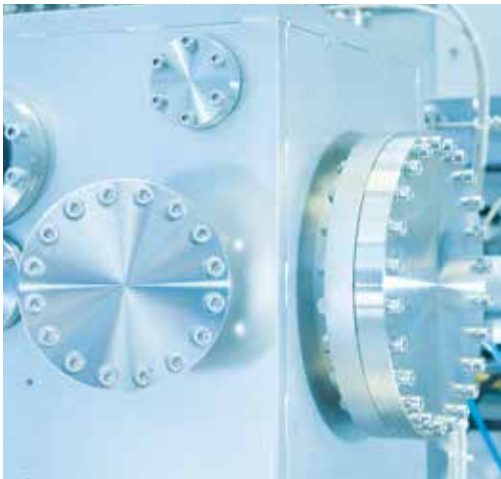
Fraunhofer
IWM

Fraunhofer-Institut für
Werkstoffmechanik IWM

Jahresbericht 2024



Röntgendiffraktometer »D8 DISCOVER«
Mit diesem Labordiffraktormeter analysieren wir Eigenspannungen und führen Phasenanalysen zerstörungsfrei durch – etwa an umgeformten Bauteilen, Schweißnähten oder funktionalen Beschichtungen und Funktionsmaterialien. Die Daten bilden die Grundlage für Modelle zur Bewertung von Lebensdauer, Integrität und Schädigungsmechanismen; auch nach Belastung durch Wasserstoff oder thermischer Beanspruchung.

Wasserstoff-Mikroautoklav
Mit unserer neu entwickelten Hochdruck-Wasserstoffkammer können wir miniaturisierte Bauteile wie Sensoren oder Mikroproben dünnwandiger Komponenten untersuchen sowie lokale Eigenschaften – etwa von Schweißnähten – effizient bewerten. Statt unter Vorbeladung werden Mikrozugproben künftig direkt in H_2-Atmosphäre (»in-situ«), bis 100 bar quasi-statisch und zyklisch untersucht.

3D-Drucker für Direct Ink Writing (DIW) von CR3D
Mit diesem hochpräzisen 3D-Drucker erschließen wir neue Möglichkeiten zur Herstellung maßgeschneiderter Funktionsmaterialien auf Basis von Suspensionen. So können alle sinterbaren Materialien wie Metalle und Keramiken verarbeitet werden und komplexe Strukturen und Materialkomposite – etwa für Hochtemperaturanwendungen, Energiewandlung, Katalyse oder die Erzeugung von Wasserstoff – hergestellt werden.

Beschichtungsanlage »HIPster«
Mit unserer neuen kombinierten PVD-PACVD-Beschichtungsanlage HIPSTER (**H**och **I**onisierte **P**lasmen zur Schichtabscheidung für Tribo-Anwendungen und Materials Engineering) entwickeln und erzeugen wir multifunktionale Schichten mit maßgeschneiderten Eigenschaften für Reibungs- und Verschleißschutz, hoher Korrosions- oder Oxidationsbeständigkeit oder Barrierewirkung.

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Jahresbericht 2024

Vorwort

Die Institutsleitung des Fraunhofer IWM: (v. l. n. r.): Prof. Dr. Peter Gumbsch, Prof. Dr. Chris Eberl, Dr. Rainer Kübler, Elke Schubert

Die Frage »Wo geht die Reise hin?« bekommt in vielen Gesprächen mit Forschungspartnern, Industriekunden und Fördermittelgebern derzeit eine neue Konnotation. Es geht nicht mehr nur um Werkstofftechnologien und Materialforschung, sondern um sich global abzeichnende Entwicklungen, die die werkstoffintensive Wertschöpfung und werkstoffverarbeitende Industrie zunehmend unter Druck setzen:

- Ressourcenknappheiten und Klimawandel forcieren Kreislaufwirtschaft und Defossilisierung.
- Die Gesetzgebung bestimmt zunehmend den Einsatz und Verbote von Materialien.
- Fragmentierte Märkte und eine konfliktgeladene Weltordnung erschweren die Wertschöpfung.
- Die Geschwindigkeit von Wissenserzeugung und Entwicklungsprozessen nimmt massiv zu.

