



Jahresbericht 2023





Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM



Jahresbericht 2023

Vorwort

Der intelligente Einsatz von Materialien ist erfolgsentscheidend beim Erreichen der Klimaneutralität und der Nachhaltigkeit in der industriellen Produktion und der Energiewirtschaft. Der Schlüssel ist daher die Beherrschung der intrinsischen Merkmale der eingesetzten Materialien – zu jedem Zeitpunkt ihres Lebens.

Am Fraunhofer IWM schaffen wir die Wissensbasis, damit Werkstoffe wie einstellbare, kontrollierbare und auch programmierbare Systeme genutzt werden können. Damit realisieren wir mit unseren Auftraggebern sichere und langlebige Bauteile, energieeffiziente und funktionale Maschinen sowie ressourceneffiziente Prozessketten.

Unseren Strategieprozess im Jahr 2023 haben wir ganz darauf ausgerichtet, unsere FuE-Leistungen im Kontext von neuen wirtschaftlichen, technologischen sowie politischen Rahmenbedingungen zu bewerten und strategisch weiterzuentwickeln. Im Juli 2023 haben wir mit äußerst engagierten Auditor*innen aus Wirtschaft und Wissenschaft ein sehr konstruktives und bereicherndes Strategieaudit durchgeführt.

Der Strategieprozess war für uns herausfordernd, da wir einerseits die langfristige strategische Ausrichtung zu klären und formulieren hatten und andererseits den operativen Finanzierungsdruck aufgrund einer schwächeren Auftragssituation gerecht werden mussten. Durch den intensiven Austausch zwischen der Institutsleitung und den Führungskräften konnten die institutsweiten Anstrengungen in ein strategisches Gesamtbild mit drei Kernaussagen integriert werden:

Durch Kundennähe und Nutzenorientierung in der Interaktion mit (potenziellen) Auftraggebern steigern wir die Wertschöpfung mit unseren FuE-Leistungen und erzielen höhere Erträge.

Wir gehen als FuE-Partner für werkstofftechnologische Herausforderungen in der Entwicklung, der Herstellung und im Betrieb von technischen Bauteilen und Systemen proaktiv auf Unternehmen zu und entwickeln gemeinsam Lösungen für mehr Leistungsfähigkeit und Ressourceneffizienz in ihren Produkten.

Mit bauteilnahen Leistungen zur Sicherheit, Zuverlässigkeit und Funktionalität in Wasserstofftechnologien schaffen wir erkennbare Mehrwerte und eine starke Wettbewerbsposition.

Die Wechselwirkung von Wasserstoff mit Werkstoffen erzeugt in der Industrie große FuE-Bedarfe bei der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Bauteilen in Wasserstoffinfrastrukturen und Maschinen zur Erzeugung, Speicherung und Umwandlung von Wasserstoff. Mit unserem werkstoffmechanischen Ansatz haben wir ideale Voraussetzungen positioniert.

Wir überführen unsere Kompetenz zur digitalen Repräsentation von Materialien in Nutzen für Unternehmen und bauen unsere Position bei der Integration von Materialien in digitale Wertschöpfungsketten aus.

Der Umgang mit Werkstoffdaten und -informationen ist erfolgsbestimmend für vernetzte werkstoffintensive Prozesse in der Industrie. Mit unseren Projekten zur Digitalisierung von Materialien und Prozessen haben wir die Voraussetzungen geschaffen, dass mit Materialien in Entwicklungs-, Herstellung und Betriebsprozessen viel systematischer und effektiver umgegangen werden kann.



Die Institutsleitung v. l. n. r.: Dr. Rainer Kübler, Elke Schubert, Prof. Dr. Peter Gumbsch und Prof. Dr. Chris Eberl.

Wir laden Sie herzlich dazu ein, im diesjährigen Jahresbericht nachzulesen, wie wir in unserer Forschung zentrale werkstofftechnologische Zukunftsfelder besetzen – wie wir hierbei vorgehen zeigt zum Beispiel das Kapitel über die Bewertung von Bauteilen im Kontakt mit Wasserstoff. Hier stehen Unternehmen vor der Herausforderung, ihre Bauteile für den Einsatz in Wasserstoffumgebung und als Wasserstoffinfrastrukturen zu qualifizieren. In mehreren großen Forschungskonsortien erarbeiten wir gemeinsam mit industriellen und akademischen Partnern die hierfür notwendigen Vorgehensweisen. Natürlich bieten wir auch entsprechende FuE-Leistungen an. In sechs Beiträgen stellen wir Ihnen unsere FuE-Ergebnisse und unsere Herangehensweise vor.

Eine besondere Stärke des Fraunhofer IWM ist die Methodenentwicklung. Ein schöner Erfolg gelang uns hier in Zusammenarbeit mit Schaeffler Technologies AG & Co. KG mit der Entwicklung einer Deep-Learning-Methode zur objektiven Bestimmung und Bewertung der Korngröße von Stählen. Dadurch kann die fehleranfällige Sichtprüfung durch eine automatisierte Qualitätsprüfung von Stählen beispielsweise für Kugellager ersetzt werden.

Auch in der Digitalisierung unserer internen Prozesse haben wir einen wichtigen Schritt vorwärts getan: Im letzten Jahr haben wir openBIS als Datenverwaltungswerkzeug implementiert. Damit erfassen und archivieren wir Projektdaten von der Probenfertigung über die Werkstoffdatenerzeugung bis hin zur Bereitstellung für Berichte. Damit können wir eine FAIRe (**F**indable, **A**ccessable, **I**nteroperable, **R**eusable) Datenhaltung für ein nachhaltiges Forschungsdatenmanagement gewährleisten.

Wir freuen uns außerdem über den Start des Fraunhofer-Leitprojektes »ORCHESTER«, das aus einem Konsortium aus sechs Fraunhofer-Instituten besteht und in dem das Fraunhofer IWM die Rolle der Projektleitung übernimmt. Im Leitprojekt geht es darum, die Informationsbasis dafür zu schaffen, dass Werkstoffe und Bauteile in möglichst hochwertiger Form erhalten werden und im Kreislauf geführt werden können. Denn unseren Wohlstand angesichts der Endlichkeit verfügbarer Ressourcen zu sichern, ist und bleibt ein zentrales Thema unserer Gesellschaft. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Fähigkeit, zukunftsfähige Produkte herstellen zu können. Grundlage dafür sind moderne Werkstoffe, die nicht nur als Rohstoffe verfügbar sein, sondern auch in hochwertiger Form erhalten bleiben müssen. Hier schlagen wir die Brücke zur Notwendigkeit der werkstoffmechanischen Kompetenz für die Sicherung von Resilienz und Nachhaltigkeit.

Zum Schluss feiern wir als Institut noch einen anderen sehr großartigen Erfolg: Im Oktober 2023 wurde die Firma GLAPE GmbH gegründet – eine Technologieausgründung aus unserem Haus. Mit der am Institut entwickelten innovativen Glasbiegetechnologie lässt sich Glas in engsten Radien mit höchster Präzision biegen. Für uns ist das ein besonderer Moment, der an die Anfänge des Instituts erinnert, in der die Bruchmechanik des Glases eine prägende Ausrichtung und wegweisend für die Gründung des Fraunhofer IWM war. Wir gratulieren allen Beteiligten und blicken gespannt auf die Zukunft dieses jungen Unternehmens.

Mit den breit gefächerten Themen der Fachbeiträge im Jahresbericht möchten wir Ihnen beispielhaft das Potenzial des Fraunhofer IWM nahebringen und Sie dazu inspirieren, über den gewinnbringenden Transfer unserer FuE-Ergebnisse in Ihr Umfeld nachzudenken.

Inhalt

Das Profil des Fraunhofer IWM	6
Organisation des Fraunhofer IWM	8
Das Institut in Zahlen	10
Kuratorium	12
Die Geschäftsfelder des Fraunhofer IWM im Profil	13
Geschäftsfeld Fertigungsprozesse	14
Geschäftsfeld Tribologie	16
Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau	18
Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte	20
Bauteile und Systeme zum Einsatz in Wasserstoff-Infrastrukturen bringen	22
FuE-Bedarfe und Optimierung von Auslegungsrichtlinien für Bauteile der Wasserstoffinfrastruktur	26
Lebensdauermodelle für die Auslegung metallischer Druckbehälter und Druckbehälterrichtlinien	28
Entwicklung eines Qualifikationskonzepts für Leichtbaurohre für Wasserstoffanwendungen	29
Festigkeitsnachweis von Maschinenbau-Komponenten mittels der FKM-Richtlinien	30
Bruchmechanische Bewertung der Wasserstofftauglichkeit von komplexen Bauteilen	32
Fortgeschrittene Methoden zur Qualifizierung von CFK-Wasserstofftanks	34
Wälzlager für Wasserstoffanwendungen qualifizieren	36
Fachbeiträge aus den Geschäftsfeldern	38
Prüfmethodenentwicklung für die Hochtemperaturtribologie in Abgas	40
Systemoptimierung geschmierter Kunststoff Gleitsysteme	42
Grenzreibung berechenbar machen – Reynoldsgleichung mit nichtlinearem Wandschlupfgesetz	44
Schaltbare Viskosität in der Blechumformung	46
Effiziente Kalibrierung von Materialmodellen für Kupferwerkstoffe zur Bauteilbewertung mittels maschinellem Lernen	48
Quantensensorik für die Materialprüfung	50
Höchsteffiziente Untersuchung für die Laser Powder Bed Fusion von Polymeren (PBF-LB/P)	52
Digitales Abonnement für fortschrittliche Werkstoffmodelle	54
Semantische Technologien der Materialinformatik: Maßgeschneiderte Lösungen zur digitalen Abbildung von reaktiven Prozessen	56
Design und Demonstration von energieeffizienten porösen Energiewandlermaterialien	58
Multiskalensimulation von Diffusionsprozessen	60
Publikationen	62
Wissenschaftliche Auszeichnungen und Preise	75
Abschlussberichte öffentlich geförderter Projekte	76
Vorlesungen	78
Impressum	80

Das Profil des Fraunhofer IWM

Unser Antrieb ist die nachhaltige Wertschöpfung mit berechenbaren Werkstoffen.

Am Fraunhofer IWM arbeiten wir für Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz in der industriellen Wertschöpfung. Mit unseren Forschungs- und Entwicklungsleistungen eröffnen wir unseren Kunden Wege und Gestaltungsräume für Langlebigkeit und Sicherheit in Bauteilen, Ressourceneffizienz in Prozessketten sowie Energieeffizienz in Maschinen. Dazu machen wir Werkstoffe in Prozessketten, Bauteilen und Maschinen mit ihrem Verhalten und ihren Eigenschaften berechenbar. Wir erforschen die Auswirkungen von mechanischen, tribologischen, thermischen, elektrischen und chemischen Beanspruchungen auf die Funktion und die Beständigkeit von Werkstoffen und entwickeln Lösungen, damit sie in Prozessen und Bauteilen wie einstellbare Systeme genutzt werden können.

Wir befähigen Unternehmen für den wissensbasierten und intelligenten Einsatz von Werkstoffen als Schlüssel für Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit.



Sichere und langlebige Bauteile

Wir befähigen unsere Auftraggeber, mit Fehlern in Werkstoffen und Bauteilen sicher umzugehen und passende Maßnahmen zur Gewährleistung der Bauteilsicherheit und zur Verbesserung der Lebensdauer zu ergreifen. Für die dazu nötigen Vorhersagen messen und untersuchen wir die Eigenschaften, die Belastbarkeit und die Fehlertoleranz der realen Werkstoffe und entwickeln Werkstoffmodelle, die das Werkstoffverhalten genau beschreiben.



Ressourcenschonende Prozessketten

Wir identifizieren, wie Prozessparameter für Kosten- und Zeitersparnis sowie Qualitätsverbesserungen herzustellender Produkte und letztlich für Nachhaltigkeit in Fertigungsketten angepasst werden können. Dazu analysieren und digitalisieren wir Fertigungsschritte. Über Prozess-Struktur-Eigenenschaftsbeziehungen verfolgen wir die Entwicklung von Werkstoffeigenschaften durch Prozessketten hindurch.



Energieeffiziente, funktionale Systeme

Wir bestimmen die Erfolgsfaktoren für Energieeffizienz und Funktionalität in Hochleistungssystemen. Dazu klären wir Reibungs- und Verschleißprozesse auf und optimieren diese, auch durch Materialsubstitution und die Entwicklung geeigneter Beschichtungen oder Schmierstoffe. Funktionswerkstoffe zur Energiewandlung und Energiespeicherung modellieren und optimieren wir multiskalig, experimentell und numerisch.

Wir forschen für die Bewältigung werkstofftechnologischer Herausforderungen der nachhaltigen Wertschöpfung.

Der wirtschaftliche und gewinnbringende Umgang mit Werkstoffdaten und -informationen

Der effiziente Umgang mit Werkstoffdaten und -informationen wird für werkstoffintensive Prozesse in der Industrie erfolgsbestimmend. Vernetzte Workflows und Strukturen zur produktiven Nutzung verteilter Daten in Unternehmen aber auch von Daten aus dem gesamten Lebenszyklus von Produkten werden zum Erfolgsfaktor in Entwicklungsprozessen und Fertigungsketten. Digitale Repräsentationen realer Werkstoffe werden eine Schlüsselrolle in vernetzten Wertschöpfungsketten und Innovationsprozessen einnehmen und ein zentraler Baustein für die technologische Souveränität sein.



Die ressourcenschonende Betriebsführung und Umnutzung von Anlagen

Unsichere Versorgungslagen, begrenzte Verfügbarkeiten bei Rohstoffen und die Weiternutzung oder Umnutzung von Anlagen im Sinne der Ressourcenschonung führen dazu, dass die Einsatzbedingungen und -belastungen für Werkstoffe in technischen Systemen größeren Schwankungen unterliegen und die Fahrweisen von Maschinen und Anlagen flexibler werden müssen. Damit rücken das Wissen um die Betriebszustände technischer Systeme und um die Spielräume bei der Anpassungsfähigkeit immer stärker in den Fokus von Unternehmen.



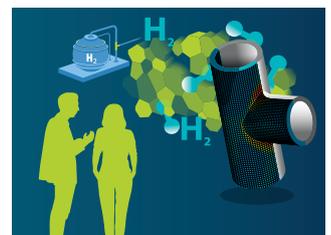
Die Kreislauffähigkeit von Werkstoffen und das »Design for Circularity«

Im Zuge der Forcierung von Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit gewinnen Werkstoffsubstitution und der Einsatz von Recycling-Materialien auch in Hochleistungssystemen an Bedeutung. Die Berechenbarkeit von Materialien unbestimmter Herkunft wird zum kritischen Erfolgsfaktor. Im Rahmen des sogenannten »Design for Circularity« werden neue Konzepte zur Bewertung der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Lebensdauer benötigt und zu einem wichtigen Bestandteil von Entwicklungs- und Fertigungsprozessen.



Sichere Wasserstofftechnologien für eine nachhaltige Energiewirtschaft

Die Wechselwirkung von Wasserstoff mit Werkstoffen erzeugt FuE-Bedarfe bei der Sicherheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Bauteilen und Anlagen in Wasserstoffinfrastrukturen. Unternehmen stehen vor der Frage, ob ihre Produkte für den Einsatz unter Wasserstoff verwendet werden können, wie sie gegebenenfalls zu modifizieren sind und was bei Neuentwicklungen zu beachten ist. Dazu muss das Verhalten von Werkstoffen und Bauteilen im Kontakt mit Wasserstoff bewertet, vorhergesagt und auch eingestellt werden können.



Organisation des Fraunhofer IWM

Institutsleitung



Institutsleiter

Prof. Dr. Peter Gumbsch



stellv. Institutsleiter

Prof. Dr. Chris Eberl



stellv. Institutsleiter

Dr. Rainer Kübler



Verwaltungsleiterin

Elke Schubert

Unternehmenskommunikation und Institutsstrategie

Thomas Götz
Prof. Dr. Christian Elsässer
(Kordinator Zukunftsthemen)

Geschäftsfelder



Fertigungsprozesse

Dr. Dirk Helm



Tribologie

Prof. Dr. Matthias Scherge
Prof. Dr. Michael Moseler



Bauteilsicherheit und Leichtbau

Dr. Michael Luke
Dr. Silke Sommer

Pulvertechnologie und Partikelsimulation

Dr. Torsten Kraft (bis Juli),
Dr. Claas Bierwisch

Umformprozesse

Dr. Alexander Butz

Glasformgebung und -bearbeitung

Tobias Rist

Verschleißschutz und Technische Keramik

Dr. Andreas Kailer

Multiskalenmodellierung und Tribosimulation

Prof. Dr. Michael Moseler
Dr. Gianpietro Moras

Polymertribologie und biomedizinische Materialien

Dr. Raimund Jaeger

Tribologische und funktionale Schichtsysteme

Bernhard Blug
Dr. Frank Burmeister

Tribokonditionierung und -analytik

(Standort Karlsruhe)
Dr. Dominic Linsler

Ermüdungsverhalten und Bruchmechanik

Dr. Igor Varfolomeev
Dr. Sascha Fliegener

Crashsicherheit und Schädigungsmechanik

Dr. Silke Sommer
Frank Huberth

Verbundwerkstoffe

Dr. Jörg Hohe

Meso- und Mikromechanik

Dr. Thomas Straub

Kontakt

Sie erreichen uns per E-Mail unter
Vorname.Nachname@iwm.fraunhofer.de



Werkstoffbewertung und
Lebensdauerkonzepte

Dr. Christoph Schweizer



Administrative
Infrastruktur

Elke Schubert



Technische
Infrastruktur

Dr. Rainer Kübler

**Mikrostruktur und
Eigenspannungen**
Dr. Johannes Preußner

**Lebensdauerkonzepte
und Thermomechanik**
Dr. Christoph Schweizer

Materialmodellierung
Dr. Daniel Urban

**Lebensdauerkonzepte für
Wasserstoffanwendungen**
Dr. Thorsten Michler
Dr. Frank Schweizer

Finanzen und Verträge
Nina Halaczinsky

**Personal- und
Reisemanagement**
Elke Schubert (komm.)

**Veranstaltungs- und
Besuchsmanagement**
Seren Yildiz

Werkstatt, Technik, Logistik
Stefan Frei

IT Services
Klaus Merkel

Scientific IT
Dr. Heiko Hafok

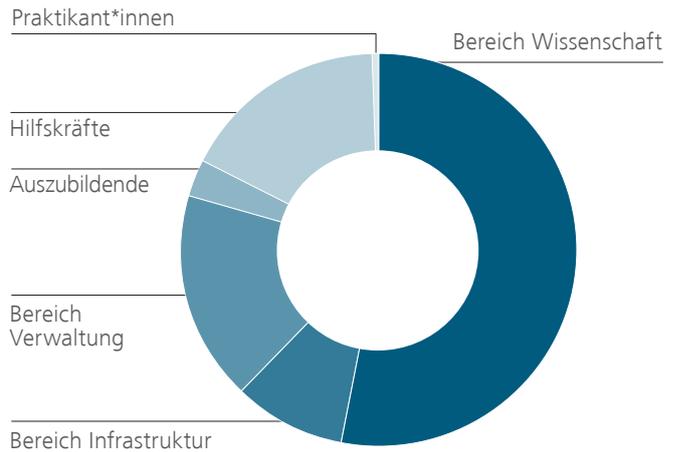
Arbeitssicherheit
Dr. Rainer Kübler

Das Institut in Zahlen

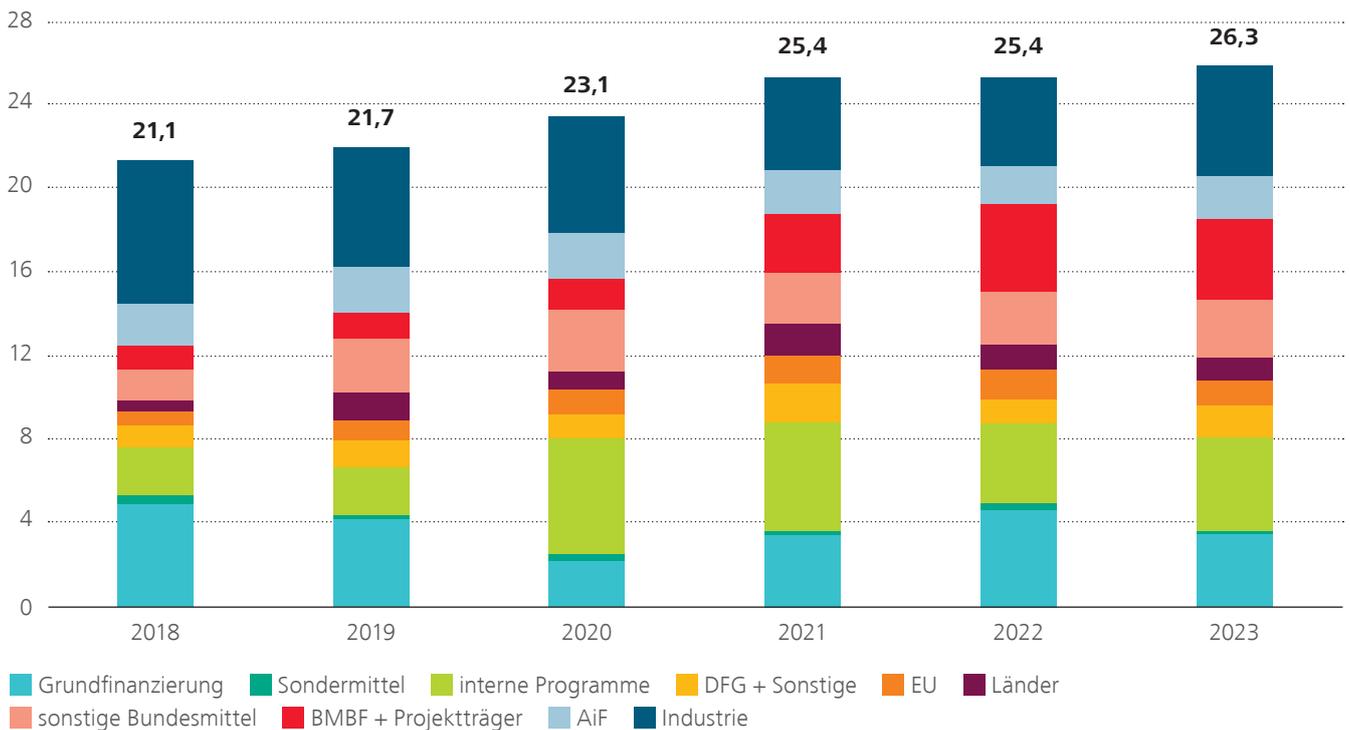
Der Haushalt des Fraunhofer IWM setzt sich zusammen aus einem Betriebshaushalt und einem Investitionshaushalt. Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist mit 26,3 Millionen Euro gegenüber dem Vorjahr leicht gestiegen. Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Er wird finanziert durch externe Erträge aus Industrie und öffentlicher Hand sowie durch die institutionelle Förderung (Grundfinanzierung). Der Anteil der Industrieerträge am Betriebshaushalt 2023 liegt bei 30,2 Prozent. Investiert wurden 2,2 Millionen Euro.

Ende 2023 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 324 Personen beschäftigt. Davon sind 258 Mitarbeitende als Stammpersonal und 66 Mitarbeitende als Hilfspersonal angestellt (Hilfskräfte, Praktika, Ausbildung, Abschlussarbeiten). Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus 172 wissenschaftlichen Mitarbeitenden, 30 technischen Beschäftigten sowie 56 Angestellten in Verwaltung und Institutsleitung. 10 Auszubildende werden in vier Berufsbildern ausgebildet.

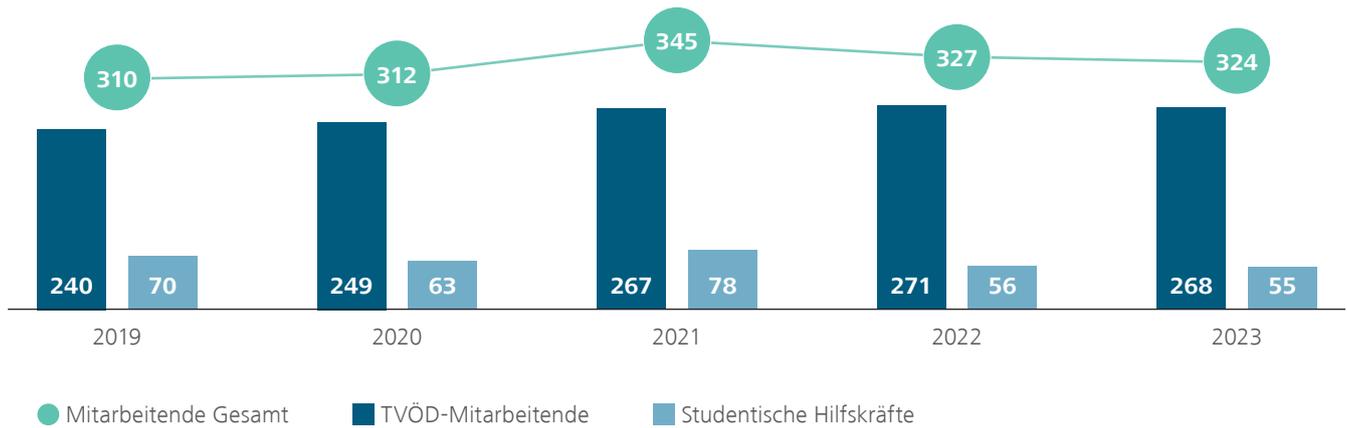
Personalstruktur



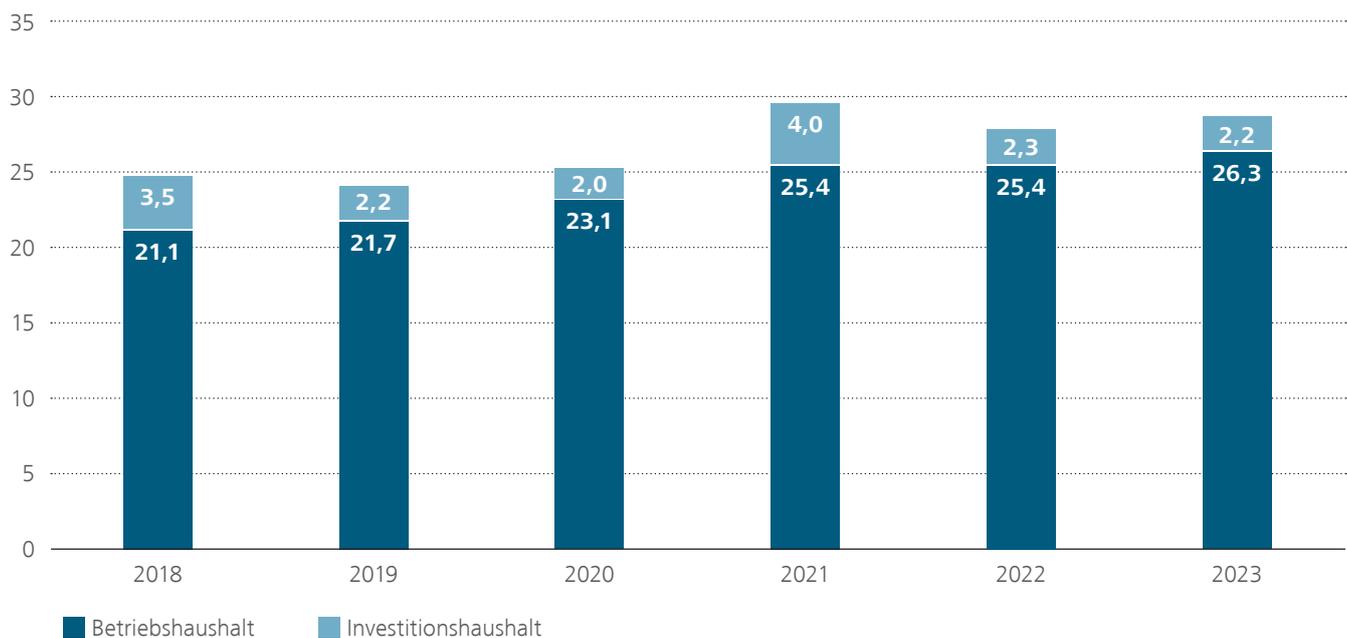
Entwicklung Betriebshaushalt in Mio. €



Personalentwicklung



Entwicklung Investitions- und Betriebshaushalt in Mio. €



Kuratorium

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

Dr. Markus Hermle

(Kuratoriumsvorsitzender),
Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Alexander Essig

Rosswag GmbH, Pfinztal

Prof. Dr. Jörg Eßlinger

MTU Aero Engines AG, München

Prof. Dr. André Haufe

DYNAMore GmbH, Stuttgart

Dr. Roland Herzog

MAN Energy Solutions SE, Oberhausen

Bernhard Hötger

HEGLA GmbH & Co. KG, Beverungen

Dr. Daniel Hug

Robert Bosch GmbH, Renningen

Prof. Dr. Oliver Kraft

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Karlsruhe

Prof. Dr. Erica Lilleodden

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von
Werkstoffen und Systemen IMWS, Halle

Dr. Katrin Mädler

Werkstoff- und Fügetechnik DB Systemtechnik
GmbH, Brandenburg-Kirchmöser

Tolulope Martin

Schmierstoffwerk Grasbrook, Shell Deutschland
GmbH, Hamburg

Dr. Juliane Mentz

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH,
Duisburg

Bruno Posset

Märkisches Werk GmbH, Halver

MR Dr. Christian Renz

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus
BW, Stuttgart

Dr. Heike Riel

Materials Integration & Nanoscale Devices,
IBM Research – Zürich

Prof. Dr. Katja Schenke-Layland

Naturwissenschaftliches Medizinisches Institut
NMI, Reutlingen

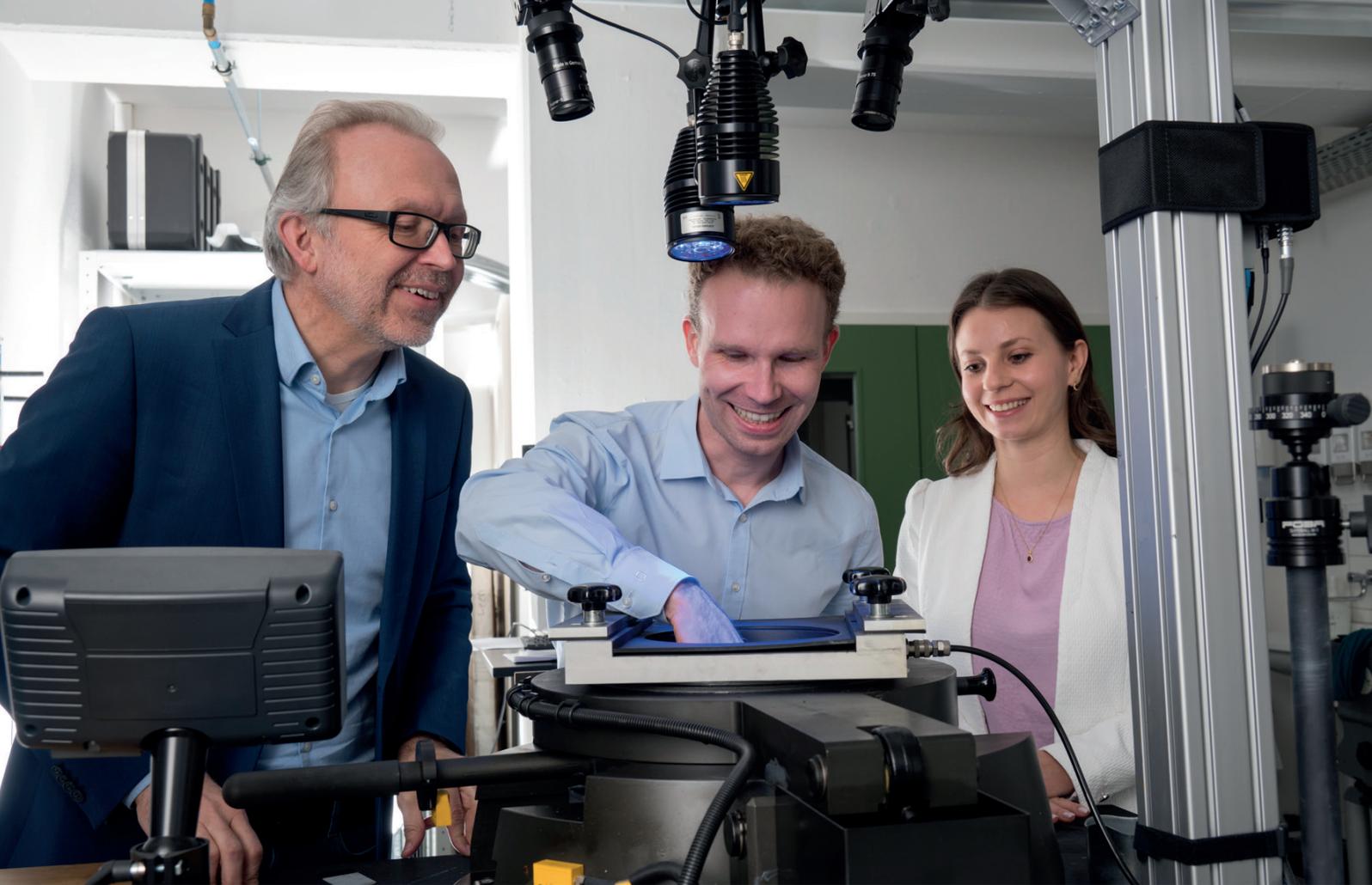
Dr. Silke Wagener

Freudenberg Technology Innovation SE & Co.
KG, Weinheim

Dr. Dietmar Völkle

Aviation Laupheim GmbH, Laupheim

Die Geschäftsfelder des Fraunhofer IWM im Profil



Alexander Wessel (Mitte) und Dr. Anandi Kugele (rechts) beim Näpfchenziehversuch im Blechprüflabor mit Dr. Dirk Helm (links).

Digitale Technologien und werkstoffmechanische Methoden auf hohem wissenschaftlichem Niveau kombinieren und auf die Anwendungsebene bringen

Geschäftsfeld Fertigungsprozesse



Wir ermöglichen unseren Kunden die Souveränität, schnell und eigenständig in der Timeline des Prozesses zu reagieren. Dass dieser Mehrwert einfach genutzt werden kann, zeigt, dass der Transfer unseres Know-hows unkompliziert und niederschwellig gestaltet werden kann.»

