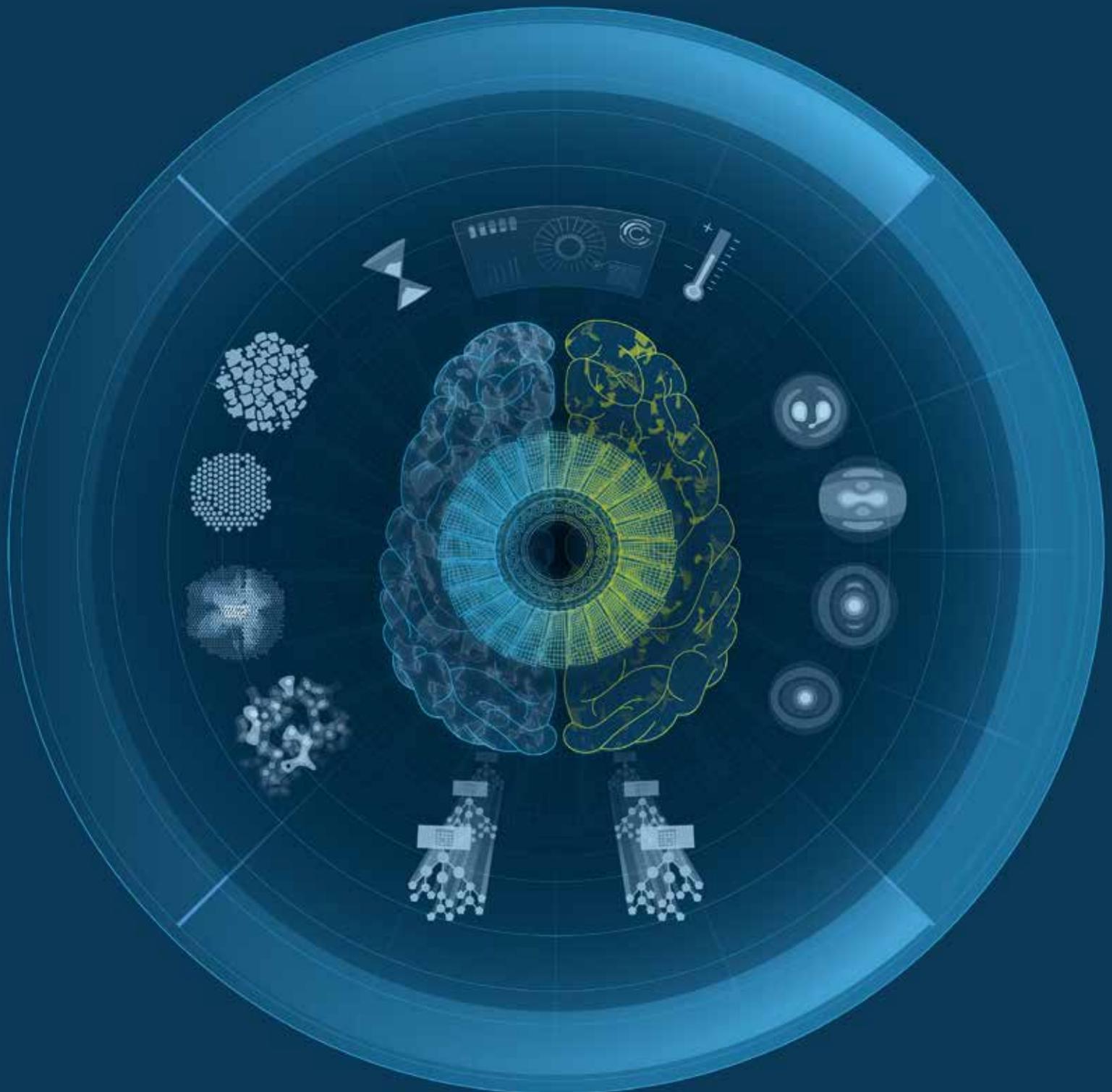




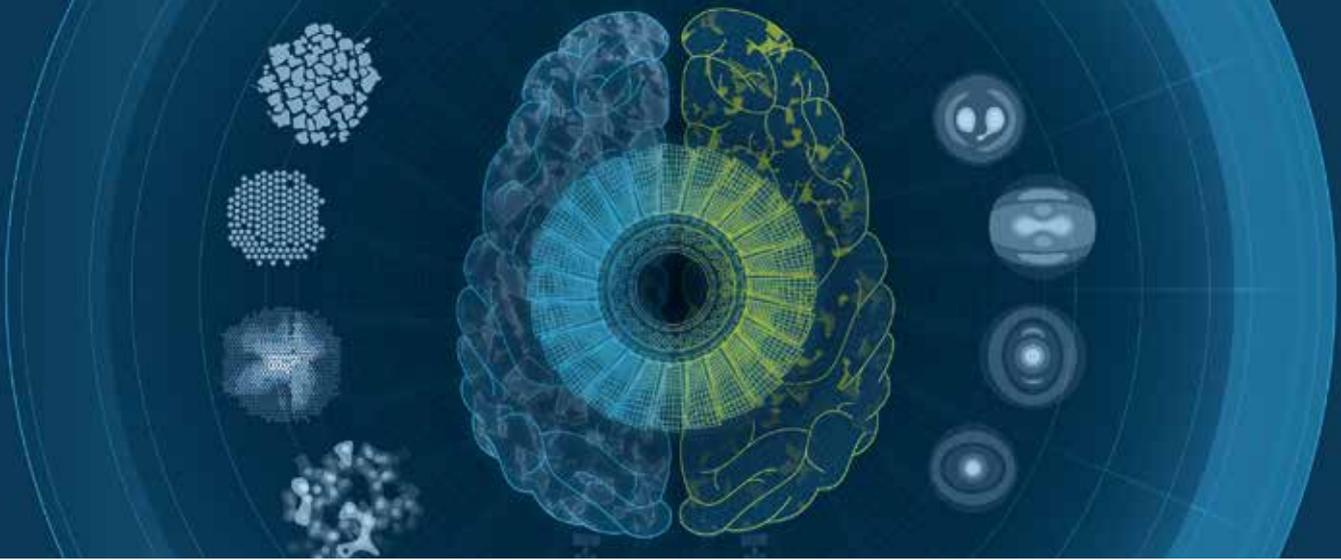
Fraunhofer

IWM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKSTOFFMECHANIK IWM



JAHRESBERICHT 2017



Digitalisierung in werkstoffintensiven Wertschöpfungsketten

Die für die Digitalisierung von Produktionen notwendige digitale Repräsentation von Werkstoffen ist Teil der strategischen Themen des Fraunhofer IWM und ein wichtiger Bestandteil unserer Forschungsarbeiten. Die Digitalisierung verspricht Wettbewerbsvorteile durch Vernetzung, Integration und neue Dienstleistungen auf der Basis von Informationsströmen und der Auswertung großer Datenmengen. In der werkstoffintensiven Wertschöpfung ist dazu eine digitale Repräsentation der eingesetzten Materialien erforderlich: In diesem Digitalen Zwilling werden Werkstoffmodellierung, Prozess- und Bauteilsimulation, Werkstoffcharakterisierung und Prozessoptimierung auf integrative Weise verknüpft (siehe Seite 9).

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 69 Institute und Forschungseinrichtungen. 24 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 2,3 Milliarden Euro. Davon entfallen etwa 2,0 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Mehr als 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Knapp 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

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

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

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

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

www.fraunhofer.de

JAHRESBERICHT 2017

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

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

im vergangenen Jahr haben wir auf den unterschiedlichsten Ebenen in die Zukunft des Fraunhofer IWM investiert: in die Schärfung unseres strategischen Forschungsprofils, in die Entwicklung unserer Mitarbeiterinnen, Mitarbeiter und Führungskräfte sowie in neue Gebäude für unsere Werkstoffforschung.

Im Beisein von Katrin Schütz, Staatssekretärin im Landesministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau, konnten wir mit der Einweihung des Technikum-Gebäudes auf dem Karlsruher Campus Ost die Aufbauphase des MikroTribologie Centrums μ TC im Juni abschließen. An unseren nun drei Standorten – am Campus Ost und am Campus Süd des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) sowie im Mutterhaus in Freiburg – haben wir mit fast 80 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Tribologie eine kritische Masse, um substantielle und nachhaltige Beiträge zur weltweiten Aufgabe leisten zu können, Reibung und Verschleiß in Betrieb und Produktion ressourceneffizient einzustellen (siehe Seite 8). Im Herbst starteten wir in den zweiten Bauabschnitt unserer Gebäude in Freiburg: Die Anzahl der Büro- und Technikumsräume wird durch ein zusätzliches Gebäude erweitert. Mit der geplanten baulichen Verbindung unserer Bestandsgebäude wird das Fraunhofer IWM in Freiburg ein völlig neues Gesicht bekommen. Trotz der umfangreichen Bauaktivitäten werden unsere Auftraggeber auch weiterhin professionell und innovativ mit Forschungsergebnissen versorgt.

In einem systematischen Strategieprozess haben wir unsere Ausrichtung in vier strategischen Institutsthemen neu definiert:

- Aufklärung, Bewertung und Vorhersage des Einsatzverhaltens von Produkten im Lebenszyklus,
- werkstoffgerechte Prozess- und Bauteiloptimierung,
- Entwicklung einsatzgerechter multifunktionaler Werkstoffe sowie
- digitale Repräsentation von Werkstoffen.

An diesen thematischen »Leuchttürmen« soll das Institut in den nächsten fünf bis zehn Jahren zu erkennen sein, sie bilden unser geschäftsfeldübergreifendes Mindset und tragen das Fraunhofer IWM wirtschaftlich und wissenschaftlich. Damit positionieren wir uns als führendes Zentrum zur Simulation von Werkstoffen und ihrem Verhalten und als bevorzugter Forschungs- und Entwicklungspartner für die Bewertung und Weiterentwicklung hochbeanspruchter Werkstoffe und Bauteile (siehe Seite 6-7). Im Dezember haben wir unsere Konzeption in einem Strategieaudit zur Diskussion gestellt und viel positives Feedback und konstruktive Hinweise zur Weiterentwicklung erhalten.

In zwei großen Fraunhofer-internen Initiativen arbeiten wir aktiv an der Fraunhofer Agenda 2022 mit (siehe Seite 15). Im Fraunhofer-Forschungscluster Programmierbare Materialien, dessen Leitung wir übernommen haben, haben sich mehrere Fraunhofer-Institute zusammengeschlossen, um eine Führungsposition der Fraunhofer-Gesellschaft für diese neue Materialklasse zu erarbeiten. Im Fraunhofer-Leitprojekt Machine Learning for Production ML4P tragen wir dazu bei, dass viel stärker als bisher Materialinformationen in Produktionsprozesse Eingang finden können.

Lassen Sie sich von unseren Projekten und zukunftsweisenden Arbeiten anregen, die Sie im vorliegenden Jahresbericht entdecken können.

Ich wünsche Ihnen eine inspirierende Lektüre!



Prof. Dr. Peter Gumbsch



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

INSTITUTSPROFIL

- 6 Strategische Institutsthemen des Fraunhofer IWM
- 8 Das MikroTribologie Centrum μ TC
- 9 Aktivitäten zur Digitalisierung in der Werkstoffmechanik
- 10 Organisation und Ansprechpartner
- 12 Das Institut in Zahlen
- 14 Kuratorium
- 15 Zukunftsprojekte

AUSGEWÄHLTE FORSCHUNGSERGEBNISSE

- 16 Geschäftsfeld Materialdesign
 - 18 Mit Kombinatorik und Informatik zu neuen Materialien
 - 20 Mechanische Präzisionsmessung an Mikro-Proben mittels Drei- und Vierpunktbiegung
- 22 Geschäftsfeld Fertigungsprozesse
 - 24 Warmumformung und Wärmebehandlung ausscheidungshärtbarer Legierungen
 - 26 Simulation mitschwindender Unterlagen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit beim Sintern
 - 27 Zuschnitt freier Formen aus Verbundsicherheitsglas (VSG)
- 28 Geschäftsfeld Tribologie
 - 30 Ultrakleine Reibung von Diamant durch tribo-induzierte Pandey-Rekonstruktion
 - 32 Die Tribologie von Graphenkeramik bewerten
 - 33 Verschleiß von weichen Materialien aus der generativen Fertigung bewerten
 - 34 Hochtemperaturbereich: Charakterisierung diamantähnlicher Kohlenstoffschichten
 - 35 Einlaufoptimierung mithilfe von Stribeck-Reibungskarten

- 36 Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau
- 38 Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen und Strukturen
- 40 Crashverhalten von Batteriezellen: Charakterisierung sowie Ersatzmodellierung
- 42 Crashbelastungen: Korrelation dynamischer Dehnungsfeld- und Infrarotmessungen
- 44 Schweißverbindungen: Einfluss lokaler Gefügeeigenschaften auf die Anrissbildung
- 46 Auswirkung von Erweichungszonen auf das Crashverhalten hochfester Stahlbleche
- 47 Methoden probabilistischer Multiskalenanalyse, um Materialstreuungen zu beherrschen

- 48 Geschäftsfeld Werkstoffbewertung, Lebensdauerkonzepte
- 50 Abgasturbolader: Methoden für effizienten Werkstoffeinsatz in Turbinenrädern
- 52 Wasserstoffversprödung: Werkstoffversagen bei statischer und dynamischer Belastung
- 53 Neue, elektrolytisch abscheidbare Korrosionsschutzschichten auf Kupferbasis

VERNETZUNG

KERNKOMPETENZEN UND TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN

- 54 Mitarbeit in Verbänden, Allianzen und Zentren der Fraunhofer-Gesellschaft
- 56 Übergreifende Vorlaufforschungsprojekte der Fraunhofer-Gesellschaft
- 58 Die Kernkompetenzen des Fraunhofer IWM

ANHANG

- 64 Personen, Ausbildung, Ereignisse
- 66 Veröffentlichungen
- 71 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 in vier strategischen Institutsthemen:

- der Aufklärung, Bewertung und Vorhersage des Einsatzverhaltens von Produkten im Lebenszyklus,
- der werkstoffgerechten Prozess- und Bauteiloptimierung,
- der Entwicklung einsatzgerechter multifunktionaler Werkstoffe,
- der digitalen Repräsentation von Werkstoffen.

Aufklärung, Bewertung und Vorhersage des Einsatzverhaltens von Produkten im Lebenszyklus

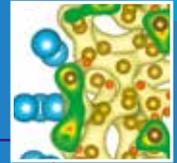
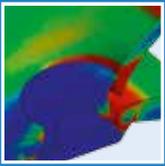
Der Bedarf für unsere Leistungen kommt aus vielen Bereichen der Energieerzeugung, der Mobilität und der Produktion. Unsere Basis dafür sind Ermüdungs-, Schädigungs-, Versagens- und Lebensdauermodelle, mit denen wir Werkstoffmechanismen präzise beschreiben können. Unsere Wettbewerbsvorteile bestehen in dem langjährigen, kompetenten Zusammenspiel von Experiment und Simulation, mit dem moderne, eigenentwickelte und weiterentwickelte Werkstoffmodelle validiert und die relevanten Inputdaten ermittelt werden.

Je nach Fragestellung beziehen wir Mechanismen aus verschiedenen Größenskalen in die Modellierung ein. Die etablierten Anwendungsgebiete sind Crash-, Festigkeits- und Sicherheitsbewertungen, die Aufklärung von Reibungs- und Verschleißmechanismen sowie Schadensanalysen. Neuere Entwicklungen betreffen Wasserstoff- und Korrosionseinflüsse oder chemische Prozesse in der Tribologie.

Werkstoffgerechte Prozess- und Bauteiloptimierung

Wir entwickeln Lösungen für Fertigungsprozesse, um die damit erzeugten Eigenschaften von Werkstoffen und Bauteilen zu optimieren oder einzustellen. Unsere Kompetenz besteht darin, die Entwicklung und Veränderung von Werkstoffeigenschaften in Fertigungsprozessen analysieren, beschreiben und vorhersagen zu können – in einer effizienten Kombination von Charakterisierung, Simulation und Modellexperimenten.

Damit bauen wir durchgängige virtuelle Prozessketten auf, die beispielsweise in der Blechumformung oder in der Pulvertechnologie zu hervorragenden Alleinstellungsmerkmalen beitragen. Unser langjähriges Know-how zu spröden Werkstoffen hat zu Verfahrensentwicklungen zum Trennen, Biegen, Prägen und Fügen von Glas geführt, die kontinuierlich weiterentwickelt und modellhaft am Institut aufgebaut werden. Unsere virtuelle Kopplung von umformtechnischen Fertigungsschritten wie Strangpressen oder Tiefziehen als auch unsere Vorhersage von Crasheigenschaften von Fahrzeugstrukturen genießt in der Industrie ein sehr hohes Ansehen. Wir erweitern die Datenbasis aus der Fertigung für die Bauteiloptimierung und erzeugen aus der Vorhersage des mechanischen Werkstoffverhaltens Mehrwerte für die Steuerung von Anlagen.



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. Daher betreiben wir zunehmend Werkstoffentwicklung auf der Basis von Multiskalensimulationen.

Zur Entwicklung einsatzgerechter multifunktionaler Werkstoffe realisieren wir – von den Systemanforderungen ausgehend – Materialfunktionen und bewerten die entsprechenden Kristall- oder Mikrostrukturen. Mit unserem Materialdesign entwickeln wir Lösungen zur Substitution kritischer Elemente in Funktionsmaterialien oder zu optisch funktionalen Materialien. Multifunktionale Beschichtungsmaterialien inklusive der Herstellungsprozesse sind unser etabliertes Geschäft. Dort haben wir erste sensorische Funktionen in Schichten integriert.

Die Erforschung von Metamaterialien und programmierbaren Materialien befindet sich in der Aufbauphase, zeigt aber deutlich, dass Herstellung und Bewertung sehr eng miteinander verknüpft sind und eine effektive Materialentwicklung nur integral erfolgen kann. Wir entwickeln das Thema mikroskalige Materialaspekte, die bisher mit makroskaliger Bewertung und Optimierung noch nicht adressiert wurden.

Digitale Repräsentation von Werkstoffen

Die Digitalisierung verspricht Wettbewerbsvorteile durch Vernetzung, Integration und neue Dienstleistungen auf der Basis von Informationsströmen und der Auswertung großer Datenmengen. Sie ist unmittelbar mit der integrierten computergestützten Materialentwicklung verknüpft, dem Werkzeug schlechthin zur quantitativen Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Prozessschritten, Materialmikrostruktur, Materialeigenschaften und Bauteilverhalten. Wir verknüpfen darin Werkstoffmodellierung, Prozess- und Bauteilsimulation, Werkstoffcharakterisierung und Prozessoptimierung und bauen so unsere Position als führendes Zentrum zur Simulation von Werkstoffen und ihrem Verhalten weiter aus.

Unser Ziel ist, neue datenbasierte FuE-Leistungen zu entwickeln, beispielsweise digitale Workflows von der »Prüfmaschine bis zum Projektbericht«. Die Digitalisierung der Werkstoffmechanik eröffnet dabei neue Möglichkeiten zur Erweiterung und Integration unserer Methoden. Die Herausforderungen bestehen dabei in der systematischen Digitalisierung von Werkstoffen oder der strukturierten Speicherung von Werkstoffdaten.



Sie machen den Weg frei für neue tribologische Impulse, von links: Prof. Dr. Matthias Scherge (Leiter und Sprecher μ TC), Dr. Ulrich Breuer (Vizepräsident für Wirtschaft und Finanzen des KIT), Katrin Schütz (Wirtschaftsstaatssekretärin), Prof. Dr. Peter Gumbsch (Institutsleiter Fraunhofer IWM und Leiter μ TC), Prof. Dr. Peter Elsner (Vorsitzender Fraunhofer-Verbund MATERIALS und Mitglied des Präsidiums der Fraunhofer-Gesellschaft), Dr. Jürgen Kirschner (Geschäftsleiter Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH und Kuratoriumsvorsitzender des Fraunhofer IWM).

DAS MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM μ TC

Die Einweihung des neuen Gebäudes des MikroTribologie Centrums μ TC auf dem Campus Ost des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) schließt den Aufbau des μ TC erfolgreich ab. Wirtschaftsstaatssekretärin Katrin Schütz gab das Technikum im Juni 2017 feierlich mit einem Schnitt durch das Eröffnungsband frei: mit dabei Ehrengäste aus Industrie, Politik, Fraunhofer-Gesellschaft und dem KIT. Damit ist das μ TC an drei Standorten präsent und aktiv. Außer den abgeschlossenen Bauvorhaben gehören auch der Aufbau der Organisationsstruktur und das eingeschwungene Zusammenspiel zwischen KIT und Fraunhofer zum Erfolg der ersten sieben Jahre des μ TC.

Mit etwa 80 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von Fraunhofer IWM und KIT ist das μ TC ein Keyplayer auf dem Gebiet der tribologischen Forschung. Die Forscherinnen und Forscher analysieren tribologisches Materialverhalten bis auf die atomare Ebene, erfassen tribologische Mechanismen in Modellen und machen sie damit berechenbar.

Standorte des MikroTribologie Centrums μ TC



Fraunhofer IWM Freiburg

Schwerpunkte bei der Simulation von Reibungs- und Verschleißprozessen, Verschleißschutzschichten und Polymertribologie.



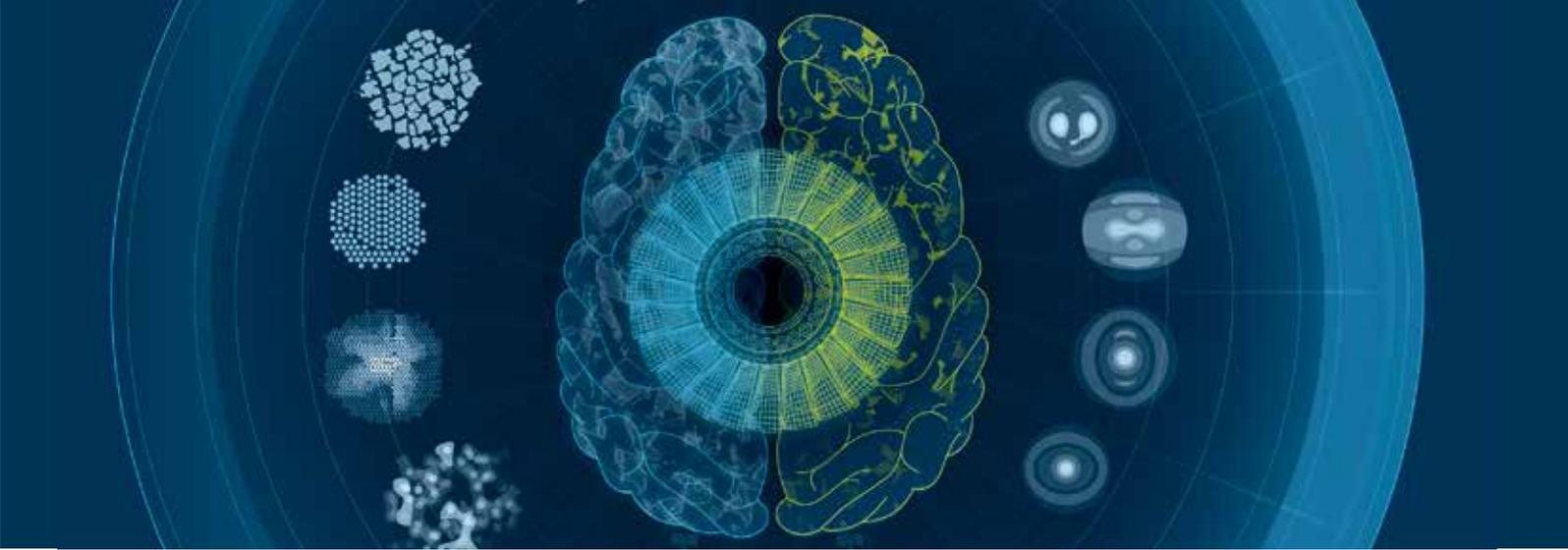
Campus Süd KIT, Karlsruhe

Fokus auf Triboanalytik, Bewertung von tribologisch belasteten Oberflächen und multiskaliger Simulation tribologischer Prozesse.



Campus Ost KIT, Karlsruhe

Schwerpunkthemen Nanotribologie, Bewertung geschmierter Tribosysteme und Echtzeitmessung von Verschleiß.



AKTIVITÄTEN ZUR DIGITALISIERUNG IN DER WERKSTOFFMECHANIK

Die in Industrie 4.0 angestrebte intelligente Vernetzung von Produkten und Prozessen wird durch den sogenannten digitalen Materialzwilling erweitert: Er bezeichnet die digital gespeicherte Momentaufnahme werkstoffmechanischer Daten realer Werkstoffe, Proben und Komponenten, die alle Informationen zur Vorgeschichte mitführt. Es ergeben sich enorme Potenziale für die Material- und Produktionseffizienz.

Um den Digitalen Zwilling zu erzeugen, braucht es Werkstoffdatenräume und eine automatisierbare, durchgehende und nachvollziehbare Datenverarbeitungskette von der Datenerzeugung bis zur Datenanalyse. Die digitale Repräsentation von Werkstoffen ist eins von vier strategischen Institutsthemen des Fraunhofer IWM: Unser Ziel ist, neue datenbasierte FuE-Leistungen zu entwickeln, beispielsweise digitale Workflows von der »Prüfmaschine bis zum Projektbericht«.

Das Fraunhofer IWM ist zudem Mitinitiator des Materials Data Space des Fraunhofer-Verbunds MATERIALS der Fraunhofer-Gesellschaft. Der Materials Data Space soll für die Industrie unternehmensübergreifend digitale Daten zu Werkstoffen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bereitstellen – eine wichtige Grundlage für Industrie 4.0. Prof. Dr. Chris Eberl ist in leitender Funktion in Gremien der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des VDI zur digitalen Transformation der Werkstofftechnik tätig. Auf europäischer Ebene ist das Fraunhofer IWM maßgeblich am Aufbau des European Materials Modelling Council EMMC-CSA beteiligt, das Perspektiven und Empfehlungen für zukünftige Standards im Bereich Materialmodellierung erstellt – in enger Zusammenarbeit mit Softwareentwicklung sowie mit akademischen und industriellen Endnutzerinnen und Endnutzern. Dadurch nimmt das Fraunhofer IWM frühzeitig Trends und Entwicklungen auf und gestaltet sie mit.

Unser EU-Projekt »Formulations and computational engineering« (FORCE), im Rahmen von Horizon 2020, hat zum Ziel, für verschiedene Industriebereiche die Materialmodellierung sowie Materialdaten in unternehmerische Entscheidungen zu integrieren. Dazu wird unter der Leitung von Dr. Adham Hashibon ein modernes Business Decision Support System (BDSS) entwickelt, mit dem in einem einzigen Workflow herausgefunden werden kann, welche technischen Lösungen wirtschaftlich sinnvoll sind.

Im Rahmen unseres Eigenforschungsprojekts »IWM-Werkstoffmechanikdatenbank« wird unter der Leitung von Dr. Christoph Schweizer ein Demonstrator zur Verwaltung und Analyse von heterogenen Werkstoffdaten und der Werkstoffhistorie entwickelt. Mit diesem Demonstrator soll nachgewiesen werden, dass sich Netzwerke aus vielen Werkstoffhistorien mithilfe eines logischen Grundgerüsts abbilden und auch durchsuchen lassen. Die dazu angepasste Werkstoffdatenbank basiert auf dem logischen Grundgerüst der Basic Formal Ontology, die Werkstoffmechanik-Wissen miteinander in Beziehung setzt. Werkstoffdaten sollen auf einfache Weise eingespeist, mit Abfragealgorithmen gesucht sowie maschinell ausgewertet werden können. Eine visuelle Datenausgabe soll die gefundenen Beziehungen leicht interpretierbar darstellen.

Workshop »MaterialDigital« am 11. und 12. April 2018 in Freiburg

Der erste Workshop dieser Art bringt hochkarätige Akteure verschiedener Disziplinen zusammen und zeigt an vielen Beispielen, wie die Digitalisierung in der Werkstofftechnik bereits Einzug gehalten hat und wo vielversprechende Chancen für Innovationen darauf warten, genutzt zu werden.

www.iwm.fraunhofer.de/MaterialDigital2018

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	Marius Brändlein (komm.)	+49 761 5142-452	marius.braendlein@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	Elke Schubert	+49 761 5142-124	elke.schubert@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

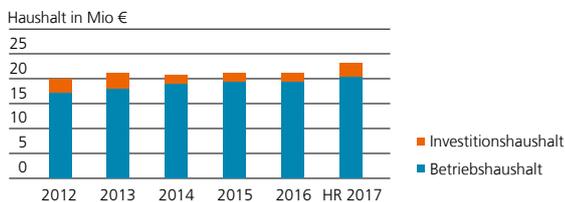
Geschäftsfelder und ihre Gruppen

Materialdesign	Prof. Dr. Christian Elsässer	+49 761 5142-286	christian.elsaesser@iwmm.fraunhofer.de
Meso- und Mikromechanik	Prof. Dr. Chris Eberl	+49 761 5142-495	chris.eberl@iwmm.fraunhofer.de
Materialmodellierung	Dr. Daniel Urban	+49 761 5142-378	daniel.urban@iwmm.fraunhofer.de
Fertigungsprozesse	Dr. Dirk Helm	+49 761 5142-158	dirk.helm@iwmm.fraunhofer.de
Pulvertechnologie, Fluidodynamik	Dr. Torsten Kraft	+49 761 5142-248	torsten.kraft@iwmm.fraunhofer.de
Umformprozesse	Dr. Dirk Helm	+49 761 5142-158	dirk.helm@iwmm.fraunhofer.de
Bearbeitungsverfahren, Glasformgebung	Tobias Rist	+49 761 5142-430	tobias.rist@iwmm.fraunhofer.de
Tribologie	Prof. Dr. Matthias Scherge	+49 761 5142-206	matthias.scherge@iwmm.fraunhofer.de
Verschleißschutz, Technische Keramik	Dr. Andreas Kailer	+49 761 5142-247	andreas.kailer@iwmm.fraunhofer.de
Multiskalenmodellierung und Tribosimulation	Prof. Dr. Michael Moseler	+49 761 5142-332	michael.moseler@iwmm.fraunhofer.de
Polymertribologie und biomedizinische Materialien	Dr. Raimund Jaeger	+49 761 5142-284	raimund.jaeger@iwmm.fraunhofer.de
Tribologische Schichtsysteme	Bernhard Blug	+49 761 5142-180	bernhard.blug@iwmm.fraunhofer.de
Angewandte Nanotribologie	Prof. Dr. Martin Dienwiebel	+49 721 204327-77	martin.dienwiebel@iwmm.fraunhofer.de
Bauteilsicherheit und Leichtbau	Dr. Michael Luke	+49 761 5142-338	michael.luke@iwmm.fraunhofer.de
Ermüdungsverhalten	Dr. Majid Farajian	+49 761 5142-268	majid.farajian@iwmm.fraunhofer.de
Crashsicherheit, Schädigungsmechanik	Dr. Dong-Zhi Sun	+49 761 5142-193	dong-zhi.sun@iwmm.fraunhofer.de
Crashdynamik	Frank Huberth	+49 761 5142-472	frank.huberth@iwmm.fraunhofer.de
Fügeverbindungen	Dr. Silke Sommer	+49 761 5142-266	silke.sommer@iwmm.fraunhofer.de
Verbundwerkstoffe	Dr. Jörg Hohe	+49 761 5142-340	joerg.hohe@iwmm.fraunhofer.de
Bruchmechanik, Strukturintegrität	Dr. Igor Varfolomeev	+49 761 5142-210	igor.varfolomeev@iwmm.fraunhofer.de
Werkstoffbewertung, Lebensdauerkonzepte	Dr. Wulf Pfeiffer	+49 761 5142-166	wulf.pfeiffer@iwmm.fraunhofer.de
Mikrostruktur, Eigenspannungen	Dr. Johannes Preußner	+49 761 5142-101	johannes.preussner@iwmm.fraunhofer.de
Lebensdauerkonzepte, Thermomechanik	Dr. Christoph Schweizer	+49 761 5142-382	christoph.schweizer@iwmm.fraunhofer.de

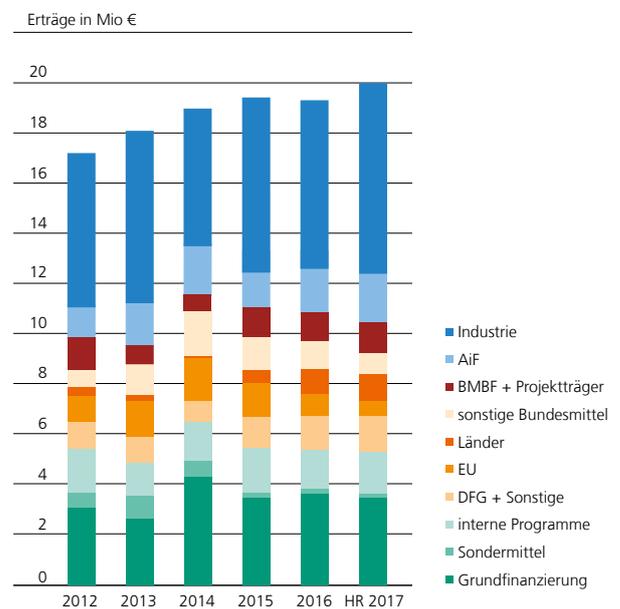
DAS INSTITUT IN ZAHLEN

Finanzielle Entwicklung

Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist gegenüber dem Vorjahr leicht gestiegen und beläuft sich auf 20,3 Millionen Euro (Hochrechnung November 2017). 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 2017 liegt bei 48,5 Prozent. Der Investitionshaushalt 2017 beträgt 2,9 Millionen Euro.