Die Folgen: Die Entwicklungsdynamik in der Industrie ist hoch, das Tempo von Transformationsprozessen in Unternehmen aufgrund von Marktumbrüchen enorm. Technologische Prioritäten ändern sich sehr schnell und auch aus der Notwendigkeit, CO_2-Emissionen zu reduzieren, resultieren enorme Handlungsbedarfe. Hier braucht es dringend technologische Lösungen, um Ressourcenschonung und Klimawandel nicht gegeneinander auszuspielen. »Ökologische Fußabdrücke« sind auf eine umfassende technische, ökologische und ökonomische Informationsbasis zu Materialien und Prozessen angewiesen; Werkstoffsubstitution und Technologiewechsel werden dabei zum Alltagsgeschäft. Gefragt sind praktikable und schnell implementierbare Lösungen.

Als Fraunhofer-Institut ist unser Auftrag Forschung und Entwicklung für industriellen und gesellschaftlichen Nutzen. Hinsichtlich veränderter wirtschaftlicher, technologischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen entwickeln wir fortwährend neue Lösungen und Wege, die die Zuverlässigkeit, Langlebigkeit, Funktion und Energieeffizienz technischer Bauteile und Systeme gewährleisten und verbessern. Zunehmend zentral werden bei uns neben den inhaltlichen Forschungsergebnissen, auch die Geschwindigkeit und Effizienz in der Wissenserzeugung und der Forschung. Im Austausch mit Stakeholdern spüren wir deutlich, wie zentral diese Aspekte bei der Bewältigung der globalen Herausforderungen sind. Die dafür notwendige Vernetzung von Informationen unterschiedlichster Herkunft, der schnelle Zugriff auf Wissen aus breit gefächerten Disziplinen und die Wertschöpfung aus Daten für robuste Entscheidungsgrundlagen sind vor diesem Hintergrund unabdingbar – und fordern nicht nur viele Unternehmen, sondern auch uns als Forschungseinrichtung.

Was sich im Moment bei der Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Daten abzeichnet – in der Industrie wie in der Wissenschaft – zeugt von einem Paradigmenwechsel; weg von der lokalen anwendungsspezifischen Datennutzung, hin zu einer datenfokussierten Sichtweise, bei der Forschungsprojekte und entsprechende Forschungsergebnisse über mehrere Stakeholder hinweg datenkonform miteinander vernetzbar sind. Die Vorzüge einer solchen datenfokussierten Herangehensweise liegen auf der Hand: Sie schafft digital zugängliche und systematisch nutzbare Werkstoffdaten, Modelle, Arbeitsabläufe, digitale Workflows, sowie digitale Repräsentationen, die für verschiedenste Anwendungen und Anforderungen genutzt werden können.

Diesen datenfokussierten Ansatz verfolgen wir nunmehr seit einigen Jahren auch institutsintern. Hier begreifen wir uns als Reallabor und haben mit Standardwerkzeugen eine leistungsfähige Infrastruktur geschaffen. Darin legen wir Messdaten und zugehörige Metadaten in FAIRen (**F**indable, **A**ccessable, **I**nteroperable, **R**eusable) – also referenzierbaren, interoperablen und offenen – Datenformaten ab. Standards gewährleisten dabei, dass wir diese Daten auch in Zukunft unabhängig von Personen und Software lesen und nutzen können. Unterschiedlichste Maschinen sind dafür an einen Datenraum angeschlossen und ermöglichen Datenströme direkt von den Untersuchungsobjekten in diesen Datenraum. Über Wissensgraphen oder Ontologien beschreiben wir letztlich komplexe Prüf- und Auswertevorgänge. Wir sind noch lange nicht am Ziel und unser interner Datenraum steht am Anfang, aber den Grundstein für die digitalisierte Materialforschung haben wir gelegt; und deren Machbarkeit demonstriert.