Dr. Dirk Helm

Wie sieht der Kompass für das Geschäftsfeld Fertigungsprozesse aus?

Helm: Fertigungsprozesse sind der Schlüssel für leistungsfähige Materialien und Produkte: Unsere Kunden stehen unter dem Druck, die Nachhaltigkeit und Resilienz in ihren Fertigungsprozessen zu verbessern. Um an den richtigen Stellschrauben drehen zu können, müssen sie das Verhalten der verarbeiteten Werkstoffe in den Prozessen besser verstehen. Und hierfür erzeugen wir die Wissens- und Entscheidungsbasis. Das hat sich in neuen industriellen und öffentlichen Projekten geäußert – mit dem Projektstart des EU-Projektes »AID4GREENEST«, das sich intensiv mit der Idee von »green steel« beschäftigt, oder dem neuen Fraunhofer-Leitprojekt »ORCHESTER«, in dem das Fraunhofer IWM die Koordination übernimmt. In diesem Projekt wird ein digitales Ökosystem entwickelt, mit dem kritische Materialien in bestehenden Systemen schneller ersetzt, Materialien mit Recyclinganteilen schneller für den Einsatz qualifiziert werden können und letztlich Materialentwicklungsprozesse signifikant beschleunigt werden.

Auch mit der Ausgründung der GLAPE GmbH (»Glass Laser Shape«) ist es uns gelungen, mit Blick auf Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz eine Technologie aus dem Haus zur Marktreife zu bringen und somit für Kunden und Unternehmen zugänglich zu machen. Mit der innovativen Glasbiegetechnologie, die am Fraunhofer IWM entwickelt wurde, ist es nicht nur möglich, Glas hochpräzise in engen Radien zu biegen, sondern auch Produkte zu gestalten, die etwa ohne Verbindungselemente nicht nur energieeffizienter sind, sondern auch am Ende ihrer Lebensdauer umweltfreundlicher wiederaufbereitet werden können.

Was bedeutet »Resilienz« im Fertigungsprozess?

Helm: Resilienz steht für die Fähigkeit, sich neuen Bedingungen anzupassen und externen Einflüssen zu widerstehen, und eine Stabilität zu gewährleisten. Im Fertigungskontext bedeutet das beispielsweise auf neue Lieferanten oder Rohstoffknappheiten, neue Produkthanforderungen oder die Vermeidung schädlicher Stoffe zu reagieren. Vor dem Hintergrund von Handelskrisen, Klimawandel, Krieg oder Pandemie, aber auch disruptiven großen und kleinen Innovationen gehören solche Umbrüche für viele Unternehmen zum Alltag. Wir betrachten diese Herausforderungen durch die Werkstoffbrille und hier tun sich viele Fragen auf, um eine hochwertige Fertigung unter neuen Bedingungen sicherzustellen.

Ein Lösungsbeispiel aus unserer Arbeit ist die Entwicklung von Web-Applikationen für die Simulation des Laser-Powder-Fusion-Prozesses von Polymeren. Dazu haben wir zunächst eine Prozesskettensimulation aufgebaut. Damit simulieren wir die Materialveränderungen in den einzelnen Fertigungsschritten auf der Mikrostrukturskala und stellen rechnerisch die Zusammenhänge zwischen resultierenden Bauteileigenschaften und den gewählten Prozessparametern her. Mit neu entwickelten Applikationen kann der additive Fertigungsprozess somit virtuell variiert und real optimiert werden.

Nicht nur schaffen wir mit einer solchen Applikation einen Zugang zu den komplexen Struktur-Eigenschaftsbeziehungen – wir ermöglichen unseren Kunden damit auch die Souveränität, schnell und eigenständig in der Timeline des Prozesses zu reagieren. Dass dieser Mehrwert einfach genutzt werden kann, zeigt, dass der Transfer unseres Know-hows unkompliziert und niederschwellig gestaltet werden kann.

Wie funktioniert der Brückenschlag vom Werkstoff zur Web-App?

Hier greifen experimentelle Werkstoffcharakterisierung, die Entwicklung von Werkstoffmodellen für verschiedene Skalen und deren Verknüpfung zu Prozesskettensimulationen ineinander. Um durchgängige Materialdatenströme zu beherrschen, nutzen wir semantische Technologien und maschinelles Lernen. Die Krönung ist die Benutzerfreundlichkeit über Apps oder entsprechende Schnittstellen, denn letztlich bemisst sich der Wert der Forschung an der Produktivitäts- oder Effizienzgewinnen im realen Prozess.

Dr. Dirk Helm

Geschäftsfeldleitung Fertigungsprozesse
Tel.: 0761 5142-158
Email: dirk.helm@iwm.fraunhofer.de



Prof. Dr. Matthias Scherge und Prof. Dr. Michael Moseler im Austausch mit Dr. Lukas Gröner über Wasserstoffpermeation (v. l. n. r.).

Tribologie als Hebel für energieeffiziente und funktionale Systeme

Geschäftsfeld Tribologie



Die Tribologie ist eine Königsdisziplin in der Materialforschung. Ihre inhärente Multiskaligkeit und unser integraler Ansatz, Werkstoffe an ihren Grenzen zu begreifen, und das unter den dynamischsten Bedingungen – all das macht die Tribologie zu einer höchst wandelbaren Systemwissenschaft.«

Prof. Dr. Michael Moseler

Welchen Stellenwert hat die Tribologie aktuell in der Wertschöpfung?

Scherge: Die Vokabeln »Tribologie« sowie »Reibung« oder »Verschleiß« verstecken sich zunehmend in der Entwicklung und Verbesserung von gesamten Systemen. Für uns heißt das, dass sich unsere tribologische Forschung neu definieren und positionieren muss, und zwar in einem größeren Kontext. Wo bislang unsere Fachkenntnisse für punktuelle Lösungen zu Rate gezogen wurden, rücken in einer zunehmend holistischen Herangehensweise tribologische Fragestellungen als Teillösung in den Vordergrund. Das stellt uns vor eine Herausforderung, da wir nun antizipieren müssen, wo unsere Expertise am ehesten gefragt sein wird und dementsprechend vermehrt Partnerschaften eingehen werden.

Moseler: Das Wichtigste ist, den Wandel als Chance zu begreifen. Hierbei hilft es enorm, nahe am Kunden zu sein. Wir demonstrieren mit marktnaher Forschung, wie die Tribologie als zentraler Hebel die Funktion und die Energieeffizienz von Maschinen und Antrieben verbessert. Beispielsweise hängt die Einführung alternativer Brennstoffe vom genauen Verständnis von Reibungs- und Verschleißmechanismen ab. Uns treibt, fortwährend neue Herausforderungen zu lokalisieren. Die kreative Reibung in unseren Kundengesprächen setzt hier eine enorme wertschöpfende Energie frei.

Bergen solche Entwicklungen Risiken oder Chancen für das Feld Tribologie?

Moseler: Die Tribologie ist eine Königsdisziplin in der Materialforschung. Ihre inhärente Multiskaligkeit und unser integraler Ansatz, Werkstoffe an ihren Grenzen zu begreifen, und das unter den dynamischsten Bedingungen – all das macht die Tribologie zu einer höchst wandelbaren Systemwissenschaft. In unserem Forschungsalltag am Fraunhofer IWM gelingt uns nach wie vor der kunstvolle Spagat zwischen Kundennähe und hohem akademischen Anspruch. Diese Stärke erst macht es uns möglich, so viele Kooperationen mit Unternehmen einzugehen, die nicht nur von unserer Expertise profitieren, sondern auch für unsere Forschung neue Felder erschließen lässt.

Nehmen wir als Beispiel den Verbrennermotor: Ein signifikanter Teil unseres Geschäfts war lange Zeit darauf ausgelegt, Fragestellungen in diesem Bereich anzugehen. Heute sind Elektroantriebe oder Wasserstofftechnologien auf dem Vormarsch mit aus tribologischer Sicht spannenden aber auch komplexen Herausforderungen. Auf der geschäftlichen Seite bauen wir hier viele neue Kundenbeziehungen auf. Schließlich sehnen wir uns als Forschende bei Fraunhofer auch nach sinnstiftender Arbeit. Wollen wir nicht alle die Welt ein Stückweit besser verlassen, als wir sie vorgefunden haben?

Es liegt also ein unausgeschöpftes Potential im Zeitenwandel?

Scherge: Absolut. »Umweltverträglichkeit« ist ein großes Stichwort, das uns umtreibt. Wir sind dazu angehalten, Lösungen zur Nachhaltigkeit und Energieeffizienz zu leisten. Ende 2023 wurde zum Beispiel ein handliches Messgerät zur Detektion von schädlichen PFAS-Verbindungen mit dem Lothar Späth-Award ausgezeichnet, welches in einer Entwicklungskooperation zwischen dem MikroTribologie Centrum μ TC und der Firma Kompass GmbH entstand. Am Fraunhofer IWM haben wir das Alleinstellungsmerkmal, dass wir mit unserer Forschung nicht nur für Kunden gut sichtbar sind, sondern auch sehr gut mit wissenschaftlichen Forschungsgruppen auf internationaler Ebene konkurrieren können.

Für die Erschließung zukünftiger Forschungsschwerpunkte unter dem Gesichtspunkt der Energiewende bietet uns das einen großen Vorteil. Auch hinsichtlich der Fragen, die mit dem Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur aufkommen, sind Expertisen aus dem Bereich der Tribologie unabdingbar. Unsere Lösungsansätze zur Reibungsminderung und dem Verschleißschutz für Lager, Dichtungen und Antriebssysteme zahlen ein auf die Sicherheit von Systemen, die mit Wasserstoff betrieben werden.

Moseler: Zusätzlich zeigt unsere Forschung im Bereich der superniedrigen Reibung, der sogenannten Supraschmierung, dass wir einen richtigen Weg zur Energieeffizienz eingeschlagen haben, und das mit großem Erfolg. Die Supraschmierung ist der Schlüssel schlechthin, um technische Systeme effizienter zu gestalten. Im Fraunhofer-internen PREPARE-Projekt »SUPRASLIDE« wird zum Beispiel daran geforscht, wie makroskalige Supraschmierung über lange Zeit stabil bleibt. Solche Erkenntnisse zur Anwendungsreife zu bringen, liegt nicht nur im Interesse der Fraunhofer-Gesellschaft, sondern sehen wir auch als unsere eigene gesellschaftliche Verantwortung.

Prof. Dr. Matthias Scherge

Geschäftsfeldleitung Tribologie
Tel.: 0721 204327-12
Email: matthias.scherge@iwm.fraunhofer.de

Prof. Dr. Michael Moseler

Geschäftsfeldleitung Tribologie
Tel.: 0761 5142-332
Email: michael.moseler@iwm.fraunhofer.de



Dominik Discher (Mitte), Dr. Michael Luke (links) und Dr. Silke Sommer (rechts) unterhalten sich über eine geprüfte Probe.

Bewertung der Sicherheit und Eignung von Bauteilen mit hohen sicherheitstechnischen Anforderungen unter betriebsrelevanten Beanspruchungen

Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau



Werkstoffe sind keine idealisierten Gebilde, sondern unvollkommen und fehlerbehaftet. Und damit gilt es umzugehen. Nur dann können die Leistungsfähigkeit oder das Leichtbaupotenzial ausgeschöpft werden und Beiträge zur Nachhaltigkeit geleistet werden.«

Dr. Michael Luke

Wie lässt sich ein Hauptthema des Geschäftsfeldes in wenigen Worten zusammenfassen?

Luke: Es geht um die Sicherstellung der Integrität von Strukturbauteilen und damit auch um den Umgang mit Fehlern. Mit Fehlern sind hier Defekte (Risse, Einschlüsse oder Unregelmäßigkeiten) in den verbauten Werkstoffen gemeint, die in der Fertigung beispielsweise beim Gießen, Schmieden oder Schweißen entstehen können oder im Einsatz aufgrund von Ermüdung oder Alterung. Aber: Kleiner Fehler, großer Schaden. Diese Sorge treibt unsere Kunden um. Und erst recht bei sehr großen Bauteilen, bei sicherheitsrelevanten Anwendungen oder bei Bauteilen, die in großer Zahl im Einsatz sind. Wir schlagen die Brücke zwischen Werkstoffverformung, Werkstoffdefekten und der Bauteilsicherheit.

Das ist ein klassisches Thema des Instituts. Wo liegen hier die Innovationspotenziale?

Luke: Zum einen in immer wieder neuen Anwendungen; etwa der Frage nach Inspektionsintervallen bei Windkraftanlagen, der Crashesicherheit von Batteriesystemen in E-Fahrzeugen oder der Sicherheit von Bauteilen, die in Wasserstoffanlagen zum Einsatz kommen. In jedem System gibt es Schwachstellen, die wir aus der Struktur- und der Werkstoffperspektive identifizieren und mit Blick auf ein mögliches Schadenspotenzial bewerten. Es gibt Defekte, die unkritisch sind, und andere, bei denen man sofort handeln muss. Und es gibt Schäden, die nachhaltig zu vermeiden sind.

Sommer: Unsere Innovationen liegen auch in den Methoden, die zur Werkstoff- und Bauteilbewertung zum Einsatz kommen. Die Bruchmechanik ist unser etabliertes Arbeitspferd – zu unseren neueren Kompetenzen gehören die Künstliche Intelligenz oder die Quantensensorik. Im Geschäftsfeld wurde zum Beispiel jüngst ein Deep-Learning-Modell entwickelt und implementiert, mit dem die Qualität von Stählen anhand der Kornstruktur objektiv und automatisiert klassifiziert und bewertet werden kann. Damit tun sich neue Anwendungsgebiete auf. Ebenso haben wir ein quantenmagnetometrisches Messsystem in der Entwicklung aufgebaut, das Ermüdungserscheinungen in Materialien detektiert, lange bevor ein Riss entsteht. Denkbar ist auch, dieses für das Monitoring von Gefügeveränderungen in der Wärmebehandlung zu nutzen. Derzeit arbeiten wir an der Übersetzung der Magnetfeldsignale in zuverlässige Aussagen zum Werkstoffzustand.

Wie findet der Know-how-Transfer in Projekte statt?

Sommer: Wir freuen uns, dass wir unsere Kompetenz in das große Forschungsprojekt »DigiTain« (Digitalization for Sustainability) einbringen können. Das Projekt mit 26 Partnern wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Das große Ziel ist die Digitalisierung der Fahrzeugentwicklung und die digitale Zertifizierung für nachhaltige

Antriebsarchitekturen. Hier sorgen wir mit der Entwicklung von Werkstoffmodellen und Simulationsmethoden dafür, dass die eingesetzten Werkstoffe und Bauteile mit ihren Besonderheiten integraler Bestandteil der digitalisierten Entwicklungsprozesse werden können.

Gleichzeitig geht es aber auch darum, das Gesamtfahrzeug bereits in der digitalisierten Entwicklung ökologisch zu optimieren und nicht erst am Ende den ökologischen Fußabdruck zu bestimmen. Und bei der Nachhaltigkeit spielen die Werkstoffe letztlich eine entscheidende Rolle. Im Projekt werden digitale Prozesse, Methoden und Werkzeuge entwickelt, die ökologischen, ökonomischen und werkstofftechnologischen Anforderungen Rechnung tragen.

Bauteilsicherheit, Nachhaltigkeit und Kosten gemeinsam in der Entwicklung von Bauteilen zu betrachten, werden immer wichtiger und erfordern disziplinübergreifendes Arbeiten. Zusammen mit anderen Fraunhofer-Instituten sind wir hier gut aufgestellt.

Als Fazit, wie hängen die digitale Fahrzeugentwicklung und die eingangs genannten Fehler in Werkstoffen zusammen?

Luke: Letztlich geht es immer um die Absicherung der Leistungsfähigkeit, der Lebensdauer und der Funktion eines technischen Bauteils während seines Lebenszyklus. Die dazu nötigen Vorhersagen werden mit Werkstoffmodellen getroffen, die die Eigenschaften, die Belastbarkeit und die Fehlertoleranz der realen Werkstoffe mathematisch beschreiben. Werkstoffe sind ja keine idealisierten Gebilde, sondern immer unvollkommen und fehlerbehaftet. Und damit gilt es umzugehen. Nur dann können die Leistungsfähigkeit oder das Leichtbaupotenzial ausgeschöpft werden und Beiträge zur Nachhaltigkeit geleistet werden.

Dr. Michael Luke

Geschäftsfeldleitung Bauteilsicherheit und Leichtbau
Tel.: 0761 5142-338
Email: michael.luke@iwm.fraunhofer.de

Dr. Silke Sommer

Geschäftsfeldleitung Bauteilsicherheit und Leichtbau
Tel.: 0761 5142-266
Email: silke.sommer@iwm.fraunhofer.de



Dr. Eva-Regine Carl demonstriert für Dr. Christoph Schweizer, Lucas Lemos Da Silva und Kimberly Frass die robotische Steuerung des mobilen Diffraktometers (v. l. n. r.).

Werkstoffe im Produktlebenszyklus berechenbar machen

Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte



Man kann den Werkstoff in einem Bauteil nicht isoliert betrachten. Das gilt nicht nur für Wasserstoffanwendungen, sondern generell für Systeme, in denen Energie erzeugt, umgewandelt oder gespeichert wird – wir werden mit immer mehr und neuen Umgebungseinflüssen konfrontiert, die Komponenten angreifen und Werkstoffeigenschaften verändern.«

Dr. Christoph Schweizer

Wo entfaltet die Kombination von Werkstoffbewertung und der Entwicklung von Lebensdauervorhersagen ihre größte Wirkung?

Schweizer: Aufgrund regelmäßig auftretender winterlicher Dunkelflauten, in denen weder aus Photovoltaik noch Windenergie signifikant Strom erzeugt werden kann, braucht Deutschland Langzeitspeicher für erneuerbar erzeugte Energie. Große Batteriespeicher können das Problem der Energiespeicherung über einen solchen Zeitraum nicht lösen. Als Speichermedium kommen zunehmend Gase – wie etwa Wasserstoff – infrage, die in Backupkraftwerken mit weitestgehend etablierter Infrastruktur und Technologie rückverstromt werden können. Um eine sichere und zuverlässige Wasserstoffinfrastruktur zu ermöglichen, muss die Antwort der eingesetzten Werkstoffe auf den Wasserstoffeinfluss vorher genauestens untersucht und beschrieben werden.

Und genau dort greift unsere Expertise: Nicht nur verfügen wir über die Möglichkeiten, Werkstoffeigenschaften unter Wasserstoffeinfluss zu bewerten, sondern können Materialien unter Wasserstoffatmosphäre auch im Hochtemperaturbereich testen. Gerade für den Betrieb von Gaskraftwerken sind solche Erkenntnisse enorm wichtig.

Das heißt, es geht darum, den Werkstoff unter neuartigen Umgebungsbedingungen berechenbar zu machen?

Schweizer: Auf jeden Fall. Man kann den Werkstoff in einem Bauteil nicht isoliert betrachten. Das gilt nicht nur für Wasserstoffanwendungen, sondern generell für Systeme, in denen Energie erzeugt, umgewandelt oder gespeichert wird – wir werden mit immer mehr und neuen Umgebungseinflüssen konfrontiert, die Komponenten angreifen und die Werkstoffeigenschaften wie etwa das Korrosionsverhalten verändern: andere Energieträger wie Ammoniak oder Methanol, zum Beispiel, aber auch feuchte Atmosphären generell. Unsere Expertise in der Struktur- und Schadensanalytik ermöglicht es uns, diese Prozesse in der Mikrostruktur aufzuklären und vorherzusagen, wie sich diese auf die Lebensdauer auswirken.

Wie profitieren Unternehmen von Ihrer Materialintelligenz?

Schweizer: Wir integrieren hochwertige und attraktive Werkstoffdatensätze in einem Datenraum und machen Wissen zu Werkstoffen, Schädigungsmechanismen, Charakterisierungs- und Fertigungsprozessen abfragbar. Dieses Know-how stellen wir in Form von Materialmodellen und Materialkarten zur Verfügung. Damit beschleunigen wir die Datenbereitstellung und erhöhen die Datenqualität.

So bieten wir etwa Entwicklungsabteilungen ein Abo-Modell an, mit dem Zugang zu Werkstoffmodellen und den zugehörigen Materialkarten geboten werden kann. Unser Anspruch ist es, vollständige Werkstoffdatensätze verfügbar zu machen, aber auch in einem Format, das Abonent*innen Effizienz verspricht – zum Beispiel durch schnellere Analysen und Aussagen zum Lebensdauerverhalten – unter Betrachtung von Faktoren wie Wärmebehandlungen, Oberflächenzustand oder Lastverhältnis.

Welche Werkstoffinnovationen gibt es momentan im Geschäftsfeld abseits der Wasserstoffthemen?

Schweizer: In der »Fraunhofer Attract«-Gruppe »KoMatSys« arbeiten wir auf der experimentellen Seite an neuartigen Funktionsmaterialien, die für uns bisher nur computergestützt mit atomistischen Simulationsmethoden zugänglich waren. Auch hier bewegen wir uns im Bereich der Energiewandlung von elektrisch nach mechanisch oder thermisch nach elektrisch. Unser Schwerpunkt ist aktuell die Erzeugung von Funktionsmaterialien mittels Kapillarsuspensionen, die poröse Strukturen auf unterschiedlichen Skalen aufweisen und dadurch scheinbar widersprüchliche Materialeigenschaften vereinen können, wie zum Beispiel Keramiken mit guten Wärmeleitungseigenschaften.

Dr. Christoph Schweizer

Geschäftsfeldleitung
Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte
Tel.: 0761 5142-382
Email: christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

Bauteile und Systeme zum Einsatz in
Wasserstoffinfrastrukturen qualifizieren

Bauteile und Systeme zum Einsatz in Wasserstoffinfrastrukturen bringen

Die Wasserstoffwirtschaft und die dazugehörige Infrastruktur sind auf ein Vielzahl technische Produkte, Maschinen und Anlagen angewiesen, deren Funktion und Sicherheit im mittel- oder unmittelbaren Kontakt mit Wasserstoff gewährleistet sein muss. Unternehmen aus vielen Industriezweigen stehen vor der Frage, ob ihre Produkte für die aufzubauende Wasserstoffinfrastruktur verwendet werden können, wie sie gegebenenfalls zu modifizieren sind, oder was bei einer Neuentwicklung zu beachten ist. Dabei spielen Zulassungsvorschriften und Auslegungsrichtlinien eine entscheidende Rolle. Sie schreiben vor, wie Unternehmen die Wasserstoffverträglichkeit ihrer Produkte technisch bewerten müssen. Für Behälter, Pipelines und Komponenten des Maschinenbaus gibt es zahlreiche Anforderungen und Normen. Die Auswirkungen des Wasserstoffs auf die eingesetzten Materialien sind darin unterschiedlich stark berücksichtigt.

Aus werkstofftechnologischer Sicht stehen Unternehmen nun vor den Herausforderungen, bestehende Regelwerke, die den Bauteileinsatz unter Wasserstoff noch nicht umfassend berücksichtigen, vorschriftsmäßig anzuwenden und die Bauteilsicherheit zu gewährleisten oder fallspezifische Bauteilbewertungen vorzunehmen, wenn keine speziellen Regelwerke vorliegen. Vereinzelt Forschungsprojekte unter Mitwirkung von Verbänden, Forschungseinrichtungen und Unternehmen befassen sich mit der Erweiterung bestehender Regelwerke oder der Entwicklung neuer Richtlinien, die wasserstoff-induzierte Mechanismen berücksichtigen. Für eine umfassende Lösung für alle Industriebereiche bedarf es jedoch noch mehrjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Fraunhofer IWM zielen auf diese folgenden drei erfolgskritischen Handlungsfelder für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft:

Weiterentwicklung von Auslegungsrichtlinien, Prüfmethoden und Regelwerken

Wir klären die Wirkmechanismen von Wasserstoff in Bauteilen auf verschiedenen Skalen experimentell und simulatorisch auf, und beschreiben diese in physikalischen oder phänomenologischen Modellen. Die Validierung erfolgt mit bauteilnahen Versuchen und einer fundierten Datenbasis. Im diesjährigen Jahresbericht zeigen dies folgende Beiträge:

FuE-Bedarfe und Optimierung von Auslegungsrichtlinien für Bauteile der Wasserstoffinfrastruktur

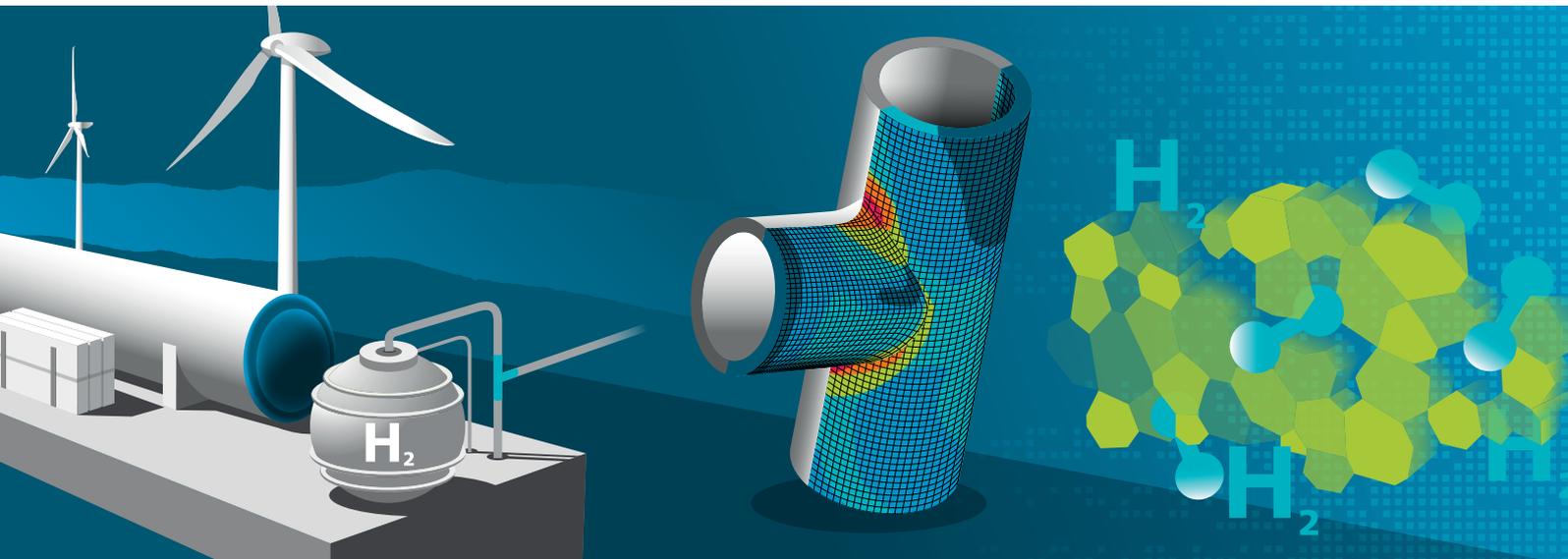
Aufbauend auf dem Stand der Technik wurden im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Wasserstoff-Leitprojekt »TransHyDE« für die Qualifizierung von Pipelines optimiert. Diese geben einen Einblick, welche potenziellen Verbesserungen bei Werkstoffen und Fertigungsverfahren den größtmöglichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben.

Lebensdauermodelle für die Auslegung metallischer Druckbehälter nach Druckbehälterrichtlinien

Die Ein- und Ausspeicherung von wasserstoffhaltigen Gasen führen bei Druckbehältern zu zyklischen Lasten. Um bestehende Regelwerke zu ertüchtigen, untersucht das Fraunhofer IWM das Anrissverhalten von Druckbehälterstählen im Wasserstoffbetrieb. Diese Arbeiten sind ebenfalls Gegenstand der vom BMBF geförderten Wasserstoffleitprojekte »H2Mare« und »TransHyDE«.

Entwicklung eines Qualifikationskonzepts für Leichtbaurohre für Wasserstoffanwendungen

Für Rohrleitungen mit kleinen Baugrößen und geringen Wandstärken von zwei bis drei Millimetern gibt es einen großen Bedarf. Die Machbarkeit eines Leichtbaukonzepts mit höherfesten hochduktilen HD-Stählen, das eine Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Materialeinsparung ermöglicht, erfolgt aktuell im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »H2-Leichtbaurohr«.



Anwendung von Regelwerken, die wasserstoffspezifische Effekte unzureichend abbilden

Manche Auslegungsrichtlinien können aktuell noch nicht oder nur eingeschränkt zur Bewertung von Bauteilen und Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur herangezogen werden, da wasserstoffspezifische Wirkmechanismen darin nur unzureichend abgebildet sind. Wir zeigen Wege auf, wie bestehende Regelwerke wasserstoffgerecht genutzt werden können. Exemplarisch ist dies im folgenden Beitrag beschrieben:

Festigkeitsnachweis von Maschinenbau-Komponenten mittels der FKM-Richtlinien

Eine gute Ausgangsbasis für Festigkeitsnachweise von Maschinenbau-Komponenten sind die FKM-Richtlinien, deren Gültigkeitsbereich aktuell jedoch keine Wasserstoffatmosphäre abdeckt. Am Fraunhofer IWM wurde eine Nachweisführung für den Bauteileinsatz unter Wasserstoff konzipiert, die sich an den FKM-Richtlinien orientiert.

Bewertung der Eignung von Produkten und Komponenten für den Einsatz in einer Wasserstoffumgebung

Bauteile sind in Wasserstofftechnologien oft komplexen Beanspruchungs- und Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Wir berücksichtigen die Wechselwirkungen dieser Faktoren und daraus resultierende Schädigungsmechanismen in unseren Bewertungsmodellen. Zur Vorhersage der Auswirkungen von Alterungseffekten wie Korrosion, Ermüdung und Verschleiß nutzen wir fortgeschrittene Alterungsmodelle und angepasste thermomechanische und tribologische Versuchstechniken. Daraus leiten wir Aussagen zur Lebensdauer und letztlich zur Gebrauchseignung ab. Untenstehende Beiträge schildern dies genauer:

Bruchmechanische Bewertung der Wasserstofftauglichkeit von komplexen Bauteilen

Für druckführende Bauteile von Wasserstoffinfrastrukturen gelten Sicherheitsanforderungen, die unter anderem durch Spröbruchsicherheitsnachweise gewährleistet werden müssen. Hierbei wird vom Vorliegen fertigungs- oder betriebsbedingter Fehler ausgegangen. Diese können am Fraunhofer IWM mit bruchmechanischen Methoden, in Anlehnung an bestehende Regelwerke, bewertet werden. Die Lebensdauer bis zum Bauteilversagen kann so prognostiziert werden.

Fortgeschrittene Methoden zur Qualifizierung von CFK-Wasserstofftanks

Die Hersteller und Betreiber von CFK-Wasserstofftanks sind auf validierte, auf die Besonderheiten der Materialien und Betriebsbedingungen abgestimmte Bewertungskonzepte angewiesen. Am Fraunhofer IWM wurden dazu spezifische Bewertungskriterien und Materialmodelle entwickelt und implementiert. Die Berechnungswerkzeuge erlauben die Bewertung der Integrität von CFK-Drucktanks und deren Ausfallwahrscheinlichkeit.

Wälzlager für Wasserstoffanwendungen qualifizieren

Die Lagerungen von Pumpen und Verdichtern in Wasserstoffinfrastrukturen kommen teilweise direkt mit Wasserstoff in Kontakt. Tribologische Systeme aus bestimmten Stählen zeigen dabei verringerte Lebensdauern. Am Fraunhofer IWM wurde eine Prüfmethode entwickelt, um Wälzlager in Hochdruckwasserstoff bei bis zu 300 bar, 200 °C und Kontaktpressungen von bis zu 3 GPa zu qualifizieren.

FuE-Bedarfe und Optimierung von Auslegungsrichtlinien für Bauteile der Wasserstoffinfrastruktur

Heiner Oesterlin, Dr. Frank Schweizer

heiner.oesterlin@iwf.fraunhofer.de, frank.schweizer@iwf.fraunhofer.de

Für den Transport und die Speicherung von Wasserstoff kann Deutschland auf eine großflächige bestehende Erdgasinfrastruktur zurückgreifen, die allerdings für den Betrieb mit Wasserstoff neu qualifiziert werden muss. Viele Industriezweige prüfen gerade, ob ihre Produkte für die aufzubauende Wasserstoffinfrastruktur verwendet werden können. Bei dieser Bewertung haben Auslegungsrichtlinien eine zentrale Bedeutung, da sie Handlungsanweisungen geben, wie Unternehmen die Lebensdauer ihrer Produkte nach dem aktuellen Stand der Technik bewerten müssen. Wichtige Auslegungsrichtlinien sind die Druckbehälterrichtlinie AD 2000 (diese enthält alle Sicherheitsanforderungen der European Pressure Equipment Directive (2014/68/EU) und die europäische harmonisierte Druckbehälternorm EN 13445, basiert auf der AD 2000), die FKM-Richtlinien¹ für Bauteile und Komponenten des allgemeinen Maschinenbaus, sowie die DVGW-Merkblätter/Arbeitsblätter² G409, G463 und G464 für Pipelines. Der aktuelle Stand der Technik bei Wasserstoffanwendungen wird in der AD 2000 und den FKM-Richtlinien unzureichend abgebildet. Dies führt dazu, dass Firmen ihre Produkte nicht hinreichend bewerten können, was momentan ein großes Hindernis beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur darstellt.