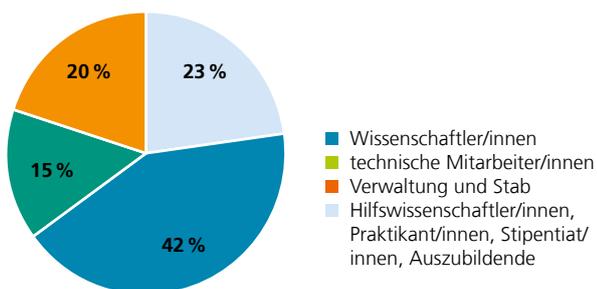
1 Entwicklung Investitionshaushalt und Betriebshaushalt.



2 Entwicklung Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM.

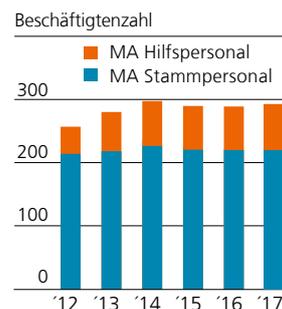
Personalentwicklung

Ende 2017 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 293 Personen beschäftigt: 225 Mitarbeitende als Stammpersonal und 68 Mitarbeitende als Hilfspersonal (Praktika, Abschlussarbeiten). Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus 122 wissen-

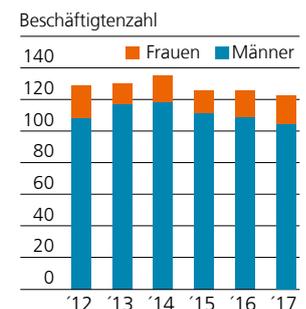


3 Personal am Fraunhofer IWM Ende 2017 nach Bereichen.

schaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, 42 technischen Beschäftigten sowie 65 Angestellten in der Verwaltung. Zehn Auszubildende werden in vier Berufen ausgebildet.



4 Entwicklung Personal am Fraunhofer IWM.

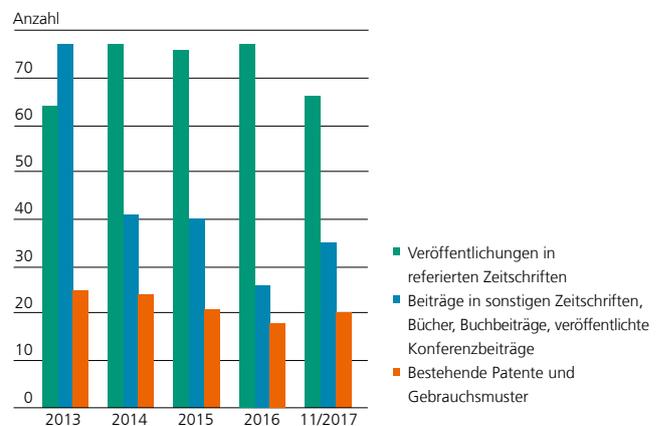


5 Entwicklung der Anzahl von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern am Fraunhofer IWM.

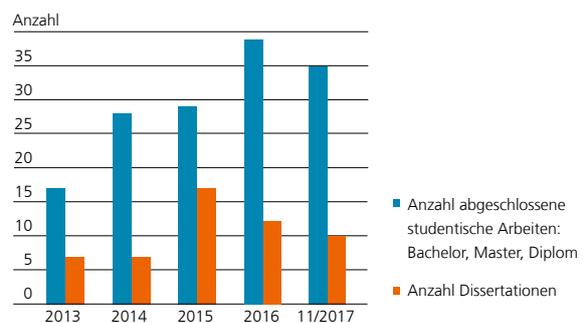
Die Fraunhofer-Institute betreiben anwendungsorientierte Forschung zum unmittelbaren Nutzen für die Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Dabei ist neben dem wirtschaftlichen Erfolg die wissenschaftliche Exzellenz ein notwendiges Kriterium, um die Mission eines Instituts erfolgreich zu erfüllen.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

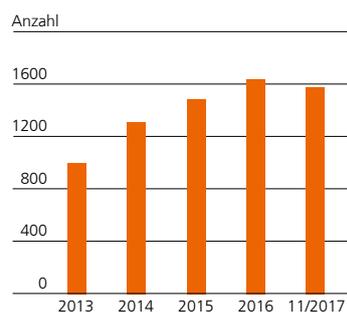
- Qualifikation von wissenschaftlichem Nachwuchs
- Wissenschaftlicher Output in Patenten und Veröffentlichungen
- Wissenschaftliche Anerkennung und Vernetzung



1 Publikationsleistung des Fraunhofer IWM.



2 Akademische Qualifizierung am Fraunhofer IWM.



3 Anzahl Zitationen von Veröffentlichungen des Fraunhofer IWM.

Das Kuratorium des Fraunhofer IWM 2017

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. Thomas Fink,
iwis motorsysteme GmbH & Co.KG, München
- Dr. Martin Grönefeld,
Magnetfabrik Bonn GmbH, Bonn
- Dr. Markus Hermle,
Daimler AG, Sindelfingen
- 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 New Technologies SE & Co.KG, Weinheim
- MinRat Dr. Joachim Wekerle,
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau,
Baden-Württemberg, Stuttgart
- Dipl.-Ing. Jens Wemhöner,
Cerobear GmbH, Herzogenrath

ZUKUNFTSPROJEKTE



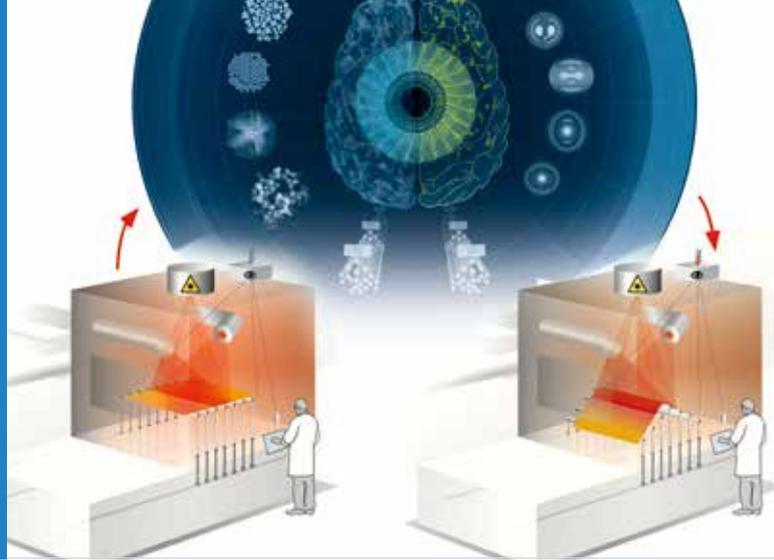
Metamaterial aus 3D-strukturiertem Polymer, das auf unterschiedlich starke Belastungen verschiedenes Materialverhalten zeigt.

Fraunhofer-Forschungscluster Programmierbare Materialien

Die Grenzen herkömmlicher Materialien gezielt verschieben und Werkstoffe herstellen, die exakt den Wunschanforderungen entsprechen – das hat sich das Fraunhofer-Forschungscluster »Programmierbare Materialien« unter der Leitung des Fraunhofer IWM als Ziel gesetzt. Fünf Institute beginnen im Januar 2018 mit Projekten zum Aufbau dreidimensionaler Mikrostrukturen von Polymeren, Metallen oder Keramiken, um Materialfunktionen »auf Wunsch« zu realisieren. Die Mikrostruktur-Expertise am Fraunhofer IWM ist dabei die ideale Grundlage, um maßgeschneiderte dreidimensionale Strukturen zu entwickeln und damit das Materialverhalten einzustellen. Diese Herangehensweise stellt die bisherige Entwicklungsstrategie eines Bauteils auf den Kopf: Bisher haben sich Bauteilentwickler ein bestimmtes Ziel gesetzt, um dann zu überlegen, mit welchen Werkstoffen sich dieses Ziel erreichen lässt. Bei programmierbaren Materialien hingegen wird eine Funktion direkt ins Material »eingepflanzt« – so können völlig neue Produktideen entstehen.

Ein Beispiel ist eine Kunststoffbeschichtung für die Innenpolsterung einer Beinprothese: Das strukturierte Polymer ist zunächst weich, um den Beinstumpf zu schützen. Hebt der Benutzer jedoch etwas Schweres an, wirkt auf die Beschichtung eine höhere Belastung ein und sie verhärtet etwas, damit der empfindliche Stumpf nicht gegen das harte Prothesenmaterial gepresst wird.

Hergestellt wird ein solches Material prototypisch mit einem 3D-Nanodrucker: einem Lasergerät, mit dem sich Werkstoffe auf wenige hundert Nanometer genau aufbauen oder bearbeiten lassen. Ein solches Gerät, das mit einem sehr präzisen Laserverfahren arbeitet und am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt wurde, nutzt das Fraunhofer IWM, um 3D-strukturierte Polymere im Labormaßstab aufzubauen (Würfel mit bis zu 1 mm Kantenlänge).



Demonstrator laserbasierte Glasbiegung: Der Herstellungsprozess soll mit virtuellen Prozessdaten aus dem Digitalen Zwilling des Werkstoffs online optimiert werden.

Fraunhofer-Leitprojekt Machine Learning for Production (ML4P)

Um in komplexen Produktionsanlagen Optimierungspotenziale aufzuspüren, ist aufgrund der Menge an vorhandenen Daten das maschinelle Lernen sinnvoll: Unbekannte Zusammenhänge können damit gefunden und adaptive Mechanismen realisiert werden. Zudem ist es wichtig, das gesamte Wissen der Anlagenexperten hinzuzuziehen. Das Ziel der am Fraunhofer-Leitprojekt ML4P beteiligten sechs Fraunhofer-Institute ist, eine methodenbasierte Vorgehensweise zu erarbeiten, die systematisch das relevante Expertenwissen und die Daten einer vorhandenen Produktionsanlage erfasst, für das maschinelle Lernen aufbereitet und Optimierungspotenziale für den Herstellungsprozess aufspürt.

Das Projektteam erarbeitet drei Anwendungsdemonstratoren an unterschiedlichen Instituten: Neben einer Membranfilterproduktion und der Blechwarmumformung soll als dritter Demonstrator eine kognitive Anlage für Flachglas-Formgebungsprozesse am Fraunhofer IWM aufgebaut werden. Der Glasbiegeofen für die laserbasierte Glasformgebung erhält eine intelligente Steuerung auf der Grundlage von maschinellem Lernen, die den Herstellungsprozess bestmöglich an das vorhandene Material und das angestrebte Produkt anpasst.

Hervorzuheben ist dabei, dass das Fraunhofer IWM sich nicht allein auf die Messdaten aus der Anlage konzentriert. Das Team baut einen sogenannten Digitalen Zwilling auf: Auf der Basis von Materialmodellen erzeugt der Digitale Zwilling zusätzlich virtuelle »Trainingsdaten« für das maschinelle Lernverfahren, um noch erfolgversprechendere Optimierungsmöglichkeiten im Formgebungsprozess finden zu können. Damit auch für andere Fertigungsprozesse virtuelle Produktionsdaten über einen Digitalen Zwilling zur Verfügung gestellt werden können, erarbeitet das Fraunhofer IWM ein Konzept.

GESCHÄFTSFELDLLEITER

Prof. Dr. Christian Elsässer

Telefon +49 761 5142-286

christian.elsaesser@iw.fraunhofer.de

GRUPPEN



MESO- UND MIKROMECHANIK

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

Prof. Dr. Chris Eberl | chris.eberl@iw.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@iw.fraunhofer.de

» *Wir erforschen und prognostizieren, welche Werkstoffe sich für bestimmte Anforderungen wie gut eignen.*



FOKUS

Mit experimentellen und simulatorischen Methoden, basierend auf der Werkstoffmechanik und Festkörperphysik, klären wir Werkstoffverhalten auf und sagen Materialeigenschaften vorher. Durch zielorientiertes Materialdesign schlagen wir unseren Kunden neuartige Substitutionsmaterialien mit gewünschten Funktionseigenschaften vor.

Wir decken die Einflüsse von Kristalldefekt- und Mikrostruktureigenschaften auf das Materialverhalten »im Großen« auf. Diese Erkenntnisse nutzen wir, um in gezielter Weise Werkstoffe ressourcen- und energieeffizient zu kombinieren und dadurch technische Systeme nachhaltig zu verbessern.

Unsere zwei Gruppen unterstützen und ergänzen sich mit ihren Expertisen: Wir charakterisieren Materialsysteme mit mikromechanischen Messtechniken und simulieren sie mit Methoden für Multiskalen-Materialmodellierung und High-Throughput-Screening.

BEMERKENSWERTES AUS 2017

Die Gruppe »Meso- und Mikromechanik« hat einen ihrer modularen Labormessplätze zur mikromechanischen Materialcharakterisierung bei einem unserer Industriepartner mit Erfolg zum Einsatz gebracht gemäß der Zukunftsvision »micromechanics from lab to fab«. Die Gruppe ist maßgeblich beteiligt an einem neuen Horizon-2020-Projekt sowie an einem neuen Fraunhofer-Clusterprojekt »Programmierbare Materialien«. Damit konzentriert sie sich verstärkt auf die Gestaltung mesoskaliger Metamaterialsysteme mit neuartigen, programmierbaren Eigenschaften.

Die Gruppe »Materialmodellierung« hat ihr »Combinatorial High-Throughput Screening« zur Vorhersage neuartiger Materialsysteme mit strukturellen oder funktionellen Zieleigenschaften weiterentwickelt: Quantenmechanische Berechnungsmethoden der Dichtefunktionaltheorie sind mit Machine-Learning-Methoden zu einem hoch automatisierten Simulations-Workflow kombiniert worden. Damit konnten wir unter anderem im Fraunhofer-Leitprojekt »Kritikalität Seltener Erden« mehrere neuartige intermetallische Phasensysteme mit vielversprechenden hartmagnetischen Zieleigenschaften theoretisch vorhersagen. Einige Phasen konnten unsere Projektpartner experimentell nachweisen.

Die Gruppe »Funktionale Schichtmaterialien« ist zur Jahresmitte in das Geschäftsfeld Tribologie integriert worden.

MIT KOMBINATORIK UND INFORMATIK ZU NEUEN MATERIALIEN

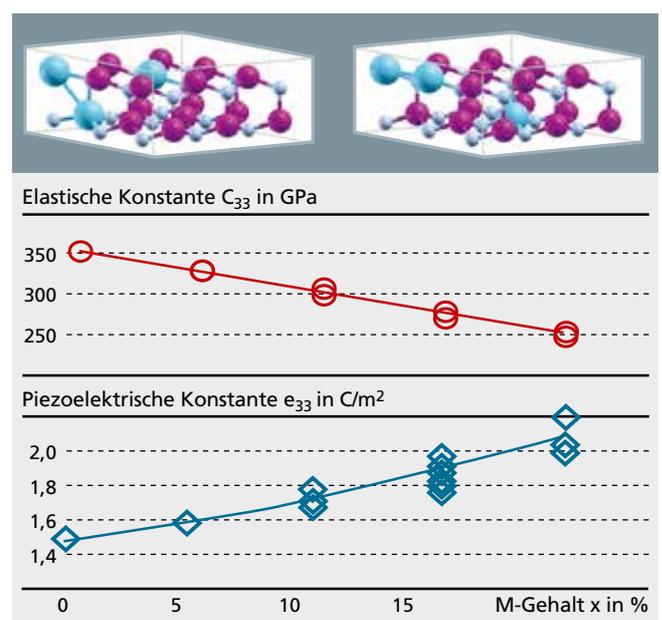
Moderne, funktionale Werkstoffe müssen zum einen spezifische physikalische Eigenschaften aufweisen und sind zum anderen einer Reihe von äußeren Randbedingungen unterworfen, wie dem Preis, der Versorgungssicherheit der elementaren Bestandteile, der Umweltverträglichkeit oder der Kompatibilität zu anderen Materialsystemen. Der Parameterraum der Variationsmöglichkeiten ist im Allgemeinen riesig, sodass in den letzten Jahren vermehrt Simulationsmethoden eingesetzt werden, um entweder bekannte Materialsysteme gezielt zu verbessern oder den Anforderungen entsprechend neue Materialien zu entdecken und vorherzusagen. Mit neuen Ansätzen der Materialinformatik können wir große Datenmengen auswerten und nach versteckten Korrelationen und Gesetzmäßigkeiten suchen. Die permanent wachsende Leistung moderner Computer ermöglicht auch zunehmend umfassende kombinatorische Ansätze, um Parameterräume systematisch zu untersuchen.

Aluminiumnitrid-basierte Dünnschichtkeramiken für hocheffiziente Frequenzfilter

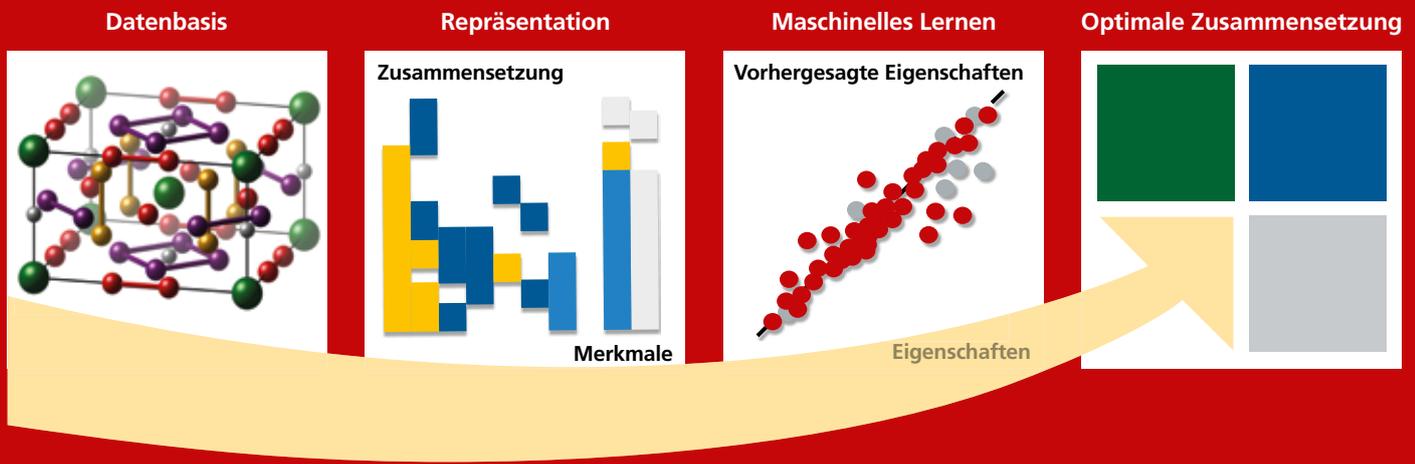
Die Weiterentwicklung der Mobilfunk- und Kommunikationstechnologie benötigt Bandpassfilter, die im Frequenzbereich 6 GHz operieren. Um diese hohen Frequenzen und eine ausreichende Energieeffizienz realisieren zu können, bedarf es neuer piezoelektrisch aktiver Funktionsmaterialien mit hoher Steifigkeit. Vielversprechend ist die Verwendung von Aluminiumnitrid mit Wurtzit-Kristallstruktur, dem weitere Übergangsmetalle (M) beigemischt werden. Durch ausgeklügelte Sputterverfahren lassen sich metastabile (Al,M)N-Verbindungen auf geeignete Substrate aufbringen und so stabilisieren. Der zur Verfügung stehende Parameterraum ist vieldimensional und mit experimentellen Methoden allein nicht effizient zu bearbeiten. Zudem sind die elastischen und piezoelektrischen Eigenschaften bei Wurtzit-Verbindungen stark richtungsab-

hängig, sodass fünf elastische und drei piezoelektrische Tensorkomponenten, die experimentell nicht alle direkt zugänglich sind, das Materialverhalten charakterisieren.

Wir berechnen das elastische und piezoelektrische Materialverhalten der (Al,M)N-Schichten mithilfe atomistischer Simulationsmethoden der Dichtefunktionaltheorie (DFT). Dabei variieren wir systematisch das Al:M-Verhältnis und untersuchen den Einfluss der stochastischen Verteilung der Atome auf dem Metalluntergitter auf atomarem Maßstab. Unsere Strukturmodelle werden gezielt deformiert, wodurch die elastischen und piezoelektrischen Kopplungsparameter extrahiert werden können. Unsere Ergebnisse werden mit experimentellen Erkenntnissen unserer Projektpartner kalibriert und kombiniert, so wird ein gründliches Verständnis des Materialsystems entwickelt.



1 Elastische und piezoelektrische Konstanten, C_{33} und e_{33} von $Al_{1-x}M_xN$. Bei gleichem M-Gehalt führen verschiedene Verteilungen der M-Atome zu kleinen Streuungen der Daten.



3 Prinzipieller Ablauf der datenbasierten Suche nach Zusammensetzungs-Eigenschafts-Beziehungen mittels Maschinellen Lernens (ML).

Mit Maschinellem Lernen neue Materialien entdecken

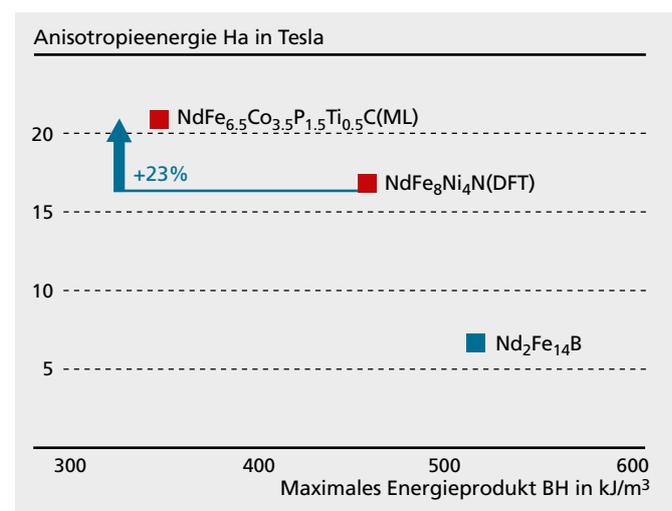
Seit einigen Jahren revolutionieren die Methoden des Maschinellen Lernens (ML) unseren Alltag, beispielsweise bei der Bildersuche im Internet und der Sprachsteuerung von Smartphones. Wir nutzen diese Methoden der Dateninformatik zur Lösung materialwissenschaftlicher Problemstellungen sowie für die Entdeckung und Entwicklung neuer Werkstoffe. Die für das ML nötigen Eingangsinformationen werden hierbei aus Simulationen oder Experimenten extrahiert. Nach einer umfassenden Optimierungs- und Validierungsphase sind die trainierten ML-Modelle in der Lage, die Eigenschaften von neuen, unbekanntem Materialien quantitativ vorherzusagen.

Neue Hartmagnetmaterialien für grüne Energietechnologien

Wir nutzen das ML bei der Suche nach intermetallischen Verbindungen mit guten hartmagnetischen Eigenschaften, die geringere Konzentrationen der versorgungskritischen Seltenerdelemente aufweisen als die aktuell besten auf dem Markt verfügbaren Materialien $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ und SmCo_5 . Unsere Ergebnisse sind insbesondere für die Zukunftsbranchen Elektromobilität und Erneuerbare Energien von großer Relevanz, da hier eine große Nachfrage nach neuen, leistungsstarken und zugleich kostengünstigen Permanentmagneten besteht. Als Eingangsdaten stehen die von uns mit einem DFT-Hochdurchsatz-Screening berechneten Materialkennwerten binärer Verbindungen zur Verfügung. Um nun Maxima der magnetischen Eigenschaften im gesamten Zustandsraum zu identifizieren, werden Beziehungen zwischen Zusammensetzung und Eigenschaften mittels ML gelernt und hinsichtlich maximaler magnetokristalliner Anisotropieenergie optimiert. Die vorhergesagten Eigenschaften der bezüglich

dieser wichtigen hartmagnetischen Kenngröße optimierten Zusammensetzungen liegen signifikant über denen der besten Kandidaten im zugrundeliegenden Datensatz. Sie liegen sogar signifikant über den Eigenschaften der aktuell besten verfügbaren $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Hochleistungsmagnete – bei deutlich reduziertem Anteil an Seltenerdmetallen. Gleichzeitig sinkt jedoch erwartungsgemäß das maximale Energieprodukt. Es liegt aber immer noch im technologisch relevanten Bereich von über 300 kJ/m^3 . Bemerkenswert ist die Vorhersagekraft des ML-Modells, das selbst für quaternäre Kombinationen von Übergangsmetallen nur um wenige Prozent von den mittels Dichtefunktionaltheorie nachgerechneten Werten abweicht.

Dr. Daniel Urban, Dr. Johannes Möller



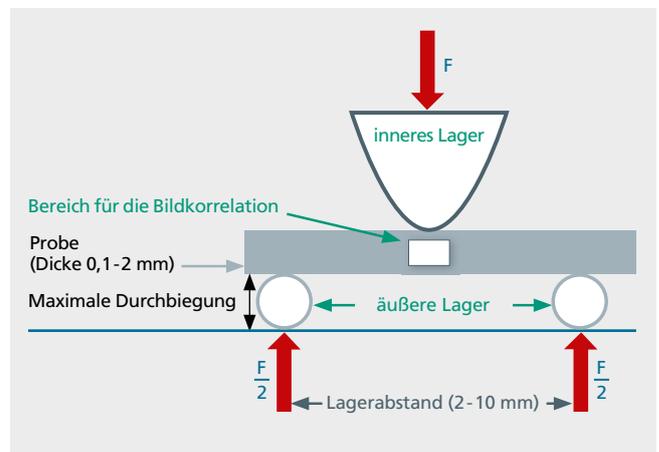
2 Die mittels ML optimierte Zusammensetzung hat, im Vergleich zur bisher besten mittels DFT gefundenen Verbindung und zu $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, eine deutlich höhere Anisotropieenergie H_a .

MECHANISCHE PRÄZISIONSMESSUNG AN MIKRO-PROBEN MITTELS DREI- UND VIERPUNKTBIEGUNG

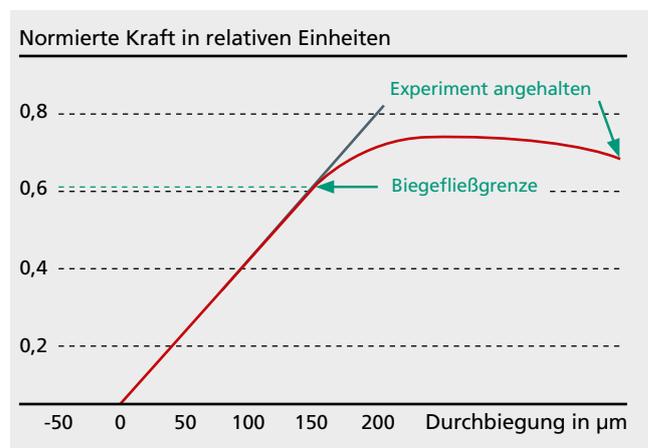
Die Gruppe »Meso- und Mikromechanik« untersucht mechanische Eigenschaften von Materialien und Bauteilen in Mikro-Größenskalen und in den für die Anwendung relevanten Belastungsarten: Ein prominentes Beispiel für Mikrobauteile sind mechanische Uhren, deren Präzision sehr stark von der Kenntnis der mechanischen Eigenschaften abhängt. Auch in Automobilen gibt es sehr viele mechanisch belastete Bauteile, deren Abmessungen von einigen 10 µm bis zu wenigen Millimetern reichen – seien es elektrische Kontaktierungen oder dünne Bleche. Selbst bei großen Bauteilen ist der mechanisch kritische Volumenbereich häufig sehr klein, zum Beispiel an Schweißnähten oder bei Beschichtungen, und kann sich in seinen Werkstoffeigenschaften von denen des gesamten Bauteils unterscheiden.

Eine Messtechnik, die unsere Gruppe im Laufe des letzten Jahres stark erweitert hat, ist die Untersuchung von Mikroproben mittels Drei- und Vierpunktbiegung. Die Durchführung von Biegeexperimenten an Mikroproben stellt höchste Anforderungen an die Prozessführung, da viele Parameter die Ergebnisse in kubischer Ordnung beeinflussen. Der große Mehrwert der Methode gegenüber Zugversuchen ist eine signifikant höhere Empfindlichkeit für Einflüsse von der Probenoberfläche und von Gradienten im Material, was von entscheidender Bedeutung für Mikrobauteile ist, die in der Anwendung auf Biegung beansprucht werden.

Unsere praxisnahen Versuchsaufbauten ermöglichen sowohl die Bestimmung des E-Moduls, der Fließgrenze und weiterer Materialkenngrößen über quasistatische Biegeversuche als auch die zyklische Ermüdung bei Frequenzen von bis zu 100 Hz. Werden höhere Frequenzen benötigt, sind zudem spezielle Resonanzmessapparaturen verfügbar.



1 Schema eines Dreipunktbiegeversuchs. Über eine digitale Bildkorrelation an Strukturen im grünen Feld kann die Durchbiegung ermittelt werden.



2 Last-Weg-Kurve eines Dreipunktbiegeversuchs an einer metallischen Probe. Ermittelt wurden der E-Modul (blaue Linie) sowie die Fließgrenze (grün gestrichelte Linie).



3 Foto einer Mikrobiegeapparatur. Es können Drei- und Vierpunktbiegeexperimente mit variablen Lagerabständen realisiert werden.

Größen- und Skalierungseffekte bei Mikrobiegeproben

In einem aktuellen Industrieprojekt ging es darum, den E-Modul von galvanisch hergestellten Mikroproben unterschiedlicher Abmessungen mittels Zugversuchen und Dreipunktbiegeversuchen zu ermitteln und parallel die Mikrostruktur abzubilden. Der Probenquerschnitt reichte von 50 x 200 µm bei den kleinsten Biegebalken bis zu 500 x 200 µm bei den größten Zugproben.

