components IDDRG 2018; Butcher, C.; Worswick, M.; Bardelcik, A. (Eds.); IOP Publishing Ltd., London, UK (2018) Art. 012123, 10 Seiten

Klocke, F.; Münstermann, S.; Schröder, K.-U.; Apel, M.; Binder, M.; Butz, A.; Döbbeler, B.; Fischersworing-Bunk, A.; Prah, U.; Ruess, M.
Integrative Werkstoff- und Prozesssimulation
in Tagungsband AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017 Internet of Production für agile Unternehmen; Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.); Apprimus Verlag, Aachen (2017) 409-433

Lienhard, J.; Discher, D.; Huberth, F.
Experimental determined temperature and strain field correlation in high-speed LFT characterization
in Proc. of 2nd International Conference on Impact Loading of Structures and Materials ICILSM 2018; Northwestern Polytechnical University (Ed.); Northwestern Polytechnical University X'ian, Xi'an, China (2018) Art.113, 4 Seiten

Mayer, U.; Reichert, T.; Tlatlik, J.
Fracture mechanics at elevated loading rates in the ductile to brittle transition region
in Proc. of ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 6A: Materials and Fabrication; Zhu, X.-K. (Ed.); ASME The American Society of Mechanical Engineers, New York City, NY, USA (2017) Art. PVP2017-65358, 10 Seiten

Morand, L.; Pagenkopf, J.; Helm, D.
Material-based process-chain optimization in metal forming
PAMM 17/1 Special Issue: 88th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Könke, C.; Trunk, C. (Eds.); Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim (2017) 709-710

Pyttel, B.; Varfolomeev, I.
Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis nach der FKM-Richtlinie – 4. erweiterte Ausgabe
in Tagungsband DVM-Tagung »Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise«; Bacher-Höchst, M.; Esderts, A. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2018) 67-74

Rist, T.; Gremmelspacher, M.; Baab, A.

Feasibility of bent glasses with small bending radii
ce/papers 2/5-6, Special Issue: Engineered Transparency 2018 Glass in
Architecture and Structural Engineering; Jesse, D. (Ed.); Ernst & Sohn Verlag
für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin (2018)
183-189

Rockenhäuser, C.; Augenstein, E.; Skrotzki, B.

Long term ageing of alloy 2618A
in Proc. of 16th International Aluminum Alloys Conference (ICAA16) 2018;
Wells, M.; Brochu, M. (Eds.); Metallurgy and Materials Society of CIM,
Montreal, Canada (2018) Paper 400101, 10 Seiten

Rockenhäuser, C.; von Hartrott, P.; Metzger, M.; Schriever, S.; Augenstein, E.;
Karlin, J.; Piesker, B.; Schweizer, C.; Skrotzki, B.

**Lebensdauerberechnung von Aluminium-Radialverdichterrädern unter
Berücksichtigung der Werkstoffalterung**
in Tagungsband R583 FVV Frühjahrstagung 2018; Forschungsvereinigung
Verbrennungskraftmaschinen e.V. (Hrsg.); Forschungsvereinigung Verbren-
nungskraftmaschinen, Frankfurt a. M. (2018) 97-130

Schober, M.; Kuboki, T.; Ameri, E.; Hohe, J.; Gumbusch, P.

**Effects of process parameters on the interlaminar fracture toughness
of GF-PA6-tapes**
PAMM 17/1 Special Issue: 88th Annual Meeting of the International Asso-
ciation of Applied Mathematics and Mechanics; (GAMM); Könke, C.; Trunk, C.
(Eds.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2017) 273-274

Sommer, S.; Rochel, P.; Guenther, M.; Herfert, D.; Meschut, G.; Giese, P.
**Crash simulation of mechanical joints with automatically determined
model parameters based on test results and prediction algorithms**
in Proc. of 15th International LS-DYNA® Users Conference 2018; DYNAmore
GmbH (Ed.); DYNAmore GmbH, Stuttgart (2018) 14 Seiten

Sun, D.-Z.; Ockewitz, A.; Trondl, A.

**Simulation of extrusion processes of aluminum profiles with modeling
of microstructure**
in Proc. of 16th International Aluminum Alloys Conference (ICAA16) 2018;
Wells, M.; Brochu, M. (Eds.); Metallurgy and Materials Society of CIM,
Montreal, Canada (2018) Paper 400976, 12 Seiten

Tlatlik, J.