Qualifizierung von Pipelines im Kontakt mit Wasserstoff

Die technische Herausforderung ist die sogenannte Wasserstoffversprödung insbesondere von Stahl. Bei Kontakt mit Wasserstoffgas können diverse mechanische Eigenschaften verringert und somit die Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Bauteilen und Komponenten reduziert werden. Im DVGW-Merkblatt G464 zur Bewertung der »H₂-Readiness« von Pipelines ist dieser Mechanismus bereits integriert. Aufbauend auf diesem Stand der Technik wurden im »TransHyDE«-Projekt »Sichere Infrastruktur« erste Bewertungskriterien für die Qualifizierung von Pipelines optimiert. Diese geben einen Einblick, welche potenziellen Verbesserungen bei Werkstoffen und Fertigungsverfahren den größtmöglichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Das Projekt ist Teil des Wasserstoff-Leitprojektes »TransHyDE« und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

¹ Forschungskuratorium Maschinenbau, FKM

² Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., DVGW

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die in »TransHyDE« formulierten Bewertungskriterien ermöglichen hierbei, die Optimierungsbereiche mit dem größtmöglichen Potenzial zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt und mögliche Szenarien wie verbesserte Werkstoffe, Bauteilprüfungen und Prüfmethode zur Defektdetektion verglichen. Ein besonders großes Optimierungspotenzial kommt der Defektdetektion durch die zerstörungsfreie Prüfung nach Fertigung oder auch als wiederkehrende Prüfung des installierten Systems zu. Für besonders kritische Anlagenteile kann eine Einzelprüfung der verbauten Bauteile in Betracht gezogen werden. Die Optimierung der chemischen Zusammensetzung der Stähle und der dazugehörigen Wärmebehandlung mit dem Ziel, den schädigenden Einfluss des Wasserstoffs zu reduzieren, bietet ebenfalls Potenzial. Das DVGW-Merkblatt G464 ermöglicht eine sichere, konservative Bewertung, und die im Projekt erläuterten Bewertungskriterien leisten einen wichtigen Beitrag zur weiteren Optimierung. Diese werden im bis 2025 laufenden Projekt durch ermittelte Kennwerte ergänzt. Parallel werden Prüfverfahren weiter verbessert.

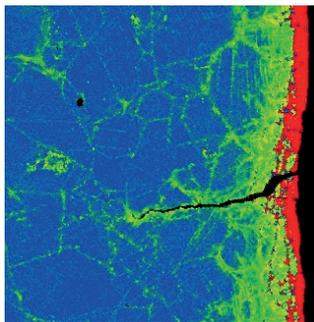
In enger Kooperation der beteiligten Forschungsstellen und Industrieunternehmen sollen die Bewertungskriterien schlussendlich Einzug in deutsche und internationale Normen und Verbandsrichtlinien halten. In dieser Form sind sie auch für nichtbeteiligte Unternehmen – insbesondere kleine und mittlere Unternehmen – anwendbar und können einen Beitrag zum sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der deutschen Wasserstoffwirtschaft leisten. Ziele für kommende Forschungsaktivitäten ist, diesen Schädigungsmechanismus in den nächsten Jahren in weitere wichtige Auslegungsrichtlinien (AD 2000 und FKM) zu integrieren und so Unternehmen eine sichere Bewertung ihrer Bauteile und Komponenten zu ermöglichen.

Hierbei hat das Fraunhofer IWM eine führende Rolle übernommen und kann basierend auf jahrzehntelangen Erfahrungen schnell Lösungen für Industriebetriebe anbieten. Diese können in gemeinsamen Projekten die technischen Details erarbeiten, um Bauteile für Wasserstoffanwendungen qualifizieren zu können.

Lebensdauermodelle für die Auslegung metallischer Druckbehälter und Druckbehälterrichtlinien

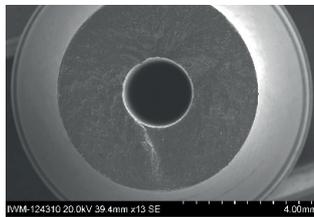
Heiner Oesterlin

heiner.oesterlin@iwmm.fraunhofer.de



Falschfarbenbild eines wasserstoffinduzierten Ermüdungsrissses in einer Nickelbasislegierung.

Ein- und Ausspeicherung führen bei den Druckbehältern und Rohrleitungen zu zyklischen Lasten. In der Vergangenheit wurde die Ermüdungsfestigkeit dieser Komponenten häufig durch eine Auslegung mit den Regelwerken AD 2000 oder EN 13445 sichergestellt. Diese Normen sind anrissbasiert – das bedeutet, dass sie nicht einen existierenden Riss postulieren (wie die amerikanischen Regelwerke ASME¹ B31.12, BPVC), sondern die Anzahl der zulässigen Zyklen bis zur Bildung eines technischen Anrisses berechnen. Um sichere und wirtschaftliche Konstruktionen von Druckwasserstoffbehältern zu ermöglichen, müssen Normen um den Einfluss von Druckwasserstoff(-gemischen) auf die Anrissbildung erweitert werden.



Draufsicht auf eine unter Druckwasserstoffeinfluss gebrochene Ermüdungshohlprobe.

Das Anrissverhalten von Druckbehälterstählen unter Wechsellast im Wasserstoffbetrieb ist aktuell nur punktuell experimentell untersucht. In den vom BMBF finanzierten Wasserstoffleitprojekten »H2Mare« und »TransHyDE« charakterisiert das Fraunhofer IWM aktuell das Anrissverhalten einiger Stähle für Druckbehälter. Das Vorantreiben der kostengünstigen Hohlprobentechnik erlaubt es dem Fraunhofer IWM dabei, die notwendigen Prüfkapazitäten schnell

aufzubauen und anzubieten. Neben Kapazitäts- und Kostenvorteilen bieten Hohlproben die einfache Möglichkeit zur Kühlung oder Heizung des Materials, um beispielsweise den Einfluss von winterlichen Außenbedingungen oder erhöhten Temperaturen in Verdichtern abzubilden.

Die AD 2000 ist eines der wenigen Regelwerke, das den Einfluss des Druckwasserstoffs überhaupt berücksichtigt: Im Merkblatt S2 wird unter gewissen Umständen ein Abschlagsfaktor von 10 auf die erlaubte Zyklenzahl im Vergleich zu Erdgas oder Luft angegeben. In der Realität ist ein solcher Abschlagsfaktor unter anderem abhängig von Wasserstoffpartialdruck, Belastungsamplitude und -frequenz und natürlich Material(-klasse). Das Fraunhofer IWM will zukünftig seine werkstoffmechanische Kompetenz verwenden, um mit den gemessenen Anrisslinien robuste Lebensdauermodelle zu entwickeln, die diese Einflüsse genau beschreiben. Des Weiteren werden diese Auslegungsmethoden einfach in die ingenieurmäßige Praxis überführbar sein und sollen perspektivisch in die Druckbehälterrichtlinien integrierbar sein.

¹ The American Society of Mechanical Engineers, ASME

Entwicklung eines Qualifikationskonzepts für Leichtbaurohre für Wasserstoffanwendungen

Dr. Carl Fischer, Dr. Ken Wackermann

carl.fischer@iwm.fraunhofer.de, ken.wackermann@iwm.fraunhofer.de

Zur Herstellung von Wasserstoffpipelines werden aus Kostengründen meist niedriglegierte Stähle verwendet. Entsprechende Regelwerke, mit denen Pipelines für den Transport wasserstoffhaltiger Gase ausgelegt und qualifiziert werden können, sind zum Beispiel die ASME¹ B31.12 und das DVGW²-Merkblatt G 464. Darin sind jeweils bruchmechanische Ansätze zur Bewertung des Risswachstums eines postulierten Anfangsdefekts durch Druckschwankungen in der Pipeline verankert, die im Allgemeinen sichere, jedoch auch sehr konservative Lebensdauervorhersagen garantieren. Die Entnahme der vorgeschriebenen Probengeometrien für Werkstoffprüfungen in Druckwasserstoff gestaltet sich bei kleinen Wandstärken allerdings schwierig. Zwar können dann konservative Ersatzwerte ermittelt und verwendet werden, jedoch bleiben somit entsprechende Reserven der Werkstoffe unangetastet.

Für Rohrleitungen mit kleinen Baugrößen und geringen Wandstärken zur Verteilung von Wasserstoff in Anlagen oder in Fahrzeugen gibt es einen großen Bedarf an wirtschaftlichen Materiallösungen. Eine wirtschaftlich attraktive Materialklasse für druckwasserstoffführende Rohre sind hochfeste hochduktilen Stähle. Unter Druckwasserstoff wird hierbei gasförmiger Wasserstoff mit bis zu 1000 bar Druck verstanden. Die Entwicklung und der Nachweis der Machbarkeit eines Leichtbaukonzepts für innovative Wasserstoffrohre erfolgt im vom BMWK geförderten Projekt »H₂-Leichtbaurohr« und wird in Kooperation mit thyssenkrupp Hohenlimburg GmbH, Benteler Steel/Tube GmbH, iChemAnalytics GmbH und VOSS Fluid GmbH durchgeführt.



Da druckwasserstoffführende Rohre in Verteilleitungen viel kleiner als Transportpipelines sind, ist eine bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung und Lebensdauerbewertung nach der ASME B31.12 und dem DVGW-Merkblatt G 464 nicht möglich. Zudem existieren aktuell keine genormten Prüfverfahren oder Probengeometrien, um Wasserstoffrohre für den industriellen Einsatz zu qualifizieren. Daher wird am Fraunhofer IWM eine effiziente Prüftechnik mit einem speziell für Leichtbaurohre zugeschnittenen Wasserstoffautoklaven entwickelt und aufgebaut. Die Entwicklung und Validierung eines anriss-basierten Lebensdauermodells für wasserstoffführende Rohre erfolgt auf Basis der im Wasserstoffautoklaven ermittelten Wöhlerkurven. Dieses Lebensdauermodell ermöglicht den industriellen Herstellern und Betreibern von Leichtbaurohren, die im Betrieb erfahrenen Belastungen zu bewerten und die Betriebsdauer von typischen Belastungsszenarien präzise vorherzusagen.

Das Gesamtpaket aus effizienter Prüftechnik, Probengeometrien, Modell zur Lebensdauervorhersage der Rohre und letztlich der Nachweis der Gebrauchseignung der hochduktilen Stähle für Wasserstoffrohre soll anschließend über relevante Gremien in Normen und Richtlinien verankert werden, um eine schnelle Marktdurchdringung des Leichtbaukonzepts zu erreichen.

¹ The American Society of Mechanical Engineers, ASME

² Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., DVGW

Festigkeitsnachweis von Maschinenbau-Komponenten mittels der FKM-Richtlinien

Dr. Sascha Fliegener

sascha.fliegenger@iwf.fraunhofer.de

Zum Aufbau einer performanten Wasserstoffinfrastruktur im Rahmen der Energiewende werden neben Auslegungskonzepten für spezifische Komponenten wie Pipelines und Druckbehälter (abgedeckt von den Regelwerken ASME¹ B31.12 und AD 2000) insbesondere allgemein anwendbare Richtlinien für breite Anwendungen im Maschinenbau benötigt, die den Einfluss von Druckwasserstoff adäquat berücksichtigen. Dies betrifft beispielsweise Bauteile wie Armaturen, Ventile, Fittings und Interfaces, Komponenten zur Betankung, Tankgefäße, Brennstoffzellen, Kompressor- und Turbinenkomponenten, Einspritz- und Brennerdüsen, Sensoren, Druckregler und viele weitere. Die damit verbundenen Einsatzbedingungen sind sehr unterschiedlich und durch stark variierende Belastungsarten (z. B. statisch, zyklisch, mehrachsig...), sowie Temperaturen (z. B. -80 bis 200 °C) und Druckbereiche (z. B. 1 bis 1000 bar Wasserstoffdruck) gekennzeichnet.

FKM-Richtlinien als Ausgangsbasis

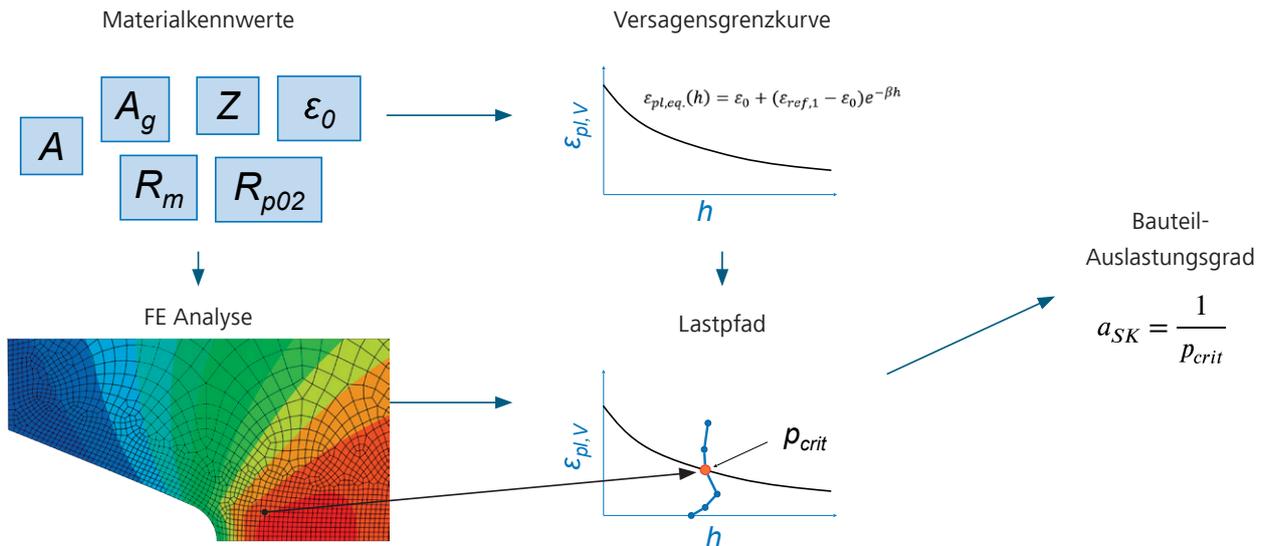
Eine ideale Ausgangsbasis, um möglichst allgemeingültige Berechnungsverfahren und Festigkeitsnachweiskonzepte auch unter Wasserstoffatmosphäre aufzubauen, sind die bei vielen Unternehmen bereits fest etablierten FKM²-Richtlinien [1]. Diese umfassen den allgemeinen rechnerischen Festigkeitsnachweis [2], eine Nachweisführung unter expliziter Nutzung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens [3], ein bruchmechanisches Konzept [4] sowie eine Richtlinie für Federbauteile [5]. Während der Gültigkeitsbereich der Richtlinien in aktueller Form eine Wasserstoffatmosphäre nicht mit einschließt, kann im Forschungsumfeld jedoch bereits eine Nachweisführung für spezielle Fälle angewandt werden, die sich stark an den FKM-Richtlinien orientiert und Werkstoffkennwerte als Eingabegrößen für die Berechnungsverfahren berücksichtigt, die unter Wasserstoffatmosphäre ermittelt wurden. Solch ein Beispiel ist im Folgenden gezeigt.

Für nieder- bis mittelfeste Stähle wie niedriglegierte C-Stähle, Edelstähle und teilweise auch Ni-Martensite ist bezüglich der Festigkeitswerte wie Streckgrenze und Zugfestigkeit oft kein wesentlicher Effekt der Wasserstoffatmosphäre messbar. Die Wasserstoffversprödung äußert sich jedoch signifikant durch eine erhebliche Reduktion von Bruchdehnung und -einschnürung. Dieser Effekt kann in der Bauteilauslegung mit dem dehnungsbasierten Konzept der FKM-Richtlinie »Nichtlinear« [3] berücksichtigt werden, indem verschiedene Versagensgrenzkurven (d. h. ertragbare plastische Dehnung $\epsilon_{pl,V}$ über der Spannungsmehrachsichtigkeit h , s. Abb. 2) unter Wasserstoff- und Referenzatmosphäre zugrunde gelegt werden. Diese können aus den Werkstoffkennwerten wie insbesondere Bruchdehnung A und Bruchdehnung Z berechnet werden. Abb. 1 zeigt das generelle Ablaufschema, während in Abb. 2 die Übertragbarkeit des Konzeptes auf eine gekerbte Probe dargestellt ist. Ebenso kann das Konzept auf Komponenten mit komplexerer Geometrie übertragen werden. Berechnungsbeispiele wie das hier gezeigte werden zurzeit im IGF-Vorhaben »Bauteilberechnung unter Wasserstoff-Einfluss« [6] erarbeitet, das vom Fraunhofer IWM mitinitiiert wurde. Weiterer dringender Forschungsbedarf besteht in der zukünftigen, allgemeinen Ertüchtigung der Richtlinien zur Berücksichtigung des Wasserstoffeinflusses.

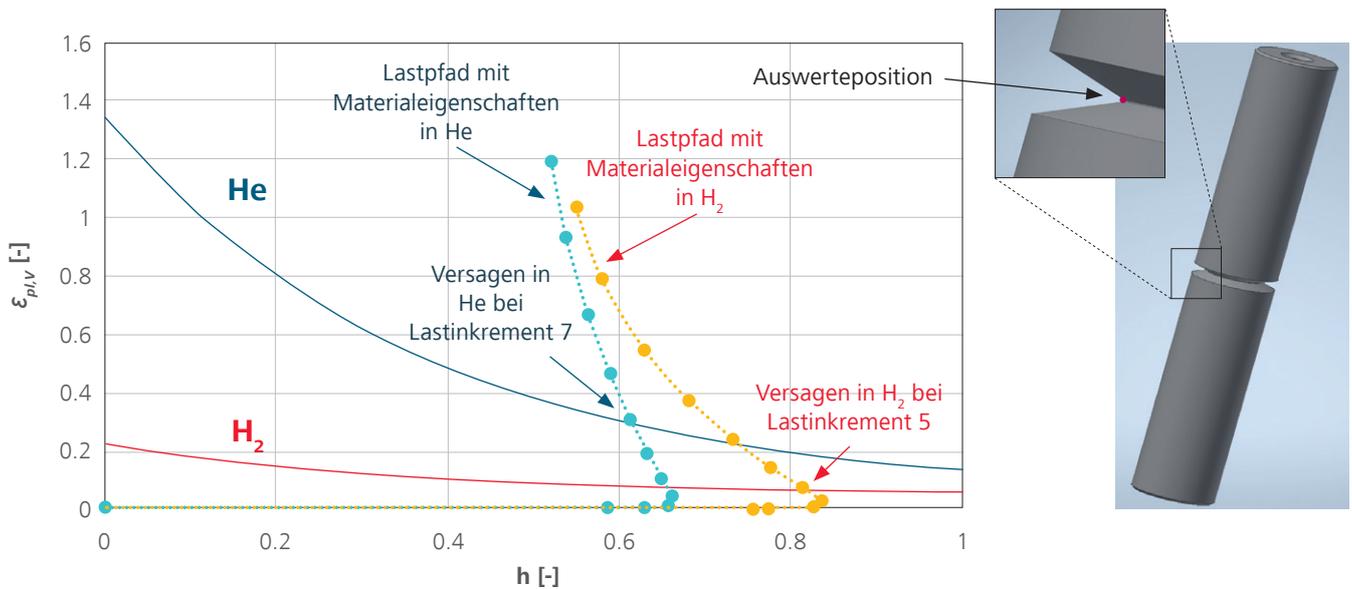
Durch die langjährige, aktive Beteiligung des Fraunhofer IWM im Entwicklungsprozess der FKM-Richtlinien ist das Institut ein idealer Ansprechpartner, um branchenweit Firmen in der Auslegung von Maschinenbaukomponenten unter Wasserstoffatmosphäre zu unterstützen, indem wir bestehende Nachweiskonzepte fallspezifisch anpassen können. Die Eingangsdaten für die Berechnung wie Werkstoffkennwerte unter Wasserstoffatmosphäre können dazu direkt am Fraunhofer IWM ermittelt werden. Unsere Kunden profitieren daher von maßgeschneiderten Auslegungskonzepten und experimenteller Kennwertermittlung aus einer Hand.

¹ The American Society of Mechanical Engineers, ASME

² Forschungskuratorium Maschinenbau, FKM



1 Ablaufschema des dehnungsbasierten Konzeptes nach FKM-Richtlinie »Nichtlinear« [3], bei dem verschiedene Versagensgrenzkurven aus Werkstoffkennwerten (insbesondere Bruchdehnung A und Brucheinschnürung Z) abgeleitet werden, die unter Wasserstoffatmosphäre stark reduziert werden.



2 Berechnungsbeispiel [7] für das dehnungsbasierte Konzept nach FKM-Richtlinie »Nichtlinear« [3] für eine gekerbte Probe mit bauteilähnlichem Belastungszustand. Die zugrundeliegende Versagensgrenzkurve für das Material X3CrNiMo13-4 ist unter Wasserstoffeinfluss stark abgesenkt, sodass bei deutlich niedrigeren aufgetragenen Lasten ein Versagen prognostiziert wird. Materialdaten aus [8].

Verweise

1 Forschungskuratorium Maschinenbau e. V. (FKM) im VDMA, <http://fkm-net.de/>

2 Rennert, R.; Kullig, E.; Vormwald, M.; Esderts, A.; Luke, M., Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile - FKM-Richtlinie, Forschungskuratorium Maschinenbau FKM (Hrsg.), VDMA Verlag, Frankfurt (2020) 7. Auflage

3 Fiedler, M.; Wächter, M.; Varfolomeev, I.; Vormwald, M.; Esderts, A., Richtlinie Nichtlinear – Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoffverformungsverhaltens für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Aluminiumknetlegierungen, Forschungskuratorium Maschinenbau FKM (Hrsg.), VDMA Verlag, Frankfurt (2019) 1. Auflage

4 Berger, C.; Blauel, J.; Hodulak, L.; Pyttel, B.; Varfolomeev, I., Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile - FKM Richtlinie Forschungskuratorium Maschinenbau FKM (Hrsg.), VDMA Verlag, Frankfurt (2018) 4. Auflage

5 Kletzin, U.; Reich, R.; Oechsner, M.; Spies, A.; Pyttel, B.; Hannig, G.; Rennert, R.; Kullig, E., Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Federn und Federelemente – FKM Richtlinie, Forschungskuratorium Maschinenbau FKM (Hrsg.) VDMA Verlag (2020) 1. Auflage

6 »Erarbeitung einer KMU-tauglichen Berechnungsprozedur für Bauteile in Druckwasserstoff-Atmosphäre am Beispiel ausgewählter struktureller Komponenten« IGF-Projekt 22733 BG, Laufzeit 01.01.2023 - 31.12.2024, Fördermittelgeber Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

7 Fischer, C.; Fliegner, S.; Oesterlin, H.; Michler, T.; Höhler, S.; Mondry, A.; Ertault de la Bretonniere, P., Codes and standards for the fatigue-based design of hydrogen infrastructure components, International Journal of Fatigue 171 (2023) Art. 107564, 17 Seiten <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/439208>

8 Deimel, P.; Sattler, E., Untersuchungen zum Wasserstoffeinfluss auf im Kompressorbau eingesetzte Werkstoffe, FKM 2007 Heft Nr. 295 Vorhaben Nr. 261 (Abschlussbericht), Forschungskuratorium Maschinenbau FKM (Hrsg.) VDMA Verlag, Frankfurt (2007)

Bruchmechanische Bewertung der Wasserstofftauglichkeit von komplexen Bauteilen

Dr. Igor Varfolomeev

igor.varfolomeev@iwm.fraunhofer.de

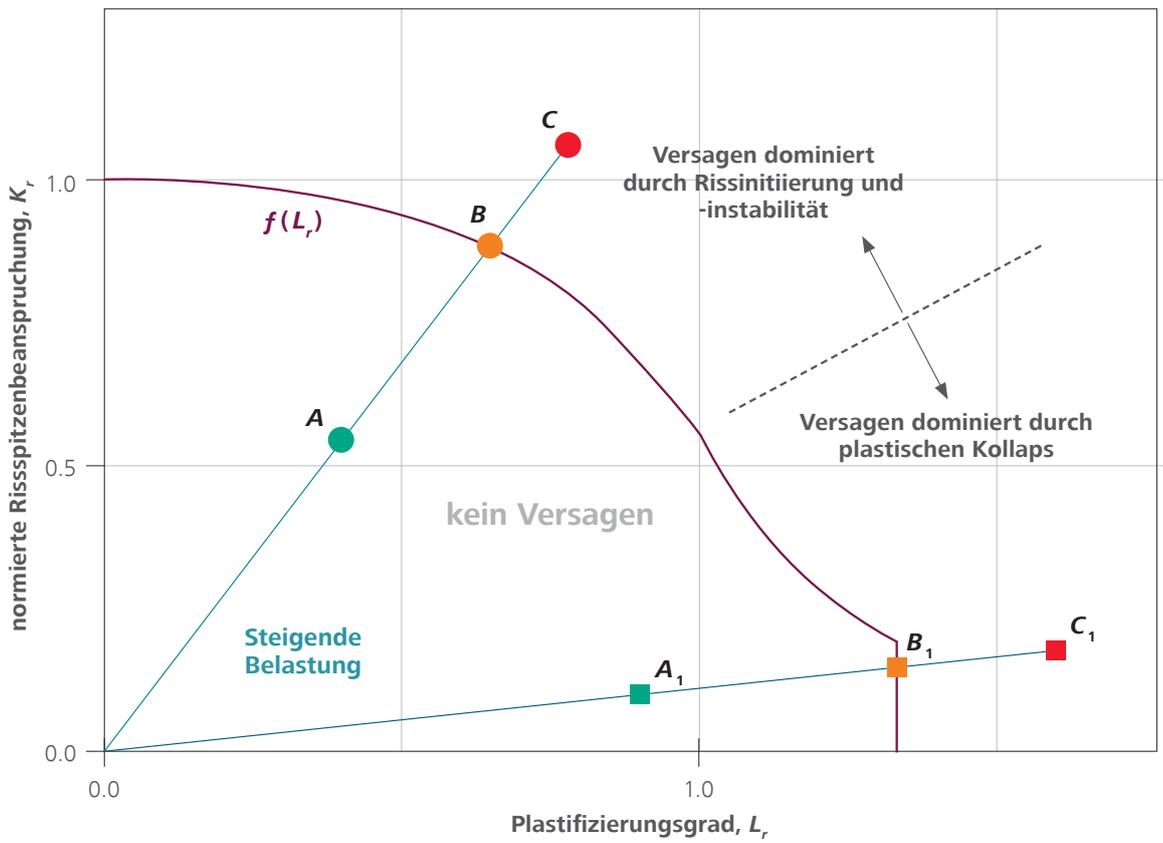
Für druckführende Bauteile von Wasserstoffinfrastrukturen gelten besondere Sicherheitsanforderungen, die unter anderem durch Sprödbrechtsicherheitsnachweise gewährleistet werden müssen. Hierbei wird vom Vorliegen fertigungs- oder betriebsbedingter Fehler ausgegangen. Da bei komplexen Bauteilgeometrien die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung erschwert ist, werden diese mit bruchmechanischen Methoden, in Anlehnung an bestehende Regelwerke, bewertet (Abb. 1). Letztere werden im Rahmen von aktuell laufenden öffentlich und durch Industrieverbände geförderten Aktivitäten hinsichtlich deren Anwendung für die Integritätsbewertung von Bauteilen unter Druckwasserstoffeinfluss überprüft und ertüchtigt. Das Fraunhofer IWM beteiligt sich an der Entwicklung von methodischen Grundlagen zur Bewertung und zum Nachweis der Wasserstofftauglichkeit kritischer Komponenten bestehender Gasnetze, einschließlich der Rohrleitungen, Armaturen sowie deren Schweißnähte.

Zur Bewertung der Kritikalität rissartiger Defekte in solchen Komponenten erfolgen zunächst struktur-mechanische Spannungsanalysen durch eine Finite-Elemente-Simulation des rissfreien Bauteils (Abb. 2). Dadurch werden hochbeanspruchte Bauteilbereiche, insbesondere an geometrischen Übergängen, Kerben und Schweißnähten identifiziert. Dort werden rissartige Fehler unterstellt und deren Verhalten unter quasi-statischer sowie wechselnder Beanspruchung bewertet. Die hierbei benötigten Kennwerte für Rissfähigkeit und den zyklischen Fortschritt können anhand von konservativen Regelwerksempfehlungen beziehungsweise Literaturdatenauswertungen abgeschätzt oder experimentell bestimmt werden.

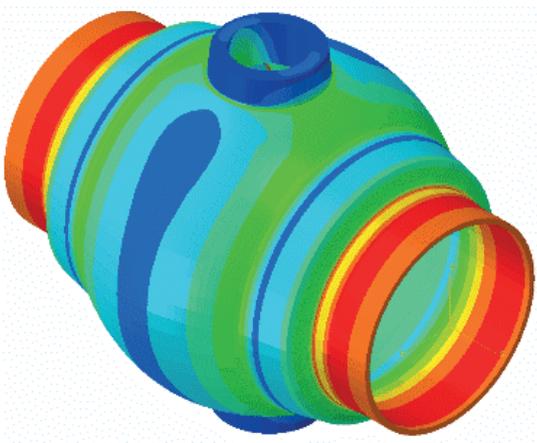
Zur Ermittlung eines Worst-Case-Szenarios für das betrachtete Bauteil werden verschiedene Kombinationen von Risslage, -orientierung und -größe sowie Beanspruchung untersucht. Zum Integritätsnachweis von Schweißnähten werden zusätzlich Schweißseigenspannungen berücksichtigt, die anhand von vorliegenden bruchmechanischen Regelwerken konservativ abgeschätzt oder mittels numerischer Schweißprozesssimulationen ermittelt werden. Im letzteren Fall besteht die Möglichkeit, die Umlagerung beziehungsweise den Abbau der Schweißseigenspannungen infolge von Druckprüfung sowie Betriebslastwechseln rechnerisch zu bestimmen, was zu einer deutlichen Minderung der Bewertungskonservativität führt.

Die bruchmechanischen Berechnungen mit dem Ziel, die Lebensdauer bis zum Bauteilversagen zu prognostizieren, werden durch das Fehlerbewertungsprogramm »IWM-VERB¹« mit dort implementierten analytischen Ersatzmodellen und Lösungen für rissbehaftete Bauteile unterstützt. Damit wird eine verlässliche Aussage hinsichtlich der Bauteilintegrität bei niedrigen Rechenzeiten gewährleistet.

¹ Versagensbewertung rissbehafteter Bauteile, IWM-VERB



1 Prinzipbild zur Versagensbewertung eines rissbehafteten Bauteils mittels FAD-Konzepts in Anlehnung an bruchmechanische Regelwerke.



2 Finite-Elemente-Modell eines Armaturegehäuses mit Darstellung der Hauptnormalspannung.

Fortgeschrittene Methoden zur Qualifizierung von CFK-Wasserstofftanks

Dr. Jörg Hohe, Dr. Carla Beckmann

joerg.hohe@iwm.fraunhofer.de, carla.beckmann@iwm.fraunhofer.de

Durch die niedrige volumenspezifische Energiedichte des Wasserstoffs müssen Lagerung und Transport entweder bei hohem Druck oder im flüssigen Zustand bei kryogener Temperatur erfolgen. Dies erfordert hochfeste, auch im tiefkalten Bereich sicher verwendbare Werkstoffe. Zum Einsatz kommen in vielen Fällen Behälter mit gewickelter, drucktragender CFK-Ummantelung (Carbonfaser verstärkter Kunststoff, CFK). Hersteller und Betreiber sind auf die Verfügbarkeit validierter, auf die Besonderheiten der Materialien und Betriebstemperaturen abgestimmter Bewertungskonzepte angewiesen. Am Fraunhofer IWM werden dazu spezifische Bewertungskriterien und Materialmodelle entwickelt, implementiert und fortwährend angepasst, um den Entwicklern geeignete Berechnungswerkzeuge an die Hand zu geben.

Bewertungskriterien und -tools für kryogene Flüssig-Wasserstofftanks

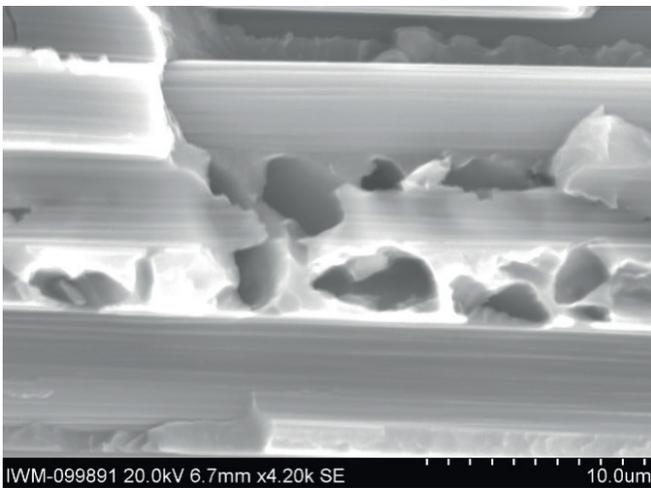
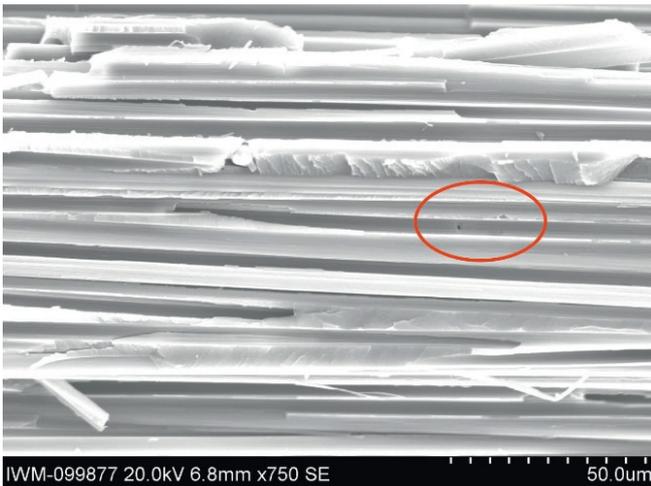
Bei der tiefkalten Wasserstoffspeicherung im flüssigen oder gasförmigen Zustand steht den Vorteilen der prinzipiell guten Tieftemperatureigenschaften von CFK mit guter Festigkeit und Zähigkeit das Problem der starken Verspannung von Kohlenstofffasern mit nahezu verschwindender Thermaldehnung in Längsrichtung und polymerer Matrix gegenüber. Die thermische Verspannung auf der Mikrostrukturebene kann allein bereits zum Auftreten erster Schäden führen. Sie muss bei der Integritätsbewertung berücksichtigt werden. Hierzu wurden am Fraunhofer IWM in Zusammenarbeit mit der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) FVK-Festigkeitskriterien (faserverstärkter Kunststoff, FVK) für die Anwendung im kryogenen Bereich qualifiziert und angepasst, sowie eine Routine zum Postprocessing von Finite-Elemente-Berechnungen entwickelt und implementiert. Diese wird durch ein Tool zur optimierten Bestimmung der Materialparameter aus Messergebnissen mit einem maximum-likelihood-Ansatz komplementiert.