Bedingt durch den Herstellungsprozess können bei galvanisch abgeschiedenen Bauteilen je nach Bauteilabmessung unterschiedliche Legierungseffekte auftreten, die wiederum die Mikrostruktur und die Materialeigenschaften beeinflussen. Zudem verändert sich das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen der Probe signifikant, sodass deren Einfluss auf das Verhalten der Probe zunimmt, wenn die Probendimension abnimmt.

Spezialentwicklung Mikrobiegeapparatur

Für die Biegeversuche an Mikroproben wird eine unserer selbst entwickelten Biegeapparaturen eingesetzt: Eine flexible Lageraufnahme (Abbildung 3) ermöglicht die Durchführung von Drei- und Vierpunktbiegeversuchen mit einem äußeren Lagerabstand von 2 bis 10 mm (Abbildung 1). Die Aufbringung der Last erfolgt über einen Piezoaktuator (Schrittauflösung: 1,2 nm), der für größere Bewegungen von einem Linearmotor unterstützt wird. Für die Kraftaufnahme stehen Kraftmesszellen mit Messbereichen von 2 bis 200 N zur Verfügung. Über ein Kamerasystem können zudem Bilder während des Versuches aufgenommen werden, die mithilfe eines speziell programmierten digitalen Bildkorrelationsverfahrens (Auflösung: 10 nm) eine hoch präzise Bestimmung

der Durchbiegung ermöglichen. Aus der Messung der von der Mikroprobe aufgenommenen Kraft und deren Durchbiegung können mit Kenntnis der Probengeometrie und des Abstands der äußeren Lager der E-Modul und die Fließgrenze ermittelt werden (Abbildung 2).

Mikrobiegeversuche als essenzielles Werkzeug zur Bestimmung der Materialkenngrößen

Die Durchführung von sowohl quasistatischen als auch zyklischen Mikrobiegeversuchen hat sich als wertvolle Ergänzung zu den schon bewährten Mikrozugversuchen erwiesen. Die bei Mikrobauteilen ohnehin schon großen Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit und der Eigenschaften in der oberflächennahen Materialzone spielen unter einer Biegebeanspruchung eine noch größere Rolle, da die maximale Belastung genau dort auftritt. Die Durchführung von Biegeexperimenten ermöglicht es, gerade diese Einflüsse zu untersuchen und zu bewerten. So können wir unseren Kunden die zur Mikrobauteilauslegung notwendigen Materialkenngrößen bereitstellen. In einem zukünftigen Projekt erarbeitet die Gruppe gemeinsam mit einem Verbund von Industriepartnern einen Standard zur mikromechanischen Prüfung von metallischen Werkstoffen. In diesem geht es speziell darum, mikromechanische Aspekte zu adressieren, die in den aus dem Makroskopischen bekannten Normen nicht behandelt werden.

Felix Schiebel, Dr. Thomas Straub

FERTIGUNGSPROZESSE

GESCHÄFTSFELDLIMITER

Dr. Dirk Helm

Telefon +49 761 5142-158

dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

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, Fügetechniken und spezielle Trenn- und Sägeverfahren. Wir liefern Lösungen für neue Prozesse und Produkte im Bereich Gläser, Glaskeramiken und Halbleitermaterialien sowie deren Bewertung zu Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit in die industrielle Anwendung.

Tobias Rist | tobias.rist@iwm.fraunhofer.de



» *Werkstoffexpertise und maßgeschneiderte Simulationstools, um Fertigungsprozesse optimal zu gestalten.*

FOKUS

Mit maßgeschneiderten Modellen und Simulationstechniken sowie fundierten Prozessanalysen tragen wir zur Gestaltung von effizienten, sicheren Fertigungsprozessen bei. Unsere Leistungen beinhalten Untersuchungen zum Verhalten von Werkstoffen in der Fertigung sowie die Analyse und technologische Entwicklung von Fertigungsprozessen zur Herstellung von Halbzeugen und Bauteilen mit funktionalen Eigenschaften. Im Vordergrund stehen pulvertechnologische Prozesse inklusive komplexer partikelbasierter Fluidsysteme bis hin zur Mikrofluidik, das Umformen und Bearbeiten von duktilen Werkstoffen sowie Bearbeitungsverfahren für spröde Werkstoffe und die Glasformgebung.

BEMERKENSWERTES AUS 2017

Mit unserem weiterentwickelten virtuellen Testlabor untersuchen wir sehr schnell und präzise beliebige Belastungszustände metallischer Werkstoffe – auch solche, die in realen Versuchen nicht messbar sind. Diesen Beitrag zur optimalen Gestaltung von Fertigungsprozessen und Bauteileigenschaften präsentierten wir auf der internationalen Fachmesse Blechexpo in Stuttgart. Die Methodik wurde zudem im Rahmen des EU-Projekts SimChain erweitert und mit Partnern ein Simulationstool entwickelt, das den Einfluss verschiedener Prozessparameter der Additiven Fertigung auf die Werkstoffeigenschaften vorhersagt. Um zur optimalen Gestaltung von pulverbettbasierten additiven Fertigungsprozessen beizutragen, wurde unsere Simulationssoftware SimPARTIX® für Rakelprozesse, Aufschmelzen und Erstarren weiterentwickelt.

In zwei neu gestarteten Projekten zum Maschinellen Lernen untersuchen wir zum einen die Einsetzbarkeit von sogenannten Grey-Box-Modellen in werkstoffmechanischen Anwendungen. Zum anderen fokussiert das Projekt Machine Learning for Production darauf, maschinelle Lernverfahren in Fertigungsprozessen zu etablieren. Dabei wird spezifisches Domänenwissen wie Prozesswissen, Versuchsdaten und Simulationen einbezogen und an einem Demonstrator erprobt. In EU-Projekten arbeiten wir an einer international einheitlichen Beschreibung von Material- und Prozessdaten. Über Algorithmen aus »machine learning« und »data mining« ermöglichen diese Daten neue Einsichten in Zusammenhänge sowie ein umfassendes Verständnis von Werkstoffen über ganze Prozessketten hinweg.

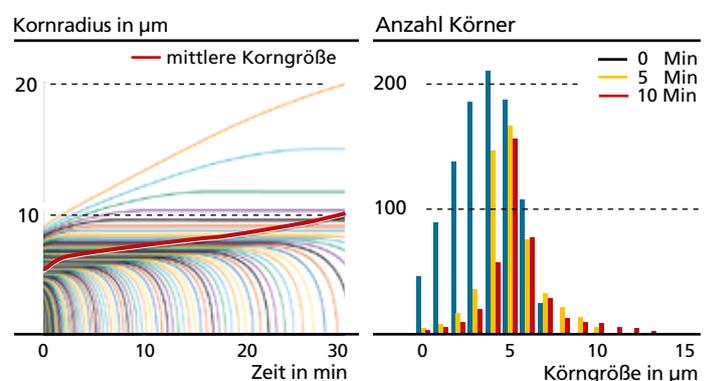
Unser neuer, laserbasierter Glasbiegeprozess realisiert mit vergleichsweise geringem Aufwand komplexe Geometrien in Flachglas. Mit dieser Lösung können Hersteller ganz individuelle Glasobjekte in kleiner Stückzahl oder sogar in Einzelstücken wirtschaftlich produzieren.

WARMUMFORMUNG UND WÄRMEBEHANDLUNG AUSSCHIEDUNGS- HÄRTBARER LEGIERUNGEN

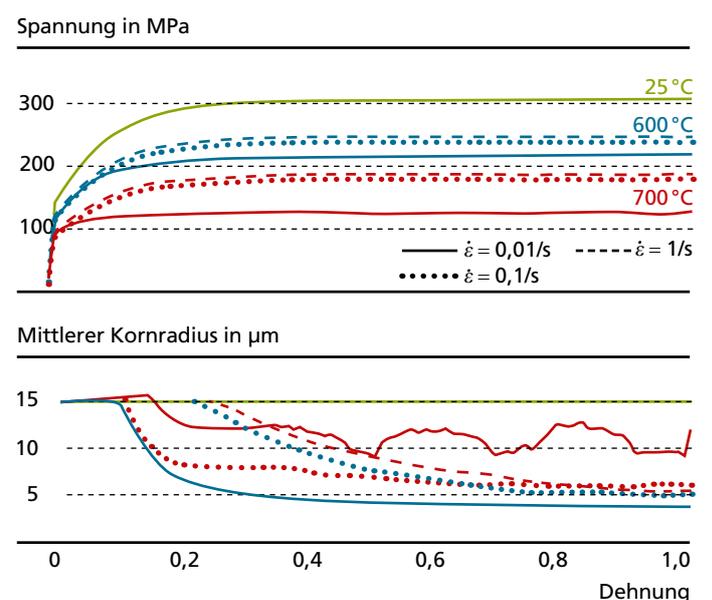
In der Metallverarbeitung umfasst die Prozesskette vom Ausgangsmaterial über die Halbzeuge bis hin zum fertigen Bauteil typischerweise mehrere Umformschritte bei verschiedenen Temperaturen sowie Wärmebehandlungen. Durch eine geeignete Prozessführung können sowohl die finalen Bauteileigenschaften gezielt eingestellt als auch die Effizienz von Prozessen optimiert werden. Dabei bestimmen die Mikrostruktur und ihre Entwicklung maßgeblich die Materialeigenschaften. Beispielsweise kommt es bei erhöhten Temperaturen zur Erholung, Rekristallisation und Kornvergrößerung. Zudem können Ausscheidungen die Festigkeit erhöhen und das Gefüge stabilisieren. Um das Materialverhalten unter Berücksichtigung dieser stark gekoppelten Phänomene zu verstehen und vorherzusagen, werden besondere Modelle benötigt.

Ein neuartiger Modellierungsansatz

Im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der DFG erarbeiten wir einen neuartigen Modellierungsansatz für metallische Werkstoffe. Er verknüpft die vielfältigen Phänomene, die das effektive Materialverhalten bestimmen, mithilfe einer umfassenden thermodynamischen Betrachtung. So ermöglicht der Ansatz eine physikalisch konsistente Beschreibung und Vorhersage des thermomechanischen Materialverhaltens und der Mikrostrukturentwicklung. In dem Projekt kooperieren wir mit dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf. Wir vereinigen klassische Modelle der Mechanik und Thermodynamik mit einem innovativen Konzept zur Beschreibung der Gefügeentwicklung. Damit können wir elastisches, plastisches und viskoplastisches Materialverhalten, Erholung, Rekristallisation und Kornvergrößerung beschreiben. Zudem berücksichtigen wir den Effekt von Ausscheidungen auf Festigkeit und Beweglichkeit der Korngrenzen und arbeiten daran, in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung Entwicklungen der Ausscheidungen zu simulieren.



1 Simulation der Kornvergrößerung in einer ausscheidungsgehärteten Kupferlegierung: Entwicklung der Größe jedes einzelnen Kornes, mittlere Korngröße als rote Linie (links); durch die Entwicklung der Korngrößen verändert sich die Korngrößenverteilung qualitativ (rechts).



2 Simulierte Zugversuche an unlegiertem Stahl bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (oben), Entwicklung der mittleren Korngröße (unten).



3 *Rekristallisation von kaltgewalztem Stahlblech: EBSD-Aufnahmen zu Beginn (links), nach 20 s (Mitte) und nach 120 s (rechts).*

Simulation mehrstufiger Prozesse ohne Datentransfer

Die Simulationsergebnisse für das Kornwachstum in reinem Kupfer konnten wir bereits anhand experimenteller Daten erfolgreich verifizieren. Abbildung 1 hingegen zeigt, wie das Gefüge einer ausscheidungsgehärteten Kupferlegierung während der Wärmebehandlung vergrößert. Im linken Bild sind die Entwicklung der Größe jedes einzelnen Kornes sowie die Entwicklung der mittleren Größe dargestellt. Kleinere Körner schrumpfen, größere wachsen und insbesondere die mittelgroßen Körner werden durch Ausscheidungen in ihrer Entwicklung gehemmt. Dadurch verändert sich die Korngrößenverteilung deutlich, wie aus den Histogrammen für drei Zeitpunkte ersichtlich wird. Vergleichbar detaillierte Vorhersagen sind mit den meisten bekannten Modellen nicht möglich.

In Abbildung 2 sind die Simulationsergebnisse von Zugversuchen an Stahl bei verschiedenen Temperaturen und Dehnraten dargestellt. Anfangsfließspannung und Verfestigungsvermögen nehmen mit der Temperatur ab. Zudem reduziert bei erhöhten Temperaturen und moderaten Dehnraten dynamische Rekristallisation die Verfestigung weiter. Gleichzeitig verfeinert sich das Gefüge durch Rekristallisation. Abhängig von der Temperatur und Dehnraten können ganz unterschiedliche Prozesse die Gefügeentwicklung dominieren. Dennoch genügt ein einziger Parametersatz, um das thermomechanische Verhalten eines bestimmten Materials unter verschiedenen Versuchsbedingungen vorherzusagen.

Unser Materialmodell eignet sich für die Anwendung auf Kalt- und Warmumformprozesse, Wärmebehandlungen und verschiedene Kombinationen daraus. Somit können wir eine ganze Prozesskette abbilden, ohne zwischen den Teilschritten Daten von einem Modell in ein anderes übertragen zu müssen.

Experiment, Modellierung und Simulation

Trotz der Komplexität des Materialmodells erfordert die Parameterbestimmung nur einen begrenzten Aufwand. Tatsächlich sind die meisten Parameter physikalische Größen und daher gut bekannt. Um die fehlenden Größen zu bestimmen, führen wir ausgewählte thermomechanische Versuche durch und charakterisieren die Mikrostruktur des Materials. Mit der thermomechanischen Prüfeinrichtung Gleeble 3150 können wir sowohl spezifische Phänomene im Detail untersuchen als auch komplexe anwendungsnahe Belastungssituationen nachstellen. Mithilfe klassischer metallographischer Techniken wie Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie Elektronenrückstreuung (EBSD) klären wir die mikrostrukturellen Vorgänge im Detail auf. Spezielle Quasi-in situ-Techniken erlauben die Beobachtung des Gefüges auch bei schnellen Veränderungen, beispielsweise während Rekristallisationsvorgängen. In Kombination mit einem umfassenden Verständnis der zugrunde liegenden Vorgänge im Material wird das physikalisch basierte Modell zu einem vorhersagekräftigen Werkzeug.

Nutzen der Ergebnisse und Einsatzmöglichkeiten

Das numerisch umgesetzte Materialmodell kann aktuell für die Auslegung, Bewertung und Optimierung von Prozessrouten eingesetzt werden, zum Beispiel in der Warm- und Kaltumformung sowie in der Wärmebehandlung. Darüber hinaus sind sogar Anwendungen im Bereich der Prozessregelung denkbar. Aktuell arbeiten wir an einer Überführung in Finite-Elemente-Programme, um das Modell auch für die Auslegung und Bewertung von Halbzeugen und komplexen Bauteilen anwendbar zu machen.

Lukas Kertsch, Dr. Dirk Helm

SIMULATION MITSCHWINDENDER UNTERLAGEN ZUR VERBESSERUNG DER MASSHALTIGKEIT BEIM SINTERN

Beim Sintern von pulvertechnologisch hergestellten Keramik-, Hartmetall- oder Stahlteilen findet eine merkliche Schwindung der Teile in allen Raumrichtungen statt. Bis auf wenige Ausnahmen betrifft dies alle Werkstoffe und Formgebungsverfahren wie Pressen, Extrusion, Spritzguss, Foliengießen oder 3D-Druck. Die schwer zu verhindernden Reibungseffekte an der Aufstandsfläche im Ofen bewirken dabei häufig einen Verzug der Teile und somit eine Abweichung von der gewünschten Sollform.

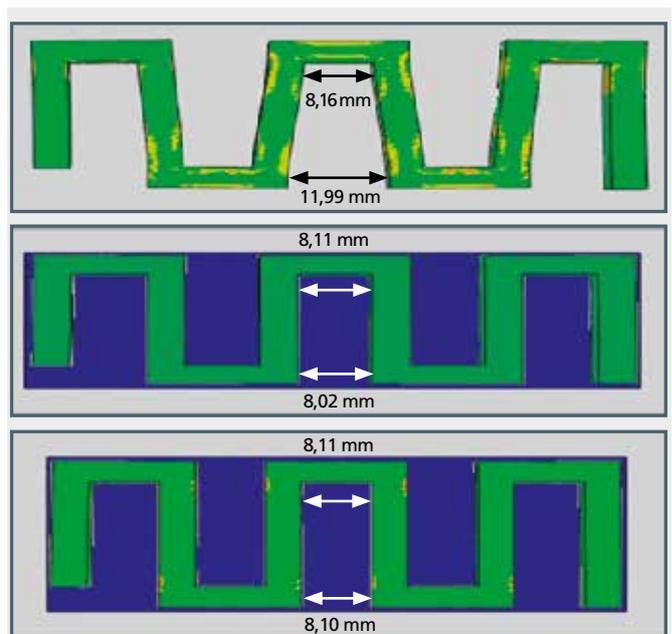
Um diese Abweichung zu minimieren, haben wir im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IKTS die Herstellung und Auslegung von »mitschwindenden Unterlagen« untersucht. Es handelt sich dabei um dünne, im Foliengießverfahren gefertigte Schichten, die eine größere Schwindung aufweisen und die das zu sinternde Teil im richtigen Maß »mitziehen«. Eine größere Schwindung wird durch die Einstellung einer geringeren Grün- beziehungsweise Materialdichte in den Unterlagenfolien erzielt, die aus dem gleichen Material wie das zu sinternde Teil bestehen.

Simulationsunterstützte Auslegung der Unterlagen

Um die Bandbreite des Anwendungsbereichs zu demonstrieren, haben wir spritzgegossene, gepresste und 3D-gedruckte Teile aus keramischem und metallischem Pulver betrachtet. Während des Sinterns verhalten sich die Werkstoffe linear viskos, unabhängig von ihrer Herstellungsart. Die Viskosität und die Sinterspannung hängen dabei jedoch stark vom durchlaufenen Temperaturprofil ab. Die Zusammenhänge haben wir in einem Materialmodell abgebildet, das in FE-Simulationen verwendet werden kann. Die Modellparameter können anhand von freien Sinterversuchen angepasst werden.

Abbildung 1 zeigt die simulierten Endformen einer mäanderförmigen Struktur, die ohne und mit Schichten verschiedener Dicke gesintert wurde. Im oberen Bild ist der durch Reibung mit der Unterlage entstehende Verzug deutlich sichtbar. Mit einer Unterlagenschicht sind die Stege dagegen nahezu parallel. Die Simulationen sagen eine optimale Schichtdicke von 190 µm voraus, für welche die Abweichung minimal ist. Am Fraunhofer IKTS durchgeführte Versuche mit im Spritzgussverfahren hergestellten Proben aus einer Eisen-Chrom-Legierung bestätigen diese optimale Dicke.

Dr. Ingo Schmidt



1 Simulierte Geometrie einer spritzgegossenen Struktur nach dem Sintern. Ohne (oben) und mit schwindender Unterlage (blau) der Dicke 450 µm (Mitte) und 190 µm (unten).

ZUSCHNITT FREIER FORMEN AUS VERBUND-SICHERHEITSGLAS (VSG)

Verbund-sicherheitsglas (VSG) besteht in der Regel aus zwei Glastafeln, die mit einer elastischen Kunststoffolie zu einem laminierten Verbund verarbeitet sind. Aus großen Tafeln gewinnen Schneidanlagen individuelle Zuschnitte: Sie ritzen und brechen das Glas beidseitig, erwärmen den Schneidbereich mit einem Heizstrahler, ziehen einen Spalt auf und trennen letztlich mit einem Messer die Folie. Dieses herkömmliche Verfahren lässt sich ausschließlich für geradlinige Schnitte nutzen, gekrümmte Konturen wie Kreise oder Ellipsen sind nicht möglich.

Neues, am Fraunhofer IWM entwickeltes Verfahren

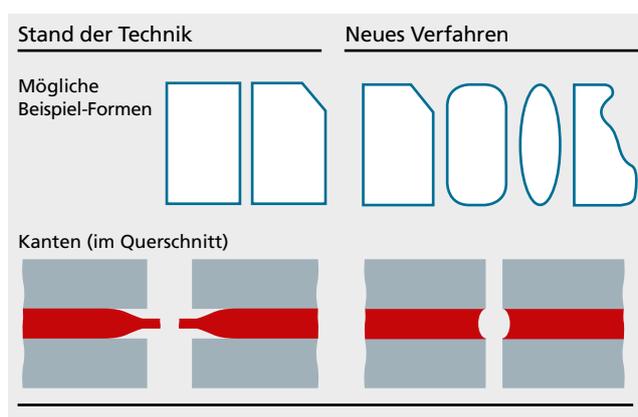
Diese Einschränkung überwindet das am Fraunhofer IWM im Auftrag der Firma HEGLA entwickelte Verfahren: Dabei wird zunächst die Folie im Inneren des Verbunds durch Laserlicht getrennt, dann das Glas beidseitig entlang der Laserlinie geritzt und aufgebrochen. Zudem hat das Verfahren den Vorteil, dass die Kanten frei von Folienüberständen sind. Der sehr lokale Wärmeeintrag durch den Laser reduziert die Gefahr von sofort oder im Einsatz eintretender Delamination der Folie im Kantenbereich drastisch. Die Lasertrenngeschwindigkeit konnte das Fraunhofer IWM inzwischen steigern auf bis zu 4 m pro Minute bei Folien mit einer Dicke von 0,76 mm. Dies gelang durch eine ausgeklügelte Strahlführung in einem optischen Lichtlenksystem. Mit dieser Lasertrenngeschwindigkeit ist das Verfahren für industrielle Produktionsprozesse mit hohen Durchsatzraten nutzbar.

Der Weg in die Industrie und Ausblick

Die Firma HEGLA integrierte das Verfahren in eine Industrieschneidanlage für VSG und präsentierte sie 2016 auf der größten internationalen Messe der Glasbranche, glasstec.

Das Fraunhofer IWM arbeitet weiter an der Steigerung der Lasertrenngeschwindigkeit und der Anwendung des Verfahrens auf weitere Folien-Materialien, beispielsweise Ionomer-Folien (Sentry). Diese Folien unterscheiden sich durch höhere Festigkeit und Steifigkeit von den häufig bei VSG genutzten Polyvinylbutyral-Folien und werden daher beispielsweise in Hurrikan-Gebieten in Sicherheitsglas eingesetzt. Für die Prozessierung mit dem Laser werden die Energieeinbringung und die chemische Zersetzung genauer untersucht.

Tobias Rist, Matthias Gremmelspacher



1 Vergleich des konventionellen Trennverfahrens für Verbund-sicherheitsglas (links) und dem am Fraunhofer IWM entwickelten Trennverfahren (rechts).

GESCHÄFTSFELDLLEITER

Prof. Dr. Matthias Scherge

Telefon +49 761 5142-206

matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de

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 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



ANGEWANDTE NANOTRIBOLOGIE

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

Prof. Dr. Martin Dienwiebel | martin.dienwiebel@iwm.fraunhofer.de

» Zielgerichtetes Einstellen tribologischer Systeme in der gesamten Wertschöpfungskette.



FOKUS

Reibung und Verschleiß sollen nach Wunsch einstellbar sein: Wir unterstützen dabei, die zugrunde liegenden Mechanismen, das Zusammenspiel von Chemie, Physik und Mechanik, zu verstehen und Komponenten ideal einzustellen. Auf der Grundlage anwendungsnaher Versuche und Simulationsmodelle entwickeln wir Lösungen für Reibungsminderung und Verschleißschutz bei technischer Keramik, tribologischen Schichtsystemen, Polymeren und Elastomeren sowie mit neuartigen Schmierstoffen oder fertigungstechnisch konditionierten Tribowerkstoffen. Wir klären Einlaufvorgänge auf und entschlüsseln die Tribochemie von Wälz- und Gleitlagern, Schneid- und Umformwerkzeugen oder Motor- und Getriebeelementen.

BEMERKENSWERTES AUS 2017

Unser neues Gebäude auf dem Campus Ost des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) eröffneten wir feierlich im Juni gemeinsam mit der Staatssekretärin des Landesministeriums für Wirtschaft, Katrin Schütz, und vielen Ehrengästen aus Forschung und Industrie. Unseren zweiten Karlsruher Neubau auf dem Campus Süd konnten wir ebenfalls beziehen.

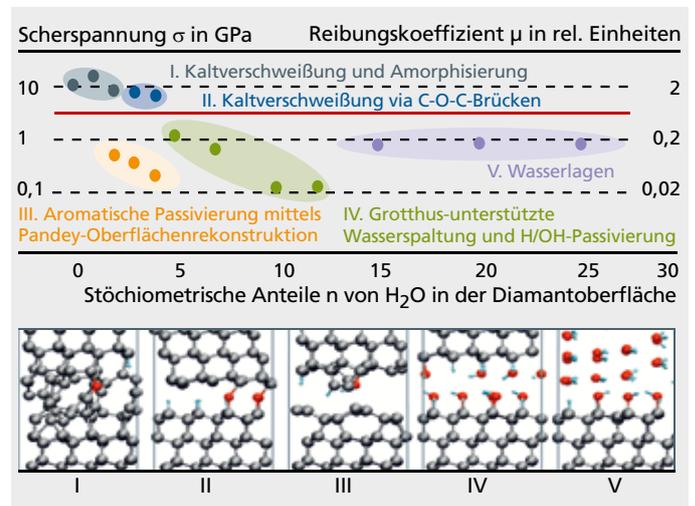
Unser Geschäftsfeld erweiterte sich um fünf Mitarbeiter der Gruppe »Funktionale Schichtmaterialien« und integrierte sie in die Gruppe »Tribologische Schichtsysteme«. Damit entstand ein großes, vielfältiges Beschichtungszentrum. Wir erzielten zudem große Fortschritte in der Simulation tribochemischer Vorgänge und identifizierten bislang unbekannte Mechanismen bei der Diamantreibung. Für Zerspanwerkzeuge aus Hartmetall, die zur Bearbeitung von Verbund- und Leichtbauwerkstoffen genutzt werden, entwickelten wir eine grundlegend verbesserte Vorbehandlungsroutine zur Haftung von CVD-Diamant.

Im Rahmen der durch uns organisierten europäischen Tagung »Friction Wear and Wear Protection« der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde (DGM) in Ettlingen fand zudem ein Symposium zum Thema »Wie kann Reibung bei Sportgeräten beeinflusst oder reduziert werden?« statt. Prof. Dr. Martin Dienwiebel war Mitorganisator der internationalen Konferenz »Wear of Materials« in Long Beach, Kalifornien, sowie des sechsten World Tribology Congress (WTC) in Beijing, China. Auf letztgenanntem präsentierte Prof. Dr. Michael Moseler die Ergebnisse seiner atomistischen Simulationen zu tribologischen Eigenschaften der Paarungen von Diamant mit Silizium oder Siliziumoxid.

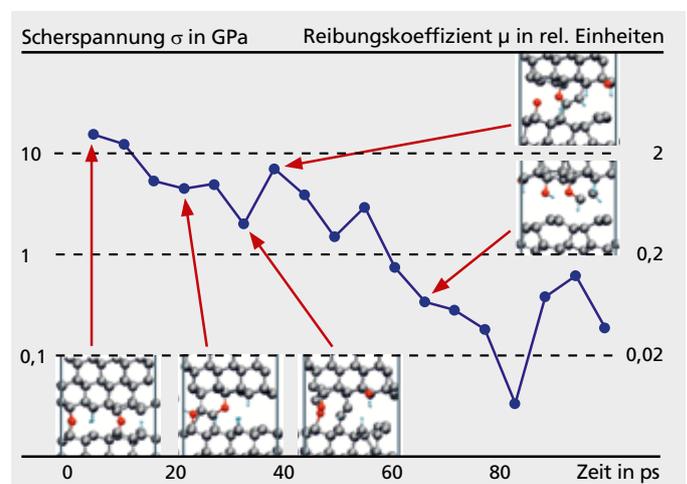
ULTRAKLEINE REIBUNG VON DIAMANT DURCH TRIBO-INDUZIERTE PANDEY-REKONSTRUKTION

Diamantschichten mit ihren außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften, ihrer hohen chemischen Stabilität und thermischen Leitfähigkeit sind ideale Materialsysteme für extreme tribologische Anwendungen wie die Bearbeitung von Gestein und nichteisenhaltigen Werkstoffen, das Schleifen von Edelsteinen oder die Nutzung als Triboschichten in aggressiven Umgebungen. Beeindruckende Fortschritte in den Wachstums- und Poliertechniken führten dazu, dass Diamantschichten mittlerweile Märkte erobern, bei denen es auf besonders kleine Reibung ankommt, beispielsweise bei Dichtungen oder mikroelektromechanischen Systemen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Reibung zwischen zwei Diamantschichten sehr stark von der Luftfeuchtigkeit abhängt. Während im Ultrahochvakuum hohe Reibungskoeffizienten ($\mu > 1$) zu messen sind, reichen schon wenige Prozent relative Luftfeuchtigkeit aus, um die Reibung um zwei Größenordnungen zu senken ($\mu = 0,01$). Bei derart kleinen Reibwerten spricht man von ultrakleiner Reibung.

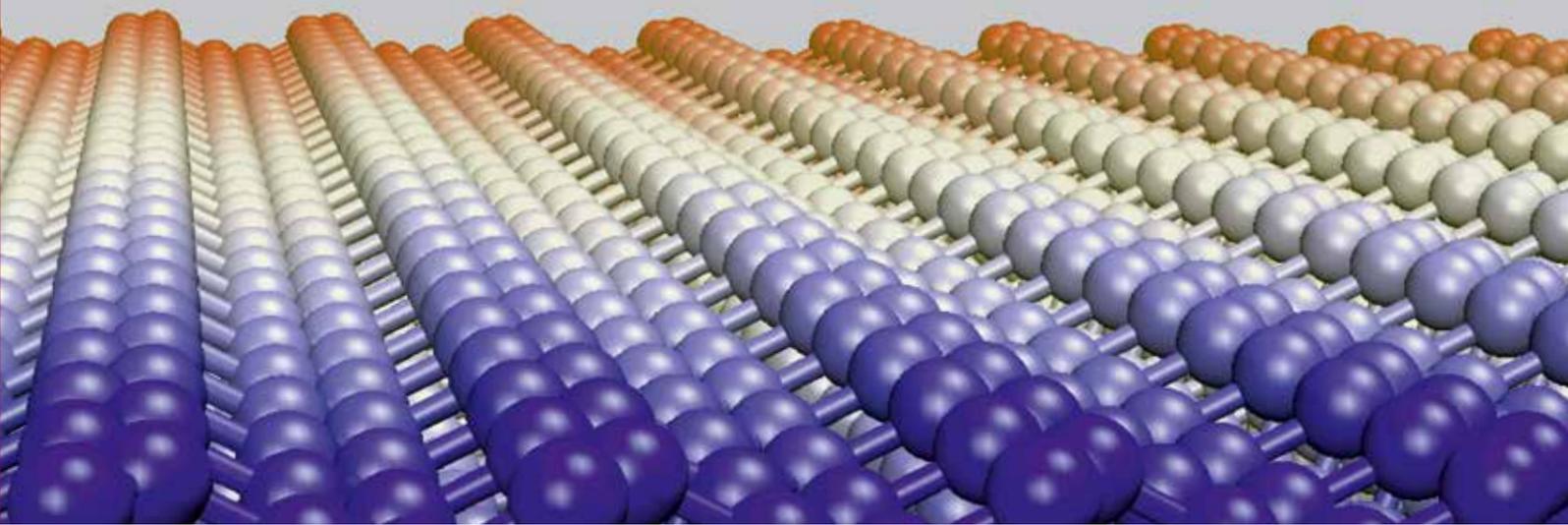
Um diese Reibwertreduktionen zu erzielen ist es notwendig, kovalente chemische Bindungen zwischen den beiden Diamantreibpartnern zu verhindern. Normalerweise sind die Diamantreibflächen bereits nach dem Wachstum Wasserdampf ausgesetzt. Diamant mit unangesättigten Oberflächenbindungen ist sehr reaktiv und deshalb in der Lage, Wasser zu spalten. Daher ist der Diamant bereits vor der tribologischen Belastung mit Wasserstoff und Hydroxylgruppen passiviert. Infolge der Reibung kann sich aber wieder radikalischer Kohlenstoff bilden, was wiederum C-C-Bindungen zwischen den beiden Diamantreibpartnern nach sich zieht. Daher ist es wichtig, in tribologischen Anwendungen dafür zu sorgen, dass es zu einer schnellen Wiederabsättigung der aktivierten Bereiche kommt. Zwei Wiederabsättigungsmechanismen werden in der Fachwelt diskutiert: die Graphitisierung der Oberfläche und die Repassivierung durch H/OH-Gruppen. In den letzten



1 Reibregime I-V zweier wassergeschmierter Diamant-(111)-Oberflächen: Abhängigkeit der Reibung von der Wassermenge (oben); Struktur der Grenzfläche der Reibregime I-V (unten).