Wir sind davon überzeugt, dass die Integration von Dateninseln, das Aufsetzen von Datenströmen und darauf aufbauend die wertschöpfende Nutzung großer Datenbestände in vielen Unternehmen als Wettbewerbsfaktor an Bedeutung gewinnt – und erheblich zur (werkstoff-)technologischen Souveränität beitragen wird.

Mit diesem Ansporn engagieren wir uns forschungsseitig etwa auf EU-Ebene beim Aufbau der Materialdatenplattform »Materials Commons for Europe« – auch auf Bundesebene sind wir in zahlreichen BMBF-geförderten Projekten aktiv, in denen Materialdaten direkt in industriellen Datenplattformen zu Effizienz und Geschwindigkeit beitragen. Fraunhofer-intern haben wir 2024 zudem das Leitprojekt »ORCHESTER« ins Leben gerufen, das sich der Etablierung eines umfassenden Materialdatenökosystems widmet. Zu guter Letzt schaffen wir tagtäglich in unserer Auftragsforschung mit digitalen Repräsentationen von Werkstoffen in Bauteilen und Fertigungsprozessen vielfältigen Kundennutzen.

Wegbereiter sein für technologische Souveränität und Nachhaltigkeit durch digitalisierte Werkstoff- und Bauteilforschung: Das ist unser Anspruch für die nächsten Jahre.

In unserem diesjährigen Jahresbericht finden Sie dazu einige Appetitmacher. Lernen Sie unser Portfolio und unsere Forschungsschwerpunkte kennen, und entdecken Sie dabei, wie das Fraunhofer IWM auch Ihnen zu mehr technologischer Souveränität verhelfen kann!

Herzliche Grüße

Peter Gumbsch

Die Institutsleitung des Fraunhofer IWM

Das Fraunhofer IWM als evolutionäre und lernende Organisation stärken – dafür haben wir einen spannenden Transformationsprozess gestartet.«

Elke Schubert,
Verwaltungsleiterin

Energieeffizienz, Ressourcenschonung oder nachhaltige Mobilität brauchen berechenbare Werkstoffe. Wir identifizieren dafür die erfolgskritischen Stellschrauben.«

Prof. Dr. Peter Gumbsch,
Institutsleiter

Mit unserer neuen digitalen Infrastruktur sind wir für die digitalisierte Werkstoffforschung gut aufgestellt. Viele Unternehmen haben die Zeichen der Zeit erkannt und tauschen sich mit uns aus.«

Prof. Dr. Chris Eberl,
stellv. Institutsleiter

Wir stehen für energieeffizienten Forschungsbetrieb – so haben wir etwa in den letzten zwei Jahren den betrieblichen Stromverbrach um 400.000 Kilowattstunden gesenkt.«

Dr. Rainer Kübler,
stellv. Institutsleiter

Inhalt

Das Profil des Fraunhofer IWM **8**

Unsere strategischen Forschungsfelder
Digitalisierung von Materialien 10
Sicherer Werkstoff- und Bauteileinsatz im Kontakt mit Wasserstoff 12

Vernetzung für Forschung, Innovation und Transfer **14**

Ausgewählte Projekte der Fraunhofer-Vorlaufforschung
Höchste Flexibilität bei Turbulenzen in Lieferketten 16
Nahezu reibungsfreie Gleitlager – Ein Baukastensystem 17

Das Fraunhofer IWM in Zahlen **18**

Organisation des Fraunhofer IWM **20**

Das Kuratorium des Fraunhofer IWM **22**

Die Fraunhofer-Gesellschaft **23**

Unsere Geschäftsfelder im Profil **24**
Geschäftsfeld Fertigungsprozesse 26
Geschäftsfeld Tribologie 30
Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau 34
Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte 38

Fachbeiträge zu zentralen Herausforderungen der nachhaltigen Wertschöpfung **43**

Wertschöpfender Umgang mit Werkstoffdaten **45**
Künstliche Intelligenz für die Lebensdauervorhersage 46
Dezentrale Werkstoffdatenräume für virtuelles Design 48
Datengetriebene Optimierung von Tribosystemen 50
Vokabularmanagement für interoperable Werkstoff- und Fertigungsdaten. 52