Schädigungsmodelle zur Bewertung von Wasserstoff-Hochdrucktanks

Zur Bewertung der Integrität von Hochdrucktanks bei 700 bar oder darüber sind hochgenaue Festigkeitskriterien und Materialmodelle erforderlich, die das vollständige oder auch teilweise Materialversagen in numerischen Simulationen des Einsatzverhaltens präzise vorhersagen. Zu diesem Zweck wurden am Fraunhofer IWM verschiedene Schädigungsmaterialmodelle entwickelt und in kommerzielle Finite-Elemente-Programme implementiert. Diese erlauben eine rechnerische Vorhersage der Degradation des Materials durch Schädigung bis zum vollständigen Versagen. Sie sind sowohl unter statischer als auch unter zyklischer (Ermüdungs-)Belastung beispielsweise durch Betankungs- und Entleerungszyklen anwendbar.

Einfluss fertigungsbedingter Ungängen

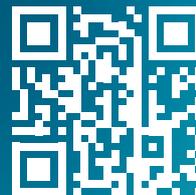
Wie bei allen anderen Arten von Verbundwerkstoffen treten auch in gewickelten CFK-Behältern unvermeidbare fertigungsbedingte Ungängen auf. Diese sind charakteristisch für das jeweilige Fertigungsverfahren. Hier handelt es sich vor allem um Schlauchporen und Faserwinkelabweichungen. Ihr Auftreten wird in herkömmlichen Ansätzen durch geeignet hohe Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt. Dies kann jedoch zu überkonservativen Auslegungen führen. Am Fraunhofer IWM werden daher seit vielen Jahren probabilistische Berechnungsverfahren entwickelt und angewendet, die das Auftreten solcher statistisch im Material verteilter inhärent unvermeidbarer Mikrodefekte berücksichtigt.



Durch kryogene Temperatur induzierte Materialschäden in CFK.

Diese Verfahren ermöglichen in einer stochastischen Finite-Elemente-Analyse eine direkte Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Behälters unter statischer oder zyklischer Innendruckbelastung. Dabei werden die verschiedenen Fehlerarten und ihre statistischen Verteilungen aus Mikrostrukturanalysen des Materials direkt in die Rechnung mit einbezogen. Das Ergebnis ist eine präzise Festigkeitsaussage unter Berücksichtigung der inhärenten Defekte.

Mit den beschriebenen Methoden ist eine umfassende Integritätsbewertung gewickelter CFK-Wasserstofftanks am Fraunhofer IWM möglich. Diese kann durch die experimentelle Bestimmung der jeweils benötigten Materialparameter auch unter Medien Einfluss und bei Berücksichtigung von Alterung durch Temperatur, Feuchte und UV-Bestrahlung komplementiert werden. Die Berechnungstools stehen auch als Software zur Verfügung.



Die Tools werden auf dem TEC-MTV Exchange Portal zur Verfügung gestellt.

Wälzlager für Wasserstoffanwendungen qualifizieren

Maximilian Baur, Dr. Dominik Kürten, Dr. Andreas Kailer

maximilian.baur@iwf.fraunhofer.de, dominik.kuerten@iwf.fraunhofer.de, andreas.kailer@iwf.fraunhofer.de



1 Wälzlagerprüfstand in einer Hochdruckkammer für Versuche in Wasserstoff.

Für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur werden Pumpen und Verdichter mit hoher Lebensdauer und gutem Wirkungsgrad benötigt. Die hier eingesetzten Lagerungen kommen teilweise direkt mit Wasserstoff in Kontakt. Es ist bereits bekannt, dass aus Standard-Wälzlagerstähle aus gehärtetem 100Cr6 unter dem Einfluss von Wasserstoff stark verringerte Lebensdauern zeigen [1].

Lösungsansätze zur Vermeidung von Frühausfällen sind momentan die Verwendung von keramischen Wälzkörpern oder von Legierungen mit hohem Chromanteil, also korrosionsbeständigen Stählen [2]. Diese sind jedoch im Vergleich zu 100Cr6 wesentlich teurer und weniger gut verfügbar. Eine weitere Möglichkeit, Wälzlageroberflächen vor einem Wasserstoffangriff zu schützen, sind Beschichtungen und Brünierungen. Diese wirken als Diffusionsbarriere und können dem Eindringen von Wasserstoff in das Metallgefüge entgegenwirken [3]. Im Hinblick auf eine steigende Anzahl von Anwendungen in Wasserstoffatmosphäre sind bezahlbare und verfügbare Werkstoffe für Wälzlager eine wichtige Voraussetzung. Zusätzlich werden Prüfmöglichkeiten benötigt, um neuartige Lösungsansätze experimentell erproben zu können.

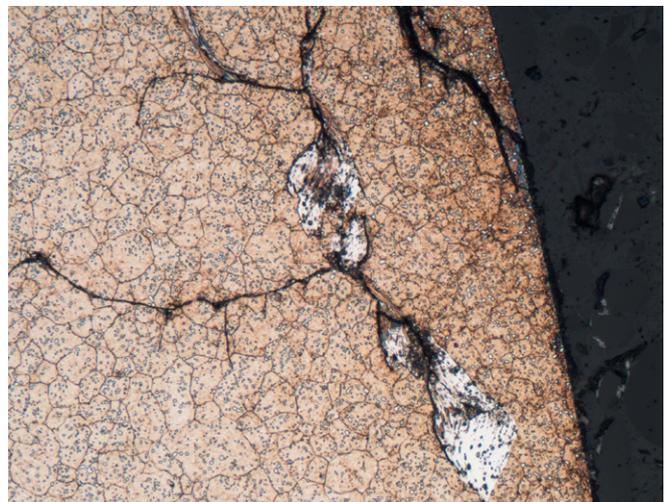
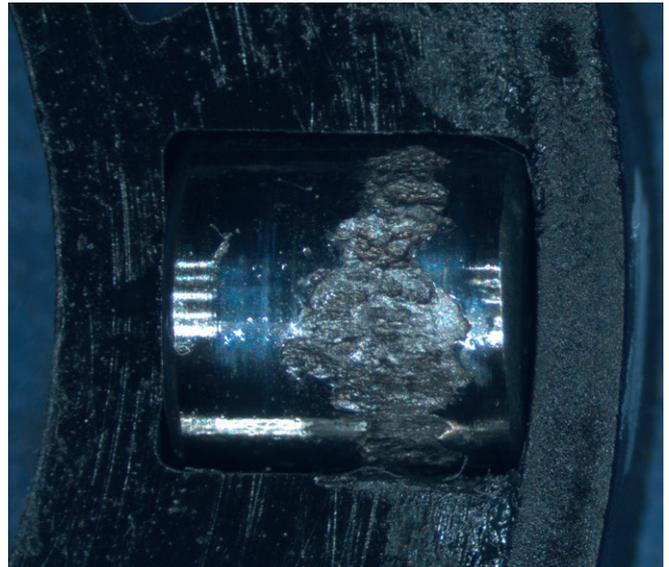
Am Fraunhofer IWM wurde eine Prüfmethode entwickelt und aufgebaut, um Wälzlager in Hochdruckwasserstoffatmosphären bei bis zu 300 bar prüfen zu können (Abb. 1). Der Prüfstand befindet sich in einer Hochdruckkammer. Die Prüfungen können geschmiert mit Ölen oder Fetten durchgeführt werden. Eine zusätzliche Temperierung der Prüfkammer ermöglicht Prüftemperaturen bis 200 °C. Für die Wälzlagerprüfung werden zwei Axiallager gegeneinander verspannt eingebaut. Der Prüfaufbau kann so Kontaktpressungen von bis zu 3 GPa realisieren. Ziele der Versuche ist es, Schmierstoffe, Werkstoffe und Beschichtungen unter anwendungsnahen Bedingungen in Wasserstoffatmosphären hinsichtlich ihrer tribologischen Eigenschaften zu qualifizieren, und so Schädigungen zu vermeiden und die Lebensdauer von Wälzlagern unter Wasserstoffeinfluss deutlich zu verbessern.

Schädigung bei Wälzlagern im Zusammenhang mit Wasserstoff

Wasserstoffschäden sind im Gegensatz zu klassischen Wälzlagerschäden keine Ermüdungsschäden. Sie entstehen zumeist weit vor dem berechneten Lebensdauende bei 5–10 Prozent der berechneten Lebensdauer und werden deshalb oft als Frühausfälle bezeichnet [4]. Die Akkumulation von Wasserstoff in der Mikrostruktur der Komponenten führt zu Bildung von großen Rissnetzwerken. Typisch für Wasserstoffschäden in 100Cr6 Wälzlagerstählen ist die Bildung von weißen Anätzungen an den Rissflanken der Rissnetzwerke (Abb. 2). Diese werden als »White Etching Cracks« (WEC) bezeichnet. Durch weiteres Überrollen der geschädigten Bereiche breiten sich die Rissnetzwerke aus, wodurch es nach kurzer Zeit zum Abplatzen der überrollten Oberfläche kommt, welche zum Funktionsverlust der Wälzlager führt.

Aber nicht nur die Wälzlager unterliegen großen Herausforderungen, sondern auch für die eingesetzten Schmierstoffe entstehen aufgrund der Wasserstoffatmosphäre veränderte Anforderungen. Durch den geringeren Sauerstoffanteil in der Atmosphäre werden Oxidationsreaktionen verhindert und chemische Wechselwirkungen zwischen den Schmierstoffadditiven und der Lagersoberflächen verändert. Dadurch können einerseits passivierende Oxidschichten, die durch Verschleiß abgetragen werden, nicht nachgebildet werden; andererseits wird die Wirkung von im Schmierstoff enthaltenen Reibminderern und Verschleißschutzadditiven gehemmt. Wasserstoff reagiert teilweise chemisch mit den Schmierstoffen, wodurch sich Veränderungen der Viskosität ergeben können. Durch die verringerte Wirkung der Schmierstoffadditive und ausbleibende Passivierung durch Oxidation entstehen reaktive Werkstoffoberflächen. Auf ungeschützten Metalloberflächen sind Adsorptions- und Absorptionsreaktionen mit Wasserstoff deutlich stärker ausgeprägt, wodurch dieser von der Oberfläche in den Werkstoff eindringen kann [5].

Werkstoffe, Beschichtungen und Schmierstoffe, und deren Wechselwirkung in Wälzlagern unter Wasserstoffatmosphäre können am Fraunhofer IWM unter anwendungsnahen Bedingungen untersucht und Schädigungsmechanismen aufgeklärt werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die oben beschriebenen Lösungsansätze zur Verbesserung der Belastbarkeit, Zuverlässigkeit und Einsatzdauer von Wälzlagern in Wasserstoffumgebung zu evaluieren und anzupassen. Technologisch nutzbare Lösungen werden für den Aufbau einer funktionierenden Wasserstoffinfrastruktur dringend benötigt.



2 Wälzlager mit einer wasserstoffinduzierten Oberflächen-schädigung (oben) und WEC-Rissnetzwerk unterhalb der Oberfläche in einem Querschliff der Zylinderrolle (unten).

Verweise

- 1 Kürten, D.; Khader, I.; Raga, R.; Casajús, P.; Winzer, N.; Spallek, R.; Scherge, M., Hydrogen assisted rolling contact fatigue due to lubricant degradation and formation of white etching areas, *Engineering Failure Analysis* 99 (2019) 330-342 <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-538040.html>
- 2 Danielsen, H. K.; Gutiérrez Guzmán, F.; Fæster, S.; Shirani, M.; Rasmussen, B. H.; Linzmayer, M.; Jacobs, G., Accelerated White Etch Cracking (WEC) FE8 type tests of different bearing steels using ceramic rollers, *Wear* 494-495 (2022) Art. 204230, 10 Seiten <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204230>

- 3 Ooi, S. W.; Yan, P.; Vegter, R. H., Black oxide coating and its effectiveness on prevention of hydrogen uptake, *Materials Science and Technology* 35/1 (2019) 12-25 <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1530425>
- 4 Stadler, K.; Lai, J.; Vegter, R. H., A review: The dilemma with premature White Etching Crack (WEC) bearing failures, in *Bearing Steel Technologies Vol. 10, Advances in Steel Technologies for Rolling Bearings*, Beswick, J. M. (Ed.), ASTM International (2014) 1-22 <https://www.astm.org/stp158020140046.html>
- 5 Tanaka, H.; Ratoi, M.; Sugimura, J., The role of synthetic oils in controlling hydrogen permeation of rolling/sliding contacts, *RSC Advances* 11/2 (2021) 726-738 <https://doi.org/10.1039/D0RA00294A>

Fachbeiträge aus den Geschäftsfeldern



Prüfmethodeentwicklung für die Hochtemperaturtribologie in Abgas

Tobias König

tobias.koenig@iwmm.fraunhofer.de

Durch gestiegene Umwelt- und Effizienzanforderungen nimmt die Komplexität heutiger Verbrennungsmotoren, die mit unterschiedlichsten Betriebsstoffen befeuert werden, deutlich zu. Mehrstufige Aufladungen, Abgasrückführungen und -nachbehandlungen führen im Abgasstrang zu einem hohen Regel- und Steueraufwand, weshalb mehrere Klappensysteme und Aktuatoren eingesetzt werden müssen. Die ungeschmierten Lagerstellen dieser Abgasklappen unterliegen durch die hohen thermischen Belastungen und dem Kontakt mit der Abgasatmosphäre signifikantem Verschleiß. Sie gelten somit als kritische Tribosysteme, die durch hohe Ausfallwahrscheinlichkeit und geringer Lebensdauer gekennzeichnet sind. Am Fraunhofer IWM wurde im Rahmen eines Projektes daher eine Qualifizierungsmethode für ebensolche Tribosysteme entwickelt, welche die Entwicklungszeit geeigneter Materialsysteme drastisch reduziert und gerade auch für kleine und mittlere Unternehmen eine tribologische Prüfung mit geringen Aufwänden ermöglicht. Weiterhin kann eine gezielt für die Anwendung im Abgasstrang abgestimmte Materialauswahl erfolgen und so die Lebensdauer der Komponenten erhöht werden.

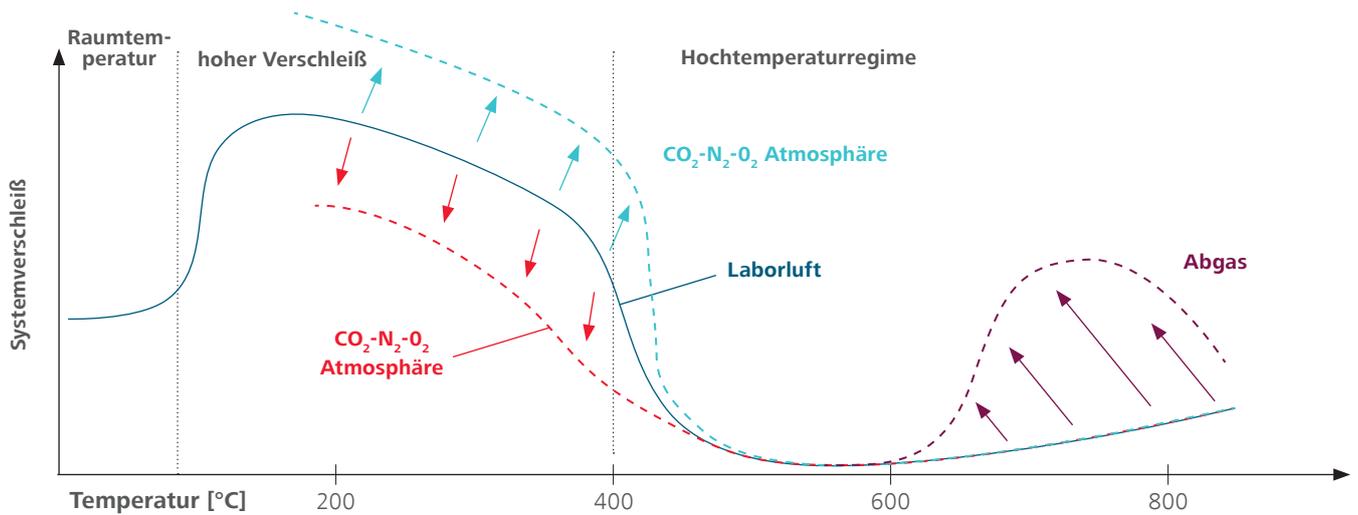
Bisher wird für die tribologische Charakterisierung dieser Lagerungen meist auf aufwendige und kostspielige Versuche am Vollmotor zurückgegriffen. Das hat zur Folge, dass die gezielte, anwendungsspezifische Weiterentwicklung der Werkstoffsysteme ausgebremst wurde und beteiligte Zulieferer auf die Zusammenarbeit und den Know-how-Transfer mit den Motorenherstellern angewiesen waren. Als Alternative zu diesem langwierigen Prozess wurde am Fraunhofer IWM in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Materialien – Zuverlässigkeit und Mikrostruktur (IAM-ZM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) innerhalb eines IGF-Projektes eine zeit- und kosteneffiziente Qualifizierungsmethode speziell für diese abgasbeaufschlagten Tribosysteme entwickelt und überprüft, mit der sich nun schnelles Werkstoffscreening realisieren lässt.



1 Welle-Buchse-Kontaktstelle im Schnitt mit vertikalem Probenhalter zur Normkrafteinleitung, thermischer Einhausung (orange Gehäuse), Konvektionsheizern (rot) und Rohranschlüsse zur Atmosphäreneinleitung.

Die Qualifizierungsstrategie besteht aus zwei sich ergänzenden Versuchsmethoden, deren Eignung durch den Vergleich mit verschlissenen Komponenten aus Feldversuchen überprüft wurde; diese verschlissenen Komponenten wurden dabei von den Industrieteilnehmern des projektbegleitenden Kreises zur Verfügung gestellt. Zum schnellen und einfachen Werkstoffscreening wurde ein linear reversierender Gleitversuch mit einer Linienkontaktgeometrie eingesetzt. Die Prüfung ermöglicht anwendungsspezifische Pressungen im unteren MPa-Bereich, kann in unterschiedlichen Inertgas-Atmosphären/Gasmischungen betrieben werden und verfügt über eine hochauflösende Datenaufzeichnung zur zyklensbasierten Datenauswertung. Zur anwendungsnahen tribologischen Prüfung wurde zudem ein neuer Prüfaufbau entwickelt, der einen Wellen-Buchsen-Kontakt mit anwendungsspezifischen Abmaßen beinhaltet (Abb. 1), ebenfalls eine hochauflösende Datenaufzeichnung besitzt und mit einer realen Abgasatmosphäre beaufschlagt werden kann.

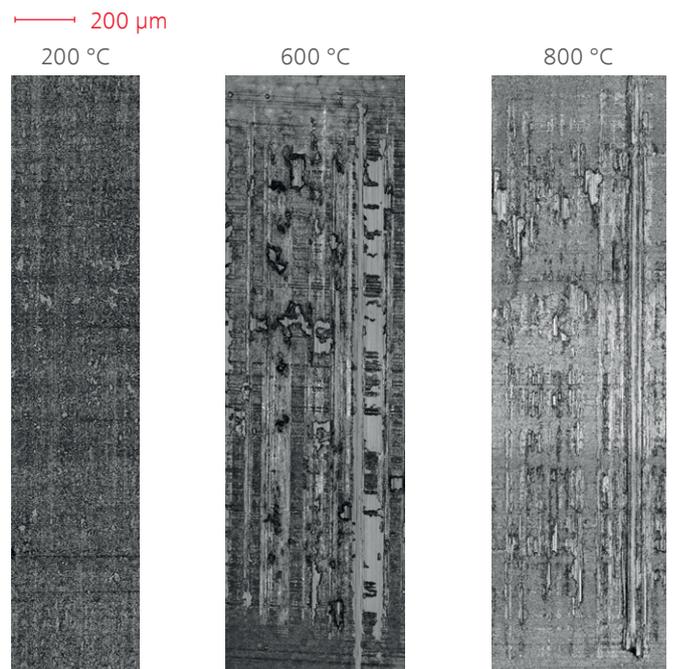
¹ Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF-Nr. 21253 N) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



2 Schematische Darstellung der dominierenden tribologischen Verschleißmechanismen für unterschiedliche Temperaturbereiche und Atmosphären.

Innerhalb des Forschungsprojektes wurden insgesamt sechs unterschiedliche Materialpaarungen tribologisch geprüft und tiefgehend analysiert, sodass die Versuchsergebnisse direkt von den Projektpartnern genutzt werden konnten. Besonders für den Wellen-Buchsen-Versuch konnte bei allen untersuchten Materialien eine gute Übereinstimmung der Verschleißmechanismen zwischen den Feldbauteilen und den Experimenten nachgewiesen werden, was dessen Eignung als anwendungsnahen Komponentenversuch unterstreicht. Beim Modellversuch konnten nur teilweise vergleichbare Mechanismen zu den Feldbauteilen identifiziert werden. Die gute Übereinstimmung der Temperaturabhängigkeit des Verschleißverhaltens und die kurzen Versuchszeiten eignen sich somit zum schnellen Werkstoffscreening und deren Vorauswahl.

Weiterhin wurde innerhalb des Projektes der Einfluss einer Abgasatmosphäre auf die stark temperaturabhängigen tribologischen Mechanismen, wie Abrasion, Adhäsion und Oxidation mit Triboschichtausbildung (Abb. 3), untersucht und es konnte kein allgemeingültiger Zusammenhang nachgewiesen werden. Sowohl Temperatur, Zusammensetzung der Atmosphäre als auch die Materialien selbst beeinflussen die ablaufenden tribochemischen Prozesse [1] und führen so zu unterschiedlichen Auswirkungen auf das Verschleißverhalten (Abb. 2). Es ist folglich unerlässlich, neue Werkstoffe gezielt in Abgasatmosphäre zu testen, wozu die neu entwickelte effiziente Qualifizierungsmethode auf Komponentenebene eingesetzt werden kann.



3 Verschleißflächen der Modellversuchskörper nach Versuchen bei unterschiedlichen Temperaturen.

Verweise

- 1 König, T.; Kimpel, T.; Kürten, D.; Kailer, A.; Dienwiebel, M., Influence of atmospheres on the friction and wear of cast iron against chromium plated steel at high temperatures, *Wear* 522 (2023) Art. 204695, 17 Seiten
<https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/440297>

Systemoptimierung geschmierter Kunststoff-Gleitsysteme

Dr. Christof Koplin

christof.koplin@iwm.fraunhofer.de

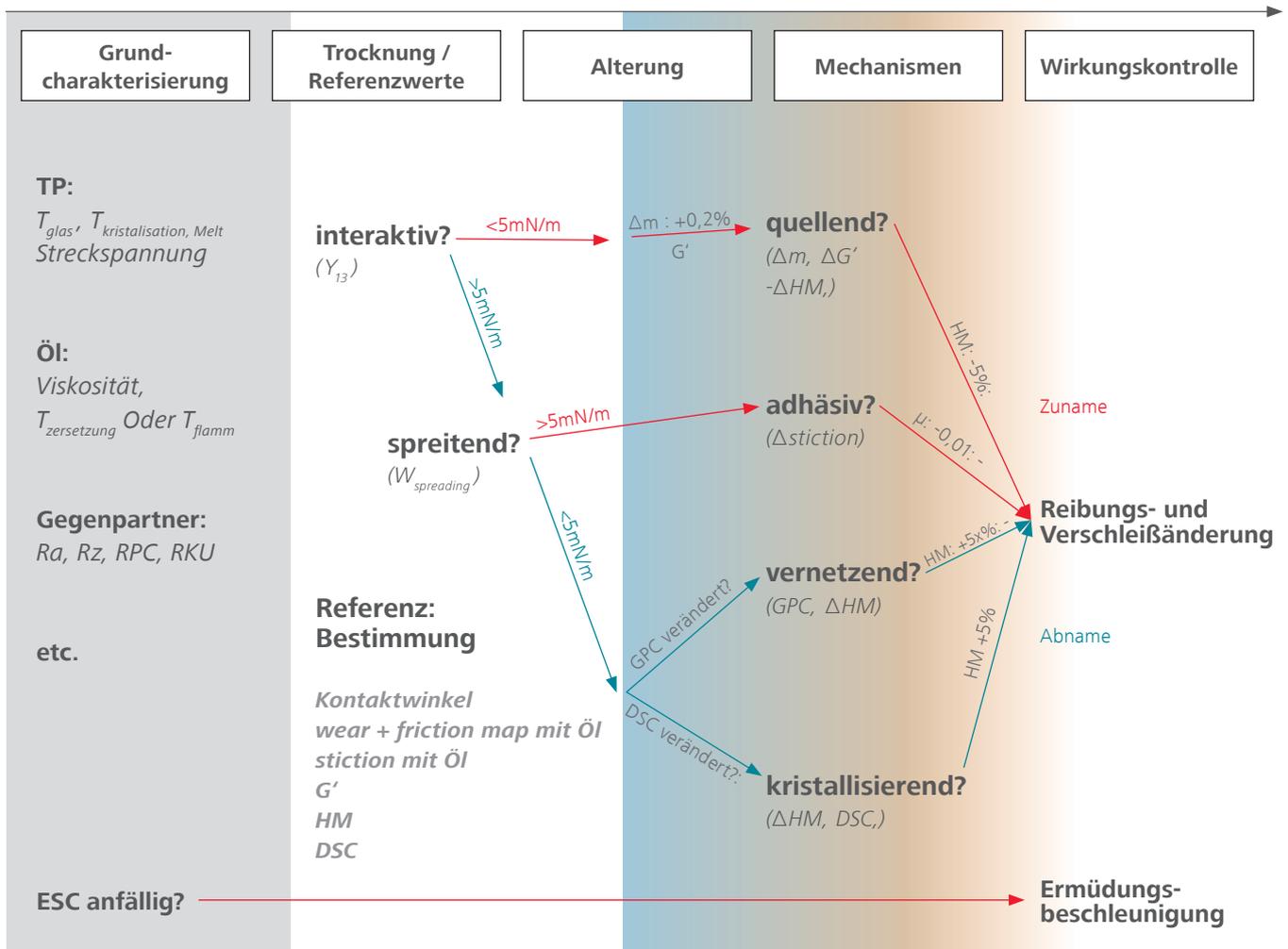
Geschmierte Kunststoffe werden zunehmend für gleitende und auch wälzende Paarungen eingesetzt. Ihre Vorteile sind immens, denn sie dämpfen Geräusche oder überbrücken Spalten und Toleranzen aufgrund ihrer großen Dehnfähigkeit. Sie sind leicht, im Spritzguss günstig in großer Stückzahl herstellbar und erzeugen geringe Trägheitsmomente. Deshalb werden zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und der Erhöhung der Kreislauffähigkeit von Stoffströmen Polymere im Vergleich zu anorganischen Werkstoffen zunehmend eingesetzt. Dies geschieht nun auch in der Antriebstechnik, da zunehmend Kleinmotoren, Stellantriebe und Werkzeuge benötigt werden. Als Dichtungswerkstoff sind sie ohnehin breit eingesetzt. Durch den Einsatz eines angepassten Systems aus Schmierung und Kunststoff kann die Reibung deutlich gesenkt oder die Lebensdauer erhöht werden, manchmal auch beides. Beides kann helfen, CO₂-Emissionen zu senken und Stoffströme zu verringern. Zur Bilanzierung der Herstellung, dem Transport und der Kreislauffähigkeit muss auch die Betrachtung des Gebrauchszyklus hinzukommen.

Der Zwang zur schematischen Bewertung der Reibungsverluste und der Lebensdauer geschmierter Kunststoffsysteme über den Gebrauchszyklus setzt nicht nur große Unternehmen unter Druck, sondern trifft über Lieferkettenvorgaben auch die kleinen und mittelständischen Unternehmen. Gleichzeitig werden nach regulatorischen Vorgaben derzeit noch eingesetzte molekulare Substanzen verboten, von denen eine zunehmende Belastung der Umwelt festgestellt wurde. Am Beispiel des diskutierten Verbots von PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen, PFAS) basierten Produkten in der EU wird deutlich, dass die Systeme einem erhöhten Substitutions- und Anpassungszwang unterliegen. Tatsächlich sollen schätzungsweise 30 Prozent der bisherigen chemischen Substanzen wegfallen.

Für gleitende und wälzende Systeme arbeitet das Fraunhofer IWM an der Bereitstellung von Handlungshilfen und Prüfrichtlinien für eine beschleunigte und zielgerichtete reibwert- und verschleißkonforme Wahl geschmierter Kunststoffsysteme, mit dem Angebot möglichst einfacher Methoden und der möglichen Ergänzung einer intensiveren Charakterisierung. Damit dies möglich ist, erstellen wir ein physikalisch-chemisch-mechanistisch motiviertes Korrelationssystem, welches die Messgrößen von Reibung, Verschleiß und Degradation betrifft.

Über die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF), der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. und der Forschungsgesellschaft Kunststoff wurde am Fraunhofer IWM anhand etablierter Kunststoffe bereits eine solche Prüfmethodik entwickelt (IGF-Vorhaben 20375 N). Basierend auf einer bekannten Grundcharakterisierung der Anbieter können über eine Kontaktwinkel-messung, Auslagerung und Wägung, Oberflächenhärteeindrücke und kurze Standardtests von Reibung und Verschleiß Systeme in ihrer Langzeitneigung unterschieden werden. Die zugrunde liegende mechanistische Beschreibung wurde über tiefergehende Charakterisierung und Beschreibung veröffentlicht [1].

Gleicherweise wurde die Rutschhemmung von Schuhsohlen untersucht und die Ermüdungsneigung von Dichtungen betrachtet. Für solche Systeme wird ebenso eine einfache Prüfrichtlinie auf Basis der elastischen Länge der Grenzfläche vorbereitet, die wiederum mit Kontaktwinkel-, Masseaufnahme- und Shorehärte-Messungen funktioniert. Je nachdem wie das Verhältnis aus dominanten Strukturabständen und der elastischen Länge erhalten wird, sinken oder steigen Reibung [2] und Ermüdungsver-schleiß. Eine Überführung in die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) wird in naher Zukunft angestrebt.



Ablauf der Evaluation des besten Systems am Beispiel Thermoplaste in geschmierten Antriebsystemen. Die analytische Methode hilft dabei, aus sehr vielen verschiedenen möglichen Kombinationen effizient zu einer Priorisierung zu kommen, anstatt nur wenige Systeme in praxisnahen Tests evaluieren zu müssen. Mit Kompatibilitätstests und immer weiteren Ebenen der einfachen Tauglichkeitsüberprüfung werden priorisierte Systeme in kurzer Zeit evaluiert.

Verweise

- 1 Koplin, C.; Oehler, H.; Praß, O.; Schlüter, B.; Alig, I.; Jaeger, R., Wear and the transition from static to mixed lubricated friction of sorption or spreading dominated metal-thermoplastic contacts, Lubricants 10/5 (2022) Art. 93, 21 Seiten. <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/4178033>
- 2 Koplin, C.; Weißer, D.F.; Fromm, A.; Deckert, M.H., Stiction and friction of nano- and microtextured liquid silicon rubber surface formed by injection molding, Applied Mechanics 3/4 (2022) 1270-1287, <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/430952>

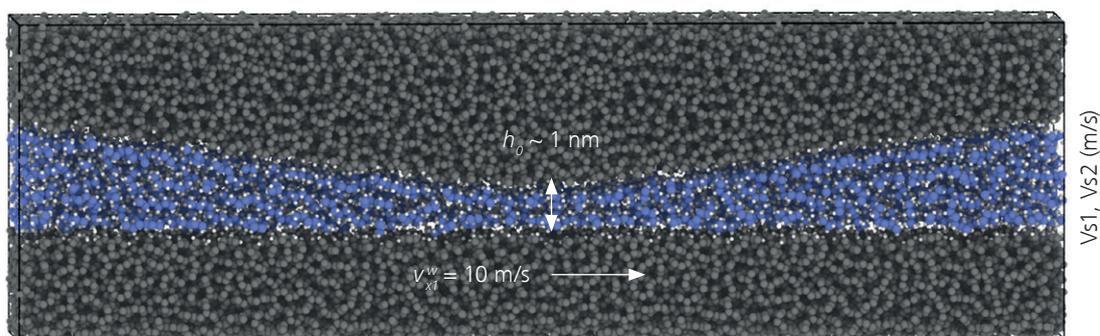
Grenzreibung berechenbar machen – Reynoldsgleichung mit nichtlinearem Wandschlupfgesetz

Prof. Dr. Michael Moseler

michael.moseler@iwm.fraunhofer.de

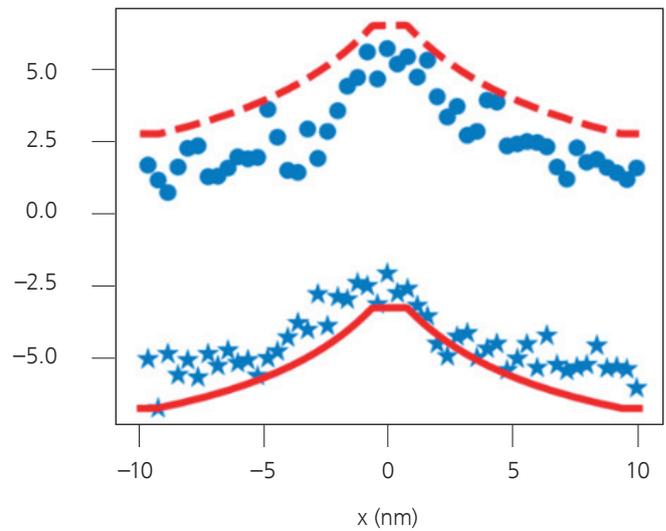
Eine häufige Frage unserer Industriepartner lautet, ob die Reibung zwischen zwei Materialien, die durch ein Fluid geschmiert sind, zu gegebenem Druck und Temperatur berechnet werden kann. Die Antwort auf diese Frage hängt davon ab, welches Schmierungsregime angestrebt wird. Soll ein Tribosystem unter elastohydrodynamischen Bedingungen betrieben werden, also mit einem Schmierfilm, dessen Dicke (h) um einiges größer ist als die Rauheiten (R) der beiden reibenden Oberflächen, ist die Reibung mit vertretbarem Aufwand mittels eines kontinuumsmechanischen Ansatzes mit guter Genauigkeit vorhersagbar. Dafür muss die Reynoldsgleichung (eine dimensionsreduzierte Variante der Navier-Stokes-Gleichungen) für den Schmierstoff, die Wärmeleitgleichung für das Gesamtsystem und die linearelastischen Gleichungen für die beiden kontaktierenden Grenzflächen gelöst werden. Dafür benötigt werden lediglich die E-Module und Poissonzahlen der Reibpartner, die Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten aller beteiligten Werkstoffe und akkurate Konstitutivgesetze für die Dichte des Fluids und dessen dynamischen Viskosität für ein Parameterfeld bestehend aus Druck, Temperatur und lokaler Scherrate im Fluid. Die Vorgehensweise ist seit Jahrzehnten bekannt und wird von großen Unternehmen oft im eigenen Haus praktiziert.