2 Zeitliche Entwicklung der Reibung im Regime III. Die Strukturbilder zeigen die Bildung einer Pandey-Rekonstruktion ausgehend von der idealen Oberfläche.



3 Die Pandey-Rekonstruktion einer Diamantoberfläche mit (111)-Orientierung.

Jahren wurde aber zunehmend berichtet, dass die zur Graphitierung notwendige $sp^3 \rightarrow sp^2$ Phasenumwandlung zu einer Amorphisierung des Diamanten und damit verbunden zu hoher Reibung führen kann.

Um Klarheit in unser Verständnis ultrakleiner Reibung in Diamant zu bringen, wurden am Fraunhofer IWM großskalige Quantenmolekuldynamik-Rechnungen wassergeschmierter Diamantoberflächen durchgeführt [1]. Hierbei wurden zwei ideale, unpassivierte Diamantoberflächen mit (111)-Orientierung mit 5 GPa gegeneinandergedrückt und mit 100 m/s gerieben. Dabei wurde die Anzahl der H_2O -Schmierstoffmoleküle im Reibkontakt variiert, um zu untersuchen, wie die Höhe des Reibwerts und die Struktur der Reibfläche von der Feuchtigkeit im Reibspalt abhängen.

Reibregime wassergeschmierter Diamantoberflächen

Ausgehend von einer trockenen Reibpaarung unter Erhöhung der Menge des zwischen den beiden Diamanten eingeschlossenen Wassers wurden in den Simulationen folgende Reibregime beobachtet (Abbildung 1): (I) Kaltverschweißung der beiden Oberflächen gefolgt von Amorphisierung; (II) Kaltverschweißung via C-O-C-Brücken ohne Amorphisierung; (III) aromatische Passivierung mittels einer Pandey-Oberflächenrekonstruktion; (IV) Grotthus-unterstützte Wasserspaltung und H/OH-Passivierung; (V) Bildung von Wasserlagen zwischen H/OH-passivierten Diamantreibpartnern. Während die Abbildung 1, oben, die Reibung als Funktion der Anzahl von Wassermolekülen zeigt, werden in Abbildung 1, unten, repräsentative Momentaufnahmen der Reibflächen für die Regime I-V dargestellt. Interessanterweise sind die Regime I und V vor unseren Simulationen bereits bekannt gewesen, wohingegen die Regime II und III und der langreichweitige Transport von H_3O^+ und OH^- (Grotthusmechanismus) in Regime IV

als Novum angesehen werden müssen. Als wichtigste neue Erkenntnisse müssen hier betrachtet werden:

- Hohe Reibung muss nicht notwendigerweise mit der Amorphisierung des Diamanten einhergehen, sondern kann auch über C-O-C-Äthergruppen erfolgen (Regime II).
- Ultranielrige Reibung muss nicht ausschließlich von einer H/OH-Passivierung erzeugt werden, sondern kann auch durch eine aromatische Oberflächenrekonstruktion entstehen.

Reibung bei weiterer Aromatisierung

Die Pandey-Rekonstruktion kann als erste Stufe hin zu einer vollständigen Aromatisierung der Diamant-(111)-Oberfläche betrachtet werden. Bricht man zwischen zwei Pandey-Reibpartnern die restlichen Bindungen zwischen den C-Oberflächenatomen und den nächsten C-Lagen, so bildet sich eine Graphendoppellage aus, die in unseren Simulationen bereits im trockenen Zustand ultrakleine Reibung zeigt.

In kommenden Arbeiten sollen nun zusammen mit Industriepartnern die Grenzen der von uns gefundenen Regime hinsichtlich Druck- und Temperaturvariationen untersucht werden, um die Stabilität der ultrakleinen Reibungskoeffizienten in realen Anwendungen zu erhöhen.

Dr. Takuya Kuwahara, Prof. Dr. Michael Moseler

[1] Kuwahara, T.; Moras, G.; Moseler, M.: Friction regimes of water-lubricated diamond (111): Role of interfacial ether groups and tribo-induced aromatic surface reconstructions, *Physical Review Letters* 119 (2017) 096101

DIE TRIBOLOGIE VON GRAPHENKERAMIK BEWERTEN

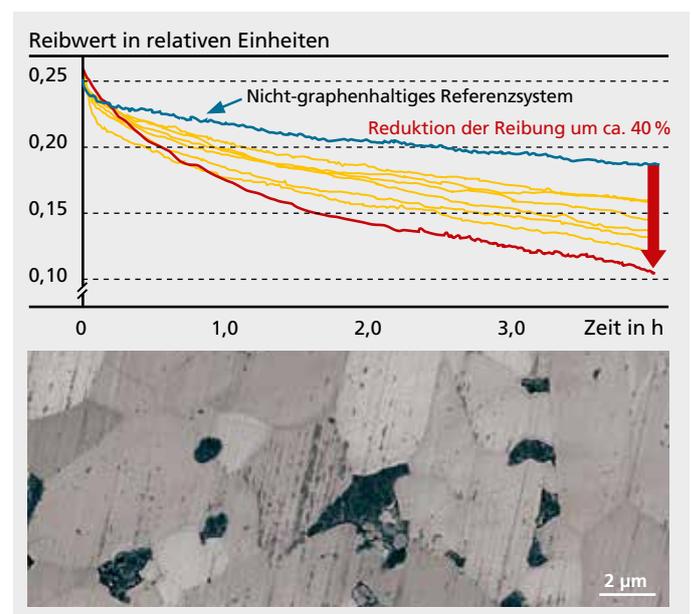
Die Kohlenstoffmodifikation Graphen ist für Anwendungen in der Tribologie sehr interessant, weil sie die Mikrostruktur von Werkstoffen verstärkt. Graphene führen zu einer chemischen Passivierung, sodass sowohl die Reibung als auch der Verschleiß erheblich sinken. Auch keramische Werkstoffe lassen sich mit Graphenen verstärken. Entsprechend zeichnen sich diese Keramiken durch eine deutlich verbesserte Festigkeit und Verschleißbeständigkeit im Vergleich zu nicht-graphenhaltigen Varianten aus. Im Rahmen eines M.ERA-NET-Projekts entwickelt das Fraunhofer IWM tribologische Systeme mit SiC-Graphen-Nanokompositen für Anwendungen unter Mediensmierung und bewertet ihre technische Nutzbarkeit für Gleitlager sowie Gleitringdichtungen. Durch die verminderten Energieverluste im Betrieb dieser Komponenten, beispielsweise in Pumpen, lassen sich die Lebensdauer, Belastbarkeit und damit die Zuverlässigkeit der technischen Systeme verbessern.

Untersuchung der Reib- und Verschleißentwicklung im Modellversuch

Mit Stift-Scheibe-Versuchen wurden am Fraunhofer IWM die Reib- und Verschleißentwicklungen von graphenhaltigen SiC-Keramiken in Wasser untersucht. Die Graphene wurden an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg zum Beispiel aus gemahlenem Graphit oder thermisch reduziertem Graphitoxid gewonnen und anschließend zu Keramikkompositen für die Stifte verarbeitet. Die Scheiben bestehen aus einer industriellen SiC-Keramik. Aus Abbildung 1 oben gehen die ermittelten Reibwertverläufe von verschiedenen tribologischen Systemen hervor. Die Ergebnisse zeigen, dass sich in Abhängigkeit vom gewählten Herstellungsverfahren der Graphene sowie vom Füllgrad verschiedene tribologische Eigenschaften einstellen: Einige der Keramiken führen zu einer deutlichen Reduktion der Reibung und des Verschleißes im Vergleich zum Referenzsystem aus SiC ohne Graphen. Wie die Oberflächenanalysen mit

REM (Abbildung 1 unten), AFM und Raman-Spektroskopie im Verbund mit atomistischen Simulationen bestätigen, sind die dünnen Kohlenstoffschichten, die sich auf den Oberflächen im Gleitkontakt ausbilden, die Ursache für die verminderte Reibung. Infolge der geringen eingebrachten Reibleistung ist ebenfalls der Verschleiß niedrig. Somit wird anhand der Ergebnisse ersichtlich, dass graphenhaltige SiC-Keramiken ein großes Einsatzpotenzial für mediengeschmierte Gleitkontakte in Pumpen haben.

Dr. Christian Schröder, Dr. Bernadette Schlüter



1 Reibwertverläufe von verschiedenen tribologischen Systemen mit graphenhaltigen SiC-Stiften (orange und rot) im Vergleich zum nicht-graphenhaltigen Referenzsystem (blau) (oben); Oberfläche des graphenhaltigen Stifts nach tribologischer Beanspruchung im wässrigen Medium (unten).

VERSCHLEISS VON WEICHEN MATERIALIEN AUS DER GENERATIVEN FERTIGUNG BEWERTEN

Die generative Fertigung, auch 3D-Druck, ermöglicht die Herstellung von kundenindividuellen Produkten im Rahmen von Mass Customization. Ein besonderes Interesse liegt hier auf der Herstellung von Schuhen, da dieser Markt sich für eine individuelle Produktanpassung besonders gut eignet. Der Hersteller »Under Armour« hatte großen Erfolg mit einer limitierten Auflage seiner »ArchTech«-Schuhe, bei denen ein Teil der Zwischensohle generativ gefertigt ist. Auch Adidas, Nike und Puma arbeiten an generativ gefertigten Schuhen. Für dieses Ziel kommen immer neue Materialien auf den Markt, die hinsichtlich ihrer Eignung charakterisiert werden müssen. In dem BMBF-geförderten Projekt »Lasergestützter Aufbau von kundenindividueller Fußbekleidung« (Förderkennzeichen 03XP0010) wurden jetzt verschiedene TPU-Varianten aus dem Selektiven Lasersintern (SLS) mit dem steifen Polyamid 12 und Sohlenmaterial aus konventioneller Herstellung verglichen.

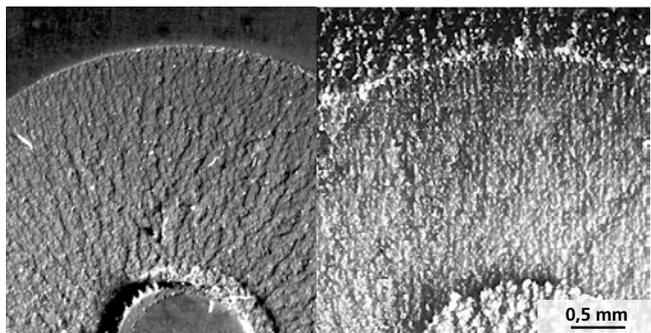
Abrieb gegen Sandpapier, Kugeln oder Klingen

Das Forschungsteam des Fraunhofer IWM verglich nicht nur den Reibwert, also die Rutschneigung, sondern auch den Verschleiß unter verschiedenen Belastungsarten. Genau wie es Straßen und Wege mit Sand, Schotter oder Kopfstein gibt, verwendete das Team verschiedene Gegenpartner aus Sandpapier, scharfen Kanten oder glatten Kugeln, um mögliche Szenarien zu untersuchen. Dabei konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit kleinen Proben in einer kurzen Zeit reproduzierbare Ergebnisse ermitteln. Die Abriebpartikel und die Reibspuren geben zusätzliche Hinweise auf die Verschleißmechanismen. Hier zeigten sich die Besonderheiten der generativen Fertigung: Unter bestimmten Bedingungen versagen die schichtweise hergestellten Proben entlang der Schichtgrenzen.

Für Sohlen noch Entwicklungsbedarf

Unter allen Belastungsarten zeigten die TPU-Varianten X92A und X97A einen geringeren Verschleiß als die konventionell hergestellten Vergleichsproben. Innerhalb der 3D-Druckmaterialien lag einmal das Polyamid 12 vorne und ein anderes Mal das weiche TPU X92A. Lediglich der Reibwert entsprach nicht den Vorstellungen, denn er lag bei den 3D-Druckmaterialien tendenziell etwas zu niedrig. Damit der 3D-Druck von Schuhen ein Erfolg wird, besteht hier noch Entwicklungsbedarf.

Dr. Tobias Ziegler, Dr. Raimund Jaeger



1 Typische Rillenstruktur in radialer Richtung (senkrecht zur Gleitrichtung), wie sie durch gleichmäßigen Abrieb entsteht (links); Freigelegte Schichtstruktur in vertikaler Richtung durch einen Klingeabrasionstests an generativ gefertigten TPU-Probe (rechts).

HOCHTEMPERATURBEREICH: CHARAKTERISIERUNG DIAMANT-ÄHNLICHER KOHLENSTOFFSCHICHTEN

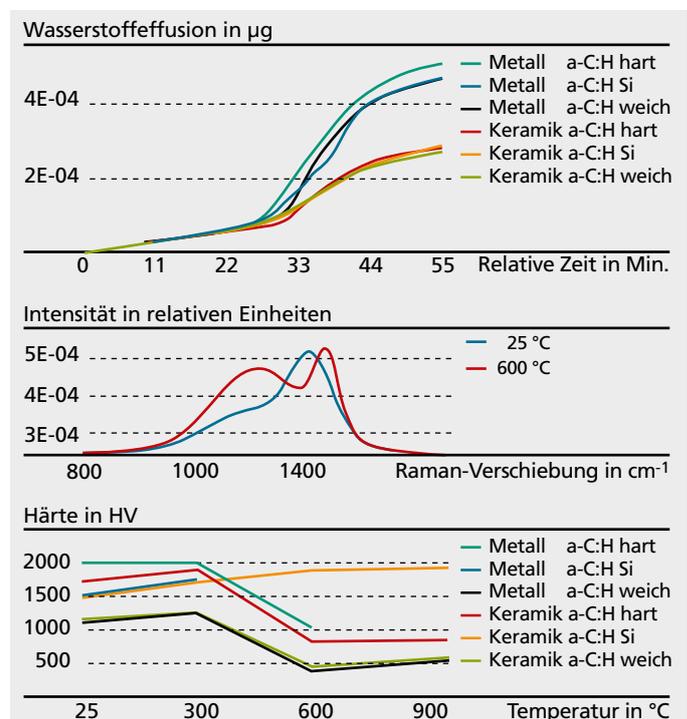
Der Einsatz diamantähnlicher Kohlenstoffschichten (DLC) ist auf Temperaturen bis etwa 300 °C beschränkt, da höhere Temperaturen verstärkt zu strukturellen Umwandlungen der Schicht und zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führen können. Einflussfaktoren sind: Wasserstoffgehalt der Schicht, Bindungsstruktur des amorphen Gefüges, Anwesenheit von Dotierungselementen und thermische Eigenschaften des Substratmaterials. Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden die temperaturabhängigen Eigenschaften verschiedener a-C:H-Schichten (hoher und niedriger Wasserstoffgehalt, Si-dotiert) auf unterschiedlichen Substraten (Ni-Stahl, Si₃N₄) untersucht, um DLC auch für Hochtemperaturanwendungen nutzbar machen zu können. Der Einfluss des Wärmeausdehnungskoeffizienten des Substrats sowie der Einfluss des Wasserstoffgehalts der Schicht, der maßgeblich die Schichthärte bestimmt, sollten beleuchtet werden.

Temperaturabhängige Wasserstoffeffusion und mechanische und strukturelle Eigenschaften

Im Heißextraktionsanalysator wurden die unterschiedlich beschichteten Substrate bis 900 °C ausgelagert und der ausgasende Wasserstoff als Funktion der Temperatur und der Auslagerungsdauer bestimmt. Die Schichten mit einem hohen initialen Wasserstoffgehalt geben mehr Wasserstoff frei als solche mit einem niedrigen. Zudem ist die Wasserstoffeffusion sehr stark von den Materialeigenschaften des Substrats abhängig (Abbildung 1 oben und Mitte). Ein hoher Ausdehnungskoeffizient und hohe Wärmeleitfähigkeit führen dabei zu einer verstärkten Wasserstoffeffusion. Neben Letzterer wurde mittels Raman-Spektroskopie eine temperaturinduzierte Strukturänderung nachgewiesen, die in den meisten Fällen eine Degradation der mechanischen Eigenschaften zur Folge hat (Abbildung 1 unten). Dies ist die Hauptursache für deren schlechtes Abschneiden im Einsatz. Es wurde eine

Si-dotierte DLC-Schicht gefunden, die bei der Auslagerung bis 900 °C sogar eine Erhöhung der Härte erfährt, indem stabile Si:O:C-Strukturen gebildet werden. Die Schicht ändert zwar ebenfalls ihre innere Struktur, dies führt jedoch zu verbesserten mechanischen Eigenschaften der Schicht bis 900 °C.

Matthias Kachel, Bernhard Blug



1 Temperaturabhängige Wasserstoffeffusion von DLC-Schichten unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften auf verschiedenen Substratmaterialien. Die gezeigten Ramanspektren zeigen exemplarisch die strukturelle Veränderung der Beschichtung (oben und Mitte); Temperaturabhängige Veränderung der Schichthärte von DLC-Schichten unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften auf verschiedenen Substratmaterialien (unten).

EINLAUFOPTIMIERUNG MIT HILFE VON STRIBECK-REIBUNGSKARTEN

Die Mehrzahl tribologischer Systeme im Maschinenbau operiert mit niedrigsten Verschleißraten von wenigen Nanometern pro Stunde: Die Randzone der Reibpartner wird bis in Tiefen von wenigen 100 Nanometern stark plastisch verformt und der sogenannte »dritte Körper« nimmt die Geschwindigkeiten zwischen den Reibpartnern auf. Damit sind häufig auch niedrige Reibwerte verbunden.

Die Ausbildung des dritten Körpers und das Einlaufverhalten kann durch die gezielte Wahl eines Betriebspunktes beeinflusst werden, was bisher nicht ohne aufwendige Versuche möglich war. Wir haben das Einlaufverhalten am Stift-Scheibe-Tribometer mit einer neuen Strategie untersucht, die das Auffinden günstiger Betriebsbedingungen im Einlauf deutlich vereinfacht. Da in realen Systemen sowohl Betriebslasten als auch -geschwindigkeiten variieren, wurde das Einlaufverhalten unter transienten und konstanten Bedingungen verglichen.

Einlaufoptimierung durch »Stribeck-Reibungskarten«

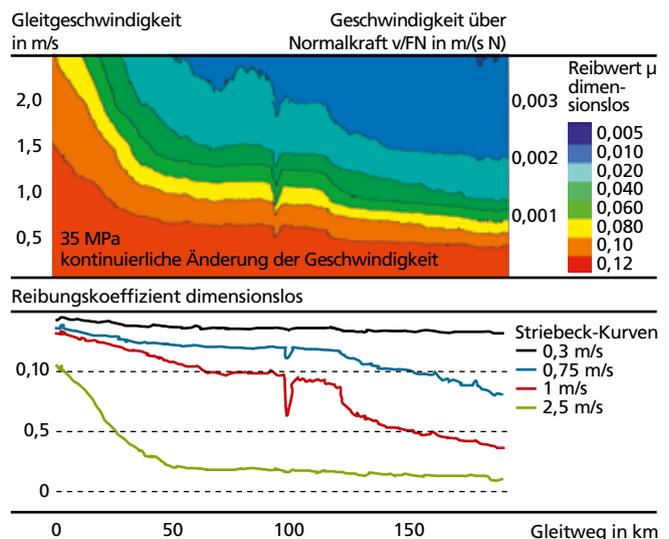
Bei konstanten Randbedingungen ergibt die Änderung des Reibkoeffizienten über die Zeit eine Linie und ist ein Indikator für den Einlauf an einem spezifischen Betriebspunkt. Anders die Situation bei transienten Bedingungen: Da nun eine Abhängigkeit sowohl von der Gleitgeschwindigkeit als auch, wegen des Einlaufverhaltens, von der Zeit beziehungsweise dem Gleitweg besteht, können die Reibwerte hier nur als zusätzliche Dimension dargestellt werden: in der Stribeck-Karte als Farbcodierung realisiert (Abbildung 1 oben).

Einlaufoptimierung

Reibpaarungen, die – wenn auch nur zeitweise – einer höheren Last ausgesetzt waren, erreichen niedrigere Reibwerte als die Systeme, die weniger hohen Belastungen ausgesetzt waren.

Die hochauflösende Verschleißmesstechnik zeigt zusammen mit Topographiemessungen, dass die verringerten Reibwerte nicht auf eine Einglättung der Reibpartner zurückzuführen sind. Es sind vielmehr die Änderungen der Randzone, die das Einlaufverhalten und niedrigere Reibwerte mit sich bringen. Damit werden die Belastungen im Betrieb zu einer wichtigen Größe für die Optimierung tribologischer Verhältnisse. Die Änderung der Endbearbeitung ist ein dazu alternativer Ansatz, mit dem günstigere Ausgangsbedingungen für die Ausbildung des dritten Körpers geschaffen werden können.

Dr. Dominic Linsler, Prof. Dr. Martin Dienwiebel



1 Reibungskarte eines Stift-Scheibe-Versuchs mit einer Paarung, wie sie im Kolbenring-Liner-Kontakt von Verbrennungsmotoren besteht (oben); Einlauf- beziehungsweise Stribeck-Kurven (unten).

GESCHÄFTSFELDLLEITER

Dr. Michael Luke

Telefon +49 761 5142-338

michael.luke@iwm.fraunhofer.de

GRUPPEN



ERMÜDUNGSVERHALTEN

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

Dr. Majid Farajian | majid.farajian@iwm.fraunhofer.de



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@iwm.fraunhofer.de



CRASHDYNAMIK

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

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



FÜGEVERBINDUNGEN

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

Dr. Silke Sommer | silke.sommer@iwm.fraunhofer.de



VERBUNDWERKSTOFFE

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

Dr. Jörg Hohe | joerg.hohe@iwm.fraunhofer.de



BRUCHMECHANIK, STRUKTURINTEGRITÄT

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

Dr. Igor Varfolomeev | igor.varfolomeev@iwm.fraunhofer.de

» *Sichere, ressourcenschonende
Strukturbauteile für alle
Belastungsszenarien.*



FOKUS

Die Bewertung der Sicherheit und der Gebrauchseignung von Bauteilen sowie die Qualifizierung neuer Leichtbauwerkstoffe stehen im Mittelpunkt unseres Aufgabenspektrums: von hochfesten Stählen über Aluminiumlegierungen bis zu Verbundwerkstoffen. Wir charakterisieren Werkstoffverhalten bei hohen und niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten und erstellen Materialkarten. Für moderne Hybridbauweisen bieten wir die Charakterisierung, Simulation und Bewertung von Werkstoffverbunden und Fügeverbindungen an. Wir quantifizieren Eigenschaftsbeziehungen zwischen der Mikrostruktur und dem Materialverhalten für die Bewertung von Strukturbauteilen: im Betriebs- oder Crashfall, beim Fügen und Schweißen oder nach mechanischer Oberflächenbehandlung wie Kugelstrahlen, Hämmern oder Festwalzen.

Die Anwendungen umfassen die Weiterentwicklung von Konzepten zur Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Komponenten aus dem Fahrzeug-, Anlagen- und Maschinenbau, die Crashbewertung von Fahrzeugkomponenten sowie Sicherheitsnachweise hoch beanspruchter Bauteile, beispielsweise in der Energietechnik und der Raumfahrt.

BEMERKENSWERTES AUS 2017

Im Rahmen der Weiterentwicklung bruchmechanischer Bewertungskonzepte haben wir Mikrostrukturmerkmale in Form von spezifischen Defekten modelliert. In mehreren Projekten zu Guss- und Schmiedebauteilen sowie zu Schweißverbindungen wurde die Rissinitiierung, ausgehend von beispielsweise Poren, Lunker oder nicht metallischen Einschlüssen, untersucht und bewertet. Zudem überführten wir Defektverteilungen aus computertomografischen Analysen im Mikrometerbereich automatisiert als Eingangsgrößen in Finite-Element-Modelle. Diese Möglichkeit steht nun für andere Materialien zur Verfügung. Voraussetzung dafür war eine geeignete Digitalisierung dieser Mikrostrukturmerkmale, welche wir für verschiedene Fragestellungen erfolgreich durchführen konnten.

Für Faserverbundmaterialien gelang es uns, real vorliegende Faseranordnungen von kurz- und langfaserverstärkten Kunststoffen in entsprechende Berechnungsmodelle einzupassen. Damit ist es möglich, verschiedene Schädigungsmechanismen wie Faserbruch, Matrixrisse oder Grenzschichtversagen in die Modellbildung zu integrieren. Die Validierungsversuche erfolgten an Mikroproben.

Der bisherige Stellvertreter des Geschäftsfelds, Dr. Dieter Siegele, ist seit August im Ruhestand und als kompetenter Berater weiterhin in die laufenden Geschäfte eingebunden. Die Stellvertretung des Geschäftsfelds hat daraufhin Dr. Silke Sommer übernommen. Um bestehende Kompetenzen zu bündeln, haben wir zwei neue Gruppen entwickelt: »Ermüdungsverhalten«, geleitet von Dr. Majid Farajian, und »Bruchmechanik, Strukturintegrität«, geleitet von Dr. Igor Varfolomeev.

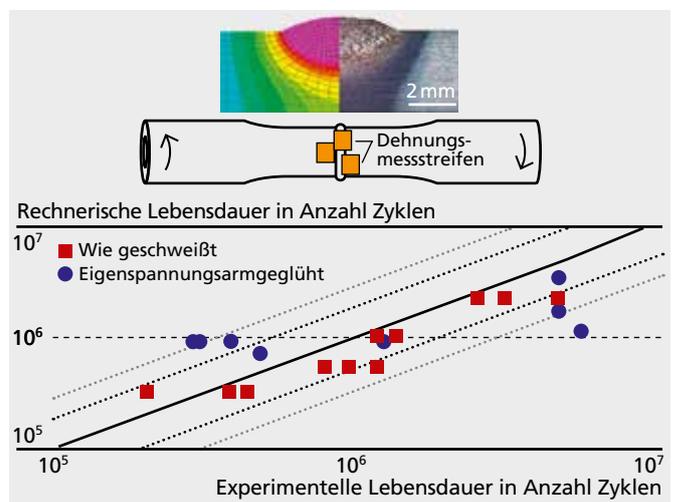
ERMÜDUNGSFESTIGKEIT VON BAUTEILEN UND STRUKTUREN

Viele technische Schadensfälle von lasttragenden Bauteilen und Strukturen lassen sich auf eine Materialermüdung infolge zyklischer mechanischer Beanspruchung zurückführen. Für den zuverlässigen Einsatz kritischer Komponenten in Automobil- und Fahrzeugbau, Schienenfahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt sowie Stahl- und Brückenbau kommt der numerischen und experimentellen Beschreibung von Materialermüdung eine entscheidende Bedeutung zu.

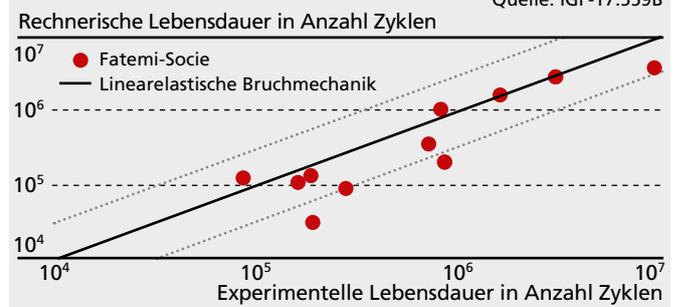
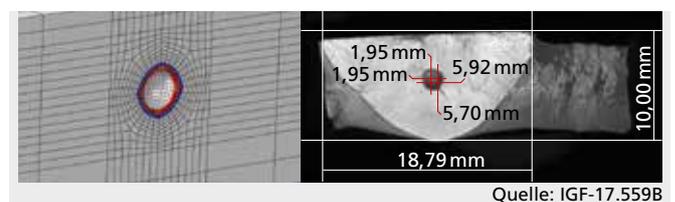
Um der Forderung nach leichten, ressourceneffizienten und sicheren Bauteilen und Strukturen gerecht zu werden, entwickeln wir Werkstoff-, Schädigungsmodelle und Simulationstools, mit deren Hilfe das zyklische Werkstoffverhalten und die Bauteillebensdauer ermittelt werden können. Durch die Kombination von Experimenten, beispielsweise instrumentierte temperaturabhängige statische und zyklische Versuche, mit numerischen Analysen leiten wir quantitative Zusammenhänge beim Werkstoff- und Bauteilverhalten unter Betriebsbelastungen ab. Den Einflussfaktoren Mikrostruktur, Verzug, Eigenspannungen und fertigungsbedingten Fehler kommt hierbei eine große Bedeutung zu.

Mehrachsig Ermüdung

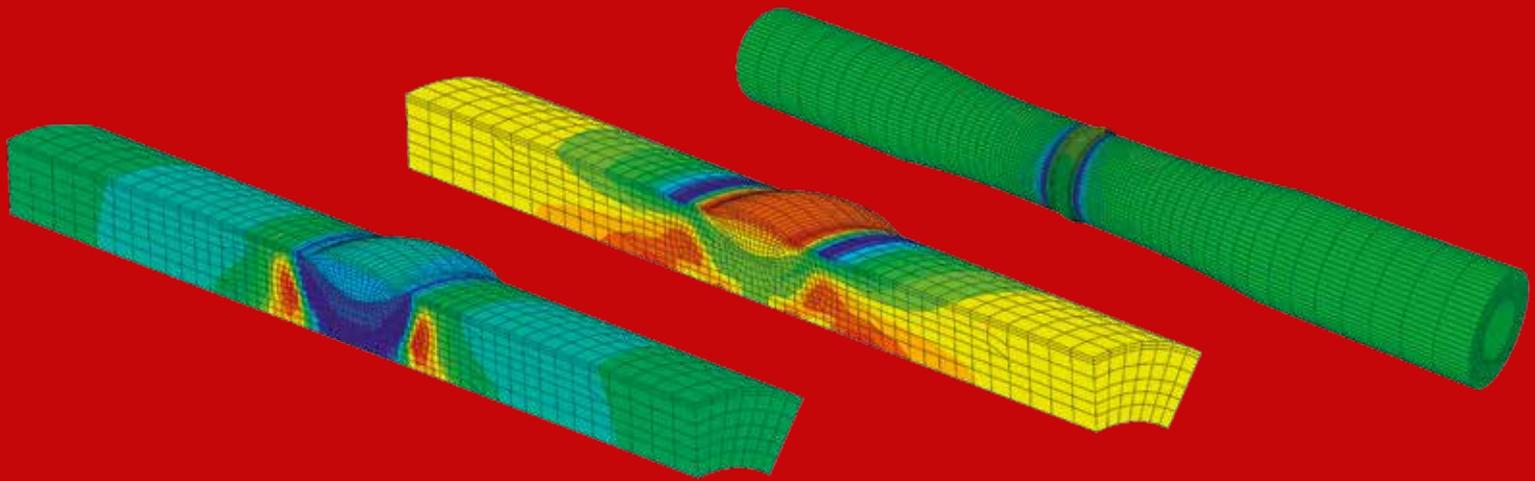
Im Betrieb sind mechanische Komponenten oft mehrachsigen Spannungszuständen ausgesetzt. Die Bewertung der Lebensdauer von Bauteilen und Strukturen unter mehrachsiger Beanspruchung ist aufgrund vielfältiger Einflussparameter auf das zyklische Werkstoffverhalten nach wie vor mit großen Unsicherheiten verbunden. Neben den klassischen Schwingfestigkeitskonzepten, die im Wesentlichen eine lokale Spannungs- oder Dehnungskomponente als schädigungswirkend betrachten, existiert eine Vielzahl von weiteren lokalen Bemessungskonzepten. Etwa die Konzepte der kritischen Ebene, die wir für mehrachsige proportionale und nicht proportionale Ermüdungsuntersuchungen einsetzen. Hierbei werden Schädigungsparameter als Funk-



1 Berechnung der Lebensdauer torsiionsbelastete Rundschweißverbindungen mittels Schädigungsparameter Fatemi-Socie, gepunktete Linien in Grafik: Streubänder um die gemittelte Lebensdauer.