**Untersuchung und Modellierung lokaler Rissarrestereignisse in
ferritisch-bainitischen Stählen bei erhöhten Belastungsraten**
in Tagungsband 50. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und
Bauteilsicherheit 2018, Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung:
Beanspruchungsanalyse, Prüfmethode und Anwendungen; Vormwald, M.
(Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin
(2018) 10 Seiten

Varfolomeev, I.; Moroz, S.; Siegele, D.; Kadau, K.; Amann, C.

Study on fatigue crack initiation and propagation from forging defects
Procedia Structural Integrity Vol. 7/Part of special issue: 3rd International
Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017; Beretta, S.;
Foletti, S.; Nicoletto, G.; Tovo, R. (Eds.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande
(2017) 359-367

Varfolomeev, I.; Hohe, J.

**Abschätzung der örtlich ertragbaren Dehnung beim statischen
Festigkeitsnachweis**
in Tagungsband DVM-Tagung »Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeits-
nachweise«; Bacher-Höchst, M.; Esderts, A. (Hrsg.); Deutscher Verband für
Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2018) 117-124

Vormwald, M.; Bosch, A.; Schackert, S.; Schweizer, C.

**Fatigue lives of power plant structures due to load sequence effects
originating from fluctuating production of renewable energy**
MATEC Web Conf. Vol. 188, 5th International Conference of Engineering
Against Failure 2018 ICEAF-V 2018; Pantelakis, S.; Koubias, S. (Eds.); EDP
Sciences, Les Ulis, France (2018), Art. 02012, 8 Seiten

BÜCHER, BUCHBEITRÄGE

Hemmes, K.; Farajian, M.

**Numerical welding simulation as a basis for structural integrity
assessment of structures: Microstructure and residual stresses**
Residual stress analysis on welded joints by means of numerical simulation
and experiments; Ferro, P. (Ed.); IntechOpen Limited, London, UK (2018)
29-47

Kailer, A.

Tribologisches Verhalten
Technische Keramik: Grundlagen - Werkstoffe - Verfahrenstechnik; Kollen-
berg, W. (Hrsg.); Vulkan Verlag, Essen (2018) 74-84

ZEITSCHRIFTEN

Baiker, M.; Pagenkopf, J.; Helm, D.

**Untersuchung der thermomechanischen Eigenschaften von additiv
gefertigtem IN718 mit Hilfe von Mikrostruktursimulationen**
NAFEMS Online-Magazin 43/3 (2017) 52-58

Fischer, C.; Schweizer, C.; Augenstein, E.

**Bewertung der prozessabhängigen Werkstoffeigenschaften von
additiv gefertigtem AlSi10Mg unter statischer und niederzyklischer
Ermüdungsbeanspruchung**
Giesserei Praxis 9 / Special - Additive Fertigung (2018) 40-48

Kessler, B.; Brenner, B.; Dittrich, D.; Maier, G.; Oesterlin, H.; Bendjus, B.

**Laser-Multi-Pass-Narrow-Gap-Welding – A new technology for joining
thick-walled components of power stations**
VGB PowerTech Journal 1/2 (2018) 74-77

Siegele, D.; Tempel, P.; Eichheimer, C.; Farajian, M.; Veile, I.

**Zum Einfluss von herstellungsbedingten Ungängen auf das
Festigkeitsverhalten von Bauteilen aus Stahlguss**
Giesserei 2 / Special - Forschung und Innovation (2017) 28-43

von Hartrott, P.; Metzger, M.; Rockenhäuser, C.; Skrotzki, B.

Alterung und Lebensdauer
MTZ Motortechnische Zeitschrift 79/10 (2018) 72-76

Weber, M.; Helm, D.

**Bessere Werkstoffsimulation für Steckverbinder. Analyse und Bewer-
tung des mechanischen Verhaltens von Kupferbauteilen mithilfe von
FE-Simulation**
Wt Werkstatttechnik online 1/2 (2018) 79-81

Impressum

Redaktion

Katharina Hien
Thomas Götz

Gestaltung und Produktion

Erika Hellstab
Marianne Förderer

Anschrift der Redaktion

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

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

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

Bildquellen

Titelbild: © Felizitas Gemetz, Freiburg

Seite 3, 14, 15, 20, 21, 28, 29, 38, 39,
50, 51: © Stock-Müller, Freiburg

Seite 59: © Matthew Berwind,
Freiburg

Alle übrigen Abbildungen:
© Fraunhofer IWM