Strebt jedoch die Dicke die Größenordnung der Rauheit an, wird das Tribosystem in der Grenzreibung betrieben (d. h. viele der Asperitenkontakte werden nur noch durch wenige Monolagen des Schmierstoffs getrennt). In diesem Fall wird in den Kontinuumsrechnungen für die »trockenen« Kontaktstellen eine grob abgeschätzte (empirische) Reibzahl verwendet. Bisher musste daher die Frage nach der Berechenbarkeit der Reibung verneint werden. Mit diesem Sachstand wollten sich vier Partnerfirmen des MikroTribologieCentrums μ TC, einem Zusammenschluss zwischen dem Fraunhofer IWM und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT), nicht zufriedengeben und beauftragten ein dreijähriges Vertiefungsprojekt, das klären sollte, ab welcher Dicke die Kontinuumsmechanik eigentlich versagt und ob diese gegebenenfalls so erweitert werden könnte, dass man den Fall noch quantitativ berechenbar machen kann.



1 Der Kontakt einer DLC-Rauheitsspitze mit einer DLC-Oberfläche unter PAO-Schmierung.

2 Die am unteren (blaue Punkte) und oberen Reibpartner (blaue Sterne) auftretenden Wandschlupfgeschwindigkeiten (rechts). Die roten Kurven zeigen den Vergleich mit der Reynoldstheorie.



Dazu wurde im Rahmen des Projektes die Molekulardynamik eines Kohlenwasserstoffschmierstoffs in einer Asperitenkontaktgeometrie berechnet (zum Beispiel zwei Oberflächen aus diamantähnlichem Kohlenstoff (DLC), die mit einem Polyalphaolefin-Grundöl (PAO) geschmiert werden, s. Abb. 1) und mit der Lösung der Reynoldsgleichung verglichen. Für Drücke zwischen den Reibpartnern unterhalb von 0,4 Gigapascal und Schmierstathöhen größer als 5 Nanometer stimmt die Reynoldsbeschreibung gut mit den Molekulardynamik-Referenzrechnungen überein, vorausgesetzt man nutzt ein exaktes Konstitutivgesetz für die Viskosität des Schmierstoffs. Andererseits wurde gezeigt, dass für hohe Drücke von ca. 1 Gigapascal und kleinen Schmierstathöhen von ca. 1 Nanometer ein zusätzliches nichtlineares Wandschlupfgesetz benötigt wird, das die Wandschlupfgeschwindigkeiten mit den lokalen Scherspannungen an der Fest-Flüssig-Grenzfläche in Beziehung setzt, um auch hier eine quantitative Übereinstimmung zu erzielen (s. die Wandschlupfgeschwindigkeiten an der unteren und oberen Wand in Abb. 2).

Diese Ergebnisse, die in der renommierten Fachzeitschrift *Science Advances*¹ jüngst veröffentlicht wurden, zeigen damit einen innovativen Weg zur nicht-empirischen prädiktiven Kontinuumsmodellierung von hochbelasteten tribologischen Kontakten unter Grenzschmierbedingungen auf – Forschende des MikroTribologie Centrums μ TC können also nun auch die Grenzreibung berechenbar machen. Allerdings wird zur Ermittlung des Wandschlupfgesetzes die atomare Struktur der reibenden Oberflächen benötigt – eine Information, die einer tiefgreifenden experimentellen Analyse bedarf.

Diese Erkenntnisse werden bereits in Folgeprojekten genutzt, um lokale Reibwerte in Realanwendungen (etwa in einem FVA-Projekt zu Wälzlagern) vorherzusagen und Partner mit entsprechender Reynoldskompetenz zur Verfügung zu stellen. Diese können dann, aufbauend auf unseren Konstitutivgesetzen, Prüfstands- und Bauteilsimulationen durchführen, ohne etwaige empirische Parameter in herkömmlichen Konstitutivgesetzen erraten zu müssen. Damit ist ein wichtiger Schritt in Richtung wissenschaftsbasiertes Schmierstoff-, Oberflächen- und Bauteildesign vollzogen worden, der sowohl für Schmierstoffhersteller, Beschichter als auch für Lager- und Getriebehersteller äußerst interessant sein wird.

Verweise

¹ Codrignani, A.; Peeters, S.; Holey, H.; Stief, F.; Savio, D.; Pastewka, L.; Moras, G.; Falk, K.; Moseler, M., Towards a continuum description of lubrication in highly pressurized nanometer-wide constrictions: The importance of accurate slip laws, *Science Advances* 9/48 (2023) Art. eadi264, 17 Seiten <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/457646>

Schaltbare Viskosität in der Blechumformung

Dr. Dominic Linsler

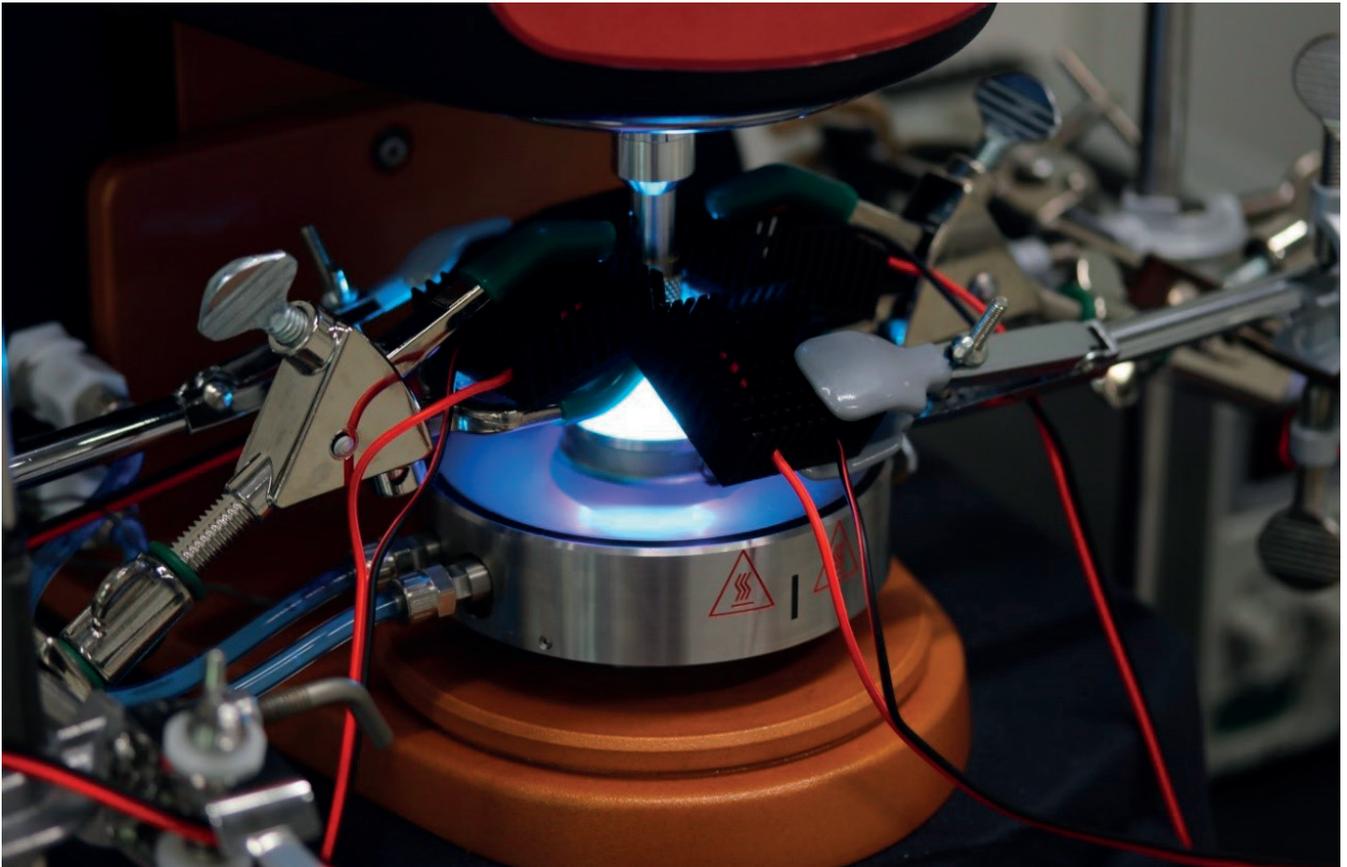
dominic.linsler@iwf.fraunhofer.de

Blechumformung durch Tiefziehen ist einer der wichtigsten Umformprozesse in der Industrie, der vor allem in der Großserienproduktion wegen geringer laufender Kosten eingesetzt wird. Durch höhere Anforderungen an Umformprodukte und kleinere Losgrößen kommt der kontrollierten Prozessführung eine immer größere Bedeutung zu. Diese kann durch aktive Beeinflussung der Reibung zwischen Blech und Werkzeug deutlich verbessert werden, da das Umformergebnis in mehrerlei Hinsicht – Falten, Rissbildung oder Rückfederung – vom Materialfluss abhängt. Die Kompensation variabler Prozessbedingungen, wie Temperaturänderungen beim Hochlauf des Prozesses, kann durch die Anpassung der Viskosität mittels photoresponsiven Schmierstoff erfolgen. Stand der Technik ist die Beölung der Coils nach dem Walzen und in manchen Fällen ein zusätzlicher Auftrag von Spot-lubricants vor der Umformung.

Im Fraunhofer-Forschungscluster »Programmierbare Materialien CPM¹« wurden verschiedene Schmierstoffsysteme charakterisiert, die für eine photoresponsive Kontrolle der Reibung infrage kommen. Die entsprechenden Effekte konnten mit Spiropyranen und anthracenfunktionalisierten Molekülen nachgewiesen werden. Die Anthracenfunktionalisierung von Siloxanen, Polyalkylenglykolen oder Fettsäuren bewirkt unter Einstrahlung von ultraviolettem Licht eine reversible Vernetzung der Schmierstoffmoleküle, die zu einer Viskositätssteigerung und damit zu einer Reibungsreduktion im Mischreibungsregime führt.

Diese reversible Viskositätsänderung wird im Rheometer quantifiziert, wofür ein auf die Fragestellung angepasster Aufbau mit einer UV-transparenten Platte verwendet wird. Der zu untersuchende Schmierstoff wird bestrahlt und die Viskositätsänderung in-situ gemessen (Abb. 1). Die Viskositätsänderung im Rheometer um einen Faktor 10 benötigt mehrere Minuten. Auf Blechen ist die Schmierstoffmenge mit zum Teil weniger als einem Gramm pro Quadratmeter deutlich geringer. Daher können Schaltzeiten im Sekundenbereich erreicht werden. Um den Schalteffekt zu optimieren, werden Versuche mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien, Kettenlängenverteilungen und Belichtungsintensitäten durchgeführt. Eine Schwäche des Systems der Anthracenfunktionalisierung ist, dass die Schaltvorgänge mit zunehmender Zyklenzahl mehr Zeit benötigen und wegen Degradationsvorgängen auf wenige Schaltzyklen begrenzt sind. Dieser Nachteil spielt jedoch im Anwendungsfall Blechumformung keine Rolle, da nur 2–3 Zyklen benötigt werden. Die Änderung der Viskosität des Schmierstoffs auf dem Blech wirkt sich signifikant auf die Reibungskräfte im Näpfchenziehversuch und im Streifenzugversuch aus.

¹ in dem die Institute Fraunhofer IWM, IAP, IWU, ICT und IBP beteiligt sind



1 Rheometeraufbau mit UV-LEDs. Der anthracenfunktionalisierte Schmierstoff leuchtet unter UV-Einstrahlung blau.

Für den industriellen Einsatz muss der Schmierstoff entlang der gesamten Prozesskette funktionieren. Diese beginnt mit dem Walzen und dem anschließenden Aufwickeln zum Coil. Zuvor wird das Blech beölt; dadurch wird ein Korrosionsschutz erreicht. Trotz der geringen Schmierstoffmengen und bestimmter, ablaufhemmender Maßnahmen kommt es während Lagerung und Transport der Coils zu einer Schmierstoffumverteilung, die sich negativ auf die Umformprozesse auswirkt, da die Reibungseigenschaften des Coils inhomogen werden. Hier liegt eine Stärke des Schmierstoffs mit schaltbarer Viskosität: Er kann niedrigviskos dünn und homogen aufgetragen werden; anschließend wird der Schmierstoff vernetzt, so dass die angestiegene Viskosität das Ablaufverhalten hemmt. Im Presswerk kann dann in einem weiteren Bestrahlungsschritt lokal oder auch über das ganze Blech hinweg die Reibung an die Prozessgegebenheiten angepasst werden. Neben der Verbesserung der Prozessstabilität können so auch Prozessgrenzen verschoben werden. Nach der Umformung werden die Blechbauteile gefügt und lackiert. Auch hier muss eine Verträglichkeit des Schmierstoffs zu den Klebe- und Lackierprozessen gegeben sein. Bei funktionierender Rückschaltung kann die Abreinigung einfacher funktionieren.

Schmierstoffherstellern und Maschinenbauern wird damit ein neuer Ansatz an die Hand gegeben, mit dem die Prozessstabilität verbessert wird, indem die veränderten Randbedingungen durch eine aktive Kontrolle der Viskosität kompensiert werden können. Die erhöhte Prozessstabilität wirkt sich auf eine Verringerung der Ausschussquote und damit auf Kosteneinsparungen und eine Erhöhung der Ressourceneffizienz aus. Von der Schmierstoffentwicklung und -herstellung im Labor- und Technikumsmaßstab bis hin zu Versuchen an Pressen kann das Forschungscluster ein breites Spektrum des Umformprozesses adressieren. Das Fraunhofer IWM kann mit Schmierstoffcharakterisierung, tribologischen Modellversuchen an Mikrotribometer und Streifenzugmaschine, der Simulation des Umformvorgangs und der Erstellung von Reibungsmodellen auf der Mikroskala zu einer Weiterentwicklung der Umformtechnik beitragen.

Effiziente Kalibrierung von Materialmodellen für Kupferwerkstoffe zur Bauteilbewertung mittels maschinellem Lernen

Dr. Alexander Butz, Dr. Lukas Morand

alexander.butz@iwm.fraunhofer.de, lukas.morand@iwm.fraunhofer.de

Die Bewertung des Langzeitverhaltens von Steckverbindern und elektrischen Kontakten aus Kupferwerkstoffen unter thermischer und mechanischer Beanspruchung gewinnt für die Bauteilauslegung zunehmend an Bedeutung. Um das Materialverhalten von Kupferwerkstoffen hinreichend genau zu bestimmen, müssen neben quasistatischen Zugversuchen auch vergleichsweise aufwendige uniaxiale Langzeitrelaxationsversuche durchgeführt werden. Ziel des gemeinsamen IGF-Forschungsvorhabens (21114N) des Fraunhofer IWM und des fem Forschungsinstituts war daher die Entwicklung eines Cantilever-Versuchsstands, der eine kostengünstigere Messung des Langzeitverhaltens ermöglicht, und die Entwicklung einer Strategie zur effizienten Ermittlung von Materialparametern für CAE-Anwendungen auf Basis der verfügbaren Versuchsdaten.

Maschinelles Lernen für die effiziente Ermittlung von Materialparametern

Beim weiterentwickelten Cantilever-Versuch wird eine einseitig eingespannte Probe aus Blechwerkstoff ausgelenkt und der Kraftabfall über die Zeit gemessen. Obwohl das Messprinzip einfach ist, stellt die Ermittlung von Parametern, beispielsweise für das am Fraunhofer IWM entwickelte Materialmodell, zur Beschreibung des Relaxationsverhaltens eine Herausforderung dar. Diese besteht darin, dass die zeitliche und räumliche Spannungs- und Dehnungsverteilung in der Probe nicht konstant ist, und die experimentelle Kraft-Zeit-Kurve nicht unmittelbar für die Parameterbestimmung nutzbar ist. Daher musste eine neue Vorgehensweise

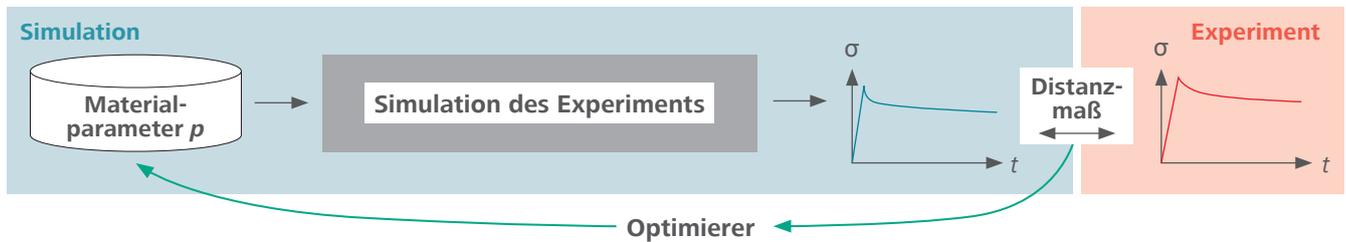
entwickelt und validiert werden, um die Cantilever-Versuche für die Ermittlung von Materialkennwerten und für die Anpassung eines Materialmodells zugänglich zu machen. Für das Erreichen des Projektziels wurde ein neuartiger Cantilever-Versuchsstand am fem Forschungsinstitut konzipiert und Messungen an unterschiedlichen Kupferwerkstoffen durchgeführt. Seitens des Fraunhofer IWM wurde eine auf maschinellem Lernen basierende Vorgehensweise entwickelt, mit der Materialparameter effizient auf Basis von Messdaten aus dem Cantilever-Versuch ermittelt werden können. Hierzu wurde ein Simulationsmodell des Versuchsstands mit der Methode der Finiten Elemente erstellt, auf Basis dessen Trainingsdaten für die Erzeugung eines maschinellen Lernmodells generiert wurden. Ziel war es, das Verhalten der numerischen Simulation zu erlernen, um das aufwendige Finite-Elemente-Simulationsmodell in klassischen optimierungsbasierten Vorgehensweisen zur Materialparameteranpassung zu ersetzen und diese zu beschleunigen.

Kupferwerkstoffe in CAE-Anwendungen realitätsnah abbilden

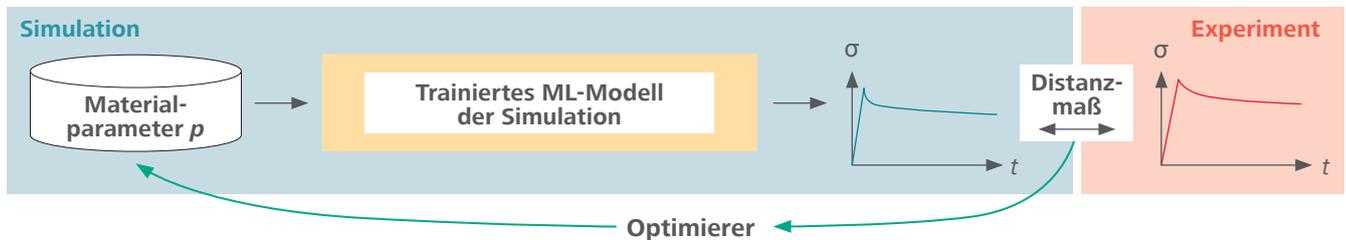
Es konnte gezeigt werden, dass Materialparameter mit der am Fraunhofer IWM entwickelten, auf maschinellem Lernen basierenden Herangehensweise erfolgreich aus den Messdaten der Cantilever-Versuche ermittelt werden können. Weiterhin wurde auf Basis von synthetischen Daten gezeigt, dass Materialparameter, die mit Daten aus Cantilever-Versuchen ermittelt wurden, die Spannungs-Zeit-Kurven aus uniaxialen Langzeitrelaxationsversuchen korrekt wiedergeben. Der Vorteil der dabei verwendeten Herangehensweise zur Parameterermittlung ist, dass das zeitaufwendige Erzeugen von Daten und das Training des verwendeten maschinellen Lernmodells nur einmalig durchgeführt werden muss und sich die Methode danach auf beliebige Kupferwerkstoffe – innerhalb des trainierten Bereichs – einsetzen lässt.

Durch die Verwendung des maschinellen Lernmodells kann eine Materialparameteranpassung auf Basis von Cantilever-Versuchsdaten innerhalb weniger Stunden oder Minuten durchgeführt werden, wohingegen die Identifikation auf Basis der numerischen Simulation mehrere Tage dauert. Im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik ermöglichen die erzielten Ergebnisse eine kostengünstigere Vorgehensweise zur Ermittlung von Materialparametern für CAE-Anwendungen, insbesondere für die Beschreibung des Relaxationsverhaltens. Für die Anwendung steht damit ein Werkzeug zur effizienten Materialmodellkalibrierung für die Simulation von Kupferwerkstoffen zur Verfügung, auf Grundlage dessen die Bewertung von Bauteilen detailliert durchgeführt werden kann. Eine Übertragung der Vorgehensweise auf weitere metallische Werkstoffe mit ausgeprägtem Relaxationsverhalten ist grundsätzlich möglich. Das Fraunhofer IWM unterstützt seine Kunden damit, geeignete maschinelle Lernmodelle für spezifische Problemstellungen zu erstellen. Ein zusätzliches Angebot besteht darin, Materialmodelle für Kunden zu kalibrieren und anschließend Bauteilsimulationen und Bewertungen durchzuführen.

Klassischer Optimierungsansatz



Beschleunigte Optimierung



¹ Bei der beschleunigten Optimierung wird die aufwendige und vielfach zu wiederholende Simulation durch das deutlich schnelle ML-Modell ersetzt.

Quantensensorik für die Materialprüfung

Dr. Simon Philipp

simon.philipp@iwmm.fraunhofer.de

Bei der Untersuchung von Versagensvorgängen in Materialien ist der in Zug- und Ermüdungsversuchen gemessene Kraftabfall infolge von Materialschädigungen oft vergleichsweise klein, was die Versuchsdauer lang und kostspielig werden lässt. Diesen Prozess abzukürzen und für Anwendungen außerhalb des Labors nutzbar zu machen, ist entlang der gesamten Prozesskette von enormem Vorteil. Am Fraunhofer IWM wird daher ein magnetisches Prüfverfahren entwickelt, welches das Magnetfeld einer Mikrozugprobe unter Belastung detektiert und zur Schadensanalyse heranzieht. Genaue Kenntnis über die Beschaffenheit eines Magnetfeldes in der Nähe einer spezifischen Schädigung erlaubt es, das Versagen von ferromagnetischen Bauteilen vorherzusagen, bevor die Materialien erkennbare Risse aufweisen. Dies spielt besonders bei Materialien in sicherheitskritischen Bauteilen eine wesentliche Rolle.

Im Gegensatz zu makroskopischen Proben bieten Mikroproben den Vorteil, dass unter mechanischer Belastung lokale Veränderungen viel genauer bestimmt werden können. Die Magnetfelder einer Mikrozugprobe sind jedoch erheblich kleiner, sodass gängige Sensoren nicht in der Lage sind, diese kleinen Änderungen festzustellen. Hier kommen hochsensitive Quantensensoren zum Einsatz – genauer handelt es sich dabei um optisch gepumpte Magnetometer (OPM), welche auf der Interaktion der freien Elektronen eines atomaren Dampfes aus Rubidiumatomen mit dem Magnetfeld beruhen. Für die Magnetfeldmessung werden die Elektronen mithilfe eines zirkulär polarisierten Lasers kohärent ausgerichtet, was den Dampf für den Laser transparent

erscheinen lässt. Ein äußeres Magnetfeld induziert eine kollektive Präzession der Elektronen um die Magnetfeldrichtung mit der Larmorfrequenz, welche vom Betrag des Magnetfeldes abhängt. Die Präzessionsbewegung moduliert nun die Transparenz des Dampfes, was sich mittels Photodetektor hochpräzise detektieren lässt. Die Sensoren erreichen durch dieses Verfahren bei Raumtemperatur Sensitivitäten, die sonst nur bei supraleitenden Sensoren bei Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt zu finden sind.

Das neue Testverfahren basiert auf dem inversen magnetostriktiven Effekt: Dabei wird die Kopplung der magnetischen Momente in der Probe an eine mechanische Verformung der Probengeometrie ausgenutzt, welche sich bei positiven Dehnraten entlang der Hauptrichtung der angelegten mechanischen Spannung orientieren und so das magnetische Streufeld außerhalb des Probekörpers modifizieren. Werden in der Materialprobe Schädigungen erzeugt, agieren diese energetisch als Pinningzentren für magnetische Strukturen wie Domänenwände, welche ein Zurückkehren des magnetischen Zustandes in die Ausgangssituation verhindern, und so Auskunft über Schädigungen im Material beinhalten. Bei zyklischer Belastung können so magneto-mechanische Hysteresen gemessen und mit den Spannungs-Dehnungs-Kurven verglichen werden. Dabei wird ersichtlich, dass das magnetische Signal deutlich sensitiver auf Ermüdungseffekte reagiert als das Kraftsignal.

Fraunhofer-Leitprojekt zur Erforschung von Quantensensoren

Im Rahmen des 2023 abgeschlossenen Fraunhofer-Leitprojektes »QMag« wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPM ein Prüfstand entwickelt und qualifiziert, der auf einer mechanischen Mikrozugapparatur basiert. Diese wurde um ein OPM und eine magnetische Abschirmung, die äußere Einflüsse wie das Erdmagnetfeld oder Felder von elektrischen Leitungen im Labor unterdrückt, ergänzt. Dann wurden kraftkontrollierte hochzyklische Ermüdungsversuche mit positivem Lastverhältnis an Proben aus Elektroblech und reinem Eisen durchgeführt. Dabei wurde, unabhängig vom Probenmaterial, ein reproduzierbares Verhalten des magnetischen Signals bereits bei Zyklenzahlen festgestellt, in denen noch keine strukturellen Veränderungen der Probe oder ein wesentlicher Abfall im Kraftsignal ersichtlich war.

Zum besseren Verständnis für die Entwicklung des magnetischen Signals wurden in Kooperation mit dem IFW Dresden Magneto-optische Kerr-Effekt (MOKE)-Aufnahmen gemacht, welche die magnetischen Domänen an der Probenoberfläche während der mechanischen Belastung abbilden. Hier konnten erste Erkenntnisse über den Effekt einer Schadensakkumulation auf die magnetische Domänenstruktur gewonnen werden. Die Ergebnisse bestätigen das generelle Verhalten der magneto-mechanischen Hysteresen, geben jedoch lediglich Aufschluss über die Magnetisierung, nicht das Magnetfeld. Daher wurden gemeinsam mit dem Fraunhofer IAF orts aufgelöste Magnetfeldscans mithilfe so genannter Stickstoffvakanz-Zentren in Diamant durchgeführt, mit denen hoch aufgelöste Informationen über verdächtige Bereiche gewonnen wurden. Untersuchungen an ermüdeten Elektroblechproben haben eine klare Korrelation des Magnetfeldes mit dem Domänenmuster aus den MOKE-Mikroskopie-Bildern ermöglicht. Dabei ist ein wesentlicher Schritt im Transfer von Quantentechnologien in die industrielle Anwendung gelungen, welcher bereits Anklang mit Anwendern aus der Prüftechnik, Automobilindustrie und Metallindustrie findet.



Zug- und Ermüdungsaufbau in der im Projekt »QMag« entstandenen magnetischen Abschirmung.

Höchsteffiziente Untersuchung für die Laser Powder Bed Fusion von Polymeren (PBF-LB/P)

Dr. Bastien Dietemann

bastien.dietemann@iwf.fraunhofer.de

Die additive Herstellung von Werkzeugen mit pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen »Laser Powder Bed Fusion« bietet zahlreiche Vorteile: Sie ist wirtschaftlich, präzise und ermöglicht individuelle Lösungen. Die Identifikation der optimalen Prozessparameter, wie die Geschwindigkeit oder die Leistung des Lasers, ist jedoch äußerst anspruchsvoll. Eine Untersuchung aller Parameter durch Experimente oder Simulationen ist oft zeitaufwendig und kostspielig. In einer zunehmend wettbewerbsintensiven Branche stehen Anwender*innen dieser Technologie vor der Herausforderung, hochwertige, langlebige Produkte herzustellen und gleichzeitig Zeit und Ressourcen zu sparen. Um diesen Schwierigkeiten entgegenzuwirken, wurde am Fraunhofer IWM ein numerisches Modell entwickelt, das den Druckprozess über mehrere Schichten hinweg beschreibt und dabei zahlreiche Simulationsmethoden kombiniert – somit kann die gesamte Prozesskette simuliert werden. Experimentell lässt sich bisher nur das Endergebnis untersuchen; das Simulationsverfahren bietet dahingegen den Vorteil einer Echtzeitanalyse, die während jedes einzelnen Prozessschritts Einblick in die Veränderungen im Werkstoff gewährt. Das Modell ermöglicht daher die Erstellung akkurater Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen.

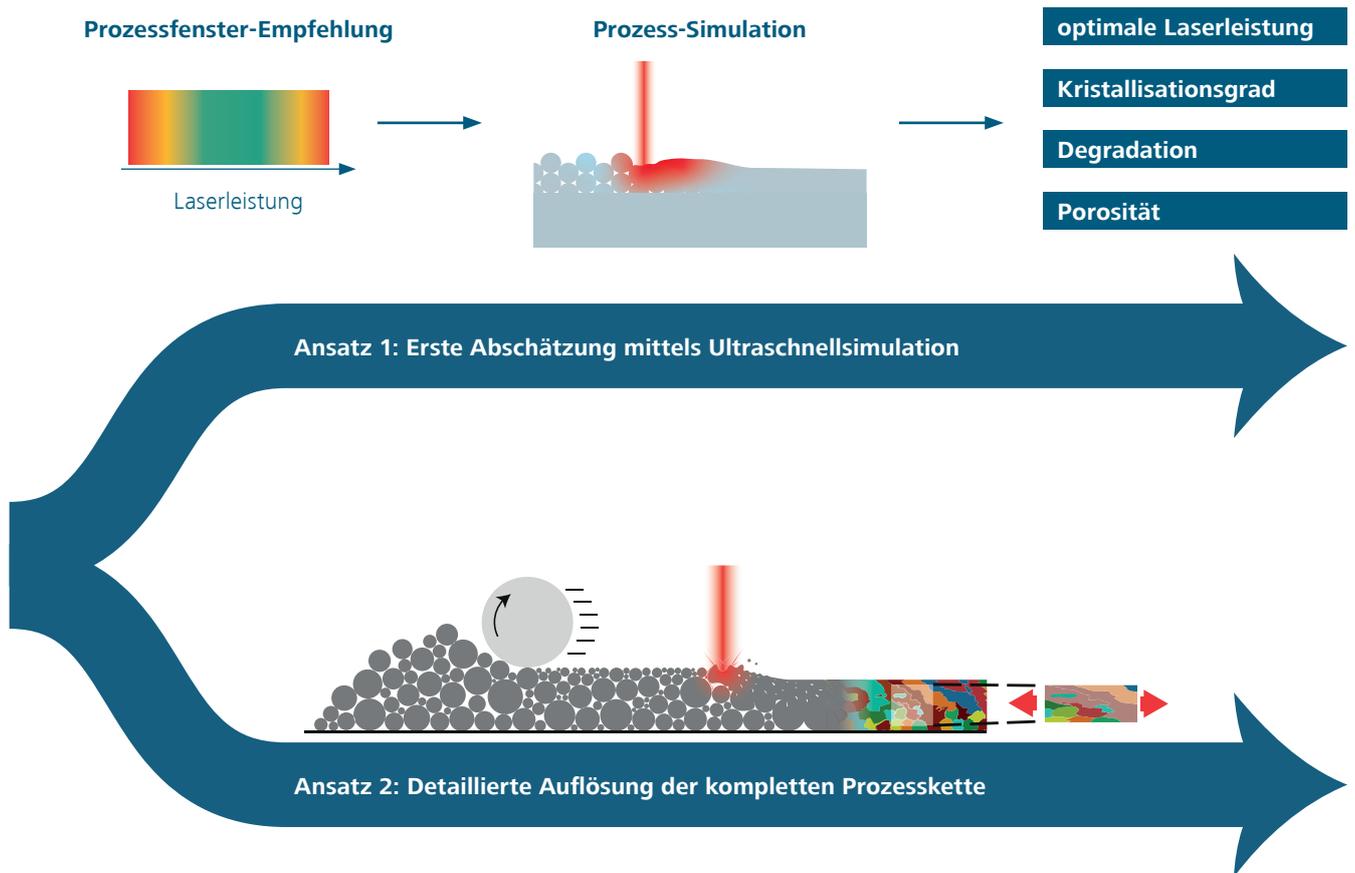
Ermittlung von wichtigen Kennzahlen mittels schneller Simulation

Die erfolgreiche Forschungsarbeit am Fraunhofer IWM führte zur Bereitstellung von numerischen Tools zur Beurteilung des Einflusses von Materialeigenschaften und Prozessparameter auf wichtige Produkteigenschaften. Diese Eigenschaften konnten schon vorher über die Simulation ermittelt werden, aber nur wenn genug gedruckte Lagen gerechnet wurden. Hier liegt im Moment die Einschränkung vieler Modelle, da mit aktuell

vorhandenen Rechenkapazitäten diese Betrachtung zeitintensiv ist. Eine umfassende Parameterstudie ist mit diesen Modellen daher unattraktiv. Unser Projektansatz umfasste daher die Entwicklung eines effizienten Modells, mittels dessen der Druckprozess über mehrere Schichten hinweg beschrieben werden kann. Dabei wird die gesamte physikalische Dynamik des Prozesses in nur einer Dimension abgebildet. Dieser Ansatz ermöglicht eine Simulation in nur wenigen Sekunden und liefert dabei eine aussagekräftige Beschreibung des Prozesses. Erst dadurch wird das Testen umfangreicher Kombinationen an Parametern möglich.