2 Lebensdauerberechnung von fehlerbehafteten Schweißproben durch Addition der Ergebnisse aus Schädigungs- und linear-elastischer Bruchmechanik, gepunktete Linien in Grafik: Streubänder um die gemittelte Lebensdauer.



3 Schweißsimulation: Berechnungen der Mikrostruktur und der Eigenspannung.

tion der Spannungs- und Dehnungskomponenten berechnet und einer Schädigungs-Wöhler-Linie gegenübergestellt. Eine kritische Ebene für die Anrissbildung ist die Ebene, auf der der höchste Wert eines Schädigungsparameters ermittelt wird. In einer Untersuchung an torsionsbelasteten Rohrschweißverbindungen wurde die Lebensdauer von Proben mit der Berücksichtigung des Eigenspannungsfeldes mittels Fatemi-Socie-Schädigungsparameter abgeschätzt. Sowohl in As-Welded als auch im spannungsarmgeglühten Zustand gibt es eine gute Übereinstimmung der berechneten Lebensdauer mit dem Experiment (Abbildung 1).

Surface Engineering und Erhöhung der Lebensdauer

Für die Lebensdauer von metallischen Bauteilen ist die Randschichtzone von ausschlaggebender Bedeutung, da unter Betriebsbelastung die Werkstoffschädigung in der Regel an der Oberfläche beginnt. Eine gezielte mechanische Oberflächenbehandlung wie Kugelstrahlen, Festwalzen oder Hochfrequenzhämmern kann die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils wesentlich erhöhen. Kugelstrahlen und Festwalzen sind industriell etablierte Verfahren, die im Automobil-, Flugzeug- und Turbinenbau Anwendung finden. Ein neueres Verfahren ist das Hochfrequenzhämmern, das zur Lebensdauersteigerung von beispielsweise Schweißkonstruktionen eingesetzt wird. Dabei basieren die Nachweise der Lebensdauersteigerung nach mechanischer Oberflächenbehandlung bisher auf experimentellen Untersuchungen. Für das Surface-Engineering haben wir eine entsprechende rechnerische Vorhersagemethodik entwickelt mit dessen Hilfe Bauteilentwickler die Leichtbaupotenziale ihrer Metallbauteile durch Optimieren der Randschichteigenschaften ausschöpfen können.

Ermüdungsfestigkeit und fertigungsbedingte Fehler

Neben Gefügeänderungen und der Entstehung von Verzug- und Eigenspannungen können durch Fertigungsverfahren wie Schweißen, Gießen, Schmieden und bei der additiven Fertigung Unregelmäßigkeiten in den bruchkritischen Bereichen eines Bauteils auftreten, die den sicheren Betrieb des Systems problematisch machen. Für die Bewertung dieser Fehler ist die Entwicklung eines »Design for Purpose«-Konzepts erforderlich, bei dem der Einfluss der Unregelmäßigkeiten auf die statische und zyklische Festigkeit bewertet wird. Aufgrund der Ergebnisse kann entschieden werden, ob eine Unregelmäßigkeit toleriert werden kann. Durch die Kombination von Festigkeitskonzepten der Schädigungs- und Bruchmechanik wurden für an den inneren Schweißfehlern entstandene Risse die Rissinitiierungs- und die Ausbreitungsphase berechnet und durch Versuchsergebnisse validiert. Dazu wurden der Schwellenwert ΔK_{th} und die Rissfortschrittskurven da/dN für das Schweißgut, in dem sich die inneren Unregelmäßigkeiten befanden, ermittelt. Um die Gesamtlebensdauer genauer abzuschätzen zu können, wurde die berechnete Anrisslebensdauer zu der berechneten Rissausbreitungslebensdauer addiert. Die Lebensdauerberechnung für 12 porenbehaftete Schweißproben und der Vergleich mit den Wöhlerversuchen sind in Abbildung 2 dargestellt.

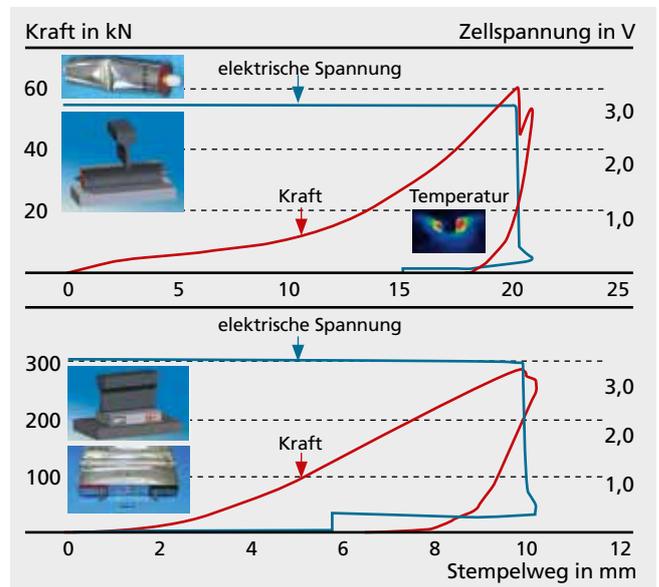
Dr. Majid Farajian, Jan Schubnell

CRASHVERHALTEN VON BATTERIEZELLEN: CHARAKTERISIERUNG SOWIE ERSATZMODELLIERUNG

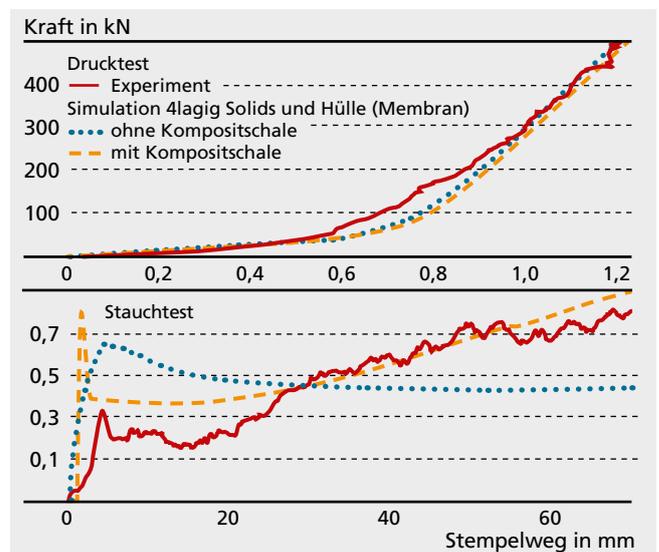
Das zentrale technische Problem bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist die Speicherung ausreichender Ladungsmengen bei gleichzeitig hoher Crashesicherheit, was zur Entwicklung individuell gekapselter Zellen führte. Zugleich sind Mobilitäts-einbußen weitestgehend zu vermeiden, was wiederum Leichtbaukonzepte erfordert, die jedoch mit den schwereren, gekapselten Zellen nicht optimal realisierbar sind. Deshalb wurden in den letzten Jahren alternativ auch nichtgekapselte, weiche Pouch-Zellen eingesetzt. Sie können in leichten Rahmen- und Plattenkonstruktionen dicht gestapelt und dennoch stabil verbaut werden und ermöglichen so höhere Energiedichten sowie Gewichtsreduktionen, was zu größeren Fahrzeugreichweiten verhelfen kann. Mit diesem Konzept sind vergleichbare Crashesicherheitsstandards möglich wie mit den eher konservativ dimensionierten, vollgekapselten Zelltypen. Ein optimaler Schutz der Zellen ist wichtig, da diese im geladenen Zustand bei äußerst ungünstigen Deformationen giftige Gase emittieren oder sogar explodieren könnten. Deshalb sind die gestapelten Pouch-Zelleinheiten in der Crashesimulation des Gesamtfahrzeugs mitzubedenken, um so bereits im Entwicklungsstadium Sicherheitsnachweise zu erbringen. Dafür werden geeignete Ersatzmodelle benötigt, da die einzelnen Zellen einen komplexen mikromechanischen Aufbau haben und in Fahrzeugsimulationen nicht detailliert abgebildet werden können. Die Gruppe Crashesicherheit und Schädigungsmechanik ist in den letzten Jahren immer stärker bei solchen Entwicklungen in verschiedenen Projekten involviert.

Experimentelle Charakterisierung

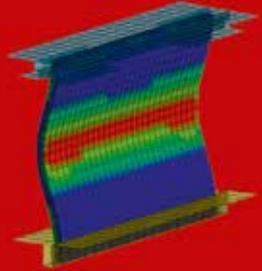
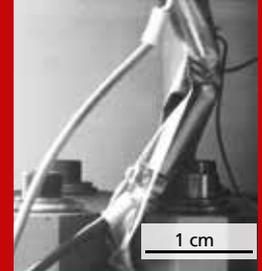
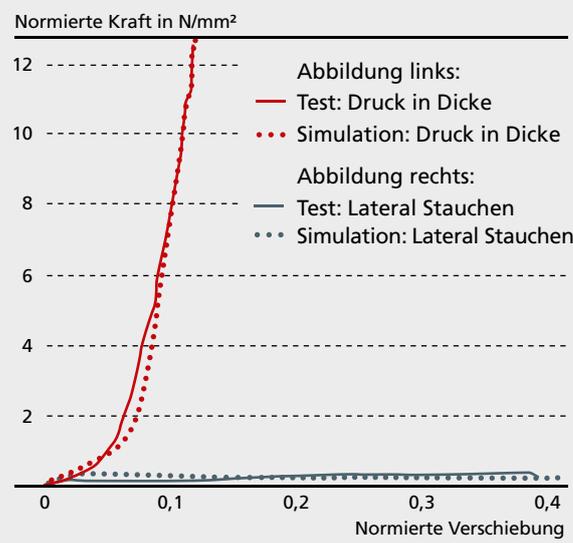
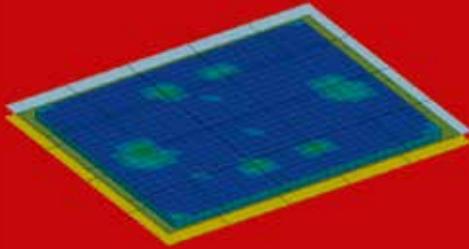
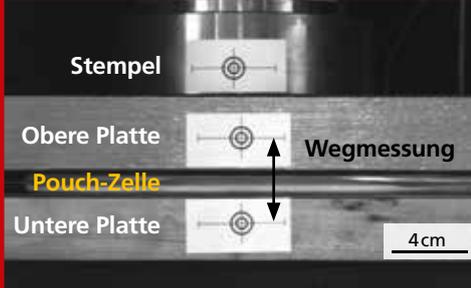
Zur Quantifizierung des mechanischen Deformations- und Versagensverhaltens wurden identische Pouch-Zellen in zwei Richtungen belastet und dabei die makroskopischen Kraft-Stempelverschiebungs-Charakteristika aufgezeichnet. Hierbei ist deutlich unterschiedliches Deformationsverhalten für



1 Indentationsversuche an vollgekapselten zylindrischen (oben) und prismatischen (unten) Li-Ionen-Zellen.



2 Druck- (oben) und Stauchversuch (unten) zweier Ersatzmodelle (blau und schwarz) im Vergleich zum Experiment (rot).



3 Richtungsabhängiges Deformationsverhalten einer Pouch-Zelle mit Simulationsergebnissen aus effizientem Ersatzmodell im Vergleich zum Experiment: Drucktest in Dickenrichtung (links); Lateral Stauchtest Pouch-Zelle (rechts).

Belastungen normal und lateral zur Zelle zu beobachten. Beide Lastszenarien sind aufgrund unterschiedlich verbauter Zellenausrichtungen in Bezug zur Fahrtrichtung als auch für den Seitenaufprall von großer Relevanz. Aufgrund der normierten Messgrößen der ermittelten Daten kann von einem richtungsabhängigen Verhalten ausgegangen werden (Abbildung 3), das das Ersatzmodell abbilden muss. Auch für vollgekapselte zylindrische und prismatische Zellen wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, bei welchen deformationsabhängiges elektrisches Kurzschlussverhalten nachweisbar ist (Abbildung 1).

Effiziente Modellierung komplexer Pouch-Zellen

Im Rahmen von Crashsimulationen ist besonders die Beschreibung von Pouch-Zellen schwierig, da bei vollgekapselten Zellen die metallische Hülle das mechanische Verformungsverhalten dominiert und daher die Deformationseigenschaften der inneren Struktur einen eher geringen Einfluss ausüben. Der heterogene, komplexe Aufbau von Pouch-Zellen, bestehend aus granularen metalloxidischen Lithium-Ionen-Materialien sowie Isolator- und Elektrodenfolien aus Polymeren sowie Metallen, erschweren eine reduzierte, effiziente Beschreibung durch Ersatzmodelle. In der jüngeren Vergangenheit wurden bereits Modelle entwickelt, diese sind jedoch aufgrund ihrer Komplexität nicht für die Gesamtfahrzeug-Crashsimulation verwendbar, da bereits in Klein- und Mittelklassewagen Hunderte dieser Zellen verbaut werden müssen.

Es wurde sowohl ein vereinfachtes homogenisiertes als auch ein erweitertes Ersatzmodell entwickelt, wobei Letztgenanntes den intrinsischen mikrostrukturellen Aufbau mithilfe entsprechend geschichteten Composites approximiert. Für die Beschreibung des dominierenden granularen Aktivmaterials wurde ein kompressibles, vom hydrostatischen Druck abhängiges

Plastizitätsmodell verwendet. Für die restlichen Komponenten ist eine Beschreibung mit inkompressibler Metallplastizität, gekoppelt mit Elastizitätsmodellen, ausreichend. Bei der Entwicklung beider Ersatzmodelle zeigten sich für lateraldominante Belastungen signifikante Einflüsse der primär aus Aluminium bestehenden Hülle der Pouch-Zelle. Mit dem erweiterten Ersatzmodell werden zusätzlich intrinsische Deformations- und Versagensmoden besser aufgelöst, auf deren Basis eine Kopplung zur Beschreibung des elektrischen Kurzschlussverhaltens zusätzlich implementierbar sein sollte. Grundsätzlich bleibt jedoch zu prüfen, ob das lokale Kurzschlussverhalten auch auf Basis des einfacheren, rein homogenisierten Ersatzmodells realisierbar wäre. Beim Design der entwickelten Ersatzmodelle wurde der Fokus auf Effizienz gelegt, die mittels adäquater Beschreibungsansätze und entsprechend angepasster Diskretisierung umgesetzt werden konnte.

Simulation stimmt gut mit experimentellen Daten überein

Die bisherigen Simulationsergebnisse zeigen für die mechanischen Deformationseigenschaften gute Übereinstimmungen zum Experiment (Abbildung 2). Das deutlich unterschiedliche Verhalten für Belastungen, normal und lateral zur Zelle, wird von den Modellen gut wiedergegeben. Für das reine Deformationsverhalten zeigen sich beim erweiterten Ersatzmodell tendenziell bessere Simulationsergebnisse als beim vereinfachten, homogenisierten Ansatz.

Die erzielten Resultate stellen eine gute Basis für eine Erweiterung der bisher entwickelten Ersatzmodelle zur effizienten Beschreibung des elektrischen Kurzschlussverhaltens dar. Dieses Ziel soll in einem nächsten Projektschritt zusammen mit der Automobilindustrie umgesetzt werden.

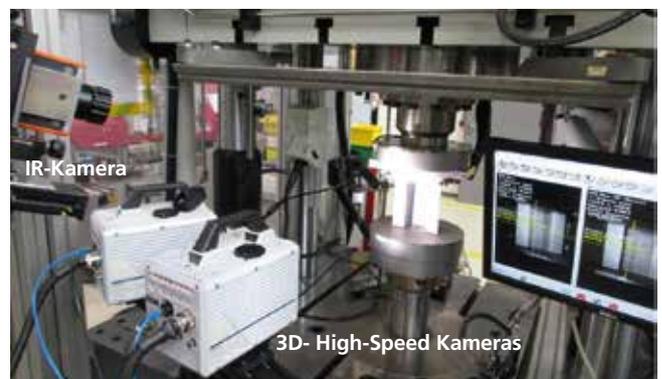
Dr. Andreas Trondl, Dr. Dong-Zhi Sun

CRASHBELASTUNGEN: KORRELATION DYNAMISCHER DEHNUNGSFELD- UND INFRAROTMESSUNGEN

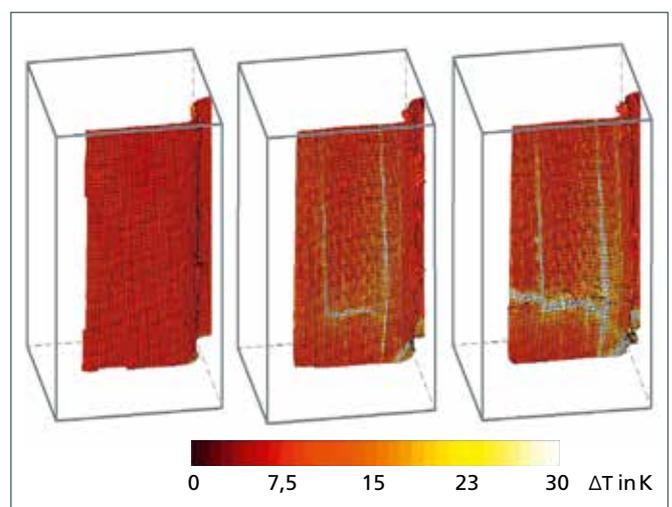
Der Fraunhofer-Verbund MATERIALS entwickelt im Zusammenhang von Industrie 4.0 das Konzept des Materials Data Space: Eine digitale Plattform soll alle relevanten Informationen von Werkstoffen und Bauteilen zur Verfügung stellen, um diese mit BigData-Methoden zu verarbeiten. Um die Methoden der Datenanalyse wie zum Beispiel Data Mining effektiv einzusetzen, müssen die Daten aufbereitet werden, was einen Anteil von bis zu 80 Prozent des Aufwands erfordert. Um diese Möglichkeiten in der Materialforschung zu nutzen und mehr als die Summe von parallelen Messungen zu erhalten, werden Feldinformationen aus Verschiebungs- und Temperaturmessungen während der Deformation räumlich und zeitlich korreliert.

Ortsgenaue mechanische Materialdaten

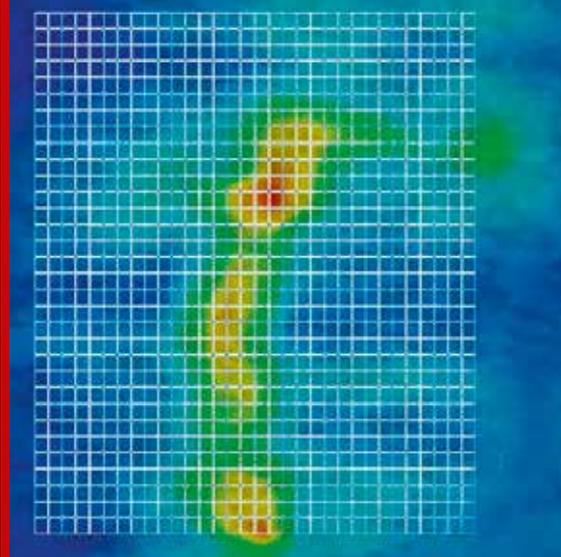
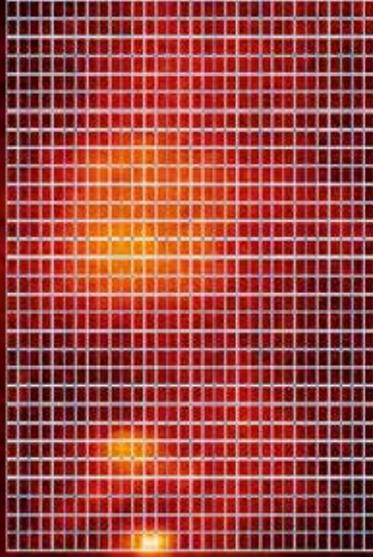
Die Gruppe Crashdynamik arbeitet aktuell daran, den Informationsgehalt aus den Untersuchungen des Werkstoffverhaltens bei Crashversuchen mit Einsatz digitaler Feldanalysen über deren Einzelaussagen hinaus zu erweitern. Für jeden Ort auf der Probe oder Bauteiloberfläche stehen nach der Datenverarbeitung Informationen über den aktuellen mechanischen und thermischen Zustand zur Verfügung. Die mechanischen Informationen kommen aus einer Grauwertkorrelation (DIC – Digital Image Correlation), die auf der Oberfläche Verschiebungen auswertet. Die thermischen Informationen werden durch transiente Infrarotmessungen gewonnen. Die daraus generierten zeit- und ortelektierten digitalen Datensätze lassen sich für eine Vielzahl von Analysen verwenden. Bisher waren viele dieser Untersuchungen auf die Auswertung angepasster Simulationen beschränkt. Mit der Feldkorrelation-Methode können beispielsweise Schädigungsentwicklungen in Form von Häufigkeitsanalysen lokaler Temperaturspitzen untersucht werden, die optisch an der Oberfläche nicht erkennbar sind. Ebenso können die thermomechanischen Eigenschaften des



1 Versuchsaufbau der High-Speed-Kameras (graue Kameras) zur Aufnahme einer dreidimensionalen Verformung mittels Grauwertkorrelation (DIC) und der High-Speed Infrarotkamera (orangene Kamera) zur Aufnahme der Temperaturinformationen.



2 Die Bildserie zeigt die thermomechanischen Eigenschaften eines CFK-Hutprofils bei einem Crushversuch. Farblich dargestellt sind die auf das Verschiebungsfeld korrelierten relativen Temperaturinformationen.



0,2mm

3 Infrarot- und Dehnungsfeld während eines Crashversuchs.

Werkstoffs für das gesamte Prüfvolumen bilanziert und daraus physikalisch basierte Modelle abgeleitet werden.

Zeit- und ortselektierte Auswertungen

In der Crashedynamik werden zur Abbildung des Verformungsverhaltens und zur Charakterisierung eines Werkstoffs oder Bauteils unter crashartigen Bedingungen Strahlungsemissionen im visuellen und infraroten Spektrum mit speziellen High-Speed-Kameras mit bis zu 10^4 und 10^6 Bildern pro Sekunde detektiert. Diese Informationen des Werkstoffverhaltens können wir momentan mit Versuchszeiten kleiner als 10 Millisekunden erheben. Dabei werden die Verformungs- und Temperaturinformationen zunächst unabhängig voneinander aufgenommen und später so korreliert, dass eine zwei- oder dreidimensionale digitale Abbildung des kompletten Versuchs zur Verfügung steht. Auf dieser Grundlage sind zeit- und ortselektierte Auswertungen und Analysen möglich.

Nach der Versuchsdurchführung werden Verformungs- und Temperaturdaten durch eine eigens entwickelte Auswerterroutine miteinander korreliert. Ein Beispiel für die Anwendung digitaler Feldmessung sind zum Beispiel Versuche an Hutprofilen, die zur Untersuchung des Crashverhaltens und der Energieabsorption verwendet werden. Abbildung 2 zeigt einen Crushversuch eines CFK-Hutprofils. Die digitale Feldmessung wurde hierbei eingesetzt, um die thermomechanischen Eigenschaften zu untersuchen und Rückschlüsse auf den Schädigungsablauf zu erhalten. Das zugrunde liegende schwarze Gitter trägt die Verformungsinformationen der 3D-Verschiebungsfeldmessung. Die auf das Verschiebungsfeld korrelierte Temperaturinformation aus der High-Speed-Infrarotmessung ist farbig dargestellt. Alternativ können auch verschiedene lokale Dehnungsinformationen dargestellt werden.

Mehrwert durch Nutzung der Datenräume

Anhand der korrelierten Verformungs- und Temperaturdaten aus den digitalen Feldmessungen ist eine Analyse möglich, die sich nicht nur auf den Versagenszeitpunkt des Werkstoffs beschränkt, sondern auch die transiente Schädigung quantifizierbar macht. Dies gibt Aufschlüsse über die Entstehung, Größe und Ausbreitung von Schädigungszonen in Werkstoffen oder Bauteilen. Unsere Methoden erlauben auch, die Umsetzung und den Abfluss umgesetzter Wärmeenergien während der Verformung und Schädigung auf lokaler und globaler Ebene zu betrachten. Adiabatische Zustände, die während der crashartigen Untersuchungen vorliegen, sind für uns von besonderem Interesse: Die freigesetzte Wärme hat keine Zeit im Werkstoff abzufließen und beeinflusst somit stark das Verformungs- und Schädigungsverhalten.

Simultan: globale und lokale Werkstoffanalysen

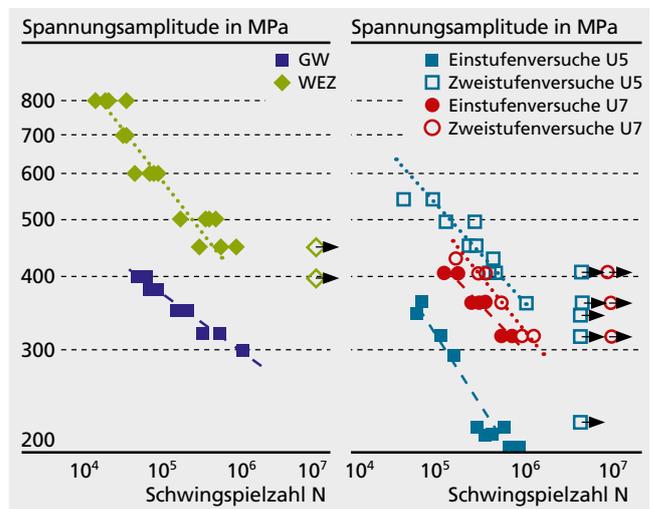
Die deutliche Steigerung der Informationsdichte durch die Feldanalyse ermöglicht simultan globale und lokale Untersuchungen und Analysen der Werkstoffe. Die digitale Informationsmatrix ermöglicht es, kontinuumsmechanische Bilanzgleichungen aufzustellen und zu lösen. Die Umsetzung von thermischer in mechanische Arbeit kann so qualifiziert werden und erlaubt Rückschlüsse auf Verformungs- und Schädigungsverhalten. Unser Ziel ist es, die Feldkorrelation als Grundlage für eine experimentell basierte Werkstoffmodellierung zu nutzen, um für unsere Kunden die Modellierung von Werkstoffen zur Auslegung von Bauteilen zu vereinfachen und zu optimieren.

Dominik Discher, Jörg Lienhard

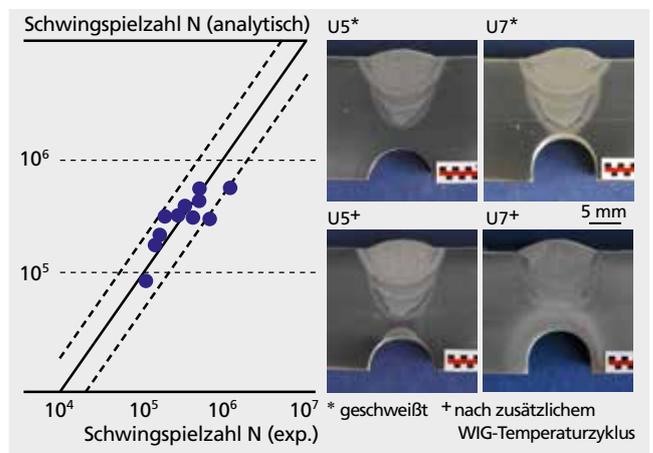
SCHWEISSVERBINDUNGEN: EINFLUSS LOKALER GEFÜGEEIGENSCHAFTEN AUF DIE ANRISSBILDUNG

Die Lebensdauer von Schweißverbindungen wird häufig durch die Anrissbildung in kritischen Bauteilbereichen bestimmt. Die Rissinitiierung wird durch das Zusammenspiel von Eigenspannungen, Verzügen, der Kerbwirkung und lokalen Werkstoffeigenschaften innerhalb einer Schweißnaht beeinflusst. In Versuchen an geschweißten Proben, die größtenteils idealisierte Bauteilgeometrien repräsentieren, wird häufig die Rissentstehung im Bereich des Nahtübergangs beobachtet, der gleichzeitig der Lage der Wärmeeinflusszone (WEZ) entspricht. Es stellen sich dabei mehrere essenzielle Fragen bezüglich der Übertragung von in Probenversuchen gewonnenen Erkenntnissen auf die Lebensdauerbewertung von Bauteilen: Ist die Rissbildung allein auf die Kerbwirkung zurückzuführen? Stellt die WEZ im Hinblick auf die Bauteilfestigkeit den schwächsten Bereich der Schweißnaht dar? Wie beeinflussen mehrmalige Temperaturzyklen beim Schweißen und insbesondere weitere Wärmeeinwirkungen, etwa eine Reparaturschweißung oder eine Wärmebehandlung, die lokalen Gefügeeigenschaften? Und wie beeinflussen diese Temperaturbeanspruchungen die Ermüdungsfestigkeit und das Versagensverhalten geschweißter Bauteile?

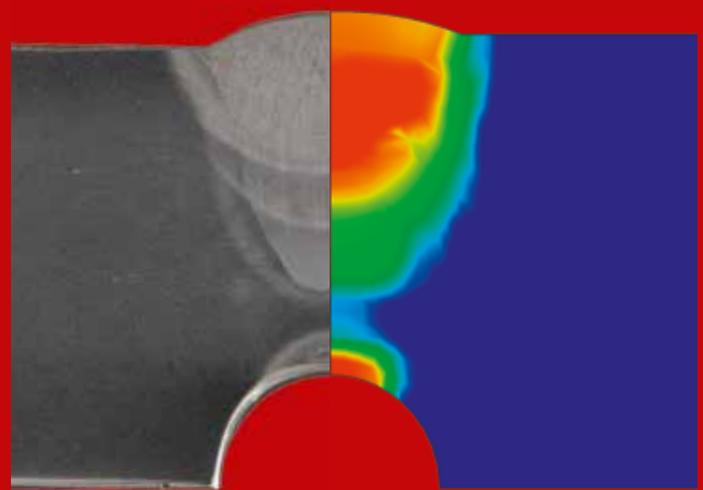
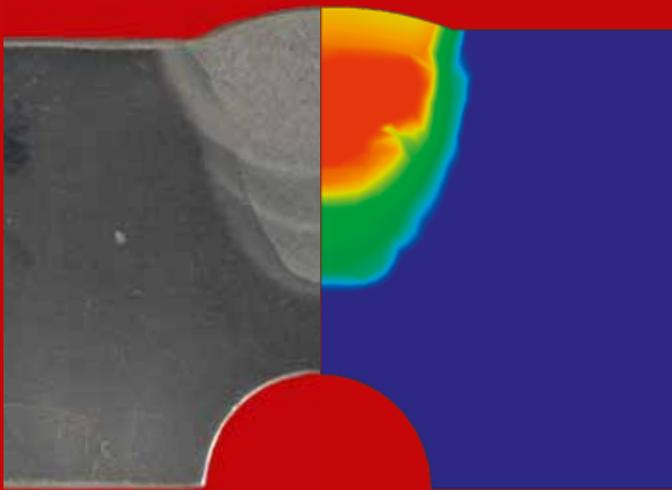
Die Beantwortung dieser Fragen sowie die Entwicklung eines Simulationstools zur Festigkeitsbewertung von mehrlagigen Schweißungen waren Ziele eines vom BMWi geförderten Vorhabens (IGF-Nr. 18242 BG), das gemeinsam vom Fraunhofer IWM und vom Lehrstuhl Füge- und Schweißtechnik an der BTU Cottbus bearbeitet wurde. Wichtige Bestandteile der Untersuchungen waren die experimentelle Charakterisierung verschiedener Gefügestände am Beispiel eines umwandelnden Baustahls, eine rechengestützte Gefügesimulation bei Vorliegen mehrerer Schweißlagen und bei einer anschließenden Wärmebehandlung. Außerdem sollten die Ergebnisse der Experimente und Simulationen in ein Bewertungskonzept überführt werden.