Energieeffiziente und funktionale Systeme **55**
Mit der virtuellen Reibspaltsonde zur Supraschmierung 56
Additive Hybridbauweisen zum Einsatz in kryogenen Wasserstoffantrieben . . . 58
DLC: Prozess- und Materialentwicklung für tribologisch hochbeanspruchte Oberflächen 60

Nachhaltiger Betrieb und Umnutzung von Anlagen **63**
Digitale Lebensdauerbewertung für Schweißverbindungen 64
Simulationen für innovatives Mischkonzept 66
Vom digitalen Werkstoff zum klimaneutralen Stahl 68

Kreislauffähigkeit von Werkstoffen und Bauteilen **71**
Nachhaltiges Design im Fahrzeugbau 72
Ermüdungsfeste naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe 74
Kontrollierte Risssteuerung in Siliziumkarbid 76
Qualitätsgesicherte Aluminiumlegierungen mit Recyclinganteilen 78

Wissenschaftlicher Output **81**
Abschlussarbeiten 82
Wissenschafliche Auszeichnungen und Preise 84
Publikationen 84
Vorlesungen 85

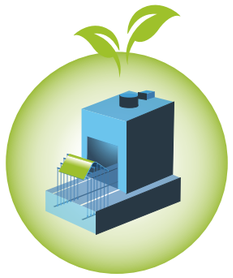
Impressum **86**

Das Profil des Fraunhofer IWM

Nachhaltige Wertschöpfung mit berechenbaren Materialien

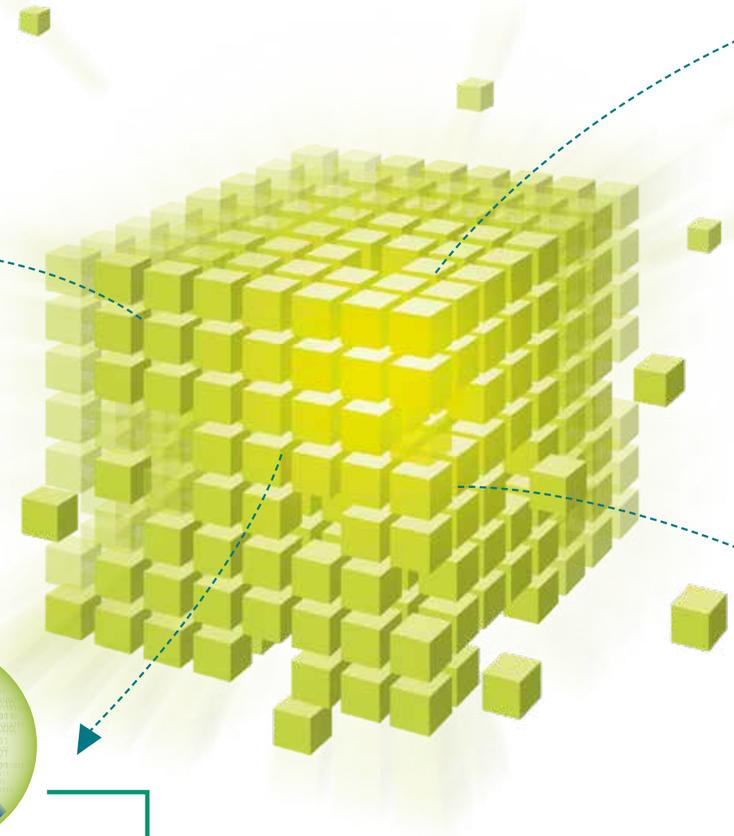
Am Fraunhofer IWM arbeiten wir für Nachhaltigkeit in der industriellen Wertschöpfung. Wir schaffen Wege und Lösungen für Langlebigkeit und Sicherheit in Bauteilen, Ressourceneffizienz in Prozessketten sowie Energieeffizienz in Maschinen. Dazu machen wir Werkstoffe in Prozessketten, Bauteilen und Maschinen mit ihrem Verhalten und ihren Eigenschaften berechenbar.