Bereitstellung der Modelle über Online-Tools

Aus der Forschungsarbeit sind gleich zwei leistungsstarke Online-Tools hervorgegangen, die von jedem Gerät mit Internetzugang aus zugänglich sind. Das erste Tool ermöglicht es, die optimale Laserleistung für ein bestimmtes Material zu ermitteln – bei zu geringer Leistung schmilzt das Polymer nicht, bei zu hoher Leistung degradiert es. Dieses Tool sollte zu Beginn zur Rate genommen werden, um die Parameterstudie direkt in einem erfolgreichen Druckregime ausführen zu können. Unsere Empfehlungen zur Laserleistung basieren dabei auf umfangreichen Forschungsergebnissen und Experimenten von Projektpartnern. Das zweite Tool ist besagtes Modell, welches die Physik des PBF-LB/P Prozesses simuliert. Nutzer*innen können hier relevanten Materialkennwerte und Prozessparameter eingeben und eigenständig Simulationen durchführen.



¹ Der LPBF-Prozess kann über zwei Ansätze untersucht werden. Der erste Ansatz nutzt die in diesem Bericht erwähnten Werkzeuge, um eine initiale Einschätzung der idealen Laserleistung zu ermitteln und darauf basierend den Kristallisationsgrad, die Degradation sowie die Porosität abzuschätzen. Sollten diese Erkenntnisse nicht genügen, besteht als zweiter Ansatz die Möglichkeit, detaillierte Simulationen entlang der gesamten Prozesskette durchzuführen.

Schnelles Modell – hochqualitative Ergebnisse kostenfrei zur Verfügung gestellt

Beide Webapplikationen stehen kostenfrei zur Verfügung und sind insbesondere für Unternehmen von Interesse, die bereits über LPBF-Maschinen verfügen und den Einsatz neuer Materialsysteme in Erwägung ziehen. Unsere Tools ermöglichen beispielsweise die Untersuchung, ob das Polymer degradieren wird oder wie hoch der Kristallinitätsgrad im Bauteil ist. Des Weiteren bietet es Größen wie die Oberflächentemperatur oder die allgemeine Dichte, über die eine experimentelle Validierung möglich ist. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass es sich bei diesen Tools um vereinfachte Modelle handelt, die für Geschwindigkeit optimiert wurden. Eine Abschätzung von Eigenschaften wie Lebensdauer oder mechanische Eigenschaften bedarf einer detaillierteren Simulation. In diesem Falle kann im Rahmen einer Zusammenarbeit auf unsere Expertise in den Bereichen Pulvertechnologie und Partikelsimulation zurückgegriffen werden.



Mit diesem Tool können Sie die optimale Laserleistung identifizieren.



Hier können Sie eine schnelle Prozesssimulation durchführen.

Digitales Abonnement für fortschrittliche Werkstoffmodelle

Dr. Mario Metzger, Dr. Christoph Schweizer

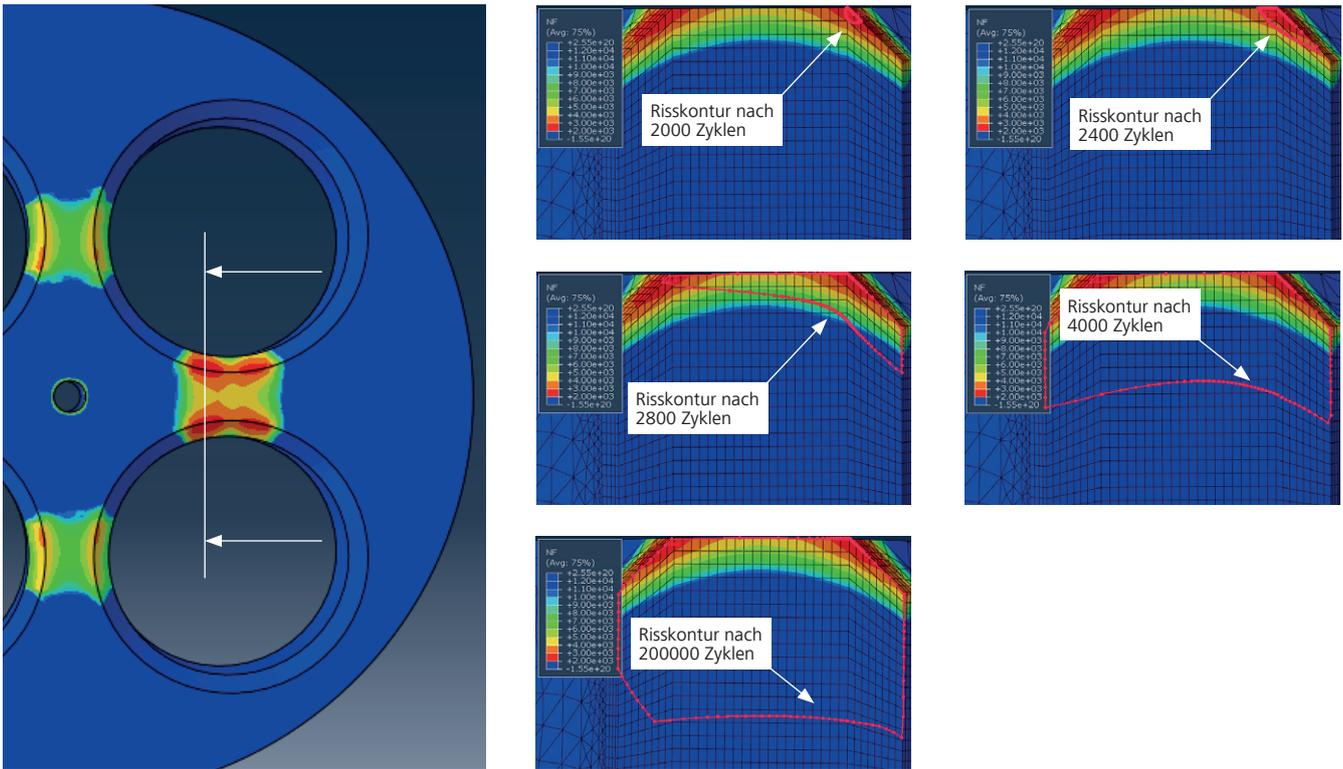
mario.metzger@iwm.fraunhofer.de, christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

Zahlreiche Hochtemperaturkomponenten unterliegen im Betrieb einer komplexen thermischen und mechanischen Belastung, wobei die mechanische Belastung ganz oder teilweise auf thermisch induzierte Spannungen infolge einer inhomogenen Temperaturverteilung im Bauteil zurückzuführen ist. Durch häufiges An- und Abfahren einer Anlage werden die Komponenten entsprechend einer thermomechanischen Ermüdungsbeanspruchung (engl.: »thermomechanical fatigue«, TMF) ausgesetzt. Sind die Belastungen hoch genug, bilden sich Oberflächenrisse, die in das Bauteil hineinwachsen und zum Ausfall der Komponente führen können. Vor diesem Hintergrund fallen beim Bauteildesign und dessen Optimierung in den verschiedensten Branchen teure und zeitaufwendige Labor- und Feldversuche an. Rechnerische Methoden wie die Finite-Elemente-Methode erlauben es, Bauteile kostengünstig und zeiteffizient unter beliebigen Randbedingungen zu analysieren und zu optimieren, und tragen oft signifikant zu einem besseren Bauteilverständnis bei. Neben den Kenntnissen zur Bauteilbelastung sind die zugrundeliegenden Werkstoffgesetze unabdingbare Voraussetzung für qualitativ hochwertige Analysen und fundierte Aussagen.

An dieser Stelle bietet ein am Fraunhofer IWM entwickeltes digitales Abonnement für fortschrittliche Werkstoffmodelle die Lösung, um den steigenden Bedarf an Modellparametersätzen für die Finite-Elemente-Analyse von thermomechanisch hochbelasteten Komponenten zu decken. Mit unserem Verständnis der Schadensmechanismen und der anschließenden Entwicklung verbesserter Materialmodelle leistet das Fraunhofer IWM einen immer größer werdenden Beitrag in der Bauteilentwicklung im Rahmen der Finiten-Elemente-Methode. Dies spart Kunden Entwicklungskosten und -zeit und leistet einen wichtigen Beitrag für ein qualitativ verbessertes Bauteildesign. Das digitale Abonnement zielt darauf ab, ein breites Spektrum an gängigen Strukturwerkstoffen zu berücksichtigen, die in den verschiedenen Bereichen der Automobil-, Flugzeug- und Kraftwerksindustrie eingesetzt werden.

Hierbei liegt der Fokus des digitalen Modell-Abos in der Bereitstellung fortschrittlicher Materialmodelle für die zyklische Wechselplastizität und die Ermüdungslebensdauer im Rahmen der Finite-Elemente-Methode. Dabei besteht die werkstoffmechanische Herausforderung darin, Parametersätze für Materialmodelle zu bestimmen, welche die komplexen Werkstoffphänomene, wie etwa zyklische Verfestigung, Kriechen, Relaxation, Dehnrateneffekte und die Schädigungsmechanismen, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von mikrostrukturellen Änderungen abbilden. Da in zahlreichen Anwendungen der Automobil-, Flugzeug- und Kraftwerksindustrie die Temperatur die treibende Kraft für die mechanische Belastung ist, müssen die Modelle entsprechend in der Lage sein, den Einfluss der Temperatur auf das Verformungs- und Lebensdauerverhalten beschreiben zu können.

Für die Modellparameterbestimmung kann am Fraunhofer IWM auf einen breiten Erfahrungsschatz von experimentellen Daten aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen, öffentlich finanzierten Forschungsprogrammen oder eigenen (ergänzenden) Untersuchungen zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse der Modellierungsarbeiten werden in Form von Modellparametersätzen für die kommerzielle Finite-Elemente-Software Abaqus und Ansys bereitgestellt und erlauben die zuverlässige Berechnung der zyklischen Wechselplastizität und Lebensdauer von Bauteilen. Ein weiterer Baustein des digitalen Modell-Abos stellen Video-Tutorials und ergänzende Dokumente mit Lehrcharakter dar. Somit ist es auch Ingenieur*innen, die sich erstmalig mit der (TMF-)Thematik und den Modellen auseinandersetzen, möglich, sich schnell in die Anwendung der Modelle einzuarbeiten und ein fundiertes Wissen zu den grundlegenden Gleichungen zu erlangen.



1 Demonstrator mit lokaler Lebensdauervorhersage. Ausgehend von der höchstbelasten Stelle ist die Entwicklung eines Risses anhand der nicht-lokalen Bewertung nach definierten Zyklenzahlen illustriert. Somit lässt sich der weitere Rissverlauf bewertbar machen und es kann, sofern die Risskontur klein im Vergleich zu den Bauteilabmessungen ist, das Zusammenspiel zwischen zunehmender Risslänge und Belastungsgradient bewertet werden.

Eine nachhaltige Weiterentwicklung der Materialmodellparametersätze, auch für weitere Werkstoffe und in Absprache mit den teilnehmenden Unternehmen, stellt einen besonderen Mehrwert dar. Da insbesondere Klein- und -Mittelständische Unternehmen nicht immer in der Lage sind, den finanziellen Aufwand einer umfassenden Werkstoffcharakterisierung und -modellierung zu stemmen, bietet das digitale Modell-Abo eine attraktive Alternative. Weiterhin tragen neuere Erkenntnisse aus aktuellen Forschungsvorhaben und erweiterte Methoden zur Lebensdauervorhersage kontinuierlich zum Fortschritt des digitalen Abonnements bei. So wurden in jüngster Zeit Methoden zur Echtzeitlebensdauerbewertung und zum Umgang mit Belastungsgradienten erarbeitet.



Hier sind weiterführende Informationen zum digitalen Modell-Abo zu finden, sowie unter anderem auch die bereits zur Verfügung stehenden Werkstoffmodelle mit der zugrundeliegenden Datenbasis. Ergänzende Versuche für kundenspezifische Werkstoffchargen und Belastungen sind jederzeit realisierbar, sodass die zugrundeliegende Datenbasis und Materialmodellparametersätze zeiteffizient und kostengünstig angepasst, und Werkstoffvergleiche vorgenommen werden können.

Semantische Technologien der Materialinformatik: Maßgeschneiderte Lösungen zur digitalen Abbildung von reaktiven Prozessen

Matthias Büschelberger

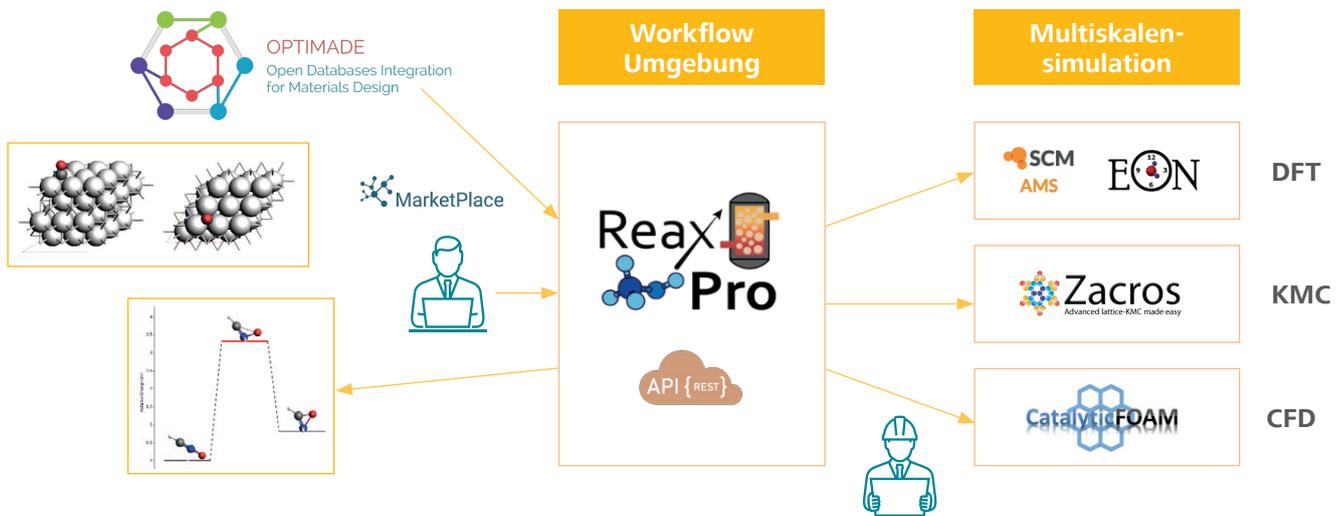
matthias.bueschelberger@iwm.fraunhofer.de

Das digitale Design von Werkstoffen und der zugehörigen Herstellungsprozesse ist wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Produktionskette und daher von großer Bedeutung für eine zukunftsorientierte Position Europas in der internationalen Marktwirtschaft. Um die Designaufgabe effizient und nutzungsfreundlich zu gestalten, sind automatisierte und reproduzierbare Simulationsworkflows von großer Bedeutung. Hierfür werden vereinheitlichte Schnittstellen benötigt. Moderne Applikationen haben nicht nur die Anforderung, dass die produzierten Daten den FAIR-Prinzipien (**F**indable, **A**ccessable, **I**nteroperable, **R**eusable) folgen, sondern dass die Softwarebasis dieses Systems für diverse Aufgabenstellungen erweiterbar ist. Dies beinhaltet die nahtlose Anbindung an übliche Datenbanklösungen, die einfache Integration weiterer Simulationsanwendungen in den Arbeitsablauf und die Verfügbarkeit als Webapplikation in digitalen Marktplätzen und App Stores, um die Barriere für die Anwendung möglichst klein zu halten. Somit kann die Integration neuer Technologien in bereits bestehende digitale Lösungen von Industrie und Forschung problemlos verwirklicht werden. Ein fein abgestimmtes Ökosystem aus modularen und interoperablen Datenwerkzeugen ermöglicht die Hochskalierung von isolierten Systemen zu komplexeren und leistungsfähigeren Datenräumen, welche die Abbildung eines Werkstoffs in einen digitalen Zwilling zur systematischen Materialentwicklung beschleunigen kann.

Insbesondere die Umsetzung der digitalen Dienstleistung durch materialwissenschaftliche Cloud-Computing-Applikationen ist Gegenstand aktueller nationaler und europäischer Forschungsaktivitäten. Aus dem EU-Forschungsprogramm »Horizon 2020« ist

unter anderem aus dem Projekt »ReaxPro« eine digitale, integrative Arbeitsumgebung hervorgegangen, welche anhand der Modellierung der CO-Oxidierung an katalytischen Oberflächen demonstriert wird. Das Fraunhofer IWM führte dabei die Ontologie- und Softwareentwicklung für die Schnittstellen, welche die Kopplung der jeweiligen DFT (Density Functional Theory), KMC (Kinetic Monte Carlo) und CFD (Computational Fluid Dynamics)-Anwendungen auf Basis von semantischen Technologien automatisiert. Die Programmarchitektur wird dabei flach gehalten, um die Installation und die Erweiterung der verfügbaren Workflowmodelle zu vereinfachen, und um mit bestehenden Open Source Lösungen für Simulationsworkflows wie AiiDA oder SimStack kompatibel zu sein. Von besonderem Interesse ist ebenso die automatisch erfasste Prozesshistorie und Datenherkunft der simulierten Eigenschaften, welche durch die erarbeitete ontologische Darstellung die Nachvollziehbarkeit der Simulationsergebnisse ermöglicht. Der Programmcode ist im Zuge dessen mitsamt der Nutzungs- und Installationsdokumentation quelloffen auf Github hinterlegt worden, um die Projektergebnisse für Industrie- und Forschungspartner, sowie der europaweiten Digitalisierungsinitiative zugänglich zu machen.

Eine noch nutzungsfreundlichere Variante wurde für das H2020-Projekt »MarketPlace« entwickelt. Hier wurde ein Demonstrator im App Store der MarketPlace-Plattform frei zugänglich gemacht und hat während der Projektlaufzeit als Trainingsmaterial eine wirksame Referenz für potenzielle Endnutzer*innen dargestellt. Insbesondere die praktische Handhabung der Applikation wurde durch die Fachexpertise des Fraunhofer



1 Die Übersichtsskizze der Plattformarchitektur verdeutlicht, wie potenzielle Anwendende auf der linken Seite mit der ihnen zugänglichen Schnittstelle interagiert, während gleichzeitig Domänenexpert*innen oder Backend-Ingenieur*innen unabhängig davon in der Lage sind, neue Entwicklungen umzusetzen und das Angebot an Workflow-Optionen durch Integration weiterer Simulationstools zu erweitern.

IWM in mehrwöchigen Online-Workshops erfolgreich am Snellius-Cluster in den Niederlanden erfolgreich demonstriert und bei den beteiligten Industriestakeholdern (BASF, Johnson-Matthey) implementiert. Das unmittelbare Interesse wurde unter anderem auch dadurch angeregt, dass bekannte und breit anwendbare Virtualisierungstechniken wie Docker und Singularity von Grund auf geschult wurden und den Teilnehmenden somit ein Wissenstransfer aus dem Fachspektrum des Fraunhofer IWM verwirklicht wurde.

Die entwickelten digitalen Technologien sind nicht nur für reaktive Prozesse wie in dem Projekt »ReaxPro« anwendbar. Wie in dem Projekt demonstriert, wendet das Team »Materialinformatik« des Fraunhofer IWM semantische Technologien in verschiedenen Bereichen der werkstofffokussierten Fertigungstechnik an und bildet somit die Brücke zwischen den Materialwissenschaften und Industrie 4.0. Zum Leistungsangebot zählen die Entwicklung und Adaption von semantischen Datenmodelle vom Vokabular zu Ontologien, die Weiterentwicklung von semantischen Technologien für möglichst barrierefreien Datenaustausch (Interoperabilität) in Versuchs- und Simulationsworkflows sowie die Umsetzung von materialwissenschaftlichen Datenräumen und Plattformen. Neben maßgeschneiderten Entwicklungen bieten wir Workshops über semantische Technologien an.



Hier finden Sie alle Informationen zur Installation, Einrichtung und Nutzung der ReaxPro-Simulationsplattform und der dazugehörigen Pakete und Tools.

Design und Demonstration von energieeffizienten porösen Energiewandlermaterialien

Dr. Jan Manuel Hinterstein, Dr. Johannes Preußner

jan.manuel.hinterstein@iwf.fraunhofer.de, johannes.preussner@iwf.fraunhofer.de

Um die Herausforderungen der Energiewende zu meistern, sind Fortschritte in der Effizienz von Energiewandlungs-Anwendungen von großer Bedeutung. Im Rahmen eines Projektes des Fraunhofer-internen Forschungsprogramms »Attract« arbeiten wir an neuen Materialsystemen, um die Effizienz von elektromechanischen und thermoelektrischen Generatoren zu erhöhen. Die Mikrostruktur der Materialien spielt eine wichtige Rolle und es werden unterschiedliche Design-Möglichkeiten genutzt, um die Effizienz zu verbessern. Die Design-Lücke zwischen der Partikel- oder Korngröße hin zur druckbaren Strukturbreite wird mit Kapillarsuspensionen geschlossen.

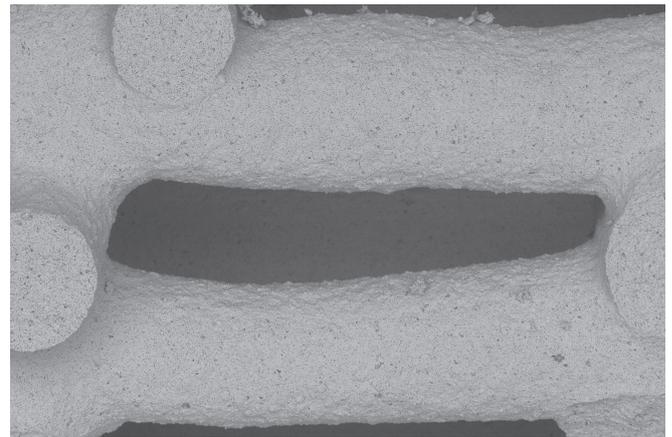
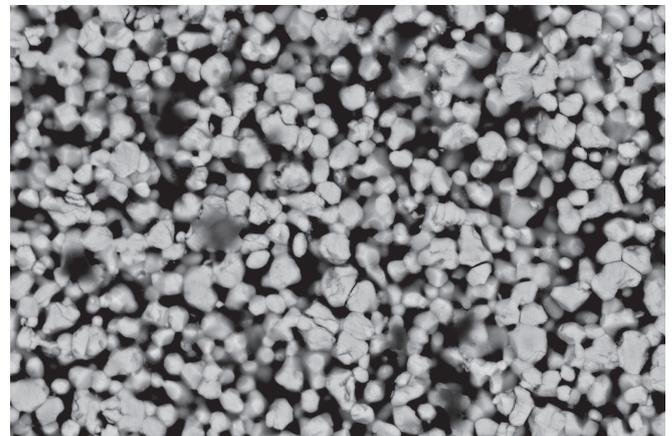
Die Erfolgshypothese besteht darin, durch das Verfahren der Kapillarsuspensionen den bislang nicht zugänglichen Größenbereich zwischen der Partikel- und der Korngröße aktiv für das Materialdesign zu erschließen und damit Potenziale bei der Energieeffizienz zu heben. Die Leistungsfähigkeit des neuen Entwicklungskonzepts konnte an einem elektromechanischen Generator unter Beweis gestellt werden. Elektromechanische Generatoren wandeln mechanische Last in elektrische Energie um und können zur Energieversorgung von Wearables genutzt werden, aber auch als medizinische Sensoren, die hochaufgelöste Daten zur Früherkennung von Parkinson liefern können.

Kapillarsuspensionen sind ternäre Materialsysteme, die aus einer partikulären, festen Phase von mikroskaligen, sinterfähigen Partikeln, einer Hauptflüssigkeit und einem kleinen Teil einer nicht mischbaren Sekundärflüssigkeit bestehen. Die Sekundärflüssigkeit bildet flüssige Brücken zwischen den Partikeln, was zur Bildung eines selbstorganisierten Partikelnetzwerks führt, das die gesamte Probe durchdringt. Durch dieses Partikelnetzwerk ist es möglich, offene Porositäten im Bereich von wenigen bis hin zu hunderten Mikrometern einzustellen und somit eine zusätzliche Hierarchie-Ebene der Metastrukturierung zu erzeugen. Die Kapillarsuspensionen lassen sich zudem einfach mittels Flüssigformgebung verarbeiten – einem Prozess, der sich gut hochskalieren lässt. Außerdem lassen sich durch den charakteristischen Scherverdünnungseffekt der Suspensionen Viskositäten einstellen, die für den Direct-Ink-Writing-Prozess erforderlich sind. Somit können poröse Strukturen nun auch mittels 3D-Druck, welcher eine Metastrukturierung im Bereich von etwa 100 µm bis hin zur Bauteilgröße erlaubt, verarbeitet werden.

Dank der Verwendung von Kapillarsuspensionen in einem 3D-gedruckten ferroelektrischen Material ist es uns am Fraunhofer IWM möglich, einen elektromechanischen Generator zu entwerfen, dessen Eigenschaften um fast 500 Prozent über dem einer Bulk-Probe liegen. Im Vergleich mit der Literatur konnten wir die Eigenschaften sogar um fast 300 Prozent gegenüber allen bisher veröffentlichten Effizienzen erhöhen. Ein Zielkonflikt bei elektromechanischen Generatoren, wo die elektromechanische Kopplung maximiert und gleichzeitig die Permittivität minimiert werden sollten, konnte durch das Partikelnetzwerk gelöst werden: Das Netzwerk führt zu einer hohen elektromechanischen Kopplung, während die hohe offene Porosität die Permittivität stark reduziert. Aktuell werden die Einflüsse verschiedener komplexer gedruckter Geometrien auf die Eigenschaften untersucht. Eine zweite Entwicklungsrichtung ist die Verbesserung der Energieeffizienz von thermoelektrischen Generatoren.

Diese wandeln einen Temperaturgradienten in elektrische Energie und können als autarke Sensoren in der chemischen Industrie, aber auch zur nachhaltigen Datenerfassung und -übermittlung eingesetzt werden. Wir arbeiten derzeit in Kooperation mit der Ernst-Abbe-Hochschule Jena daran, den Zielkonflikt in thermoelektrischen Generatoren zwischen hoher elektrischer und geringer thermischer Leitfähigkeit zu lösen, indem wir Werkstoffe mit einem Partikelnetzwerk strukturieren. Hier würde das Netzwerk eine hohe elektrische Leitfähigkeit durch die geringe Perkolations-Grenze gewährleisten, während die hohe offene Porosität zu einer deutlich verringerten Wärmeleitfähigkeit führt.

Damit steht am Fraunhofer IWM eine durchgängige Entwicklungskette zur Verfügung, bestehend aus der Herstellung von Kapillarsuspensionen, dem 3D-Druck von porösen Funktionsmaterialien aus den Kapillarsuspensionen, dem Funktionsnachweis daraus realisierter Generatoren zur Energiewandlung und letztlich dem Transfer in verschiedenste Anwendungsgebiete.

100 μm 5 μm 1 μm

1 3D-gedruckte Struktur eines elektromechanischen Generators (oben). Durch Kapillarsuspensionen entstandenes Partikelnetzwerk mit gleichmäßiger, hoher offener Porosität (Mitte). Kontaktstellen des Partikelnetzwerk das hohe elektromechanische Kopplung zwischen den Partikeln gewährleistet (unten).

Multiskalensimulation von Diffusionsprozessen

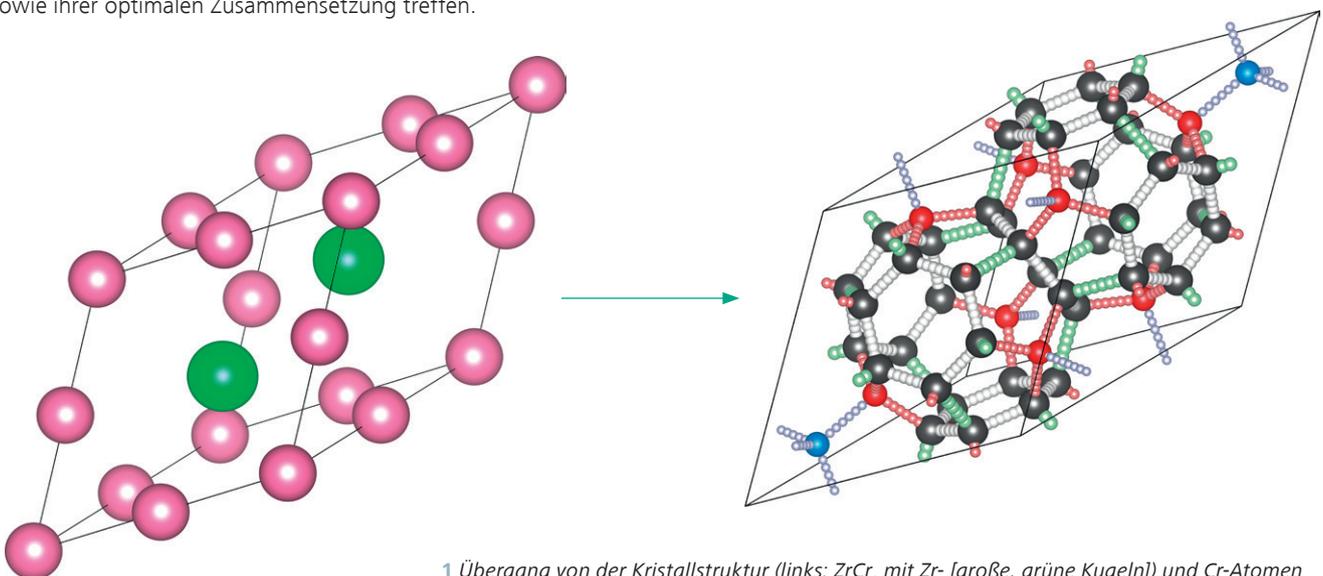
Dr. Daniel Mutter, Daniel Pfalzgraf, Dr. Daniel F. Urban

daniel.mutter@iwmm.fraunhofer.de, daniel.pfalzgraf@iwmm.fraunhofer.de, daniel.urban@iwmm.fraunhofer.de

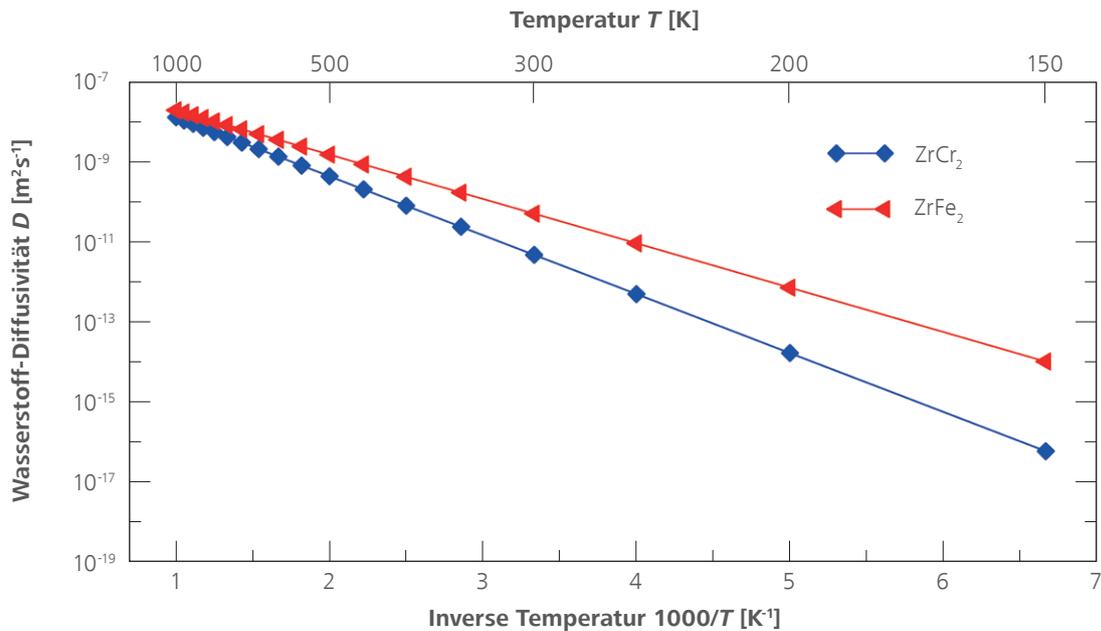
Diffusionsprozesse von Atomen in Festkörpern spielen für viele funktionale Materialien eine zentrale Rolle. Darunter fallen beispielsweise keramische Elektrolyte für Festkörperbatterien, in denen eine hohe Leitfähigkeit bestimmter Ionen (Li^+ , Na^+) vorherrschen muss. In Festoxid-Brennstoff- und Elektrolysezellen ist die Beweglichkeit von Sauerstoff sowohl im Elektrolyten als auch in den Elektrodenmaterialien essenziell. In anderen Fällen kann Diffusion dagegen Degradation und Materialversagen hervorrufen. Wenn etwa Wasserstoff, Sauerstoff oder andere Fremdelemente von reaktiven Oberflächen und sensitiven Komponenten ferngehalten werden müssen, werden Materialien benötigt, die als Schutzschichten die Diffusion dieser Elemente verhindern. Um Materialien hinsichtlich dieser Aspekte optimieren zu können, sind das Verständnis und die quantitative Vorhersage von Diffusionsprozessen und -eigenschaften auf der atomaren bis hin zur makroskopischen Skala von enormer Wichtigkeit. Mit ihrer Kompetenz in der Multiskalenmodellierung können Forschende des Fraunhofer IWM Vorhersagen zur Auswahl von Materialsystemen sowie ihrer optimalen Zusammensetzung treffen.