1 *Wöhlerlinien an Umlaufbiegeproben aus dem Grundwerkstoff und der Wärmeeinflusszone (links) und Wöhlerlinien an gekerbten Biegeproben (rechts); mit Pfeilen sind Durchläufer gekennzeichnet.*



2 *Rechnerische Abschätzung der Lebensdauer für Zweistufenversuche an Biegeproben mit der U5-Kerbe (links), Gefügeverteilung in gekerbten Proben (rechts).*



2mm

3 Bewertung und Simulation von Gefügeveränderungen: Vergleich von Schliffbildern mit simulierten Festigkeitsverteilungen im Gefüge.

Werkstoffcharakterisierung

Das experimentelle Programm bestand aus Schwingfestigkeitsversuchen an gekerbten, dreilagig MAG-geschweißten Proben sowie an glatten Umlaufbiegeproben. Die Umlaufbiegeproben wurden zuerst aus dem Grundwerkstoff gefertigt; anschließend wurde in etwa der Hälfte der Proben eine simulierte Wärmeinflusszone eingebracht. Die Gefügeumwandlung des Grundwerkstoffs in die WEZ erfolgte kontrolliert in einer Gleeble-Anlage unter Berücksichtigung der Parameter des verwendeten MAG-Schweißverfahrens, inklusive der gemessenen Spitztemperatur und der Abkühlzeit. Abbildung 1 zeigt die an den Umlaufbiegeproben mit den beiden Gefügeständen ermittelten Wöhlerlinien. Dabei weist das WEZ-Gefüge eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit als die des Grundwerkstoffs auf.

Gekerbte Schweißproben

Es wurden zunächst 20 mm dicke und 300 mm breite Platten mit einer U-förmigen Kerbe auf der unteren Seite und einer V-förmigen, 10 mm tiefen Kerbe auf der oberen Seite vorbereitet. Dabei betrug die Tiefe der U-Kerbe 5 oder 7 mm (U5- beziehungsweise U7-Proben). Anschließend wurden die V-Kerben mit drei MAG-Schweißlagen zugeschweißt und die Platten in 20 mm breite Einzelproben mit einer mittig positionierten U-Kerbe zertrennt. Die entsprechenden Proben wurden unter schwellender Biegebeanspruchung bis zur Anrissbildung geprüft, wobei sich die Kerbseite im zugbeanspruchten Bereich befand. Dadurch wurde die Rissentstehung am Nahtübergang, das heißt an einer Kerbe undefinierter Geometrie, unterdrückt.

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, liegen im Kerbgrund der U5- und U7-Proben unterschiedliche Gefügestände – Grundwerkstoff für die U5- beziehungsweise WEZ für die U7-Probe – vor. Trotz

einer höheren Kerbwirkung ergibt sich für die letztere Probenform eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit als für U5.

Neben einem direkten Vergleich zweier Gefügestände wurde der Einfluss einer möglichen während des Betriebszyklus auftretenden Gefügeumwandlung auf die Lebensdauer hin untersucht. Hierzu wurden zwei weitere Versuchsreihen, je an U5- und U7-Proben, analog zu den oben beschriebenen Versuchen, jedoch bis zirka $\frac{1}{2}$ Lebensdauer, durchgeführt. Anschließend wurde mit einem WIG-Brenner ein Temperaturzyklus an der Kerbseite aufgebracht, wodurch anstelle von Grundwerkstoff ein WEZ-Gefüge (U5) beziehungsweise ein größerer WEZ-Bereich (U7) entstanden ist, siehe Abbildung 2. Dies führte, trotz einer zuvor erfolgten Vorschädigung, zu einer signifikanten Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zu den einstufigen Versuchen. Insbesondere für alle U5-Proben ergaben sich in der zweiten Versuchsstufe bei gleichbleibenden Spannungsamplituden ausschließlich Durchläufer. Erst nach einer zirka 1,5- bis 2-fachen Lasterhöhung traten eine weitere Schädigung und Brüche auf. Auch bei den U7-Proben wurde infolge des WIG-Zyklus eine zirka 2-fache Lebensdauererhöhung erzielt.

Lebensdauerbewertung

Als pragmatischer und mit vorliegenden Regelwerken kompatibler Weg zur Lebensdauerbewertung wurde zum einen eine auf die lokale Festigkeit des Schweißgefüges vorgenommene Skalierung von Wöhlerlinien und zum anderen die lineare Schadensakkumulationshypothese angenommen. Dabei ergab sich eine gute Übereinstimmung von in zweistufigen Versuchen an gekerbten Schweißproben gemessenen und analytisch berechneten Lebensdauern (Abbildung 2).

Sergii Moroz, Dr. Igor Varfolomeev

AUSWIRKUNG VON ERWEICHUNGSZONEN AUF DAS CRASHVERHALTEN HOCHFESTER STAHLBLECHE

Im Fahrzeugbau werden hochfeste Stähle in dünnen Blechdicken eingesetzt: aus Leichtbaugründen zur Steigerung der Energieeffizienz sowie zur Erhöhung der passiven Sicherheit bei gleichzeitiger Ressourcenschonung. Aktuell und auch zukünftig wird das etablierte und hoch automatisierbare Widerstandspunktschweißen verwendet, um die einzelnen Bauteile aus diesen hochfesten Stählen zu einer tragenden Struktur zu verbinden. Beim Punktschweißen dieser Stahlklasse bilden sich durch Anlasseneffekte Erweichungszonen aus. Diese zeigen niedrigere Festigkeit als der unbeeinflusste hochfeste Stahl und können die Bauteilintegrität gefährden.

Charakterisierung von Blechen mit Erweichungszonen

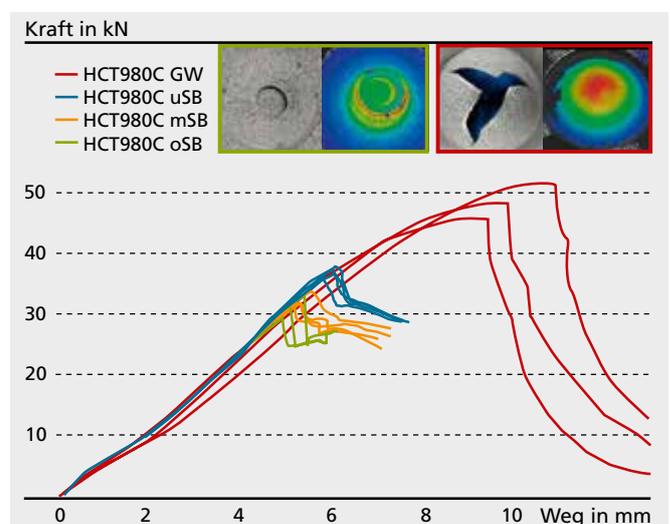
Zur Charakterisierung des Einflusses von Erweichungszonen um Schweißpunkte haben wir zwei einfache Probenversuche entwickelt. Es sind Versuche mit Zug- und Durchstoßproben, die das inhomogene Gefüge des Schweißpunkts und somit die Erweichungszone enthalten und die durch Abtrennen eines aufgeschweißten Opferblechs hergestellt werden. Abbildung 1 zeigt die gemessenen Kraft-Wegkurven aus Durchstoßproben mit der Erweichungszone im Vergleich zu homogenen Proben aus dem Complexphasenstahl HCT980C. Das typische Ergebnis, das wir auch in Zugversuchen beobachten: Der Weg bis zur ersten Rissbildung und die maximal ertragbare Kraft mit Erweichungszone ist viel kleiner als ohne. Dies bedeutet, dass auch bei punktgeschweißten Bauteilen, bei denen Zug- und Biegebelastungen in der Blechebene im Einsatz vorliegen, früheres Versagen und damit eine niedrigere Energieaufnahme auftreten.

Modellierung für die Crashsimulation

Um diesen Effekt in Crashsimulationen punktgeschweißter Bauteile abzubilden, haben wir eine Vorgehensweise auf

Basis der oben beschriebenen Versuche entwickelt und ein Versagensmodell für die Erweichungszone aufgestellt. Blechbauteile werden mit Schalenelementen abgebildet und Schweißpunkte mit einfachen Ersatzelementen, die wiederum die Schalenelemente an der Fugestelle miteinander verbinden. An den Schweißpunktpositionen modellieren wir in den Blechen ringförmige Bereiche, denen die Eigenschaften und das Versagensmodell der Erweichungszone zugeordnet werden. Diese Simulationsmethodik kann neben dem reinen Schweißpunktversagen auch Rissbildung in der Erweichungszone vorhersagen. Des Weiteren wurde eine analytische Abschätzung der Zugfestigkeit geschweißter Bleche entwickelt und in ein Programm implementiert, das unter www.iwm.fraunhofer.de/spotweld-tool zugänglich ist.

Lilia Schuster, Dr. Silke Sommer



1 Gemessene Kraft-Weg-Kurven aus Durchstoßversuchen mit und ohne Erweichungszone; Dehnungsverteilung kurz vor Versagen und gebrochene Proben.

METHODEN PROBABILISTISCHER MULTISKALENANALYSE, UM MATERIALSTREUUNGEN ZU BEHERRSCHEN

Viele Verbundwerkstoffe, beispielsweise kurz- oder langfaserverstärkte Composites wie SMC oder LFT, haben eine ausgeprägt ungeordnete Mikrostruktur. Diese führt zu Streuungen in den Materialeigenschaften der Werkstoffe. Um diese Streuungen einer Berechnung und damit der Berücksichtigung im Design von Bauteilen zugänglich zu machen, werden am Fraunhofer IWM neuartige, probabilistische Simulationsmethoden entwickelt.

Werkstoffe mit Streuung im Materialverhalten

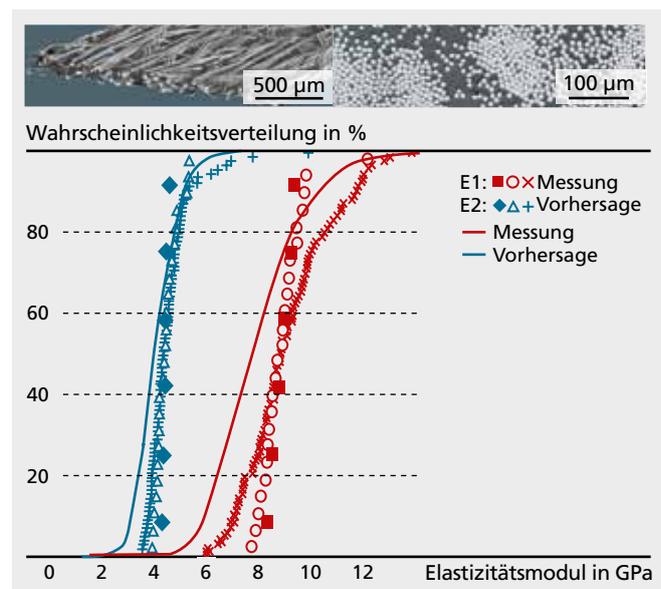
Wesentliche Mikrostrukturparameter vieler Composites weisen signifikante Streuungen auf. Das sind bei kurz- und langfaserverstärkten Werkstoffen die Faserorientierung und die -länge, bei unidirektional endlosfaserverstärkten Kunststoffen die lokale Faserdichte und der mittlere Faserabstand oder bei Partikelverbunden und festen Schäumen die Größe und Form von Partikeln oder Poren. Diese Inhomogenitäten bewirken, dass auch das Materialverhalten der Werkstoffe auf der makroskopischen Ebene mit deutlichen Streuungen oder »Unschärfen« behaftet ist.

Mehr Leichtbaupotenzial durch Mikrostrukturmodelle

In der herkömmlichen Bauteilbewertung wird der Streuung der Materialeigenschaften durch die Wahl eines hinreichend großen Sicherheitsbeiwerts Rechnung getragen. Dies führt meist zu einer Überdimensionierung und damit einer schlechten Ausnutzung des Leichtbaupotenzials. Eine vielversprechende Alternative stellen moderne probabilistische Berechnungsmethoden dar, die die Streuung im Materialverhalten explizit berücksichtigen. Sie sind in der Lage, die zu erwartenden Unschärfen im Bauteilverhalten direkt vorherzusagen und haben gegenüber den klassischen Verfahren eine erheblich verbesserte Aussagekraft.

Am Fraunhofer IWM wurden probabilistische Homogenisierungsmethoden erarbeitet, die es erlauben, die Streuung des Materialverhaltens aus einer Finite-Elemente-Analyse der Mikrostruktur vorherzusagen. Dazu wurden leistungsfähige Methoden zur zufallsgesteuerten Generierung von Mikrostrukturmodellen auf der Basis gemessener Wahrscheinlichkeitsverteilungen etabliert. Auf dieser Basis werden die Materialstreuungen durch statistische FE-Simulation vorhergesagt. Die Übertragung auf die Bauteilebene erfolgt durch eine Zufallsfeldbeschreibung des Materialverhaltens. Hierdurch wird ein wichtiger Baustein der durchgängigen Simulationskette von der Mikrostruktur bis zum Bauteil gebildet.

Dr. Carla Beckmann, Dr. Jörg Hohe



1 *Streuende Mikrostruktur von LFT- und UD-Materialien und Wahrscheinlichkeitsverteilung der Longitudinal- und Transversal-Elastizitätsmoduli von LFT.*

WERKSTOFFBEWERTUNG, LEBENSDAUERKONZEPTE

GESCHÄFTSFELDLIMITER

Dr. Wulf Pfeiffer

Telefon +49 761 5142-166

wulf.pfeiffer@iwm.fraunhofer.de

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



» *Die quantitative Werkstoffbewertung ist die Grundlage physikalisch basierter Lebensdauerkonzepte.*

FOKUS

Wir bewerten den Einfluss von Mikrostruktur, Eigenspannungen und Schädigung auf Funktionalität und Lebensdauer von Bauteilen. Besonderen Wert legen wir auf die Verknüpfung von Experimenten unter einsatznahen Belastungsbedingungen mit fortschrittlicher Werkstoffmodellierung. Hierbei spielt das Verständnis der Anforderungen unserer Kunden an die Bauteile eine zentrale Rolle, beispielsweise für die Energieumwandlung und -speicherung oder bei der Werkstoffqualifizierung für die Verbrennungskraftmaschinen und die Kraftwerkstechnik. So leisten wir einen enormen Beitrag zur regenerativen Energieversorgung.

Schwerpunkte unserer Arbeiten sind die Modellierung zyklischer thermomechanischer Beanspruchungen und die Aufklärung von Degradationsmechanismen der Korrosion, Spannungsrisskorrosion, Hochtemperaturkorrosion und Wasserstoffversprödung zur Lebensdauervorhersage und -optimierung. Bei akuten Schadensfällen unterstützen wir unsere Kunden durch Gutachten.

BEMERKENSWERTES AUS 2017

Einer unserer Forschungsschwerpunkte ist die Aufklärung der Mechanismen umgebungsbedingter Materialdegradationen und die Ableitung geeigneter Schutzmaßnahmen. So konnten wir durch Kombination von thermodynamischer Gefügesimulation mit atomistischer Werkstoffmodellierung aussichtsreiche Zusammensetzungen für CuSnZn-Korrosionsschutzschichten identifizieren, die mittels umweltfreundlicher Elektrolyte von unserem Projektpartner Fraunhofer IPA erfolgreich durch galvanische Abscheidung hergestellt wurden.

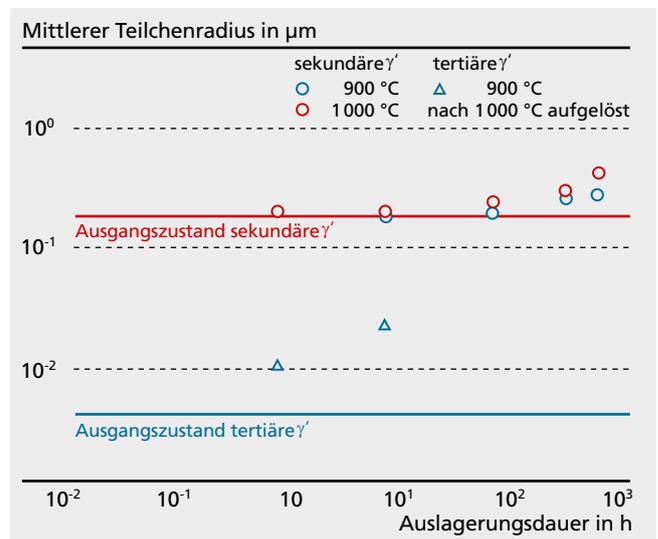
Unserer Hochtemperaturversuchstechnik konnten wir durch ein optisches Dehnungsregelungssystem, das in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPM entstanden ist, weiter professionalisieren. Mit diesem unikalen System lassen sich selbst höchstbeanspruchte Werkstoffe berührungsfrei, schnell und hoch präzise charakterisieren. Zudem haben wir die Methodenentwicklung für einen ressourceneffizienten und applikationsgerechten Werkstoffeinsatz in Turbinenrädern für Abgasturbolader vorangetrieben.

ABGASTURBOLADER: METHODEN FÜR EFFIZIENTEN WERKSTOFFEINSATZ IN TURBINENRÄDERN

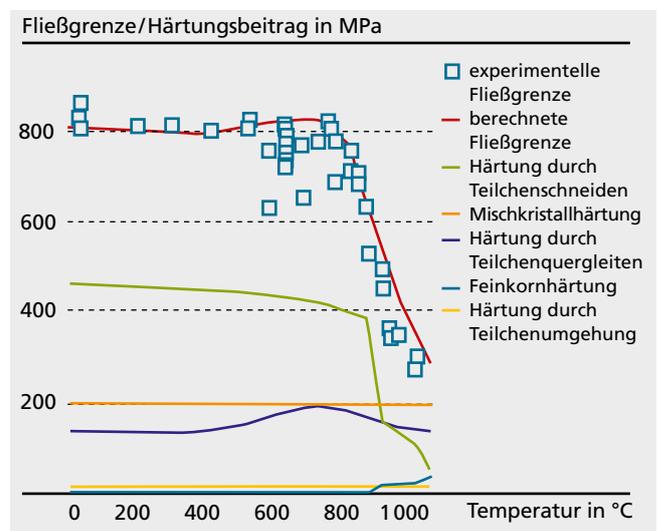
Eine Maßnahme zur Reduktion der CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen ist die Erhöhung der Abgastemperatur. Für Turbinenräder des Abgasturboladers werden Werkstoffe mit hohen mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit bei Temperaturen zwischen 800 und 1 000 °C benötigt. Dies sind teure Nickelbasislegierungen mit Legierungselementen, die selten auf der Erde vorkommen und teilweise nur in politisch instabilen Regionen bezogen werden können. In einem vom baden-württembergischen Landesministerium für Wirtschaft und Wohnungsbau geförderten Vorhaben wird am Fraunhofer IWM ein integrales Verfahren zur systematischen Substitution von Legierungselementen in technischen Hochtemperaturlegierungen am Beispiel des Turbinenrads entwickelt und bewertet. Ziel ist es, den Gehalt kritischer beziehungsweise teurer Legierungen bei gleichbleibender Funktionalität deutlich zu reduzieren.

Mechanismen der Hochtemperaturfestigkeit

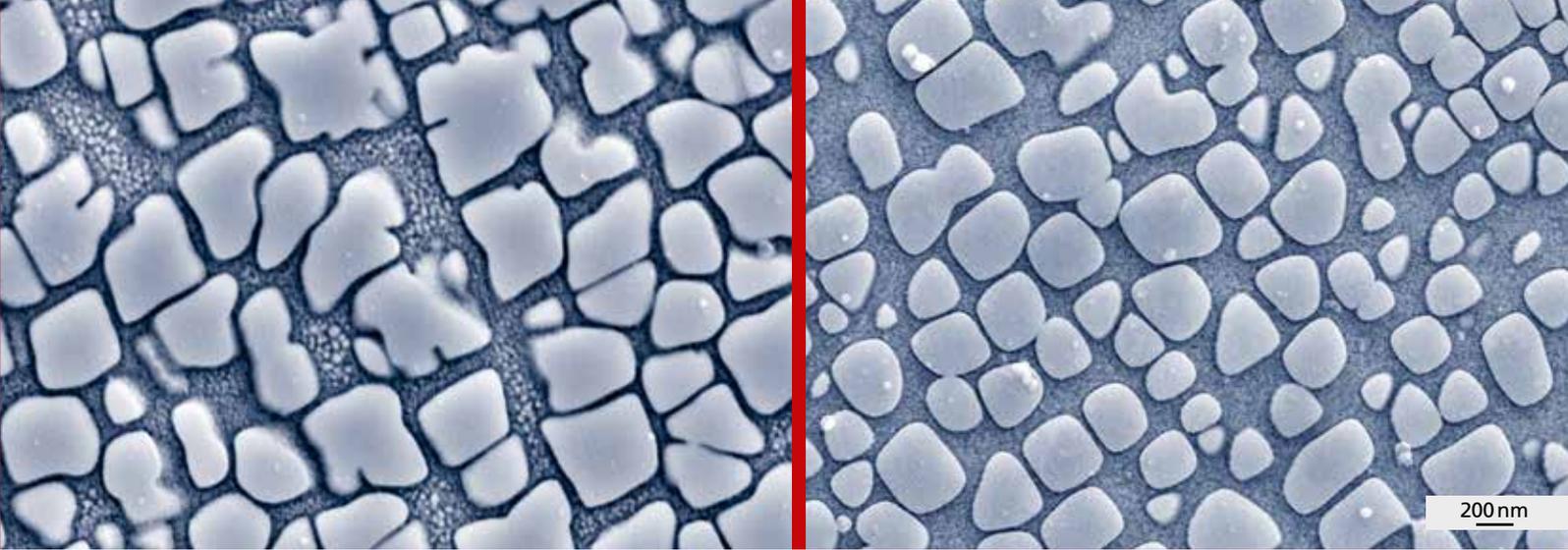
Intermetallische Phasen, genannt γ' -Teilchen, tragen maßgeblich zur Festigkeit von Nickelbasislegierungen bei hohen Temperaturen bei. Sie härten die Nickelmatrix, indem sie die Versetzungsbewegungen behindern. Der Härtingsbeitrag zur statischen Fließgrenze hängt von der Größe und Morphologie der γ' -Teilchen ab. Die Versetzungen schneiden kleinere γ' -Teilchen und umgehen sie, wenn sie eine kritische Größe erreicht haben. Bei Temperaturen zwischen 600 und 800 °C steigt die Fließgrenze etwas an, weil Versetzungen quer durch größere γ' -Teilchen gleiten. Der Herstellungsprozess ist darauf optimiert, verschiedene γ' -Teilchenpopulationen gezielt auszuscheiden. Bei hohen Temperaturen setzen Diffusionsprozesse ein, die zur Vergrößerung, zum Zusammenwachsen und schließlich zur Auflösung der γ' -Teilchen führen können. Die chemische Zusammensetzung der Nickelbasislegierung und die Morphologie der γ' -Teilchen tragen maßgeblich dazu bei, bei welcher Temperatur und welchen Zeiten die Diffusions-



1 Mittlerer Teilchenradius der γ' -Teilchen als Funktion der Auslagerungszeit und der Auslagerungstemperatur in MAR-M247.



2 Experimentelle und modellierte Fließgrenze der Nickelbasislegierung MAR-M247 in Abhängigkeit von der Temperatur.



3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der γ' -Teilchen in MAR-M247 im Ausgangszustand (links) und nach zehnstündiger Auslagerung bei 1 000 °C (rechts), Bild eingefärbt.

prozesse einsetzen und mit welcher Geschwindigkeit sie bei einer gegebenen Temperatur erfolgen. Diese Mikrostrukturveränderungen führen zur Verschlechterung der Hochtemperaturfestigkeit. Ein weiterer bedeutender Mechanismus ist die Härtung des Mischkristalls durch Fremdatome, die ebenfalls als Hindernisse für mobile Versetzungen wirken.

Mikrostrukturentwicklung bei hohen Temperaturen

Die temperatur- und zeitabhängige Mikrostrukturentwicklung mehrerer Nickelbasislegierungen mit unterschiedlichen Gehalten an kritischen beziehungsweise seltenen Legierungselementen wurde systematisch untersucht. Hierzu wurde der γ' -Teilchenradius im Ausgangszustand und nach Auslagerung im Laborofen bei 900 °C beziehungsweise bei 1 000 °C zwischen einer und tausend Stunden ermittelt. Feinverteilte sekundäre γ' -Teilchen und feinste tertiäre γ' -Teilchen zwischen den sekundären tragen maßgeblich zur Härtung bei (Abbildung 3 links). Die Entwicklung des mittleren Teilchenradius als Funktion der Auslagerungsdauer und -temperatur wurde durch automatisierte Bildverarbeitung ermittelt (Abbildung 1). Nach Auslagerung bei 900 °C vergrößern und wachsen die feinsten tertiären γ' -Teilchen am schnellsten. In MAR-M247 sind sie nach Auslagerungszeiten von 100 Stunden aufgelöst. Bei 1 000 °C sind sie bereits nach einer Stunde Auslagerung aufgelöst (Abbildung 3 rechts). Die sekundären γ' -Teilchen wachsen schneller bei 1 000 °C als bei 900 °C.

Mikrostrukturbasierte Modellierung der Hochtemperaturfestigkeit

Ein Modell wurde erprobt, das die Fließgrenze aus den Beiträgen der Teilchen-, Mischkristall- und Feinkornhärtung einheitlich beschreibt. Die nach einstündiger Auslagerung gemessenen γ' -Teilchenradii und im Ausgangszustand

gemessenen Korngrößen wurden eingesetzt. Abbildung 2 zeigt experimentelle Fließgrenzen aus der Literatur, die modellierte Fließgrenze sowie die Härtungsbeiträge durch die jeweiligen Mechanismen. Der Beitrag durch Schneiden von feinsten tertiären γ' -Teilchen durch Versetzungen ist der höchste. Er sinkt bei Temperaturen oberhalb 850 °C durch ihre Vergrößerung und Auflösung bei 1 000 °C. Der Beitrag durch Mischkristallhärtung ist der zweithöchste. Der Beitrag durch Quergleiten der größten primären γ' -Teilchen beschreibt den Fließgrenzenverlauf zwischen 600 und 800 °C. Der Fließgrenzenbeitrag durch Feinkornhärtung ist sehr gering für diese Nickelbasislegierung, da die Körner sehr groß sind. Der Beitrag durch Teilchenumgehung ist ebenfalls niedrig. Er ist für große primäre γ' -Teilchen wirksam, die in der Detailaufnahme in Abbildung 2 nicht zu sehen sind.

Gegenstand künftiger Untersuchungen wird es sein, die Entwicklung des Teilchenradius der γ' -Teilchen durch diffusionskinetische Berechnungen vorherzusagen und diese zur Bewertung der temperatur- und dehnratenabhängigen Fließgrenze sowie der Kriecheigenschaften zu nutzen. Zur Validierung dieses prädiktiven Modells werden neben den mikrostrukturellen Untersuchungen mechanische Kennwerte an mehreren Nickelbasislegierungen ermittelt.

Dr. Valérie Friedmann, Dr. Christoph Schweizer

WASSERSTOFFVERSPRÖDUNG: WERKSTOFFVERSAGEN BEI STATISCHER UND DYNAMISCHER BELASTUNG

Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger verlangt den Ausschluss der sogenannten Wasserstoffversprödung für Werkstoffe im direkten Kontakt mit Wasserstoff. Ein grundlegender Versuch ist die Prüfung nach ASTM E 1681: Rissbehaftete Bauteile werden statisch unter betriebsrelevanten Umgebungsbedingungen belastet und die umgebungsbedingte kritische Spannungsintensität K_{IEAC} gemessen, die zum Versagen führt.

Für den Werkstoff P265GH, einen niedriglegierten Kohlenstoffstahl, der für Rohrleitungen und Druckkessel verwendet wird, haben wir den Kennwert K_{IEAC} für eine elektrochemische Beladung mit Wasserstoff ermittelt. Die Beladung erfolgte in 0,1 N Natronlauge mit 1 g/l Thioharnstoff bei einer Beladungsstromdichte von 15 mA/cm², was nach längerer Versuchsdauer in einem relativ geringen Wasserstoffgehalt von 3 ppm resultierte.

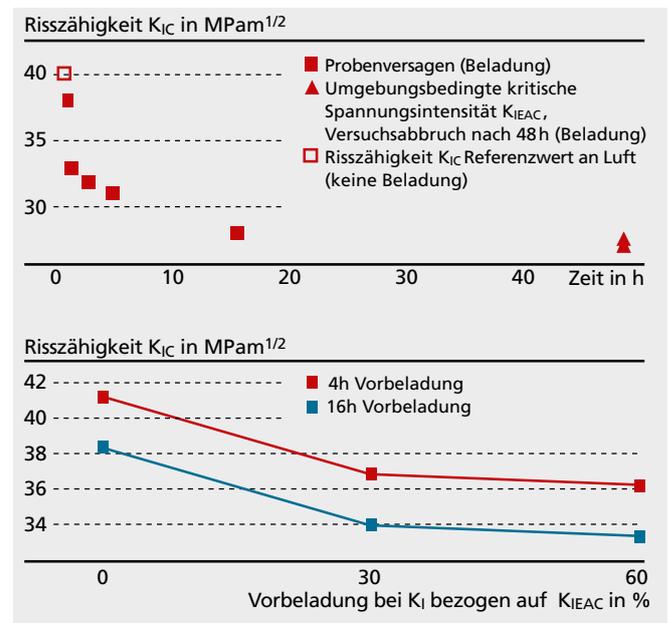
Der Referenzwert der Risszähigkeit K_{IC} an Luft nach ASTM E 399 liegt bei 38 MPa√m. Die Risszähigkeit K_{IEAC} unterschreitet bei länger andauerndem Wasserstoffangebot mit rund 27 MPa√m den Referenzwert deutlich (Abbildung 1 oben). Die statisch ertragbare Belastung wird also durch die Anwesenheit von Wasserstoff signifikant vermindert und muss bei der Auslegung eines Bauteils für Wasserstofftransport oder -speicherung berücksichtigt werden. Die auch gezeigte Belastungsabhängigkeit der Zeit bis zum Versagen ist typisch für den Prozess der Wasserstoffversprödung. Hohe Zugspannungen an der Risspitze führen zu hohen Wasserstoffanreicherungen sowie einer schnellen Rissinitiiierung und -ausbreitung.

Kennwerte für dynamische Belastung

Weiterhin wurde der Einfluss einer Wasserstoffanreicherung bei statischer Last unterhalb von K_{IEAC} auf K_{IC} geprüft. Damit wird der Fall simuliert, bei dem sich Wasserstoff im Betrieb im Bereich von Ungängen, wie Kerben oder Einschlüssen, bei

statisch unkritischen Lasten anreichert und eine kurzzeitige Überbelastung zum Versagen führen kann. Im Versuch erfolgt nach der Vorbelastung eine schnelle Belastung bis zum Bruch zur Messung von K_{IC} . Dabei nimmt mit steigender statischer Belastung während der Beladung die anschließende Bruchzähigkeit K_{IC} ab (Abbildung 1 unten). Die Wasserstoffversprödung muss also auch bei kurzfristigen, dynamischen Belastungen berücksichtigt werden.