Mit unseren Forschungs- und Entwicklungsprojekten stellen wir uns der Bewältigung der zentralen Herausforderungen der nachhaltigen Wertschöpfung:



Nachhaltiger Betrieb und Umnutzung von Anlagen

Neue Einsatzbedingungen und die Frage der sicheren Nutzung von Anlagen über ihre geplante Lebensdauer hinaus machen das Wissen um die Werkstoffzustände sowie die Anpassungsfähigkeit und Resilienz von Anlagen absolut notwendig.



Wertschöpfender Umgang mit Werkstoffdaten

Der Umgang mit Werkstoff- und Prozessdaten sowie die digitale Repräsentation realer Werkstoffe mit ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten in Bauteilen werden zu entscheidenden Erfolgsfaktoren in Entwicklungs- und Fertigungsprozessen.

Energieeffiziente und funktionale Systeme

Die Energiewende braucht hohe Wirkung bei der Erzeugung, Wandlung und Speicherung von Energie. Die in energieeffizienten Maschinen eingesetzten Werkstoffen, müssen multiple Funktionen wahrnehmen, präzise eingestellt und zuverlässig betrieben werden.

Kreislauffähigkeit von Werkstoffen und Bauteilen

Der Einsatz von Recycling-Materialien auch in Hochleistungssystemen gewinnt an Bedeutung. Die Berechenbarkeit von Materialien unbestimmter Herkunft insbesondere für das »Design for Circularity« wird dabei unerlässlich.

Unsere strategischen Forschungsfelder

Digitalisierung von Materialien
Wir machen Werkstoffe zum integralen Bestandteil vernetzter Wertschöpfungsketten. Digitale Repräsentationen realer Werkstoffe und werkstoffintensiver Fertigungsprozesse beschleunigen Entwicklungsprozesse und verbessern die Innovationsfähigkeit.

Mehr erfahren

Unser Anspruch

Der Umgang mit Werkstoffdaten und -informationen ist für vernetzte, werkstoffintensive Prozesse in der Industrie erfolgsbestimmend. Mit unseren Projekten zur Digitalisierung von Materialien und Prozessen schaffen wir die Voraussetzungen für einen systematischen und effektiven Umgang mit Materialien in Entwicklungs-, Herstellungs- und Betriebsprozessen.

Digitalisierung am Fraunhofer IWM

Für eine erfolgreiche Digitalisierung haben wir am Fraunhofer IWM eine leistungsfähige Infrastruktur mit Standardwerkzeugen aufgebaut, in der wir Messdaten und Metadaten referenzierbar, interoperabel und offen abbilden. Diese Struktur erlaubt vielfältigste Abfragen und Auswertungen und bringt uns der digitalisierten Werkstoffmechanik einen großen Schritt näher. So können wir etwa Schnittstellen zur Maschinenanbindung schaffen oder mit Ontologien komplexe Prüf- und Auswertevorgänge beschreiben und interpretieren.

Angebote für Unternehmen

- Integration von Dateninseln und Datensilos
- Kuratieren von Werkstoffdatenbeständen mit KI
- semantische Strukturierung werkstoffrelevanter Daten in Fertigungsprozessen und Integration in Design- und Simulationsprozesse
- Entwicklung von Web-Apps für die Werkstoffbewertung und Lebensdauervorhersage

Unser Ziel ist, Werkstoffwissen und -daten für Entwicklungsprozesse und Unternehmensentscheidungen digital nutzbar und abfragbar zu machen.

Unser Blick auf die Welt

Gesetze und Regelungen bestimmen den Einsatz von Materialien. Für fundierte Entscheidungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette braucht es Datenräume, die Werkstoffe mit Prozessen, Anwendungen und regulatorischen Anforderungen verknüpfen. Digitale Zwillinge begleiten dabei die Produktentwicklung und Fertigung. Zentraler Erfolgsfaktor in diesem Wandel bleibt der Wissenstransfer: Nur wenn Erkenntnisse aus der Forschung in die Praxis gelangen, gelingt der digitale Fortschritt.