Parameter zur Beeinflussung der Diffusion erkennen

In der Gruppe »Materialmodellierung« am Fraunhofer IWM wurden über viele Jahre in diversen Projekten vielfältige Fragestellungen zur Diffusion von Elementen in kristallinen und amorphen Materialien bearbeitet und dabei umfangreiche methodische Kompetenzen aufgebaut. Diese reichen von Li-Ionenleitung in Oxidkeramiken über Legierungsordnungs- und Kornwachstumsprozesse unter dem Einfluss äußerer Felder bis hin zur Wasserstoffleitung durch intermetallische Phasen und metallhaltige Nitride und Carbide (MAX-Phasen). Aus werkstoffmechanischer Sicht werden dabei in der Regel Antworten auf die Frage gesucht, wie die erwünschte oder zu verhindernde Diffusion durch die chemische Zusammensetzung des Materials, dessen Kristallstruktur, und durch atomare oder ausgedehnte Gitterdefekte, beeinflusst werden kann.



1 Übergang von der Kristallstruktur (links: ZrCr_2 mit Zr- [große, grüne Kugeln]) und Cr-Atomen zum Migrationsnetzwerk für Wasserstoff (rechts).



2 Diffusivität von Wasserstoff in Abhängigkeit der Temperatur in den Laves-Phasen $ZrCr_2$ und $ZrFe_2$.

Um hier bestmöglich Antworten zu liefern, greifen Expert*innen des Fraunhofer IWM auf der atomaren Skala auf Methoden der Dichtefunktionaltheorie, die zur Bestimmung von Sprungraten von Atomen zwischen Gitterplätzen dient, und der Molekulardynamik zurück. Mithilfe der Sprungraten können über ein effektives Modell Aussagen zur Diffusion auf der makroskopischen Skala getroffen werden. Ein solches Vorgehen wird zum Beispiel angewendet, um die Diffusion von Wasserstoff in Laves-Phasen unterschiedlicher elementarer Zusammensetzung zu bestimmen. Laves-Phasen sind intermetallische Phasen mit der Strukturformel AB_2 , welche als aussichtsreiche Kandidaten für die Speicherung von elementarem Wasserstoff gelten. Ursächlich hierfür ist ein zusammenhängendes Netzwerk aus Zwischengitterplätzen, auf denen sich Wasserstoff einlagern kann. Der erste Schritt zur Berechnung der Diffusivität besteht darin, dieses Netzwerk aus der Kristallstruktur abzuleiten (Abb. 1). Anschließend werden die Energien berechnet, die für die Überwindung der Bereiche zwischen diesen Plätzen aufgebracht werden müssen. Daraus ergeben sich schließlich die Sprungraten, die als Eingangsgrößen für das makroskopische Diffusionsmodell dienen.

Abbildung 2 zeigt die Diffusivität von Wasserstoff in den Laves-Phasen $ZrCr_2$ und $ZrFe_2$ in einem Temperaturbereich zwischen 150 und 1000 K. In der halblogarithmischen Auftragung gegenüber der inversen Temperatur ergeben sich für die Diffusivitäten lineare Verläufe, in guter Übereinstimmung mit dem empirischen Arrhenius-Gesetz zwischen Energiebarrieren und Sprungraten. Die elementare Zusammensetzung zeigt für niedrige Temperaturen einen deutlichen Einfluss auf die Beweglichkeit, wohingegen sich dieser Effekt bei hohen Temperaturen geringer auswirkt.

Multiskalenmodellierung für die Entwicklung funktionaler Materialien

Mit unserer Erfahrung und methodischer Kompetenz in der Multiskalenmodellierung von Diffusionsprozessen sprechen wir Firmen an, die im Bereich der Entwicklung funktionaler Materialien tätig sind. Das Spektrum reicht von Herstellern für Komponenten für Energiespeicher- und Wandlerner Materialien bis hin zu Anbietern von Beschichtungen zur Verhinderung von Materialschädigung. In diesen Bereichen spielen neben einer optimalen Funktionalität Fragen der Materialverfügbarkeit und -kritikalität sowie der Ressourceneffizienz eine entscheidende Rolle. Am Fraunhofer IWM bieten wir Vorhersagen zur kosteneffizienten Auswahl der Materialsysteme und zur optimalen Zusammensetzung, um die anspruchsvollen Anforderungsprofile zu erfüllen, was mit einem vertieften Verständnis der Mechanismen auf verschiedenen Skalen einhergeht.

Publikationen



Publikationen

Referierte Zeitschriften

Baumann, A. F.; Mutter, D.; Urban, D.; Elsässer, C.

[First-principles analysis of the interplay between electronic structure and volume change in colquiriite compounds during Li intercalation](#)

Physical Review B 108/16 (2023) Art. 165140, 13 Seiten

Bayani, A.; Gebhardt, J.; Elsässer, C.

[Electronic bulk and surface properties of titanium dioxide studied by DFT-1/2](#)

Langmuir 39/42 (2023) 14922-14934

Bord, J.; Kirchhoff, B.; Baldofski, M.; Jung, C.; Jacob, T.

[An atomistic view of platinum cluster growth on pristine and defective graphene supports](#)

Small 19/10 (2023) Art. 2207484, 8 Seiten

Braun, M.; Schubnell, J.; Sarmast, A.; Subramanian, H.; Reissig, L.; Altenhöner, F.; Sheiki, S.; Renken, F.; Ehlers, S.

[Mechanical behavior of additively and conventionally manufactured 316L stainless steel plates joined by gas metal arc welding](#)

Journal of Materials Research and Technology jmr&t 24 (2023) 1692-1705

Bremecker, D.; Wohninsland, A.; Teuber, S.; Lalitha, K. V.; Hinterstein, M.; Rödel, J.

[Texture-based ferroelectric hardening in Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO₃-based piezoceramics](#)

Physical Review Materials 7/6 (2023) Art. 064407, 11 Seiten

Christ, N.; Scheuring, B. M.; Montesano, J.; Hohe, J.

[A Python package for homogenization procedures in fiber reinforced polymers](#)

The Journal of Open Source Software JOSS 8/87 (2023) Art. 5295, 4 Seiten

Codrignani, A.; Peeters, S.; Holey, H.; Stief, F.; Savio, D.;

Pastewka, L.; Moras, G.; Falk, K.; Moseler, M.

[Towards a continuum description of lubrication in highly pressurized nanometer-wide constrictions: The importance of accurate slip laws](#)

Science Advances 9/48 (2023) Art. eadi264, 17 Seiten

Das Adhikary, G.; Jafo Muleta, G.; Abebe Tina, G.; Sharma, D.; Mahale, B.; Lemos da Silva, L.; Hinterstein, M.; Senyshyn, A.; Ranjan, R.

[Structural insights into electric field induced polarization and strain responses in K_{0.5}Na_{0.5}NbO₃ modified morphotropic phase boundary compositions of Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃-based lead-free piezoelectrics](#)

Physical Review B 107/13 (2023) Art. 134108, 13 Seiten

de Kock, S.; Skudler, K.; Matsidik, R.; Sommer, M.; Müller, M.; Walter, M.

[NEXAFS spectra of model sulfide chains: implications for sulfur networks obtained from inverse vulcanization](#)

Physical Chemistry Chemical Physics PCCP 25/30 (2023) 20395-20404

Dornheim, J.; Morand, L.; Janarthanam, H. N.; Helm, D.

[Neural networks for constitutive modeling: from universal function approximators to advanced modeling and the integration of physics](#)

Archives of Computational Methods in Engineering 31/2 (2023) 1097-1127

Durmaz, A. R.; Potu, S. T.; Romich, D.; Möller, J. J.; Nützel, R.

[Microstructure quality control of steels using deep learning](#)

Frontiers in Materials 10 (2023) Art. 1222456, 13 Seiten

Eberl, C.

[Programmable Materials](#)

Programmable Materials 1 (2023) Art. e3, 2 Seiten

Eggeler, Y. M.; Chan, K. C.; Sun, Q.; Díaz Lantada, A.; Mager, D.; Schwaiger, R.; Gumbsch, P.; Schröder, R.; Wenzel, W.;

Korvink, J. G.; Islam, M.

[A review on 3D architected pyrolytic carbon produced by additive micro/nanomanufacturing](#)

Advanced Functional Materials Online First (2023) Art. 2302068, 18 Seiten

Eickworth, J.; Wagner, J.; Daum, P.; Dienwiebel, M.; Rühle, T.

[Gas phase lubrication study with an organic friction modifier](#)

Lubrication Science 35/1 (2023) 40-55

- Fan, L.; Reder, M.; Schneider, D.; Hinterstein, M.; Nestler, B.
[A phase-field model for ferroelectric materials - Based on the multiphase-field method](#)
 Computational Materials Science 230 (2023) Art. 12510, 15 Seiten
- Fischer, C.; Fliegenger, S.; Oesterlin, H.; Michler, T.; Höhler, S.; Mondry, A.; Ertault de la Betronnière, P.
[Codes and standards for the fatigue-based design of hydrogen infrastructure components](#)
 International Journal of Fatigue 171 (2023) Art. 107564, 17 Seiten
- Fischer, C.; Schackert, S.; Seifert, T.; Schweizer, C.; Fuchs, M.
[Experiments and modeling on the stain-controlled time- and temperature-dependent cyclic ratchetting plasticity of the nickel-based superalloy IN100](#)
 Materials 16/5 (2023) Art. 1888, 32 Seiten
- Frie, C.; Kolyshkin, A.; Mordeja, S.; Durmaz, A. R.; Eberl, C.
[Reduction of testing effort for fatigue tests: application of Bayesian optimal experimental design](#)
 Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 46/12 (2023) 4783-4800
- Friedmann, V.; Bellmer, M.; Antons, R.; Hafok, H.
[Automated quantitative microstructural analysis using the open-source server-client platform OMERO – Automatisierte quantitative Mikrostrukturanalysen mit der quelloffenen Server-Client Plattform OMERO](#)
 Practical Metallography/Praktische Metallographie 60/12 (2023) 820-837
- Gäbert, C.; Hicke, D.; Bahnemann, J.; Mayrhofer, L.; Hartliebe, M.; Reinicke, S.
[Light-dependent RAFT polymerization of spiropyran acrylates](#)
 Macromolecular Rapid Communications 44/14 (2023) Art. 2300108, 6 Seiten
- Gatti, J. F.; Cai, W.; Herzog, R.; Gharavian, A.; Kailer, A.; Baltes, N.; Rabenecker, P.; Mörchel, P.; Balzer, B. N.; Amann, T.; Rühle, J.
[Investigation of programmable friction with ionic liquid mixtures at the nano- and macroscales](#)
 Lubricants 11/9 (2023) Art. 376, 20 Seiten
- Gatti, S. F.; Gatti, F.; Amann, T.; Kailer, A.; Moser, K.; Weiss, P.; Seidel, C.; Rühle, J.
[Tribological performance of electrically conductive and self-lubricating polypropylene – ionic-liquid composites](#)
 RSC Advances 13/12 (2023) 8000-8014
- Ge, Y.; Lin, N.; Du, C.; Amann, T.; Feng, H.; Yuan, C.; Li, K.
[Improved boundary lubrication of perfluoropolyether using fluoropolymer-grafted cellulose nanocrystal](#)
 Cellulose 30/6 (2023) 3757-3771
- Gebhardt, J.; Gassmann, A.; Wei, W.; Weidenkaff, A.; Elsässer, C.
[Screening for sustainable and lead-free perovskite halide absorbers – A database collecting insight from electronic-structure calculations](#)
 Materials & Design 234/7 (2023) Art. 112374, 8 Seiten
- Gebhardt, J.; Elsässer, C.
[DFT with corrections for an efficient and accurate description of strong electron correlations in NiO](#)
 Journal of Physics: Condensed Matter 35/20 (2023) Art. 205901, 10 Seiten
- Gevaudan, J. P.; Timounay, Y.; Mayrhofer, L.; Zarshenas, M.; Moseler, M.
[How does the pore solution chemistry influence the passivation of reinforced alkali- and salt-activated slag materials?](#)
 Journal of the American Ceramic Society 107/3 (2023) 1625-1635
- Grießer, J.; Moras, G.; Pastewka, L.
[Yielding under compression and the polyamorphic transition in silicon](#)
 Physical Review Materials 7/5 (2023) Art. 055601, 10 Seiten
- Gulbay, O.; Ackermann, M.; Gramlich, A.; Durmaz, A. R.; Steinbach, I.; Krupp, U.
[Influence of transformation temperature on the high-cycle fatigue performance of carbide-bearing and carbide-free bainite](#)
 Steel Research International 94/12 (2023) Art. 2300238, 14 Seiten
- Haas, B.; Boland, T. M.; Elsässer, C.; Singh, A. K.; March, K.; Barthel, J.; Koch, C. T.; Rez, P.
[Atomic resolution mapping of localized phonon modes in silicon grain boundaries](#)
 Microscopy and Microanalysis 29/1 (2023) 618-619
- Haas, B.; Boland, T. M.; Elsässer, C.; Singh, A. K.; March, K.; Barthel, J.; Koch, C. T.; Rez, P.
[Atomic-resolution mapping of localized phonon modes at grain boundaries](#)
 NANO Letters 23/13 (2023) 5975-5980
- Han, Y.; Kruse, J.; Rosalie, J. M.; Radners, J.; von Hartrott, P.; Skrotzki, B.
[Influence of mean stress and overaging on fatigue life of aluminum alloy EN AW-2618A](#)
 Materials Science and Engineering: A 886 (2023) Art. 145660, 10 Seiten
- Hinterstein, M.; Lemos da Silva, L.; Knapp, M.; Schoekel, A.; Etter, M.; Studer, A.; Brand, H.
[In situ neutron diffraction for analysing complex coarse-grained functional materials](#)
 Journal of Applied Crystallography 56/4 (2023) 1242-1251

Hinterstein, M.; Lemos da Silva, L.; Vajpayee, G.; Lee, K. Y.; Studer, A.

[Stroboscopic in situ neutron diffraction approach to elucidate the kinetics of strain mechanisms in ferroelectric materials](#)

Physical Review Materials 7/3 (2023) Art. 034406, 11 Seiten

Holey, H.; Gumbsch, P.; Pastewka, L.

[Confinement-induced diffusive sound transport in nanoscale fluidic channels](#)

Physical Review Letters 131/8 (2023) Art. 084001, 5 Seiten

Iraki, T.; Morand, L.; Dornheim, J.; Link, N.; Helm, D.

[A multi-task learning-based optimization approach for finding diverse sets of microstructures with desired properties](#)

Journal of Intelligent Manufacturing Online First (2023) 17 Seiten

Kempe, F.; Metzler, L.; Brüchner, O.; Buchheit, H.; Walter, M.; Komber, M.; Sommer, M.

[Substituent-controlled energetics and barriers of mechanochromic spiropyran-functionalized Poly\(\$\epsilon\$ -caprolactone\)](#)

Macromolecular Chemistry and Physics 224/1 (2023) Art. 2200254, 8 Seiten

Klitschke, S.; Westhäuser, S.; Schneider, M.; Heitzmann, A.; Pearce, A.; Friebe, H.

[A uniform method for the characterization of shear fracture strain for high-strength steel sheets under quasi-static and crash loading](#)

Materials Science & Engineering Technology 1284/1 (2023) Art. 12075, 11 Seiten

König, T.; Kimpel, T.; Kürten, D.; Kailer, A.; Dienwiebel, M.

[Influence of atmospheres on the friction and wear of cast iron against chromium plated steel at high temperatures](#)

Wear 522 (2023) Art. 204695, 17 Seiten

Koplin, C.; Schlüter, B.; Jaeger, J.

[Running-in effects of lubricated polyether ether ketone on steel for different spreading and sorption tendencies](#)

Lubricants 11/3 (2023) Art. 135, 16 Seiten

Koplin, C.; Schwarzer-Fischer, E.; Zschippang, E.; Löw, Y. M.; Czekalla, M.; Seibel, A.; Rörich, A.; Georgii, J.; Güttler, F.; Yasar-Schlickewei, S.; Kailer, A.

[Design of reliable remobilisation finger implants with geometry elements of a triple periodic minimal surface structure via additive manufacturing of silicon nitride](#)

J — Multidisciplinary Scientific Journal 6/1 (2023) 180-197

Kulagin, R.; Reiser, P.; Truskovsky, K.; Koeppe, A.; Beygelzimer, Y.; Estrin, Y.; Friedrich, P.; Gumbsch, P.

[Lattice metamaterials with mesoscale motifs: exploration of property charts by Bayesian optimization](#)

Advanced Engineering Materials 25/13 (2023) Art. 2300048, 8 Seiten

Li, J.; Yuan, Y.; Amann, T.; Yuan, C.; Li, K.

[Macroscopic oil-based superlubricity achieved on steel surfaces with the roughness of engineering level](#)

Tribology Letters 71/2 (2023) Art. 32, 10 Seiten

Li, K.; Yang, Y.; Amann, T.; Yuan, C.

[Synergistic effect of 1,3-diketone fluid and carbon-based nanoparticles as hybrid eco-friendly additives in polyalphaolefin oil](#)

Tribology Letters 71/2 (2023) Art. 53, 16 Seiten

Lienhard, J.; Barisin, T.; Grimm-Strele, H.; Kabel, M.; Schladitz, K.; Schweiger, T.

[Microstructural characterisation of 3D printed and injection-moulded glass fibre-reinforced polypropylene by image analysis, simulation and experimental methods](#)

Strain 60/2 (2023) Art. e12463, 18 Seiten

Luitz, M.; Pellegrini, D.; von Holst, M.; Seteiz, K.; Gröner, L.; Schleyer, M.; Daub, M.; Warmbold, A.; Thomann, Y.; Thomann, R.; Kotz-Helmer, F.; Rapp, B. E.

[High-resolution patterning of organic-inorganic photoresins for tungsten and tungsten carbide microstructures](#)

Advanced Engineering Materials 25/13 (2023) Art. 2201927, 11 Seiten

Luo, H.; Tang, S.; Sun, Z.; Zhang, Y.; Yao, Y.; Zheng, H.; Yang, J.; Ren, Y.; Tang, M.; Huang, H.; Liu, H.; Hinterstein, M.; Chen, J.

[Perovskite/metal \(Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-BaTiO₃/Ag\) lead-free composite ceramics featuring enhanced depolarization temperature](#)

Acta Materialia 254 (2023) Art. 119024, 9 Seiten

MacLucas, T.; Klemenz, A.; Grünewald, P.; Presser, V.;

Mayrhofer, L.; Moras, G.; Suarez, S.; Dienwiebel, M.; Mücklich, F.; Moseler, M.

[Multiwall carbon nanotubes for solid lubrication of highly loaded contacts](#)

ACS Applied Nano Materials 6/3 (2023) 1755-1769

Matsidik, R.; Skudler, K.; de Kock, S.; Seifert, A.; Müller, M.; Walter, M.; Choudhury, S.; Sommer, M.

[On the effect of sulfur strand length on the electrochemical performance of dual-redox-active sulfur-naphthalene diimide cathode materials](#)

ACS Applied Energy Materials 6/18 (2023) 9466-9474

Michaelis, J. U.; Kiese, S.; Amann, T.; Folland, C.; Asam, T.; Eisner, P.

[Thickening properties of carboxymethyl cellulose in aqueous lubrication](#)

Lubricants 11/3 (2023) Art. 12, 21 Seiten

- Michler, T.; Freitas, T.; Oesterlin, H.; Fischer, C.; Wackermann, K.; Ebling, F.
[Tensile testing in high pressure gaseous hydrogen using conventional and tubular specimens: Austenitic stainless steels](#)
 International Journal of Hydrogen Energy 48/65 (2023) 25609-25618
- Mutter, D.; Tao, C.; Urban, D. F.; Elsässer, C.
[Formation energy profiles of oxygen vacancies at grain boundaries in perovskite-type electroceramics](#)
 Advanced Engineering Materials 25/18 (2023) Art. 2201847, 8 Seiten
- Najuch, T.; Bierwisch, C.; Yamauchi, T.
[Dimensionless unified modelling of macroscale electric properties of conductive fibre networks in different regimes](#)
 Materials & Design 232 (2023) Art. 112090, 13 Seiten
- Nasrabadi, H. B.; Hanke, T.; Weber, M.; Eisenbart, M.; Bauer, F.; Meissner, R.; Dziwis, G.; Tikana, L.; Chen, Y.; Skrotzki, B.
[Toward a digital materials mechanical testing lab](#)
 Computers in Industry 153 (2023) Art. 104016, 15 Seiten
- Preußner, J.; Rödler, G.; Fischer, F.; Hintz, K.; Friedmann, V.; Weisheit, A.
[Additive manufacturing of a lightweight Al-Ca alloy by direct energy deposition and laser powder bed fusion – Additive Fertigung einer Al-Ca-Leichtmetall-Legierung mittels Laserauftrags-schweißen und pulverbettbasiertem Laserstrahlschmelzen](#)
 Practical Metallography/Praktische Metallographie 60/11 (2023) 704-715
- Provenzano, M.; Bellussi, F. M.; Morciano, M.; Rossi, E.; Schleyer, M.; Asinari, P.; Straub, T.; Sebastiani, M.; Fasano, M.
[Experimentally validated phase-field model to design the wettability of micro-structured surfaces](#)
 Materials & Design 231 (2023) Art. 112042, 11 Seiten
- Rockenhäuser, C.; Hartrott, P. von; Skrotzki, B.
[Brinell-hardness data \(HBW 2.5/62.5\) of aluminum alloy EN AW-2618A after different aging times and temperatures](#)
 Data in Brief 46 (2023) Art. 108830, 7 Seiten
- Rosenberger, J.; Tlatlik, J.; Münstermann, S.
[Deep learning based initial crack size measurements utilizing macroscale fracture surface segmentation](#)
 Engineering Fracture Mechanics 293 (2023) Art. 109686, 21 Seiten
- Sarmast, A.; Schubnell, J.; Preußner, J.; Hinterstein, M.; Carl, E.
[Residual stress analysis in industrial parts: a comprehensive comparison of XRD methods](#)
 Journal of Materials Science 58 (2023) 16905-16929
- Sauer, F.; Codrignani, A.; Haber, M.; Falk, K.; Mayrhofer, L.; Schwitzke, C.; Moseler, M.; Bauer, H.-J.; Schulze, V.
[Multiscale simulation approach to predict the penetration depth of oil between chip and tool during orthogonal cutting of AISI 4140](#)
 Procedia CIRP 117 (2023) 426-431
- Schaefer, T. C.; Greive, S.; Bierwisch, C.; Mohseni-Mofidi, S.; Heiland, S.; Kramer, M.; Möhlenbruck, M. A.; Bendszus, M.; Vollherbst, D. F.
[Iatrogenic air embolism: Influence of air bubble size on cerebral infarctions in an experimental in vivo and numerical simulation model](#)
 Journal of NeuroInterventional Surgery Online First (2023) Art. jnis-2023-020739, 6 Seiten
- Schlayer, M.; Warwas, M.; Seifert, T.
[A temperature-dependent viscoplasticity model for the hot work steel X38CrMoV5-3, including thermal and cyclic softening under thermomechanical fatigue loading](#)
 Materials 16/3 (2023) Art. 994, 27 Seiten
- Schubnell, J.; Carl, E.; Sarmast, A.; Hinterstein, M.; Preußner, J.; Seifert, M.; Kaufmann, C.; Rußbüldt, P.; Schulte, J.
[Surface conditions after Laser Shock Peening of steel and aluminum alloys using ultrafast laser pulses](#)
 Materials 16/20 (2023) Art. 679, 13 Seiten
- Schubnell, J.; Carl, E.; Widerspan, V.; Collmann, M.
[Determination of loading and residual stresses on offshore jacket structures by X-ray diffraction](#)
 Journal of Marine Science and Engineering 11/7 (2023) Art. 1304, 10 Seiten
- Schubnell, J.; Konidena, S. K.; Matthias, J.; Braun, M.; Ehlers, S.; Mada, M.; Kannengießler, T.; Löschner, D.
[Approach for the probabilistic fatigue assessment of welded joints based on the local geometry of the weld seam](#)
 Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 47/1 (2023) 88-107
- Schubnell, J.; Müller, A.; Boywitt, R.; Maiß, O.; Farajian, M.
[Fatigue life improvement of similar and dissimilar aluminum friction stir welds by deep rolling](#)
 Welding in the World 67/3 (2023) 721-732
- Schwarzer-Fischer, E.; Zschippang, E.; Kunz, W.; Koplín, C.; Löw, Y. M.; Scheithauer, U.; Michaelis, A.
[CerAMufacturing of silicon nitride by using lithography-based ceramic vat photopolymerization \(CerAM VPP\)](#)
 Journal of the European Ceramic Society 43/2 (2023) 321-331

Schweiger, T.; Lienhard, J.; Grimme-Strele, H.; Hiermaier, S.
[Investigation of strain rate dependent microscopic failure mechanisms in short fiber reinforced plastics using finite element simulations](#)
 Journal of Composite Materials 57/15 (2023) 2483-2497

Schweiger, T.; Lienhard, J.; Hiermaier, S.
[A strain rate dependent and anisotropic failure material model for short fiber reinforced plastics based on energy density accounting for local fiber orientation](#)
 Journal of Composite Materials 57/12 (2023) 2013 – 2028

Sun, Q.; Dolle, C.; Kurpiers, C.; Kraft, K.; Islam, M.; Schwaiger, R.; Gumbsch, P.; Eggeler, Y. M.
[In situ pyrolysis of 3D printed building blocks for functional nano-scale metamaterials](#)
 Advanced Functional Materials Online First (2023) Art. 2302358, 12 Seiten

Sun, Q.; Dolle, C.; Kurpiers, C.; Schwaiger, R.; Gumbsch, P.; Eggeler, Y. M.
[In situ pyrolysis of 3D printed microstructures – an ESEM study](#)
 Microscopy and Microanalysis 28/S1 (2022) 2346 – 2348

Szczefanowicz, B.; Kuwahara, T.; Filleter, T.; Klemenz, A.; Mayrhofer, L.; Bennewitz, R.; Moseler, M.
[Formation of intermittent covalent bonds at high contact pressure limits superlow friction on epitaxial graphene](#)
 Physical Review Research 5/1 (2023) Art. L012049, 7 Seiten

Thomas, A.; Durmaz, A.; Alam, M.; Gumbsch, P.; Sack, H.; Eberl, C.
[Materials fatigue prediction using graph neural networks on microstructure representations](#)
 Scientific Reports 13/1 (2023) Art. 122562, 16 Seiten

Tlatlik, J.
[Verification of the master curve concept \(ASTM E1921\) and inhomogeneity analysis of a German RPV weld for various loading rates](#)
 Engineering Fracture Mechanics 279 (2023) Art. 108998, 18 Seiten

Tlatlik, J.; Hohe, J.; Münstermann, S.
[Analysis and improvement of local cleavage fracture models at elevated loading rates](#)
 Theoretical and Applied Fracture Mechanics 125 (2023) Art. 103857, 18 Seiten

Urban, D. F.; Körner, W.; Elsässer, C.
[Stability and magnetic properties of grain boundaries in the inverse Heusler phase Fe₂CoGa and in bcc Fe](#)
 Physical Review B 108/2 (2023) Art. 024415, 12 Seiten

Urban, D. F.; Sell, P.; Elsässer, C.
[Atomic migration and ordering of binary ferromagnetic intermetallic L10 phases and influences of alloying elements and electric fields](#)
 Advanced Energy Materials 25/18 (2023) Art. 2201864, 10 Seiten

Walter, M.; Linsler, D.; König, T.; Gäbert, S.; Reinicke, S.; Moseler, M.; Mayrhofer, L.
[Mechanochemical activation of anthracene \[4+4\] cycloadducts](#)
 The Journal of Physical Chemistry Letters 14/6 (2023) 1445-1451

Xia, K.; Dong, Z.; Sun, Q.; Debastiani, R.; Liu, S.; Jin, Q.; Li, Y.; Paetzold, U. W.; Gumbsch, P.; Lemmer, U.; Eggeler, Y. M.; Levkin, P. A.; Hernandez-Sosa, G.
[Electrical conductivity and photodetection in 3D-printed nanoporous structures via solution-processed functional materials](#)
 Advanced Materials Technologies 8/23 (2023) Art. 2300408, 10 Seiten

Xu, Y.; Nie, Z.; Li, J.; Du, C.; Amann, T.; Yuang, C.; Li, K.
[Enhanced superlubricity of 1,3-diketone oil by doping polydopamine functionalized silica nano-additive](#)
 Tribology International 185 (2023) Art. 108584, 11 Seiten

Yang, H.; Zhao, J.; Zhuang, J.; Hinterstein, M.; Ren, W.; Ye, Z.-G.; Zhang, N.
[Electric field-induced two-step phase transformation and its contribution to the electromechanical strain in lead-free relaxor-based ceramics](#)
 Journal of the European Ceramic Society 43/8 (2023) 3289-3296

Yuan, Y.; Amann, T.; Xu, Y.; Zhang, Y.; Chen, J.; Yuan, C.; Li, K.
[Load and velocity boundaries of oil-based superlubricity using 1,3-diketone](#)
 Friction 11/5 (2023) 704-715

Zoller, K.; Gruber, P.; Ziemann, M.; Görtz, A.; Gumbsch, P.; Schulz, K.
[Classification of slip system interaction in microwires under torsion](#)
 Computational Materials Science 216 (2023) Art. 111839, 10 Seiten

Unreferierte Zeitschriften

Bierwisch, C.; Butz, A.; Dietemann, B.; Najuch, T.
[Multiphysik-Simulation des Laserpulverbettsschmelzens mit mesoskopischen Modellen](#)
 Giesserei 9 (2023) 22-27

Durmaz, A. R.; Potu, S. T.; Romich, D.; Möller, J. J.; Nützel, R.
[Using deep learning to classify steel materials objectively](#)
 think.steel 1/4 (2023) 53-55

Huberth, F.; Dittmann, F.; Gall, M.; Arana, T.
[Einsatz kohlenstoffbasierter Materialien im Schienenverkehr, Studie zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit der dauerhaften Speicherung von CO2 in der Eisenbahninfrastruktur als Mittel des aktiven Klimaschutzes \(Teil 1\)](#)
 EI – Der Eisenbahningenieur 7 (2023) 69-72

Huberth, F.; Dittmann, F.; Gall, M.; Arana, T.
[Einsatz kohlenstoffbasierter Materialien im Schienenverkehr, Studie zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit der dauerhaften Speicherung von CO2 in der Eisenbahninfrastruktur als Mittel des aktiven Klimaschutzes \(Teil 2\)](#)
 EI – Der Eisenbahningenieur 8 (2023) 12-16

Kertsch, L.
[Simulation-based microstructure prediction](#)
 Wire 4 (2023) 12-13

Kertsch, L.
[Simulationsgestützte Mikrostrukturvorhersage in der Prozessauslegung](#)
 Draht 4 (2023) 10-11

Kölle, S.; Schweizer, F.
 Forschungsprojekt OptiHeat – Sichere und ökonomische Entgasungs-Wärmebehandlung für galvanisch beschichtete Bauteile
 WOMag 11 (2022) 20-21

Morand, L.; Butz, A.; Bierwisch, C.
[KI-basierte Vorhersage von Eigenschaften magnetorheologischer Fluide](#)
 Konstruktion 75/07-08 (2023) 58-62

Schweizer, C.; Garcia Trelles, E.
[Entwicklung von digitalen Wissensrepräsentationen für Hochtemperaturwerkstoffe](#)
 Prozesswärme 1 (2023) Seite 34

Wessel, A.; Butz, A.
[Blechwerkstoffe »virtuell« charakterisieren](#)
 Maschinenbau 5 (2023) 8-12

Zapara, M.; Augenstein, E.; Guk, S.; Hoffmann, F.; Jennings, R.; Prah, U.
[Praxisorientierte Schadensvorhersage bei mehrstufiger Kaltmassivumformung von Stählen mit nichtmetallischen Einschlüssen](#)
 massivUMFORMUNG Dez. 2022 (2022) 44-49

Buch

Bader, M.; Bareiß, J.; Diwo, A.; Donth, B.; Ganswind-Eyberg, J.; Hald, J.; Hauke, T.; Heckmann, S.; Kern, T. U.; Klenk, A.; Koalick, C.; Kozłowski, P.; Krein, R.; Maier, G.; Mathias, S.; Mohrmann, R.; Mußmann, J.; Schwienheer, M.; Seliger, P.; Steck, T.; Subanovic, M.; Udoh, A.
[vgbe-Technisch-wissenschaftlicher Bericht: 9 % bis 12 % Cr-Stähle – Auslegung, Herstellung, Betrieb und Sicherheitskonzepte, VGBE-TW 531](#); vgbe energy service GmbH (Hrsg.); Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften, Essen (2023) 157 Seiten

Bierwisch, C.
[Particle level simulations in magnetorheological suspensions. Magnetic Soft Matter: Fundamentals and Applications, Soft Matter Series No. 18; de Vicente, J. \(Hrsg.\)](#); The Royal Society of Chemistry, London, UK (2023) 379-409

Elsässer, C.; Michler, T.; Gumbsch, P.
[Unfallsicherheit und Lebensdauer – Materialien](#)
 Wasserstofftechnologien; Neugebauer, R. (Hrsg.); Springer Vieweg, Wiesbaden (2022) 351-366

Elsässer, C.; Michler, T.; Gumbsch, P.
[Accident prevention and service life – Materials](#)
 Hydrogen Technologies; Neugebauer, R. (Hrsg.); Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland (2022)

Wessel, A.; Schilling, M.; Butz, A.; Willmann, T.; Bischoff, M.
[Weiterentwicklung der verbesserten Blechumformsimulation durch 3D-Werkstoffmodelle und erweiterte Schalenformulierungen](#)
 Blechverarbeitung MORGEN unter den Aspekten Nachhaltigkeit + Digitalisierung; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V. EFB, Hannover (2023) 251-264

Tagungsband

Andrieux, F.; Klitschke, S.; Trondl, A.
[Failure model calibration of a DP1000 dual phase steel using solid and shell elements for crash simulation](#)
 in Proc. of 14th European LS-DYNA Conference 2023; Dynamore GmbH, Stuttgart (2023) 7 Seiten