Dr. Ken Wackermann, Dr. Wulf Pfeiffer



1 Zeit bis zum Versagen bei unterschiedlichen Spannungsintensitäten während elektrochemischer Beladung in 0,1 N NaOH mit 1 g/l Thioharnstoff und 15 mA/cm² für P265GH (oben). Risszähigkeit bei dynamischer Belastung nach Vorbelastungen bei unterschiedlichem K_I (unten).

NEUE, ELEKTROLYTISCH ABSCHIEDBARE KORROSIONSSCHICHTEN AUF KUPFERBASIS

Elektrolytisch abgeschiedene Nickelschichten werden wegen ihrer guten Korrosions- und tribologischen Eigenschaften vielseitig eingesetzt. Aufgrund seiner Glanzbildung und seines Einebnens von Oberflächen wird Nickel auch als Zwischenschicht für dekorative Schichten verwendet. Allerdings können sogar verchromte Flächen mit Nickel als Zwischenschicht bei empfindlichen Personen allergische Reaktionen auslösen. Zudem verhindern der komplexe elektrolytische Abscheidungsprozess und die bisher cyanidhaltigen Elektrolyte momentan eine größere Anwendungsbreite. Am Fraunhofer IWM werden zusammen mit dem Fraunhofer IPA neue Schichtsysteme auf der Basis von Kupfer, Zinn und Zink entwickelt, die vergleichbar interessante Eigenschaften und eine gute Umweltverträglichkeit besitzen.

Schichtentwicklung im Labormaßstab erfolgreich

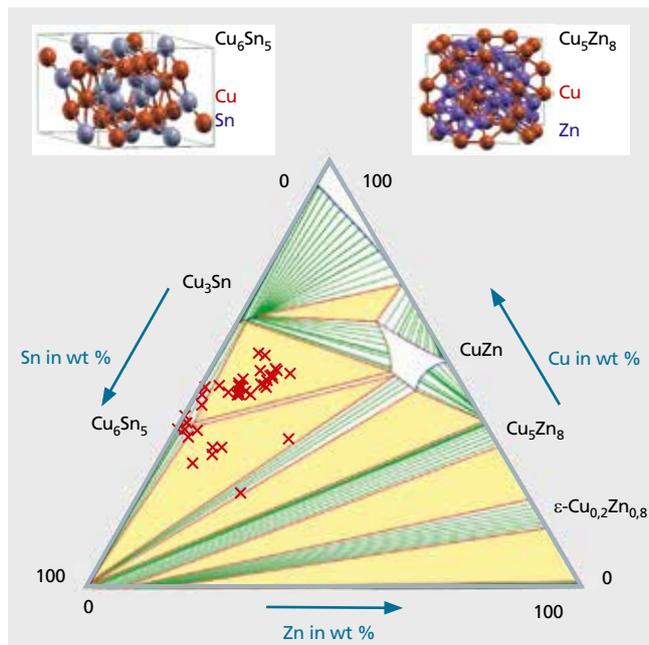
Ziel der aktuellen Forschung ist es, rissfreie Schichten mit ausreichender Dicke und guten mechanischen Eigenschaften herzustellen, um damit Bauteile gegen Korrosion und Verschleiß zu schützen. Für Anwendungen mit dekorativen Oberflächen spielt die Ebenheit der Schicht und damit der Glanzgrad eine große Rolle. Im vom Land Baden-Württemberg geförderten Projekt »Umweltverträgliche und leistungsfähige galvanische CuSnZn-Beschichtungen« wurden bisher Schichten in Dicken bis zu 30 µm erfolgreich cyanidfrei abgeschieden.

Begleitende Simulation und metallurgische Betrachtungen

Um Schichten anwendungsspezifisch optimal einstellen zu können, wird das Legierungssystem CuSnZn grundlegend untersucht. Mit atomistischen Simulationsmethoden berechnen wir die Bildungsenthalpien der Mischphasen sowie den Einfluss von Schwankungen der Stöchiometrie. Auf atomarer Ebene können wir Diffusionsprozesse untersuchen und damit Phasenumwandlungen und Korrosion verstehen.

Mithilfe thermodynamisch-kinetischer Modelle ist es möglich, aufgrund der chemischen Mischung die Phasenzusammensetzung temperatur- und zeitabhängig vorherzusagen. Damit lassen sich Rückschlüsse auf die von der Legierungszusammensetzung abhängigen Eigenschaften ziehen. Auch die Langzeitstabilität der Schichten lässt sich mithilfe von thermodynamisch-kinetischen Rechnungen und wenigen stichprobenartigen Versuchen abschätzen.

Dr. Johannes Preußner, Dr. Daniel Urban



1 Thermodynamisch berechnetes Phasendiagramm für das Legierungssystem CuSnZn; Kreuze: chemische Zusammensetzungen einzelner hergestellter Schichten; Simulationen (oben) für die Berechnung der physikalischen Eigenschaften der beiden dominierenden intermetallischen Phasen.

MITARBEIT IN VERBÜNDEN, ALLIANZEN UND ZENTREN DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Fraunhofer-Verbund MATERIALS

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS bündelt die Kompetenzen der materialwissenschaftlich orientierten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft. Er ist einer von sieben Fraunhofer-Forschungsverbänden, in denen sich fachlich verwandte Institute organisieren.

Das Forschungs- und Entwicklungsspektrum innerhalb des Fraunhofer-Verbunds umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über die Fertigungsverfahren im quasi-industriellen 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



2,5 mm

Demonstrator einer generativ gefertigten orthopädischen Einlage aus thermoplastischem Polyurethan (TPU).

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. Peter Gumbsch

www.profilregion-ka.de

Fraunhofer-Projektgruppe

Neue Antriebssysteme – NAS

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

Prof. Dr. Matthias Scherge

www.ict.fraunhofer.de/de/komp/nas.html

ÜBERGREIFENDE VORLAUFFORSCHUNGSPROJEKTE DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT

Biomimetischer Synthesekautschuk in innovativen Elastomerkompositen – BISYKA

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

Drei Fraunhofer-Institute entwickeln das Laser-Mehrlagen-Engstspaltschweißen für dickwandige Hochtemperaturkomponenten aus Nickelbasiswerkstoffen. Das Fraunhofer IWM charakterisiert das mechanische Verhalten von Schweißverbindungen unter Praxis-Beanspruchungen und entwickelt ein Lebensdauer-Prognose-Tool, mit dem sowohl der Zeitpunkt der Rissinitiation 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

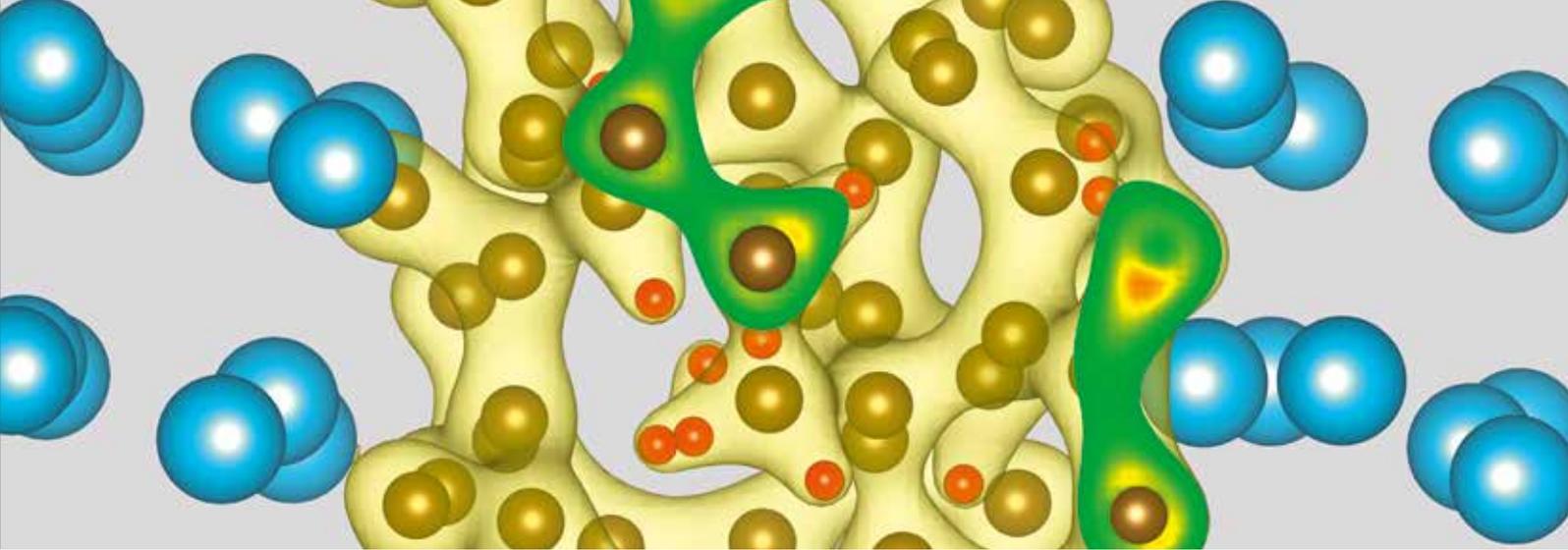
Drei Fraunhofer-Institute schaffen die technologischen Voraussetzungen für neuartige, photovoltaisch aktive Perowskit-Materialien für Anwendungen im Quadratmeter-Maßstab. Dazu müssen die Perowskit-Materialien großflächig geschützt vor Wasser, Sauerstoff und Ionendrift im Bauteil integriert und elektrisch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

Dr. Rainer Kübler

Kooperationsprojekt zwischen Max-Planck und Fraunhofer – HEUSLER

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

Prof. Dr. Christian Elsässer



Grenzfläche zwischen Titan und mit amorphem Wasserstoff gesättigtem Kohlenstoff. Titan-, Kohlenstoff- und Wasserstoffatome: blaue, goldene und rote Kugeln; Elektronenverteilung: braunes Netz.

Fraunhofer-Discoverprojekt

Trennverfahren von Schweißverbindungen höchstfester Stähle – TrennSpröd

Die Trennung von Schweißverbindungen zwischen hochfesten Stahlblechen erfordert im Reparaturfall oder beim Recycling bei EOL einen nicht unerheblichen Aufwand durch Schleifen, Bohren oder Flexen. Das Fraunhofer IWM erarbeitet wissenschaftlich-technologische Prozessgrundlagen für ein einfacheres Trennen von Schweißverbindungen.

Dr. Silke Sommer

Fraunhofer-Forschungscluster

Programmierbare Materialien – ProgMat

Programmierbare Materialien sind form- und funktionsdynamische Materialien, Materialverbünde 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

Kritikalität Seltener Erden

Sieben Fraunhofer-Institute entwickeln effizientere Herstellungsprozesse für Hochleistungsmagnete, optimieren deren Bauteilauslegung und erforschen Recyclingmöglichkeiten. Das Ziel: den Primärbedarf an schweren Seltenerd-Elementen bei zwei Demonstrator-Permanentmagneten halbieren.

Das Fraunhofer IWM sucht Substitutionsmagnetmaterialien möglichst ohne Seltenerd-Elemente mit elektronentheoretischer Materialsimulation und elektronenmikroskopischer Materialcharakterisierung.

Prof. Dr. Christian Elsässer

www.seltene-erden.fraunhofer.de

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@iwf.fraunhofer.de

Werkstoffe in ihrer inneren Struktur und ihrem globalen Verhalten erfassen

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 und Bauteilen auf mechanische, thermo- und chemomechanische sowie tribologische Belastungen und klärt Verformungs- und Versagensmechanismen auf. Die benötigten Werkstoffkennwerte erfasst und bewertet es in Korrelation zur Mikrostruktur und zu strukturverändernden Prozessen auf allen Größenskalen. 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- und Analysemethoden zu entwickeln und anzuwenden. Die Grundlage 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 einsatzgerechter Methoden der Charakterisierung als auch bei der Bewertung von Schädigungsentwicklungen. Die Bauteilprüfung berücksichtigt lokal unterschiedliche Werkstoffeigenschaften. Zudem werden bruchmechanische Fehlerbewertungen und Schadensanalysen durchgeführt, mehrachsige Beanspruchungszustände erfasst und bewertet sowie lokale Kennwerte durch Mikroprüftechniken und Gefügeanalytik ermittelt. Das Portfolio ist ergänzt durch verschiedene hochauflösende Eigenspannungsanalysetechniken und thermophysikalische und thermomechanische Charakterisierungen.

Mess- und Analysemöglichkeiten

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

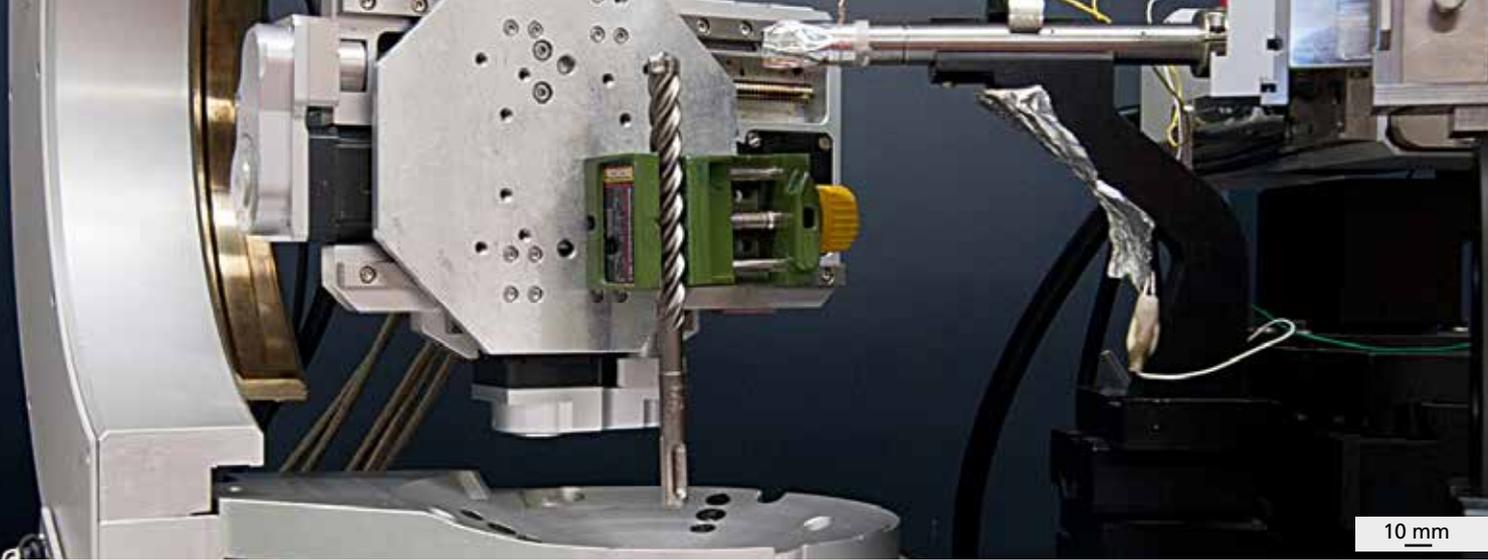
Statische und zyklische Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung

- Statische Festigkeit, Mehrachsigenparameter, Schwingfestigkeit, Bruchzähigkeit, Rissfortschritt und Torsionsfestigkeit mit servohydraulischen, elektrodynamischen und elektromechanischen Prüfmaschinen
- Fretting Fatigue mit Modul 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
- Dehnratenabhängigkeit mit Schnellzerreißmaschinen, Fallwerken und Kerbschlagbiegeversuchsständen
- Dehnungsfeldanalysen durch Bildkorrelation
- Schädigungsentwicklung durch Thermographie
- Kriechverhalten mit temperierten und klimatisierten Prüfständen

Thermomechanische Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung

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



*Röntgenographische Eigenspannungsmessung
an geometrisch komplexen Bauteilen.*

Mikromechanische Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung

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

Thermophysikalische Werkstoffeigenschaften

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

Chemomechanische Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung Hochvakuum

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

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

Metallographie (Mikrostrukturaufklärung)

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

Röntgenographische Eigenspannungsmessungen

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

Pulvertechnologische Werkstoffbewertung

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

KERNKOMPETENZ

WERKSTOFFMODELLIERUNG UND SIMULATION

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

Werkstoffeigenschaften in Modelle umsetzen

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

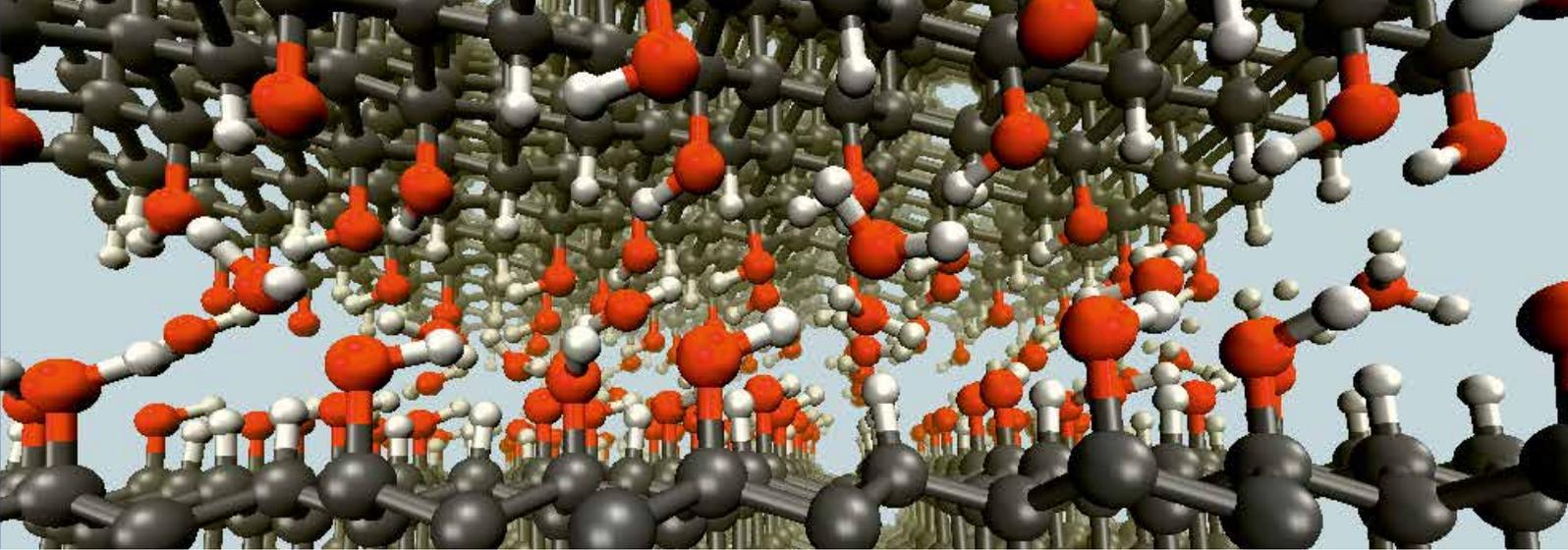
Die relevanten Werkstoffeigenschaften ermittelt das Fraunhofer IWM meist experimentell, bestimmt die zugehörigen Modellparameter und entwickelt Methoden und Algorithmen. In virtuellen Testlabors werden die Eigenschaften von Werkstoffen sowie die Sicherheit und Lebensdauer von Bauteilen vorhergesagt. 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 Belastungsständen 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



Ultraniedrige Reibung von Diamantoberflächen: Spuren von Wasser führen zur sogenannten aromatischen Pandey-Oberflächenrekonstruktion (rot) und verhindern eine Amorphisierung der Diamantoberfläche (siehe Seite 30).

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 Bauteil-Oberflächen 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 Sub-

strat 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 ermöglichen. 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

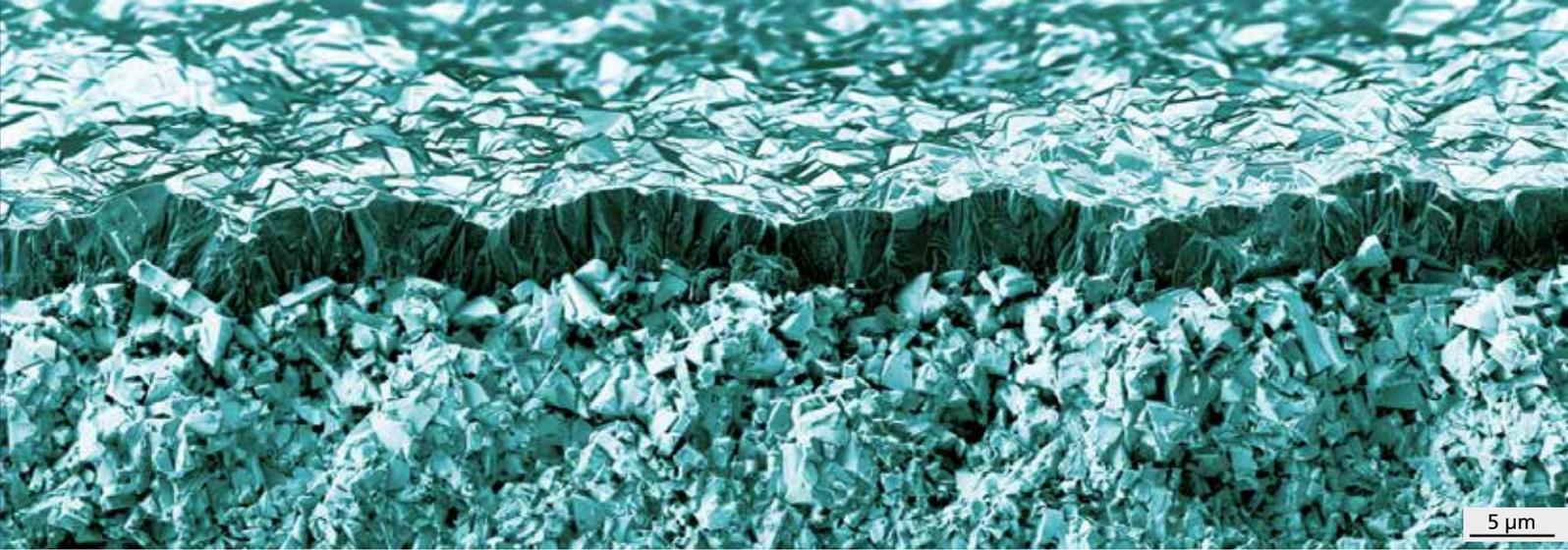
Das Fraunhofer IWM arbeitet mit der modernsten am Markt verfügbaren Geräteausstattung und entwickelt darüber hinaus spezifische Versuchsstände für individuelle Kundenanfragen.

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



5 μm

Bruchkante eines diamantbeschichteten Hartmetallbauteils, das für eine bessere Schichthaftung mit einem am Fraunhofer IWM entwickelten Prozess vorbehandelt wurde.

- 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 Salzschmelzen
- 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 Tribo-Prüfständen:

- Kolbenring-Liner Simulator mit RNT (Radionuklid-Technologie), Stift-Scheibe-Tribometer mit RN-T Technologie, Gleitlager- und Komponentenprüfstand mit RN-T, 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 Mikromechanik-Prüfstände

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 2017
KSPG AG an Manuel Mee für seine Dissertation »Mikrowellenplasmagestützte Prozessentwicklung zur Herstellung von Funktionsgradientenhardmetallen für die CVD-Diamantbeschichtung«
02.06.2017, Freiburg

ERC Starting Grant des Europäischen Forschungsrats in Höhe von knapp 1,5 Mio. Euro an Prof. Dr. Lars Pastewka für sein Projekt »Emergence of Surface Roughness in Shaping, Finishing and Wear Processes (ShapingRoughness)«
15.08.17, Freiburg

Dissertationen

Christian Amann*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Probabilistic fracture mechanics of forged rotor disks

Christian Dold
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Zum Einfluss struktureller Eigenschaften auf das tribologische und rheologische Verhalten geschmierter Reibkontakte am Beispiel von ionischen Flüssigkeiten

Matthias Hartweg*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchung der Möglichkeiten zur Reibungsreduzierung verbrennungsmotorischer Steuertriebe durch pneumatische Ventildfedern

Oliver Hübsch
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Verformung, Schädigung und Mikrostrukturentwicklung der Legierung Alloy 800H unter Ermüdungsbeanspruchung bei hohen Temperaturen

Peter Maas
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Vorhersage der Kantenrisse beim Warmbandwalzen schwer umformbarer Nickelbasislegierungen: Experimente, Modellbildung und Simulation

Manuel Mee
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Mikrowellenplasmagestützte Prozessentwicklung zur Herstellung von Funktionsgradientenhardmetallen für die CVD-Diamantbeschichtung

Rahul Raga
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Damage initiation and evolution in silicon nitride under cyclic and rolling contact

Christian Schröder
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchung tribologischer Systeme mit Y-TZP-Keramiken

Markus Stricker*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Übertragung von mikrostrukturellen Eigenschaften aus der diskreten Versetzungsdynamik in Kontinuumsbeschreibungen

Tim Weyhmüller*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fertigungstechnische und tribologische Wirkmechanismen beim Werkstoffpaarung einer Nockenwellenlagerung

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

Hamidreza Ahmadi
Ernst-Ahle-Hochschule Jena
Construction, bringing into service and optimization of a test system with in situ hydrogen charging for the measurement of the environmental-assisted fracture threshold stress intensity factor according to ASTM E 1681 (M)

Martin A. Böhme*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Werkstoffliche Untersuchung von Bremsbändern einer Motorsäge mit expandierter Randzone (M)

Dominik Discher
Hochschule Offenburg
Temperaturfeldanalyse eines crashartig belasteten langfaserverstärkten Thermoplasts (LFT) und dessen Matrixwerkstoff (M)

Vergil Djamiykov*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Bio-inspirierte Oberflächentexturierung für tribologische Anwendungen – lasergestützte Erzeugung und Charakterisierung im Modellversuch (M)

Dominik Dreja
Hochschule Offenburg
Numerische Untersuchungen zu Schweißspannungen in Rundnähten austenitischer Rohrverbindungen (M)

Stefan Eckmann
Hochschule Offenburg
Entwicklung und Implementierung eines Lebensdauermodells für Nickellegierungen unter thermomechanischer Ermüdungsbeanspruchung (M)

Lukas Elflein
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
DFT Investigations of anisotropic magnetic and crystalline properties of rare-earth-free intermetallic phases (M)

Rebecca Emmanuel
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Untersuchungen zu mechanischen Eigenschaften von Ti2 ALN mit Hilfe von Raman-Biegeversuchen (B)

Max Hauber
Hochschule Offenburg
Entwicklung einer serientauglichen dynamischen Reboundeinrichtung für verschiedene Werkstoffklassen (B)

Christian Haug*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Analyse der tribologischen Eigenschaften von Stahl und Ingenieurkeramiken unter ölgeschmierten Fretting-Bedingungen (M)

Wissam Hawchar*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Tribologische Charakterisierung von Luftfahrtwerkstoffen unter Fretting-Bedingungen (M)

Hamideh Jafarpoorchebab
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Description of bistable mechanisms in mechanical metamaterials and their implementation for MEMS applications (M)

Marius Janek*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchungen zum Einfluss des Laserstrahlsschweißens auf Festigkeit und Gefüge verschiedener metallischer Materialien und Materialdicken (M)

Ehsan Javaheri
Technische Universität Braunschweig
Fatigue assessment of the welded joints containing process relevant imperfections considering the effect of residual stresses: Numerical simulation and experiment (M)

Sophie Jenne
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Untersuchung zur Mikrostrukturentwicklung von Si3N4 in Abhängigkeit der Abscheideparameter im reaktiven Sputterprozess (B)

Stephan Kreis*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Analyse der Struktur-Material Beziehungen mithilfe von »Data Mining« – Fallstudie zur Bewertung von Rissen (M)

Johannes Kurz
Hochschule Offenburg
Untersuchungen zur Reibungs- und Verschleißminderung in emissionsarmen BHKW-Motoren (M)

Julia Lehmann*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Einfluss einer Lasertexturierung auf das tribologische Verhalten von oszillierenden Sägeblättern in der Orthopädie (M)

Richard Leute
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Ab initio phonon and electronic structure calculations for hot carrier solar cell absorbers (M)

Mengxuan Lu*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchung von Mikrostrukturmodellen zur Vorhersage von Wälzermüdungslebensdauern (M)

Andreas Maciolek
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Implementierung eines elasto-viskoplastischen Materialmodells zur Simulation des Kugelstrahlens an Komponenten aus 42CrMoS4 (M)

Simon Mersch*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Beginn der Mikrostrukturveränderung in Eisen unter einer tribologischen Belastung (B)

Thank Thank Nguyen
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Mikromechanische Untersuchung des Schädigungsverhaltens langfaserverstärkter Thermoplaste (M)

Thomas Reichenbach
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Theoretical modelling of the CO2 hydrogenation to methanol on inverse ZnO/Cu catalysts hydrogenation to methanol on inverse ZnO/Cu catalysts (M)

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

Luca Schneider
Hochschule Offenburg
Reibungsuntersuchung von DLC-Schichten im Kontakt mit Stahl-Spritzschichten (B)

Michael Schnitzler
Hochschule Offenburg
Bruchmechanische Bewertung von gelochten Brennkammerprüfkörpern unter betriebsnaher Biegebeanspruchung (M)

Maximilian Schweiger*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Mikrofabrikation sphärischer Körper mittels fokussiertem Ionenstrahl (B)

Marco Sebastiano*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Greensche Funktionen für elastische Substrate endlicher Dicke (B)

Reinhard Seydel*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Reibungseigenschaften und dem Oberflächenrauheitskennwert Aq (M)

Kai Strycker*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Effekte der relativen Dichte auf das Indentationsverhalten von nanoporösem Gold (B)

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

Nurul Syafiqah Syamsul
Hochschule Offenburg
Injection molding simulation of high molecular weight polyethylene – influence on crystallinity and local orientation (M)

Sebastian Ullrich*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Simulative und experimentelle Untersuchung des tribologischen Systems aus Kolbenring, Schmierstoff und poröser Zylinderlaufbahn (M)

Aditya Shiv Kanth Vuppala
RWTH Aachen University
Materialmodellierung langfaserverstärkter Thermoplaste in LS-Dyna zur Anwendung in der Automotive Crash-Simulation (M)

Manuel Waidele
Hochschule Offenburg
Untersuchung und Verbesserung des Kavitationserosionsverhaltens verschiedener Stähle in Salzwasser mit elektrochemischen Methoden (B)

Niklas Weckenmann*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Optische Spektralanalyse zur Untersuchung von Fehlermechanismen beim Schneiden mit dem Festkörperlaser (M)

Hans-Jörg Winkler
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Tribologie motorischer Spritzschichten unter Einfluss regenerativer Kraftstoffe (M)

David Zeltner*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Rissanalyse mit einem Versetzungs-basierten Kontinuumsmodell (M)

Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftler

Karan Antrolia
Lehigh University, Bethlehem, USA
02.05. - 31.07.17

Dr. Abdiel Carpio
Universidad Antofagasta, Chile
01.10. - 21.12.17

Balwant Singh Chauhan
Indian Institute of Technology, Delhi, Indien
01.01. - 31.03.17

Frei Gao
Najing University, China
01.01. - 30.09.17

Dr. Fabian Kaiser
Freudenberg New Technologies SE & Co. KG
01.01. - 31.12.17

Prof. Dr. Jürg Küffer
Fachhochschule Nordwestschweiz, Windisch, Schweiz
01.10. - 31.12.2017