Abgeschlossene Forschungsprojekte

2024 haben wir drei BMBF-Projekte abgeschlossen – »StahlDigital«, »KuperDigital« und »iBain«, in denen wir Workflows zur Rückverfolgbarkeit von Informationen entlang von Verarbeitungsketten aufgesetzt haben. Wir konnten Werkstoffmikrostrukturen in Ontologien darstellen und mit Künstlicher Intelligenz kombinieren sowie Akteure in Wertschöpfungsketten in Datenökosystemen miteinander vernetzen.

Unsere strategischen Forschungsfelder

Sicherer Werkstoff- und Bauteileinsatz für Wasserstofftechnologien
In unseren Forschungsprojekten reduzieren wir den Zeit- und Kostenaufwand für die Bewertung von Bauteilen im Kontakt im Wasserstoff. Dazu verschieben wir die technologischen Grenzen bestehender Prüfkonzepte, um reale Einsatzbedingungen im Labormaßstab darzustellen. Mit der Autoklaventechnik, der Hohlzugprobentechnik und Mikroprobentechnik halten wir ein umfangreiches Portfolio für die Ermittlung von Werkstoffkennwerten unter Hochdruckwasserstoff vor – für eine große Anwendungsvielfalt.

Wasserstoff in geschmierten Wälzkontakten

Die Lagerungen von Pumpen und Verdichtern in Wasserstoffinfrastrukturen kommen teilweise direkt mit Wasserstoff in Kontakt. Frühzeitige Ausfälle aufgrund wasserstoffinduzierter Schädigungen beispielsweise von Lagerungen in Windkraftanlagen sind sehr kostspielig. Wir arbeiten an Lebensdauervorhersagen von Lagerkomponenten im Kontakt mit Wasserstoff und an der entsprechenden Werkstoffqualifizierung bereits im Entwicklungsprozess.

Kraftwerksturbinen und Komponenten

Der Einsatz von Wasserstoff in Kraftwerken bringt einen hohen Prüf- und Qualifizierungsbedarf für neue und aktuell eingesetzte Legierungen mit sich. Mit unseren Hochdruck-Wasserstoff-Autoklaven forschen wir an Alternativen zur Werkstoffprüfung – insbesondere durch die Ermüdungsprüfung mit Hohlproben – und bewerten neue Legierungen bezüglich ihrer Eignung als Rotorwerkstoff.

Barriereschichten

Um Hochleistungssysteme der Energie- und Prozesstechnik vor chemischen Angriffen durch Gase wie Wasserstoff oder aggressive Medien zu schützen, entwickeln wir Barriere- und Korrosionsschutzschichten, vorwiegend auf Basis von Oxiden und Nitriden.

Mehr erfahren

Funktionsmaterialien für die Wasserstofferzeugung

Die PEM-Elektrolyse ist ein wichtiges Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff. Der Wirkungsgrad wird unter anderem durch die elektrische Leitfähigkeit und den Kontaktwiderstand der Titanelektroden bestimmt. Mit der Technologie der Kapillarsuspensionen arbeiten wir an der Herstellung solcher Elektroden aus selbstorganisierten Partikelnetzwerken mit eingestellter Porosität über mehrere Größenskalen. Damit steigern wir die Effizienz der Elektrolyse.

Wasserstoffmotoren

Im Zuge der Defossilisierung werden Verbrennungsmotoren zunehmend mit wasserstoff-, methan- oder ammoniakhaltigen Kraftstoffen betrieben. Um den erweiterten Anforderungen in Motoren Rechnung tragen zu können, erforschen wir tribochemische Prozesse und untersuchen die Eignung von Werkstoffsystemen, Materialpaarungen und Beschichtungen mit dem Ziel, Verschleißmechanismen zu beherrschen.