Baur, M.; Kürten, D.; Kailer, A.
[Untersuchung der Diffusion und Akkumulation von Wasserstoff im Walzkontakt und Möglichkeiten zur Vermeidung der WEC-Bildung](#)
 VDI-Berichte Band 2415, 15. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen 2023; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag, Düsseldorf (2023) 333-342

Beckmann, C.; Findeisen, C.; Schober, M.; Judt, P.; Jatzlau, P.; Schäuble, R.; Hohe, J.
[Probabilistic analysis and integrity assessment of filament wound CFRP pressure vessels accounting for stochastically distributed micro defects](#)
 in Proc. of 17th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (ECSSMET); ESA/ESTEC, Noordwijk, NL (2023) 496-501

Bierwisch, C.; Dietemann, B.; Najuch, T.
[Accurate laser powder bed fusion modelling using ISPH](#)
 in Proc. of 17th SPHERIC International Workshop 2023; Fourtakas, G. (Hrsg.); University of Manchester, Manchester, UK (2023) 255-261

Blug, A.; Thiemann, K.; Philipp, S.; Straub, T.; Butz, A.
[Quantum magnetometry with OPM: Novel applications in non-destructive testing?](#)
 in Proc. of 26th IMEKO TC4 International Symposium and 24th International Workshop on ADC and DAC Modelling and Testing, IWADC 2023; Popovic Renella, D.; Dvatos, J.; Sovilji, P. (Hrsg.); International Measurement Confederation IMEKO, Budapest, HUNGARY (2023) 122-125

Braun, M.; Fischer, C.; Baumgartner, J.; Varfolomeev, I.; Hecht, M.
[Zum Verhältnis von Rissinitierung und -ausbreitung an gekerbten Proben mit Schweißnahtcharakteristik in Tagungsband 54. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit »Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethode und Anwendungen«, DVM-Bericht 254; Vormwald, M. \(Hrsg.\); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin \(2022\) 225-236](#)

Christ, N.; Montesano, J.; Hohe, J.
[Experimental investigation of carbon long fiber reinforced polyamide 6 exposed to environmental conditions PAMM 22/1](#)
 Special Issue: 92nd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM); Kaliske, M. (Hrsg.); Wiley-VCH GmbH, Weinheim (2023) Art e202200166, 7 Seiten

Dietemann, B.; Najuch, T.; Mohseni-Mofidi, S.; Wessel, A.; Butz, A.; Bierwisch, C.
[Simulation of the laser powder bed fusion process with a holistic workflow](#)
 in Proc. of Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2023; Müller, B. (Hrsg.); Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2023) 6 Seiten

Findeisen, C.; Schober, M.; Appel, S.; Hohe, J.; Weiss, K.-P.
[Development and implementation of a parameter estimation and post-processing tool for the failure analysis of composite materials](#)
 in Proc. of 17th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (ECSSMET); ESA/ESTEC, Noordwijk, NL (2023) 539-543

Fischer, C.; Oesterlin, H.; Michler, T.
[Comparison of design approaches on the design lifetime prediction of gaseous hydrogen storage tanks](#)
 in Proc. of ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference PVP 2023 Vol. 1: Codes and Standards; The American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, USA (2023) Art. PVP2023-105731, 10 Seiten

Fliegner, S.; Dominguez, J. M.; Francisco Morgado, J.; Kobialka, H.-U.; Kraft, T.; Luke, M.; Rosenberger, J.; Tlatlik, J.
[Digitale Methoden für die Lebensdauerbewertung am Beispiel hochfester Stähle](#)
 in Tagungsband 49. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit 2023, Betriebsfestigkeit – Potenziale der Betriebsfestigkeit in Zeiten des technologischen und gesellschaftlichen Wandels; Decker, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2023) 31-44

Fliegner, S.; Dominguez, J. M.; Francisco Morgado, J.; Kobialka, H.-U.; Kraft, T.; Luke, M.; Rosenberger, J.; Tlatlik, J.
[Digitale Methoden für die Lebensdauerbewertung am Beispiel hochfester Stähle](#) in Tagungsband Werkstoffprüfung 2023 – Werkstoff und Bauteile auf dem Prüfstand; Wächter, M.; Langer, B. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM Berlin (2023) 14-24

Grünwald, M.; Baumann, S.; Popp, K.; Lang, M.; Bastian, M.; Mohseni-Mofidi, S.; Bierwisch, C.; Rudloff, J.
[Analysis of the energy input during the sintering process of polyamide 12](#)
 AIP Conference Proceedings 2607/1 – Proc. of 36th Conference of the Polymer Processing Society – PPS36; Aij, A.; Mighri, F.; Nagub, H. E. (Hrsg.); AIP Publishing, Melville, NY, USA (2023) Art. 120001-1, 5 Seiten

Hohe, J.; Fliegner, S.
[Anisotropic creep analysis of fiber reinforced load point support structures for thermoplastic sandwich panels](#)
 Creep in Structures VI. IUTAM 2023. Advanced Structured Materials, Vol. 194; Altenbach, H.; Naumenko, K. (Hrsg.); Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland (2023) 161-274

Kern, T.-U.; Schwienheer, M.; Maier, G.
[Creep and Creep-Fatigue interaction for rotor material made of MarBN \(HOWEFLEX\)](#)
 in Proc. of 6th Creep & Fracture Conference ECC2023; ECC2023) 408-419

- Kugler, M.; Rödiger, S.; Dienwiebel, M.; Könke, C.
Dämpfungsverhalten verschiedener Materialien im
Frettingkontakt – Experiment und Simulation über Finite-Elemente-Methode in Tagungsband Reibung, Schmierung und Verschleiß – Forschung und praktische Anwendung
64. Tribologie Fachtagung 2023; Gesellschaft für Tribologie e. V., Aachen (2023) 4 Seiten
- Koplin, C.; Schlüter, B.; Hohe, J.; Schirmeister, C.; Hees, T.; Mühlhaupt, R., Jaeger, R.
[3D printing of lightweight »All-Polyethylene Single Component« composite materials designed for circularity](#)
in Proc. of Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2023; Müller, B. (Hrsg.); Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2023) 5 Seiten
- Kürten, D.; Kailer, A.; Franke, J.; Lengel, R.; Franken, M.; Smudzinski, N.; von Knorring, J.
[Untersuchung zur Wasserstofffreisetzung im Roll- und Gleitkontakt für unterschiedliche Schmierstoffformulierungen](#)
VDI-Berichte Band 2415, 15. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen 2023; VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.); VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2023) 343-353
- Lenz, C.; Ziesche, S.; Reinhardt, K.; Körner, S.; Schletz, A.; Bach, H. L.; Schmidt, I.; Simon-Naiasek, M.
[Development and characterization of a monolithic ceramic pre-package for SiC-semiconductor devices based on LTCC technology](#)
in Proc. of 9th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC) 2022; Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE (2022) 62-66
- Lienhard, J.; Backes, R.; Andrieux, F.; Herrmann, T.
[Bewertung des Porositätseinflusses auf lokale mechanische Eigenschaften von Aluminiumgussbauteilen mittels digitaler Datenerfassung](#)
in Tagungsband 40. Tagung Werkstoffprüfung 2022: Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand; Prüftechnik – Kennwertermittlung – Schadensvermeidung; Zimmermann, M. (Hrsg.); Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V., Sankt Augustin (2023) 79-84
- Maier, G.; Riedel, H.
[Anwendung eines neuen Modells zur Anriss- und Restlebensdauerbewertung bei Kriechermüdungsbeanspruchung am Beispiel eines MarBN-Stahls](#)
in Tagungsband 45. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe 2022; Forschungsvereinigung für Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe FVWHT, Düsseldorf (2022) 14 Seiten
- Morand, L.; Weber, M.; Butz, A.; Helm, D.; Pfeffer, K.; Bauer, F.; Schlay, B.; Eisenbart, M.; Klotz, U. E.
[Charakterisierung und Modellierung des Langzeitverhaltens von Kupferwerkstoffen und Anwendung: Effiziente Identifikation von Materialparametern im Cantilever-Versuch](#)
Wirtschaftskompendium Kupfer-Symposium 2023 Vortragsband; Kupferverband e. V.; Eigenverlag, Jena (2023) 20-27
- Olfert, V.; Schuster, L.; Baehr, P.; Hein, D.; Meschut, G.; Sommer, S.
[Methodenentwicklung zur Prognose des Crashverhaltens von widerstandspunktgeschweißten 3-Stahlblechverbindungen](#)
in Tagungsband 25. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen 2023; Boecking, R. (Hrsg.); GSI-Gesellschaft für Schweißtechnik, Duisburg (2023) 9-22
- Philipp, S.; Mathes, N.; Feuerhelm, M.; Durmaz, A. R.; Deldar, S.; Soldatov, I.; Schäfer, R.; Vidal, X.; Straub, T.
[Diamond-based magnetic widefield-microscopy of domain patterns in electrical steel](#)
in Proc. of SMSI 2023 – Sensor and Measurement Science International Conference; AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e. V. (Hrsg.); AMA Service GmbH, Wunstorf (2023) 75-76
- Radners, J.; Schweizer, C.; Eckmann, S.; Al-Ameri, M.; Amann, C.; Gumbsch, P.; Kadau, K.
[Influence of casting defects on the low cycle fatigue performance of MAR-M247 – A path towards a probabilistic model](#)
in Proc. of ASME Turbo Expo 2023: Power for Land, Sea, and Air: Turbomachinery Technical Conference and Exposition Vol. 11 B: Structures and Dynamics; The American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, USA (2023) Art. GT2023-101940, 8 Seiten
- Rohrmüller, B.; Kneisel, F.; Hohe, J.; Beckmann, C.
[Experimental investigation of the uncertainty of disordered fiber-reinforced injection-molded components](#)
in Proc. of UNCECOMP 2023, 5th ECCOMAS Thematic Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering; Papadrakakis, M.; Papadopoulos, V.; Stefanou, G. (Hrsg.); National Technical University of Athens, Athens, Greece (2023) 684-694
- Romero, P. A.; Brink, A.; Scherge, M.; Moseler, M.
[Shear induced dynamic grain-refinement in sliding polycrystalline metal surfaces](#)
High Performance Computing in Science and Engineering, 20; Transactions of the High Performance Computing Center (HLRS) 2020; Nagel, W. E.; Körner, D. H.; Resch, M. M. (Hrsg.); Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland (2022) 169-183

Rosenberger, J.; Tlatlik, J.; Münstermann, S.
[Crack size measurements on fracture surface images using deep neural networks for semantic segmentation](#)
 in Proc. of the ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2023 Vol.2: Computer Technology & Bolted Joints; Design & Analysis; The American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, USA (2023) Art. PVP2023-106773, V002T02A019, 8 Seiten

Rosenberger, J.; Tlatlik, J.; Münstermann, S.
[Automatisierte Analyse von Bruchflächen mittels künstlicher neuronaler Netzwerke \(KNN\) für kerntechnisch relevante Sicherheitskomponenten](#)
 in Tagungsband 55. Tagung des Arbeitskreis Bruchmechanik und Bauteilsicherheit; Vormwald, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e. V. DVM, Berlin, Deutschland (2023) 9-16

San Marchi, C.; Ronevich, J. A.; Pohl, J.; Ramseyer, S.; Cortinovis, D.; Eckmann, S.
[Fatigue crack initiation and fatigue life testing of high-strength austenitic stainless steel tubing with internal hydrogen](#)
 in Proc. of ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference PVP 2023 Vol. 5: Materials & Fabrication; The American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, USA (2023) Art. PVP2023-106413, V005T06A073, 6 Seiten

Schackert, S.; Riedel, H.; Schweizer, C.
 Risswachstum unter thermomechanischer Ermüdung an der Nickelbasis Gusslegierung Inconel 100
 in Tagungsband 54. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit »Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethode und Anwendungen«, DVM-Bericht 254; Vormwald, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e. V. DVM, Berlin (2023)

Schilling, M.; Willmann, T.; Wessel, A.; Butz, A.; Bischoff, M.
[Higher-order 3D-shell elements and anisotropic 3D yield functions for improved sheet metal forming simulations: Part I](#)
 in Proc. of 14th European LS-DYNA Conference 2023; DYNAMore GmbH, Stuttgart (2023) 10 Seiten

Schweiger, T.; Lienhard, J.; Grimm-Strele, H.; Kabel, M.
[Automatic generation of high performance material models for long fiber reinforced plastics in crash simulations](#)
 in Proc. of 14th European LS-DYNA Conference 2023; DYNAMore GmbH, Stuttgart (2023) 7 Seiten

Schwienheer, M.; Kern, T.-U.; Diwo, A.; Langer, U.; Maier, G.
[Herstellung und Qualifizierung des Werkstoffs MarBN für Rotoranwendungen – Grundcharakteristik und Langzeiteigenschaften](#)
 in Tagungsband 45. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe: Neues aus Anwendung und Forschung; Forschungsvereinigung für Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe FVWHT, Düsseldorf (2022) 12 Seiten

Shrestha, R.; Ronevich, J. A.; Michler, T.; San Marchi, C.
[Fatigue and fracture behavior of aluminum alloys in gaseous hydrogen](#)
 in Proc. of ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference PVP 2023 Vol. 5: Materials & Fabrication; The American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, USA (2023) Art. PVP2023-106442, V005T06A075, 7 Seiten

Sommer, S.; Pichl, I.
[Untersuchung und Bewertung der Mischbruchneigung von Widerstandspunktschweißverbindungen in hochfesten Stählen](#)
 in Tagungsband 25. DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen 2023; Boecking, R. (Hrsg.); GSI-Gesellschaft für Schweißtechnik, Duisburg (2023) 1-8

Wenz, F.; Lichti, T.; Schwarz, A.; Lechner, A.; Andrae, H.; Hueber, C.; Eberl, C.
[Programming shape morphing in metamaterials](#)
 ECCOMAS Proceedings – 10th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials SMART 2023; Sarvanos, D. A.; Benjeddou, A.; Chrysochoidis, N. A.; Theodosiou, T. C. (Hrsg.); Mechanical Engineering & Aeronautics Department, University of Patras, Patras, Greece (2023) 1601-1610

Wessel, A.; Perdahcioğlu, E. S.; Butz, A.; van den Boogard, T.; Volk, W.
[Prediction of texture-induced plastic anisotropy in AA6014-T4 aluminium sheets utilising two different crystal plasticity-based constitutive models](#)
 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 1284, 42nd Conference of the International Deep Drawing Research Group IDDRG 2023, IOP Publishing Ltd, Bristol, UK (2023) Art. 012059, 10 Seiten

Wessel, A.; Schilling, M.; Willmann, T.; Butz, A.; Bischoff, M.
[Higher-order 3D-shell elements and anisotropic 3D yield functions for improved sheet metal forming simulations: Part II](#)
 in Proc. of 14th European LS-DYNA Conference 2023; DYNAMore GmbH, Stuttgart (2023) 10 Seiten

Dissertationen

Philipp Bähr
 Universität Paderborn
 Modellierung von Kerbeffekten durch Stanznietverbindungen unter Berücksichtigung des Fügeprozesses

Florian Dittmann
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Berücksichtigung von Sekundärspannungen in der bruchmechanischen Bewertung

Ali Riza Durmaz
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Experimental and data-driven workflows for microstructure-based damage prediction

Joachim Faller
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Über das Einlaufverhalten amorpher Kohlenstoffschichten und dessen nanoskaligen Fingerabdruck

Rafael Gryga*
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Simultan betriebene Hohlkathodenentladungen zur Deposition von wasserstoffhaltigen amorphen Kohlenstoffschichten in Sacklochgeometrien

Erik Arne Hansen*
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Numerical analysis of friction reduction due to surface textures in the mixed lubrication regime

Mohamed Tarek Elewa Hassan*
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Pressure gradients in molecular dynamics simulations of nano-confined fluid flow

Hannes Holey*
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Entwicklung einer Multiskalenmethode für die Simulation von Schmierprozessen

Lukas Kertsch
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Modellierung des thermomechanischen Materialverhaltens und der Gefügeentwicklung mikrolegierter Stähle (Nachtrag aus 2022)

Chantal Miriam Kurpiers*
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Untersuchung der Mikrostruktureinflüsse auf die mechanischen Eigenschaften von Nano- und Mikroarchitekturen

Martin Möller*
 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
 Entwicklung eines mehrstufigen Methodenrahmens für eine prospektive Nachhaltigkeitsbewertung von neuartigen Technologien und Materialsystemen (TAPAS)

Carina Elisabeth Morstein
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Graphite lubrication mechanism under high mechanical load

Francesco Radaelli*
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Probabilistic modeling approach to crack nucleation from forging flaws

Benedikt Rohrmüller
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Characterization and modeling of fiber-matrix interfaces of a glass fiber reinforced sheet molding compound

Dennis Rusitov*
 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
 Tunable phenyl diazo ester containing polymers for C-H insertion crosslinking (CHic)

Sophie Schackert
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Experimentelle und bruchmechanische Untersuchungen zum Ermüdungsrisswachstum an der Nickelgusslegierung IN100 und dem austenitischen Edelstahl 1.4550

Timo Schweiger
 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
 Modellierung des Versagensverhaltens von faserverstärkten Thermoplasten für die Crashesimulation

Xiaochen Song*
 Ruhr-Universität Bochum
 Analysis and microstructure based simulation of fatigue damage in high-performance steels

Roman Virsik*
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Untersuchung eines neuartigen trockengeschmierten Verbrennungskolbens mit Fokus auf dessen tribologische Eigenschaften

Studentische Arbeiten (Bachelor, Master, Diplom)

- Caroline Adam
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Untersuchungen zur plasmagestützten Abscheidung von Al₂O₃-Schichten im reaktiven hybriden MF/HF-HiPIMS-Sputterprozess (B)
- Wael Alkhaled
Universität Stuttgart
Untersuchungen zur Transmission und Benetzungsverhalten strukturierter Gläser – Investigations on the transmission and wetting properties of structured glass surfaces (M)
- Öner Aydoğan
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Bestimmung der Kerbformzahlen von Schweißverbindungen aus Oberflächenscans durch künstliche neuronale Netze (M)
- Philipp Bratsch
Technische Hochschule Mittelhessen
Einfluss von Druckwasserstoff auf das Zugverhalten von Hohlproben (B)
- Amanda Bruncrona
Aalto University
Nucleation modelling during selective laser melting (M)
- Sarp Dündar*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Development of the laser textured dimples post-processing on 100Cr6 Steel (B)
- Kirsten Flockenhaus
Hochschule Zittau/Görlitz
Vergleichende Ökobilanzierung von Pflanzenkohle gegenüber Talkum in Polypropylen-Werkstoffen (B)
- Janik Harter
Hochschule Offenburg
Weiterentwicklung des Material Data Fusion Tools zur Versagensmodellierung von Aluminiumgussbauteilen unter Berücksichtigung von Defektverteilungen (M)
- Florian Sven Erich Claus Heisch
Technische Universität Berlin
Entwicklung, additive Fertigung und Untersuchung bionisch inspirierter Triply Periodic Minimal Surfaces zur Anwendung in Protektoren (M)
- Andreas Heitzmann
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Untersuchungen zum Scherversagen hochfester Blechwerkstoffe in einem weiten Dehnratenbereich (M)
- Till Herrmann
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Analysing neural network architectures for predicting fibre orientation tensors (B)
- Thitichai Janpheng
Hochschule Offenburg
Dichtebasierte Nachbildung eines trabekulären Knochens mit Triply Periodic Minimal Surface Struktur (B)
- Jixing Jie*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Entwicklung einer In-situ Verschleißmessung (M)
- Franziska Kneisel
Universität Siegen
Experimentelle statistische Charakterisierung von mikroheterogenen Werkstoffen am Beispiel eines spritzgegossenen Kurzfasern-Kunststoffverbunds (M)
- Sai Kumar Konidena
Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Digitization of weld geometry for fatigue life assessment by optical 3D measurement technique (M)
- Johannes Krautheimer
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Entwicklung eines Algorithmus zur automatisierten Auswertung geometrischer Parameter aus 3D-Punktwolken (B)
- Patrick Kusser
Hochschule Offenburg
Entwicklung von supraschmierenden Gleitlagern (M)
- Jiajie Liang*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Thermomechanical properties of 3D-printed nanoceramics (M)
- Lisa Plassery*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Process parameter optimisation for laser surface texturing of 100 Cr6 steel (B)
- Sai Teja Potu
Leibniz Universität Hannover
Deep neural networks for microstructure classification of high variance martensitic and bainitic micrographs (M)
- Manisha Poudel
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Ab initio simulations of mechano-electrochemical properties of silicon based anodes for lithium ion batteries (M)

David Primus
Frankfurt University of Applied Sciences
Untersuchung des Ermüdungsverhaltens additiv gefertigter Metalle in Flüssigstickstoff und mit Wasserstoffbelastung (B)

Sri Rathinamani Ramdoss
Technische Universität Darmstadt
On the applicability of strength assessment schemes in hydrogen environment (M)

Harihara Subramanian Ramesh
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
X-ray diffraction residual stress analysis of additively manufactured and textured 316L steel using the cos alpha method (M)

Gokarna Regmi
Hochschule Kaiserslautern
Konstruktion von Vorrichtung für IR-Strahler in den Glasformofen zur Effizienzoptimierung von Formgebungsprozessen für Flachglas (B)

David Schmid
Hochschule Offenburg
Einfluss der Dehnrate auf die Fließfiguren der Aluminiumblechlegierungen EN AW-5182 (B)

Christian Schrewe
Hochschule Offenburg
Experimentelle und numerische Untersuchung der Scherfestigkeit von Schweißpunkten mit Hilfe von Torsionsversuchen (B)

Timur Seferli
Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes HTW Saar
Experimentelle Untersuchungen zur wechsellastigkeitsinduzierten Ausscheidungshärtung von Aluminium EN AW 2024 – Experimental investigations of cycling plasticity precipitation strengthening of aluminium EN AW 2024 (M)

Shahenda Fouad Ezzeldin Mohamed Ahmed Seif
Paris-Saclay University France
Tribology of all-hydrocarbon-composites (M)

Kaan Sevim*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Implementation of active learning with Gaussian process regression for molecular simulation data (B)

Nisha Singh
KTH Royal Institute of Technology
Impact of frame stiffness on tribological behaviour of sliding interfaces (M)

Vraj Soni*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Laser surface modification of titanium alloy Ti6Al4U for tribological applications (B)

Felix von Hoegen*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Surrogat-Modellierung zur Charakterisierung der Mikrostruktureffekte in der kontinuierlichen Versetzungsdynamik (M)

Emanuel Werth*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
3D-Printed ceramic metamaterials with tensegrity nanoarchitecture (M)

Wissenschaftliche Auszeichnungen und Preise

1. Platz im Wettbewerb »My research project in 180 seconds« Tribology Today – Winter School 2023 an Franziska Stief für »Viscous friction in mixed and boundary lubrication: fluid dynamics far from equilibrium« 20.10.2023, Monastir, Tunesien

Lothar-Späth-Award 2023
Lothar-Späth Award Stiftung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V.
an Matthias Scherge für »Mobiles Messgerät zur Detektion und Überwachung von PFAS-Verbindungen« 16.11.2023, Jena

Abschlussberichte öffentlich geförderter Projekte

Entwicklung eines wasserbasierten Schmierstoffs für Gleitlager am Vorbild des Synovialgelenks – HydroSyn
Abschlussbericht (2023)
Amann, T.; Kailer, A.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
Förderkennzeichen: 13XP5166A
Projektlaufzeit: 01.10.2021 bis 31.03.2023

Energieeffizienz durch Standzeiterhöhung von Lagern unter tribokorrosiven Betriebsbedingungen – POSEIDON II
Teilprojekt IWM: Molekulardynamik Simulation unter tribokorrosiven Betriebsbedingungen
Abschlussbericht (2023)
Bartz, M.; Brückner, T.; Decho, H.; dos Santos, C.; Feige, K.; Fluch, R.; Hahn, I.; Hasselbruch, H.; Herrera, C.; Hrubý, H.; Kaestner, P.; Kölle, S.; Kröner, J.; Mehner, A.; Mielewski, E.; Moras, G.; Moseler, M.; Niederhofer, P.; Paschke, H.; Procelewska, J.; Reichenbach, T.; Rudnik, Y.; Schwanzer, P.; Siebert, S.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: 03ET1477D
Projektlaufzeit: 01.06.2018 bis 30.09.2022

Abriebbeständige, superomniophobe Glasabdeckungen mit breitbandiger Entspiegelung nach dem Vorbild des Glasflügelfalters – GLASSWING
Abschlussbericht (2023)
Burmeister, F.; Schillinger-Engel, K.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
Förderkennzeichen: 13XP5165A | Verbund-Nr. 01237338
Projektlaufzeit: 01.10.2021 bis 21.12.2022

Sortenreine Komposite mit adaptiver Strukturbildung unter tribologischer Belastung – ADAPTRIBO
Abschlussbericht (2023)
Jaeger, R.; Koplin, C.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
Förderkennzeichen: 13XP5170A
Projektlaufzeit: 01.10.2021 bis 31.12.2022

Steigerung der Energieeffizienz von Sinteröfen – EnEffiSint
Abschlussbericht (2023)
Janzen, V.; Ernst, E.; Schneider, M.; Preuß, M.; Bernd, K.; Creutziger, M.; Engler, N.; Halwas, Vatahsk, T.; Pietrucha, S.; Kraft, T.; Schmidt, I.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: 03ET1640E
Projektlaufzeit: 01.11.2018 bis 31.10.2022

Feststoffschmierung durch Kohlenstoffnanoröhren: Grundlegendes Verständnis der Transferschichtbildung und der Gleitmechanismen durch Atomistik und experimentelle Nanoanalytik – CNTLUB
Abschlussbericht (2023)
Klemenz, A.; MacLucas, T.
Fördermittelgeber: Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG
Förderkennzeichen: 407711892
Projektlaufzeit: 01.01.2029 bis 30.04.2022

EroSim – Entwicklung und Erprobung eines Modellrahmens zur prädiktiven Aufklärung von erosivem Verschleiß in pneumatischen Förderungen
Abschlussbericht (2023)
Kruggel-Emden, H.; Drescher, E.; Bierwisch, C.; Mohseni-Mofidi, S.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 20815 N
Projektlaufzeit: 01.10.2019 bis 31.03.2023

Verbundprojekt: Gasmotoren-Entwicklung: Energieeffiziente Systemtechnologien mit integraler Robustheit – GESIR
Teilvorhaben: Entwicklung von Prüfkonzepten und Bewertung des tribologischen Verhaltens von Ventilkomponenten und Schmierstoffen
Abschlussbericht (2023)
Kürten, D.; Kailer, A.; Dienwiebel, M.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: 19119006E
Projektlaufzeit: 01.07.2019 bis 31.03.2023

Sensorbasierte Elektroniksysteme zur nachhaltigen Nutzung von Schmierstoffen in Industrieanlagen – Lube.Life
Abschlussbericht (2023)
Linsler, D.; Mayrhofer, L.; Schütte, M.; Kruse, L.; Stief, F.; Reichenbach, T.; Walter, M.; Moseler, M.; Scherge, M.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
Förderkennzeichen: 16ME0105
Projektlaufzeit: 01.04.2019 bis 31.03.2023

STREAM – Semantische Repräsentation, Vernetzung und Kuratierung von qualitätsgesicherten Materialdaten
Abschlussbericht (2023)
Nashon, Y.; Weber, M.; Kraft, T.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF
Förderkennzeichen: 16QK11A | Verbund-Nr. 01187067
Projektlaufzeit: 01.08.2019 bis 31.12.2022

Methodenentwicklung zur Prognose des Crashverhaltens von widerstandspunktgeschweißten 3-Stahlblechverbindungen – WPS-Crash 3-Blech
Abschlussbericht (2023)
Meschut, G.; Hein, D.; Olfert, V.; Sommer, S.; Schuster, L.; Bähr, P.; Heise, F.-J.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 20998 N
Projektlaufzeit: 01.02.2020 bis 31.01.2023

Untersuchung und Bewertung der Mischbruchneigung von Widerstandspunktschweißverbindungen in hochfesten Stählen – Mischbruch
Abschlussbericht (2023) DVS Forschung, Band 573
Sommer, S.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 20264 N
Projektlaufzeit: 01.09.2019 bis 31.08.2022

Verbundprojekt Bruchdynamik Phase 3: Untersuchung des Masterkurven-Konzepts bei dynamischer Rissbeanspruchung
Teilprojekt: Untersuchung anhand von dynamischen SE(B)-Versuchen
Abschlussbericht (2023)
Tlatlik, J.; Discher, D.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV
Förderkennzeichen: 1501563A
Projektlaufzeit: 01.05.2018 bis 31.07.2022

Probabilistische Sicherheitsbewertung von Behältern aus Gusseisen
Abschlussbericht (2023)
Tlatlik, J.; Discher, D.; Schober, M.; Rohrmüller, B.; Beckmann, C.; Aydin, A.; Varfolomeev, I.; Huberth, F.; Siegele, D.; Hohe, J.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz BMUV
Förderkennzeichen: 1501576
Projektlaufzeit: 15.10.2015 bis 14.08.2022

Qualifizierung von standardisierten Langzeitversuchen an Kupferwerkstoffen zur wirtschaftlichen Bestimmung von Materialparametern für CAE-Anwendungen
Abschlussbericht (2023)
Weber, M.; Norouzi, E.; Morand, L.; Butz, A.; Helm, D.; Schlay, B.; Bauer, F.; Pfeffer, K.; Klotz, U. E.; Eisenbart, M.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 21114N
Projektlaufzeit: 01.05.2020 bis 30.04.2023

3D-Blechmodellierung II – Verbesserte Blechumformsimulation durch 3D-Werkstoffmodelle und erweiterte Schalenformulierungen – Teil 2
Abschlussbericht (2023) EFB-Forschungsbericht 607
Wessel, A.; Butz, A.; Schilling, M.; Bischoff, M.
Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 19707N
Projektlaufzeit: 01.01.2021 bis 30.06.2023

Vorlesungen

Wintersemester 2022/2023

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

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

Wissenschaftliches Programmieren
Dr. Michael Walter

Hochschule Offenburg

MA-15, Teil Kunststoffe
Frank Huberth

Konstruktionselemente
Dr. Raimund Jaeger

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nanotribologie und -mechanik
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Seminar zu studentischen Arbeiten am IAM-ZM
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

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

Universität Siegen

Composites I – Verbundwerkstoffe
Dr. Jörg Hohe

Sommersemester 2023

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Continuum Mechanics I
Dr. Dirk Helm

Computational Materials Engineering
Dr. Gianpietro Moras

Oberseminar Simulationen in der Materialphysik
Prof. Dr. Michael Moseler

Quantum Transport
Dr. Michael Walter

Werkstoffwissenschaften
Franziska Wenz
Mario Schleyer

Hochschule Offenburg

Werkstofftechnik III: Teil Mechanik und Festigkeitslehre
Frank Huberth

Werkstofftechnik IV: Teil Kunststoffe
Frank Huberth

Numerische Methoden der Biomechanik
Dr. Christof Koplín

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nanotribologie und -mechanik
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Physik für Ingenieure
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Praktikum Tribologie
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Angewandte Werkstoffsimulation
Prof. Dr. Peter Gumbsch

MD Simulation
Dr. Daniel Mutter

Anwendungsorientierte Materialtheorien
Dr. Ingo Schmidt

Universität Siegen

Composites II – Werkstoffverbunde
Dr. Jörg Hohe

Impressum

Fraunhofer-Institut
für Werkstoffmechanik IWM
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg
Tel.: +49 761 5142-154
Fax: +49 761 5142-510
info@iwf.fraunhofer.de
www.iwf.fraunhofer.de

Geschäftsführende Institutsleitung

Institutsleitung
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Stellvertretende Institutsleitung
Dr. Rainer Kübler, Prof. Dr. Chris Eberl

Redaktion

Thomas Götz (verantw.)
Anabel Thieme

Gestaltung, Layout und Satz

Graphikbuero GEBHARD|UHL, Freiburg

Druck

Fraunhofer-Druckerei

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, 2024

Bleiben Sie auf dem Laufenden

Internet: www.iwf.fraunhofer.de
LinkedIn: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
YouTube: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Bildnachweise

© Fraunhofer IWM, Grafik: GEBHARD|UHL Freiburg; Titel
© Fraunhofer IWM, Foto: Margrit Müller; 3
© Fraunhofer IWM, Grafik: GEBHARD|UHL Freiburg; 6 – 7
© Fraunhofer, Foto: Piotr Banczerowski; 8 (Mitte unten)
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 8 – 9
© Fraunhofer IWM, Grafik: GEBHARD|UHL Freiburg; 10 – 11
© Fraunhofer IWM, Foto: Margrit Müller; 14
© Fraunhofer IWM, Foto: Margrit Müller; 16
© Fraunhofer IWM, Foto: Margrit Müller; 18
© Fraunhofer IWM, Foto: Margrit Müller; 20
© Fraunhofer IWM, Grafik: GEBHARD|UHL Freiburg; 25
© Projektträger Jülich im Auftrag des BMBF; 27

Alle weiteren Abbildungen

© Fraunhofer IWM

Am Fraunhofer IWM stellen wir die Brücke her zwischen dem Verhalten und den Eigenschaften von Materialien und der Langlebigkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Funktion technischer Systeme. Somit eröffnen wir für verschiedene Anwendungsfelder und zur Bewältigung der großen gesellschaftlichen und industriellen Herausforderungen neue werkstofftechnologische Innovations- und Gestaltungsräume.

Die Fraunhofer-Gesellschaft

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

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

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 76 Institute und Forschungseinrichtungen. Unsere derzeit rund 30 800 Mitarbeitenden, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von rund 3,0 Mrd. €. Davon fallen 2,6 Mrd. € auf den Bereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund ein Drittel steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

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

Hoch motivierte Mitarbeitende, die Spitzenforschung betreiben, stellen für uns als Wissenschaftsorganisation den wichtigsten Erfolgsfaktor dar. Fraunhofer bietet daher die Möglichkeit zum selbstständigen, gestaltenden und zugleich zielorientierten Arbeiten und somit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung, die zu anspruchsvollen Positionen in den Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft befähigt. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und des frühzeitigen Kontakts mit Auftraggebern hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

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