Dr. Beunggun Nam
Hyundai MotorCompany, Korea
01.01. - 30.06.17

Dr. Jiri Svoboda
Czech Academy of Science, Brünn, Tschechoslowakai
24.07. - 04.08.17

Roman Virsik
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Stuttgart
01.01. - 31.12.17

Lei Wang
Lanzhou University of Technology, China
01.09.- 31.12.17

Vorlesungen WS 2016/2017

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Theory and modeling of materials: theoretical models for magnetic properties of materials
Prof. Dr. Christian Elsässer

Computational materials engineering
Prof. Dr. Michael Moseler

Hochschule Offenburg

Konstruktionselemente
Dr. Raimund Jaeger

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nanotechnologie für Ingenieure und Naturwissenschaftler
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Tribologie
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Schweißtechnik
Dr. Majid Farajian

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

Prozesssimulation in der Umformtechnik
Dr. Dirk Helm

Kontaktmechanik
Prof. Dr. Lars Pastewka

Universität Siegen

Composites I – Verbundwerkstoffe
Dr. Jörg Hohe

Vorlesungen SS 2017

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Theory and modeling of materials – theoretical models for magnetic properties of materials
Prof. Dr. Christian Elsässer

Continuum Mechanics I
Dr. Dirk Helm

Computational physics: materials science
Prof. Dr. Michael Moseler

Quantum transport
Dr. Michael Walter

Hochschule Offenburg

Schadenskunde
Rolf Zeller

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nanotribologie und -mechanik
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Praktikum Tribologie
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Universität Siegen

Composites II – Werkstoffverbunde
Dr. Jörg Hohe

Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen

Girls' Day 2017
28.04.17, Freiburg

Industriewoche Baden-Württemberg
Fraunhofer-Industrieforum und Interaktive Fraunhofer-Ausstellung
21.-22.06.17, Freiburg

Wissenschaftsmarkt
Freiburger Fraunhofer Gemeinschaftsstand
14.-15.07.17, Freiburg

Messen mit Fraunhofer IWM-Beteiligung

Blechexpo 2017
07.-10.11.17, Stuttgart

Erteilte Patente 2017

Meier, S.; Schnakenberg, S.; Thelke, J.; Schickanz, R.; Werdecker, F.; Lang, K.; Keller, T.; Schulten, B.; Haselbacher, P.; Johannes, R.; Dröscher, P.; Otschik, J.
Slide ring of a slide ring seal arrangement, having properties which lengthen the service life, and method for the production thereof
Patent-Nr. US2014/0319776A1

Ziegler, T.; Schäfer, R.; Kraft, T.; Weking geb. Graf, C.; Visotschnig, R.; Richter, H.-J.; Heinritz, geb. Haderk, K.
Zahnersatz
Patent-Nr. DE102012205064B4

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

- Abdel-Wahed, S.A.; Koplín, C.; Jaeger, R.; Scherge, M.
On the transition from static to dynamic boundary friction of lubricated PEEK for a spreading adhesive contact by macroscopic oscillatory tribometry
Lubricants 5/3 (2017) 21 1-9
- Balázs, C.; Fogarassy, Z.; Tapasztó, O.; Kailer, A.; Schröder, C.; Parchoviánsky, M.; Galusek, D.; Dusza, J.; Balázs, K.
Si₃N₄/graphene nanocomposites for tribological application in aqueous environments prepared by attritor milling and hot pressing
Journal of the European Ceramic Society 37/1 (2017) 3797-3804
- Beckmann, C.; Hohe, J.
Modeling transgranular crack growth in random 3D grain structures under cyclic loading
Probabilistic Engineering Mechanics 50 (2017) 45-52
- Berwind, M.F.; Hashibon, A.; Fromm, A.; Gurr, M.; Burmeister, F.; Eberl, C.
Rapidly prototyping biocompatible surfaces with designed wetting properties via photolithography and plasma polymerization
Microfluidics and Nanofluidics 21/9 (2017) 144 1-7
- Böttcher, R.; Seidelmann, M.; Scherge, M.
Sliding of UHMWPE on ice: Experiment versus Modeling
Cold Regions Science and Technology 141 (2017) 171-180
- Brügner, O.; Reichenbach, T.; Sommer, M.; Walter, M.
Substituent correlations characterized by Hammett constants in the Spiropyran-Merocyanine transition
The Journal of Physical Chemistry A 121/13 (2017) 2683-2687
- Butcher, T.A.; Körner, W.; Krügel, G.; Elsässer, C.
Dependence of magnetisation and magnetocrystalline anisotropy on site distribution of alloying elements in RE-TM phases with ThMn₁₂ structure
Journal of Magnetism and Magnetic Materials 441 (2017) 1-5
- Chan, N.; Balakrishna, S.G.; Klemenz, A.; Moseler, M.; Egberts, P.; Bennewitz, R.
Contrast in nanoscale friction between rotational domains of graphene on Pt(111)
Carbon 113 (2017) 132-138
- Codrignani, A.; Savio, D.; Magagnato, F.; Frohnápfel, B.
A scaling parameter for pressure losses and thermal effects in lubricant flows with viscous dissipation
Tribology International 113 (2017) 238-244
- Colonna, F.; Elsässer, C.
First principles DFT study of interstitial hydrogen and oxygen atoms in the MAX phase Ti₂AlN
RSC Advances 7/60 (2017) 37852-37857
- Echlin, M.P.; Titus, M.S.; Straw, M.; Gumbach, P.; Pollock, T.M.
Materials response to glancing incidence femtosecond laser ablation
Acta Materialia 124 (2017) 37-46
- Eckmann, S.; Schweizer, C.
Characterization of fatigue crack growth, damage mechanisms and damage evolution of the nickel-based superalloys MAR-M247 CC (HIP) and CM-247 LC under thermomechanical fatigue loading using in situ optical microscopy
International Journal of Fatigue 99/Part 2 (2017) 235-241
- Fabini, D.H.; Labram, J.G.; Lehner, A.J.; Bechtel, J.S.; Evans, H.A.; Van Der Ven, A.; Wudl, F.; Chabiniy, M.L.; Seshadri, R.
Main-group halide semiconductors derived from perovskite: distinguishing chemical, structural, and electronic aspects
Inorganic Chemistry 56/1 (2017) 11-25
- Farajian, M.; Hardenacke, V.; Pfeiffer, W.; Klaus, M.; Rebelo Kornmeier, J.
Numerical and experimental investigations on shot-peened high-strength steel by means of hole drilling, X-ray, synchrotron and neutron diffraction analysis
Materials Testing 59/2 (2017) 161-165
- Findeisen, C.; Hohe, J.; Kadic, M.; Gumbach, P.
Characteristics of mechanical metamaterials based on buckling elements
Journal of the Mechanics and Physics of Solids 102 (2017) 151-164
- Flieger, S.; Kennerknecht, T.; Kabel, M.
Investigations into the damage mechanisms of glass fiber reinforced polypropylene based on micro specimens and precise models of their microstructure
Composites Part B: Engineering 112 (2017) 327-343
- Foehrenbach, J.; Hardenacke, V.; Farajian, M.
High frequency mechanical impact treatment (HFMI) for the fatigue improvement: numerical and experimental investigations to describe the condition in the surface layer
Welding in the World 60/4 (2016) 749-755
- Fu, Z.; Freihart, M.; Schlordt, T.; Fey, T.; Kraft, T.; Greil, P.; Travitzky, N.
Robocasting of carbon-alumina core-shell composites using co-extrusion
Rapid Prototyping Journal 23/2 (2017) 423-433
- Gad, A.; Hoffmann, M.W.G.; Casals, O.; Mayrhofer, L.; Fabrega, C.; Caccamo, L.; Hernandez-Ramirez, F.; Mohajerani, M.S.; Moseler, M.; Shen, H.; Waag, A.; Daniel Prades, J.
Integrated strategy toward self-powering and selectivity tuning of semiconductor gas sensors
ACS Sensors 1/10 (2016) 1256-1264
- Gutwald, R.; Jaeger, R.; Lambers, F.M.
Customized mandibular reconstruction plates improve mechanical performance in a mandibular reconstruction model
Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 20/4 (2017) 426 - 435
- Hemmes, K.; Farajian, M.; Boin, M.
Numerical studies of welding residual stresses in tubular joints and experimental validations by means of x-ray and neutron diffraction analysis
Materials and Design 126 (2017) 339-350
- Hemmes, K.; Farajian, M.; Fatemi, A.
Application of the critical plane approach to the torsional fatigue assessment of welds considering the effect of residual stresses
International Journal of Fatigue 101/Part 2 (2017) 271-281
- Hemmes, K.; Farajian, M.; Siegele, D.
Numerical and experimental description of the welding residual stress field in tubular joints for fatigue assessment
Welding in the World 60/4 (2016) 741-748
- Hempel, N.; Moroz S.; Nitschke-Pagel, Th.; Varfolomeev, I.; Dilger K.
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Eigenspannungseinfluss auf die Schwingfestigkeit mehrlagiger Rohrschweißverbindungen
Schweißen und Schneiden 69 (2017) 316-322
- Hohe, J.; Gall, M.; Gauch, H.; Flieger, S.; Abdul Hamid, Z.M.
A material model for prediction of fatigue damage and degradation of CFRP materials
Key Engineering Materials 742 (2017) 740-744
- Jacobs, T.; Junge, T.; Pastewka, L.
Quantitative characterization of surface topography using spectral analysis
Surface Topography: Metrology and Properties 5/1 (2017) 013001 1-18
- Khader, I.; Rasche, S.; Lube, T.; Raga, R.; Degenhardt, U.; Kailer, A.
Lifetime prediction of ceramic components - A case study on hybrid rolling contact
Engineering Fracture Mechanics 169 (2017) 292-308
- Khader, I.; Renz, A.; Kailer, A.
A wear model for silicon nitride in dry sliding contact against a nickel-base alloy
Wear 376-377/Part A (2017) 352-362
- Klitschke, S.; Huberth, F.
Influence of strain rate on the beginning of instable deformation and failure behavior from shear to multiaxial loading for a DP1000
Journal of Physics: Conference Series (JPCS) 896 (2017) 012112 1-8

Krupp, U.; Söker, M.; Giertler, A.; Dönges, B.; Christ, H.-J.; Wackermann, K.; Boll, T.; Thuvander, M.; Marinelli, M.C.

The potential of spinodal ferrite decomposition for increasing the very high cycle fatigue strength of duplex stainless steel
International Journal of Fatigue 39/Part 2 (2016) 363-371

Krupp, U.; Wackermann, K.; Christ, H.-J.; Colliander, M.H.; Stiller, K.
Intergranular oxidation effects during dwell-time fatigue of high-strength superalloys

Oxidation of Metals 88/1-2 (2017) 3-14

Kutelia, E.; Dzigrashvili, T.; Kukava, G.; Darsavelidze, I.; Kurashvili, I.; Riedel, H.; Donth, B.

Characterization of physico-mechanical properties of Z-phase strengthened ferritic steels using internal friction measurements in the range 25 ÷ 750 °C

AIP Conference Proceedings 1809/1 (2017) 020030 1-10

Kuwahara, T.; Moras, G.; Moseler, M.

Friction regimes of water-lubricated diamond (111): role of interfacial ether groups and tribo-induced aromatic surface reconstructions
Physical Review Letters 119/9 (2017) 96101 1-6

Li, S.; Li, Q.; Carpick, R.W.; Gumbsch, P.; Liu, X.Z.; Ding, X.; Sun, J.; Li, J.

The evolving quality of frictional contact with graphene
Nature 539/7630 (2016) 541-546

Li, X.; Dao, M.; Eberl, C.; Hodge, A.M.

Fracture, fatigue, and creep of nanotwinned metals
MRS Bulletin 41/4 (2016) 298-304

Linsler, D.; Kümmel, D.; Nold, E.; Dienwiebel, M.

Analysis of the running-in of thermal spray coatings by time-dependent stribec maps

Wear 376-377/Part B (2017) 1467-1474

Linsler, D.; Schröckert, F.; Scherge, M.

Influence of subsurface plastic deformation on the running-in behavior of a hypoeutectic AlSi alloy
Tribology International 100 (2016) 224-230

Lüthi, B.; Ventelon, L.; Elsässer, C.; Rodney, D.; Willaime, F.

First principles investigation of carbonscrew dislocation interactions in bodycentered cubic metals

Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering MSMSE 25/8 (2017) 084001 1-14

Meyer, F.; Blum, M.; Benkert, A.; Hauschild, D.; Jeyachandran, Y.L.; Wilks R.G.; Yang, W.; Bär, M.; Heske, C.; Reinert, F.; Zharnikov, M.; Weinhardt, L.

X-ray emission spectroscopy of proteinogenic amino acids at all relevant absorption edges

The Journal of Physical Chemistry B 121/27 (2017) 6549-6556

Mutter, D.; Urban, D.; Elsässer, C.

Systematic search for lithium ion conducting compounds by screening of compositions combined with atomistic simulation

MRS Advances 2/9 (2017) 483-489

Raga, R.; Khader, I.; Chlup, Z.; Kailer, A.

Damage progression in silicon nitride undergoing non-conforming hybrid cyclic contact

International Journal of Fatigue 105 (2017) 97-110

Raga, R.; Khader, I.; Zdeněk, C.; Kailer, A.

Experimental and numerical investigation of crack initiation and propagation in silicon nitride ceramic under rolling and cyclic contact
Journal of Physics: Conference Series (JPCS) 843/1 (2017) 012030 1-9

Ramirez, E.C.; Klemenčič, R.; Klučka, M.; Lang, B.; Beisel, S.; Altorfer, H.; Koebel, M.M.; Malfait, W.J.

Large-scale anodic bonding mediated by a liquid tin solder
Journal of Materials Processing Technology 246 (2017) 69-76

Rasp, T.; Jamin, C.; Guillon, O.; Kraft, T.

Cracking and shape deformation of cylindrical cavities during constrained sintering

Journal of the European Ceramic Society 37/8 (2017) 2907-2917

Reiser, J.; Garrison, L.; Greuner, H.; Hoffmann, J.; Weingärtner, T.; Jäntschi, U.; Klimenkov, M.; Franke, P.; Bonk, S.; Bonnekoh, C.; Sickinger, S.; Baumgärtner, S.; Bolich, D.; Hoffmann, M.; Ziegler, R.; Konrad, J.; Hohe, J.; Hoffmann, A.; Mrotzek, T.; Seiss, M.; Rieth, M.; Möslang, A.

Ductilisation of tungsten (W): Tungsten laminated composites

International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 69 (2017) 66-109

Renz, A.; Kürten, D.; Lehmann, O.

Wear of hardfaced valve spindles in highly loaded stationary lean-burn large bore gas engines

Wear 376-377/Part B (2017) 1652-1661

Rucavado, E.; Jeangros, Q.; Urban, D.F.; Holovsky, J.; Remes, Z.;

Duchamp, M.; Landucci, F.; Dunin-Borkowski, R.E.; Körner, W.; Elsässer, C.; Hessler-Wyser, A.; Morales-Masis, M.; Ballif, C.

Enhancing the optoelectronic properties of amorphous zinc tin oxide by subgap defect passivation: A theoretical and experimental demonstration

Physical Review B 95/24 (2017) 245204 1-10

Scherge, M.; Böttcher, R.; Kürten, D.; Linsler, D.

Multi-phase friction and wear reduction by copper nanoparticles

Lubricants 4/36 (2016) 1-13

Schlesinger, M.; Seifert, T.; Preußner, J.

Experimental investigation of the time and temperature dependent growth of fatigue cracks in Inconel 718 and mechanism based lifetime prediction

International Journal of Fatigue 99/2 (2017) 242-249

Schmidt, S.B.; Kempe, F.; Brügger, O.; Walter, M.; Sommer, M.

Alkyl-substituted spiroyrans: Electronic effects, model compounds and synthesis of aliphatic main-chain copolymers

Polymer Chemistry 8/35 (2017) 5407-5414

Schröder, C.; Kiemle, T.; Kailer, A.; Berthold, C.; Nickel, K.G.

Cyclic contact loading of Y-TZP ceramics with spherical SSIC shape under ambient air and water-lubricated conditions

Journal of the European Ceramic Society 37/6 (2017) 2449-2458

Schubnell, J.; Hardenacke, V.; Farajian, M.

Strain-based critical plane approach to predict the fatigue life of high frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints depending on the material condition

Welding in the World 61/6 (2017) 1199-1210

Schulenberg, L.; Seelig, T.; Andrieux, F.; Sun, D.-Z.

An anisotropic elasto-plastic material model for injection-molded long fiber-reinforced thermoplastics accounting for local fiber orientation distributions

Journal of Composite Materials 51/14 (2017) 2061-2078

Schulz, K.; Sudmanns, M.; Gumbsch, P.

Dislocation-density based description of the deformation of a composite material

Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering MSMSE 25/6 (2017) 064003 1-19

Singh, A.P.; Kodan, N.; Mehta, B.R.; Held, A.; Mayrhofer, L.; Moseler, M.

Band edge engineering in BiVO₄/TiO₂ heterostructure: enhanced photoelectrochemical performance through improved charge transfer
ACS Catalysis 6/8 (2016) 5311-5318

Stauffert, O.; Ghassemizadeh, R.; Walter, M.

Spectroscopic signatures of triplet states in acenes

Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 50/15 (2017) 154007 1-9

Stoyanov, P.; Schneider, J.; Rinke, M.; Ulrich, S.; Nold, E.; Dienwiebel, M.; Stüber, M.

Microstructure, mechanical properties and friction behavior of magnetron-sputtered V-C coatings

Surface and Coatings Technology 321 (2017) 366-377

Stoyanov, P.; Shockley, J.M.; Dienwiebel, M.; Chromik, R.R.

Combining in situ and online approaches to monitor interfacial processes in lubricated sliding contacts

MRS Communications 6/3 (2016) 301-308

Stricker, M.; Weygand, D.; Gumbsch, P.

Irreversibility of dislocation motion under cyclic loading due to strain gradients

Scripta Materialia 129 (2016) 69-73

Tlatlik, J.

**Investigation of cleavage fracture under dynamic loading conditions:
Part I fractographic analysis**

Engineering Fracture Mechanics 184 (2017) 39-50

Tlatlik, J.

**Investigation of cleavage fracture under dynamic loading conditions:
Part II numerical analysis**

Engineering Fracture Mechanics 184 (2017) 22-38

Tlatlik, J.; Siegele, D.

Cleavage fracture assessment of transient thermo-mechanical loading situations by local approach

Engineering Fracture Mechanics 178 (2017) 512-526

Urban, D.F.; Elsässer, C.

Atomic defects and dopants in ternary Z-phase transition-metal nitrides CrMN with M=V, Nb, Ta investigated with density functional theory

Physical Review B 96/10 (2017) 104107 1-10

Vitek, V.; Lin, Y.-S.; Mrovec, M.

Development of bond-order potentials for BCC transition metals

Solid State Phenomena 258 (2017) 3-10

Walter, M.; Moseler, M.; Pastewka, L.

Offset-corrected Δ -Kohn-Sham scheme for semiempirical prediction of absolute x-ray photoelectron energies in molecules and solids

Physical Review B 94/4 (2016) 041112 R 1-5

Xie, D.; Li, S.; Li, M.; Wang, Z.; Gumbsch, P.; Sun, J.; Ma, E.; Li, J.; Shan, Z.

Hydrogenated vacancies lock dislocations in aluminium

Nature Communications 7 (2016) 13341 1-7

Ziegler, T.; Jaeger, R.; Koplin, C.

A design, mechanical rating, and load adaptation method for cellular components for additive manufacturing

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 90/9-12 (2017) 2875-2884

ZEITSCHRIFTEN

- Jänchen, R.; Fromm, A.
Undichte Lebensmittelpackungen vermeiden
RFL Rundschau für Fleischhygiene und Lebensmittelüberwachung 68/10 (2016) 349-351
- Mock, C.; Kölle, S.; Preußner, J.
(Zukunfts-)Chancen der Weißbronzeschichten – eine potentielle Nickeleratzschicht?
WOMag 5 (2017) 4 Seiten
- Piotter, V.; Eberl, C.; Kraft, O.
Miniaturisierung? Ja, bitte!
Forschung - das Magazin der Deutschen Forschungsgemeinschaft 41/3 (2016) 24-27
- Pfeiffer, W.; Reisacher, E.; Windisch, M.; Kahnert, M.
Effiziente Eigenspannungsanalyse reibrührgeschweißter Raumfahrt-Komponenten
Konstruktion 9 (2017) 70-75
- Zapara, M.; Augenstein, E.; Helm, D.
Schädigungsarmes virtuelles Prozessdesign
Konstruktion 7-8 (2017) IW14-16
- BÜCHER, BUCHBEITRÄGE**
- Hötger, B.; Thiele, B.; Gremmelspacher, M.; Rist, T.; Kübler, R.
Lasergestütztes, automatisiertes Schneidverfahren zum Zuschnitt freier Formen und Modelle aus Verbundsicherheitsglas (VSG-Modelle)
Glasbau 2017; Bauten und Projekte – Bemessung und Konstruktion – Forschung und Entwicklung – Bauprodukte und Bauarten; Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.); Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (2017) 445-452
- Kailer, A.
Tribologisches Verhalten
Technische Keramik; Kollenberg, W. (Hrsg.); Vulkan Verlag, Essen (2017) 56-66
- VERÖFFENTLICHTE KONFERENZBEITRÄGE**
- Bierwisch, C.; Polfer, P.
Scaling laws for implicit viscosities in smoothed particle hydrodynamics
EPJ Web of Conferences 140; Powders and Grains 2017 – 8th International Conference on Micromechanics of Granular Media; Radjai, F.; Nezamabadi, S.; Luding, S.; Delenne, J.Y. (Eds.); EDP Sciences, Les Ulis; France (2017) 15008 1-4
- Bierwisch, C.; Schubert, R.; Kraft, T.; Dehning, C.
Discrete and finite element co-simulations
in Proc. of International Congress on Particle Technology PARTEC 2016; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2016) 4 Seiten
- Breinlinger, T.; Hashibon, A.; Schubert, R.; Kraft, T.
Simulation of die filling for powders with complex rheology
in Proc. of International Congress on Particle Technology PARTEC 2016; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2016) 4 Seiten
- Breinlinger, T.; Schubert, R.; Hashibon, A.; Kraft, T.
Modelling die filling for powders with complex rheology: A new DEM contact-model
in Proc. of 19th Plansee Seminar 2017; Sigl, L.S.; Kestler, H.; Pilz, A. (Eds.); Plansee Group Service GmbH, Reutte/Tirol, Österreich (2017) HM 26/1-7
- Dittmann, F.; Varfolomeev, I.
Comparison of analytical methods for the consideration of thermal stresses in the engineering failure assessment
Procedia Structural Integrity 2, Proc. of 21st European Conference and Fracture ECF21; Iacoviello, F.; Susmel, L.; Firrao, D.; Ferro, G. (Eds.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande (2016) 2974-2981
- Farajian, M.; Schubnell, J.; Luke, M.
Surface Engineering – Lebensdauerverlängerung metallischer Komponenten durch mechanische Oberflächenbehandlung
Wt Werkstatttechnik online 107/1-2 (2017) 94-95

- Filippini, M.; Luke, M.; Varfolomeev, I.; Regazzi, D.; Beretta, S.
Fatigue strength assessment of railway axles considering small-scale tests and damage calculations
Procedia Structural Integrity 4; Proc. of ESIS TC24 Workshop – Integrity of Railway Structures 2016; Gänsler, H.-P.; Beretta, S. (Eds.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande (2017) 11-18
- Friedmann, V.; Maier, G.; Schweizer, C.; Quintus, C.
Creep-fatigue lifetime modelling of bellows made of AISI 316 using advanced models
in Proc. of 42nd MPA-Seminar Fit for Future 2016: Energy Challenge – Materials Challenge 2016; MPA Universität Stuttgart, Stuttgart (2017) 13 Seiten
- Giese, P.; Meschut, G.; Sommer, S.; Rochel, P.
Characterisation of load-bearing capacity and failure behaviour of different mechanical joints under crash load of steel intensive structures
in Proc. of 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks SCT 2017; Future trends in steel development, proceedings technologies and applications; Wieland, H.-J. (Hrsg.); Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf (2017) 8 Seiten
- Günther, M.; Herfert, D.; Giese, P.; Meschut, G.; Sommer, S.; Rochel, P.
Daten- und prognosebasierte Generierung von Modellparametern für die Crashsimulation mechanisch gefügter Verbindungen
in Tagungsband 6. Füge-technischen Gemeinschaftskolloquiums Gemeinsame Forschung in der mechanischen Füge-technik 2016, TB-043; FOSTA; EFB; DVS (Hrsg.); Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. EFB, Hannover (2016) 55-61
- Hohe, J.
Non-classical effects of the transverse core compressibility on the static and dynamic response of soft core sandwich structures
in Proc. of 22nd International Conference on Computer Methods in Mechanics CMM 2017; Polish Association for Computational Mechanics (Ed.); Selbstverlag – Lublin University of Technology, Lublin, Polen (2017) 2 Seiten
- Hohe, J.; Flieger, S.; Beckmann, C.
Multiscale analysis of uncertainties in lightweight structures consisting of materials with uncertain microstructure
in Proc. of 14th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing ECSSMET 2016; CNES Centre National d'Études Spatiales, Toulouse, Frankreich (2016) 9 Seiten
- Klitschke, S.; Huberth, F.
Strain rate-dependent characterization of advanced high-strength steels under various multiaxial stress states for the determination of forming and failure limits
SCT 2017 Proceedings; 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks SCT2017 – Future trends in steel development, proceedings technologies and applications; Wieland, H.-J. (Hrsg.); Verlag Stahleisen, Düsseldorf (2017) 8 Seiten
- Mohrmann, R.; Kranz, A.; Maier, G.; Oesterlin, H.
Online Kriech-Ermüdungs-Überwachung an einem Komponentenversuch
in Tagungsband zur 39. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe; Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2017) 86-97
- Mohseni-Mofidi, S.; Nutto, C.; Lagger, H.; Bierwisch, C.
SPH simulations of magnetorheological abrasive flow machining at a microscopic scale
in Proc. of 12th International Smoothed Particle Hydrodynamics European Research Interest Community SPHERIC Workshop; Crespo, A.J.C.; Gómez Gesteira, M.; Altomare, C. (Eds.); Universidade de Vigo, Ourense, Spanien (2017) 412-417
- Mutter, D.; Lang, B.; Ziebarth, B.; Urban, D.; Elsässer, C.
Computational analysis of Li diffusion in NZP-type materials by atomistic simulation and compositional screening
High Performance Computing in Science and Engineering '16 – Transactions of the High Performance Computing Center, Stuttgart (HLRS) 2016; Nagel, W.E.; Körner, D.H.; Resch, M.M. (Eds.); Springer International Publishing AG, Cham, Schweiz (2017) 177-187

Oesterlin, H.; Maier, G.; Günther, P.

Calculation methods for thick walled components under creep fatigue – review and advanced concepts

in Proc. of ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2016, Volume 5: High-Pressure Technology; The American Society of Mechanical Engineers ASME (Ed.); ASME Digital Collection, Washington D.C., USA (2016) 64021, 9 Seiten

Pfeiffer, W.; Reisacher, E.

Evaluation of thickness and residual stress of shallow surface regions from diffraction profiles

International Conference on Residual Stresses 2016 ICRS-10, Materials Research Proceedings 2; Holden, T.M.; Muránsky, O.; Edwards, L. (Eds.); Materials Research Forum LLC, Millersville, PA, USA (2017) 317-322

Reichert, T.; Böhme, W.; Tlatlik, J.

Modified shape of dynamic master curves due to adiabatic effects

Procedia Structural Integrity 2, Proc. of 21st European Conference und Fracture ECF21; Iacoviello, F.; Susmel, L.; Firrao, D.; Ferro, G. (Eds.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande (2016) 1652-1659

Rochel, P.; Bier, M.; Sommer, S.; Giese, P.; Hein, D.

Charakterisierung und Modellierung von mechanischen Fügeverbindungen mit einseitiger Zugänglichkeit für den profilintensiven Leichtbau unter Crashbelastung

in Tagungsband 6. Füge-technischen Gemeinschaftskolloquiums Gemeinsame Forschung in der mechanischen Füge-technik 2016, TB-043; FOSTA; EFB; DVS (Hrsg.); Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. EFB, Hannover (2016) 37-41

Schubert, R.; Yan, Z.; Marigo, M.; Kraft, T.

DEM modelling of powder flow and powder filling during die compaction

in Proc. of International Congress on Particle Technology PARTEC 2016; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2016) 4 Seiten

Schuster, L.; Sommer, S.

Characterization and modelling of soft zones around spot welds in high strength steels

in Proc. of 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks, SCT 2017: Future trends in steel development, processing technologies and applications. Bringing the automotive, supplier and steel industries together; Wieland, H.-J. (Hrsg.); Verlag Stahleisen, Düsseldorf (2017) 8 Seiten

Schuster, S.; Pagenkopf, J.; Gibmeier, J.

Local residual stress analysis on deep drawn cups by means of the incremental hole-drilling method

International Conference on Residual Stresses 2016 ICRS-10, Materials Research Proceedings 2; Holden, T.M.; Muránsky, O.; Edwards, L. (Eds.); Material Research Forum LLC, Millersville, USA (2017) 187-192

Schweizer, C.; Eckmann, S.

Assessment of fatigue crack growth under isothermal and thermomechanical fatigue loading using a time-dependent fracture mechanics approach

in Proc. of 8th International Conference on Low Cycle Fatigue 2017; Beck, T.; Charkakik, E. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialprüfung DVM e.V., Berlin (2017) 255-260

Song, H.W.; Sun, D.-Z.; Andrieux, F.; Zhang, S.H.

Determination of instability of a DP 980 steel sheet under different stress states based on experiment and theoretical

MATEC Web of Conferences 80, Proc. of NUMIFORM 2016: The 12th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes 2016; Saanouni, K.; Chenot, J.L.; Duval, J.L. (Eds.); EDP Sciences, Les Ulis, France (2016) 03007 1-6

Strobl, M.; Morand, L.; Seelig, T.

Simulation of Hertzian cone cracks using a phase field description for fracture

PAMM 16/1; Special Issue: Joint 87th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM) and Deutsche Mathematiker-Vereinigung; Bach, V.; Fassbender, H. (Hrsg.); Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2016) 177-178

Varfolomeev, I.; Dittmann, F.

Examination of methods for the treatment of constraint effects within the FAD approach

Procedia Structural Integrity 2, Proc. of 21st European Conference und Fracture ECF21; Iacoviello, F.; Susmel, L.; Firrao, D.; Ferro, G. (Eds.); Elsevier B.V., Amsterdam, Niederlande (2016) 761-768

Wackermann, K.; Schweizer, C.; Varfolomeev, I.; Maier, G.; Mohrmann, R.

Messung von Risswiderstandskurven und der Ermüdungsrissausbreitung an dünnwandigen Röhren zur bruchmechanischen Bewertung

in Tagungsband 39. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe FVWHT; Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf (2017) 131-142

Impressum

Redaktion

Katharina Hien
Thomas Götz

Bildquellen

Seite 3:
© Achim Käflein, Freiburg

Gestaltung und Produktion

Erika Hellstab
Marianne Förderer

Seite 8:
Header: © Franz Wamhof, Karlsruhe
oben: © Johannes Marburg, Genf
Mitte: © Roland Guth, Freiburg
unten: © Johan Zerdoun, Freiburg

Anschrift der Redaktion

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

Titelbild, Seiten 9, 15 o.r.:
© Gebhard I Uhl, Freiburg

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

Seiten 16, 17, 22, 23, 28, 29,
36, 37, 48, 49:
© Stock-Müller, Freiburg

Seite 21: © Felix Schiebel, Freiburg

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

Seite 55:
© Felizitas Gemetz, Freiburg

Alle übrigen Abbildungen:
© Fraunhofer IWM