Druckbehälter

Der Einsatz von Druckbehältern für wasserstoffhaltige Gase führt zu zyklischen Beanspruchungen. Bei metallischen Behältern untersuchen wir das Anrissverhalten von Druckbehälterstählen und entwickeln Lebensdauermodelle. Für die Bewertung der Integrität von CFK-Drucktanks und deren Ausfallwahrscheinlichkeit bestimmen wir spezifische Bewertungskriterien, entwickeln Materialmodelle und implementieren diese in Berechnungswerkzeuge.

Maschinenelemente und Strukturbauteile

Für druckführende Bauteile von Wasserstoffinfrastrukturen führen wir mit bruchmechanischen Methoden in Anlehnung an bestehende Regelwerke Sicherheitsnachweise durch, um die Lebensdauer bis zum Bauteilversagen vorherzusagen. Für die Berücksichtigung von Wasserstoff in der Bauteilauslegung haben wir eine Nachweisführung konzipiert, die sich an den FKM-Richtlinien orientiert.

Vernetzung für Forschung, Innovation und Transfer

Wir begreifen das Fraunhofer IWM als lebendiges und wertschöpfendes Netzwerk mit vielen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft. Gemeinsam schaffen wir neue Innovations- und Gestaltungsräume – ob durch institutsübergreifende Vorlaufforschung in der Fraunhofer-Gesellschaft, Forschungsprojekte oder studentische Arbeiten mit Hochschulen oder durch öffentliche Verbundprojekte: Wir wissen, dass Kooperation den Weg zu Innovation bereitet.

universität freiburg

Forschung, Ausbildung, Lehre über die Professur für Mikro- und Werkstoffmechanik (Prof. Dr. Chris Eberl) und die Professur für funktionale Nanosysteme (Prof. Dr. Michael Moseler)

LEISTUNGSZENTRUM NACHHALTIGKEIT FREIBURG

Leistungszentrum Nachhaltigkeit:
Kooperation mit der Universität Freiburg für den Transfer nachhaltiger Innovationen in die industrielle Praxis

livMatS

Exzellenzcluster »Living, Adaptive and Energy-autonomous Materials Systems (livMatS)«: Entwicklung lebensähnlicher Materialsysteme für Umwelt- und Energietechnologien der Zukunft

KIT Karlsruher Institut für Technologie

Forschung und Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs über die Lehrstühle für Werkstoffmechanik (Prof. Dr. Peter Gumbsch) und Angewandte Nanotribologie (Prof. Dr. Martin Dienwiebel)

Fraunhofer IWM KIT
MIKROTRIBOLOGIE CENTRUM µTC

Kombination von FuE-Transfer, anwendungsnaher Entwicklung sowie Grundlagenforschung und Ausbildung für nachhaltige Lösungen zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß

3D MATTER MADE TO ORDER

»Cluster 3D Matter Made to Order (3DMM2O)«: Additive 3D-Fertigung von der Makro- auf die Mikro-, Nano- und die molekulare Skala bringen

Fraunhofer MATERIALS

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS: Fraunhofer-weite materialwissenschaftliche Expertise und innovative Werkstofflösungen für Energie, Mobilität, Gesundheit, Bau und Sicherheit

Fraunhofer CPM

Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CMP: Entwicklung von Materialien, in die sich komplexe Funktionen einprogrammieren und deren Eigenschaften sich kontrollieren und reversibel ändern lassen

Fraunhofer

Fraunhofer-Wasserstoff-Netzwerk: Koordinierte Bündelung der Kompetenzen und Leistungsangebote von 36 Fraunhofer-Instituten in den Wasserstofftechnologien

MATERIALDIGITAL

»Plattform MaterialDigital«: Entwicklung eines Werkstoffdatenraums und von Prozesse für den nachhaltigen Umgang mit Materialdaten – Koordination Fraunhofer IWM

NFDI MatWerk

»Nationale Forschungsdateninfrastruktur für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik«: Aufbau einer Dateninfrastruktur für nahtlosen Zugang zu hochwertigen Daten und kollaborative Forschung – Koordination Fraunhofer IWM

Quantum BW

Quantum Technology Alliance Baden-Württemberg: Zusammenschluss führender Forschungseinrichtungen und Unternehmen für FuE in den Zukunftsthemen Quantensensorik und Quantencomputing

Gewinnung von Rohstoffen, Herstellung von Halbzeugen, Bauteilen, Systemen, Recycling und Rückführung in der Produktionskreislauf. Das Projekt »ORCHESTER« schafft parallel zum Produktionskreislauf den integrierten Wissenskreislauf mit einem digitalen Ökosystem.

Höchste Flexibilität bei Turbulenzen in Lieferketten

Ein neues Fraunhofer-Leitprojekt schafft ein digitales Ökosystem für die resiliente und nachhaltige Versorgung mit funktionssicheren Werkstoffen.

Projekttitel
»ORCHESTER – Digitales Ökosystem für eine resiliente und nachhaltige Versorgung mit funktionssicheren Werkstoffen«

Laufzeit
Jan. 2024 – Dez. 2027

Projektkonsortium
Fraunhofer IWM (Konsortialführer)
Fraunhofer ISI
Fraunhofer IWKS
Fraunhofer IWS
Fraunhofer IZFP
Fraunhofer IWU

Kontakt

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

Dr. Christoph Schweizer
christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de

Lieferketten für Hochleistungssysteme wie Elektromotoren oder Brennstoffzellen sind hochoptimiert und auf erfolgskritische Rohstoffe angewiesen; dadurch allerdings sehr störanfällig. Bei unerwarteten geopolitischen Ereignissen, Handelskonflikten oder einer Pandemie müssen Unternehmen schnell und gezielt reagieren, um die Herstellung entsprechender Systeme anzupassen oder umzubauen, und die Wertschöpfung aufrechtzuerhalten. Das Wissen über Rohstoff- und Fertigungskreisläufe ist ein entscheidender Faktor, wenn Unternehmen ihre Produktion resilient und nachhaltig und gestalten wollen.

Sechs Fraunhofer-Institute haben sich deshalb im Fraunhofer-Leitprojekt »ORCHESTER« zusammengetan: Sie entwickeln ein digitales Ökosystem für die Industrie, das alle Daten zusammenführt, die entlang der Wertschöpfungskette entstehen – vom Abbau der Rohstoffe über die Lieferung und Verarbeitung der Materialien, die Herstellung des Endprodukts bis hin zu Entsorgung und Recycling. Diese Daten werden mit weiteren Informationen aus der Produktion wie etwa den Ergebnissen von Werkstoffprüfungen oder Sensordaten in einer Plattform integriert. Zusätzlich entstehen hier Bewertungstools, Entscheidungsgrundlagen für Handlungsempfehlungen zur Funktionssicherheit und zur Nachhaltigkeit.

Das Wissen um Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge macht Rohstoffkreisläufe transparent. Das versetzt Unternehmen in die Lage, die Versorgung mit Metallen wie Seltenen Erden besser zu steuern und frühzeitig auf Schwankungen in den Lieferketten zu reagieren. Die digitalen Tools und Modelle ermöglichen es, bereits in der Designphase eines Produkts zu entscheiden, welche Materialien genutzt werden können – und welche Alternativen es gibt, falls ein Rohstoff knapp wird. Mit sogenannten High-Throughput-Screening-Methoden können Materialmischungen schnell und effizient getestet werden. So soll die Auswahl an einsetzbaren Werkstoffen vervielfacht, der Recyclinganteil in Prozessrouten gesteigert und die Materialresilienz erhöht werden.

Mehr erfahren

Nahezu reibungsfreie Gleitlager – Ein Baukastensystem

Ein Fraunhofer-Konsortium bringt Supraschmierung für neue Gleitlager in die Anwendung.

Projekttitel
»SupraSlide«

Laufzeit
April 2021 – September 2024

Projektkonsortium
Fraunhofer IWM (Konsortialführer)
Fraunhofer IKTS
Fraunhofer IPA
Fraunhofer IWS

Ein Fünftel der weltweit erzeugten Energie geht durch Reibung verloren. In vielen mechanischen Anwendungen werden daher Wälz- und Gleitlager eingesetzt, um Energieverluste durch bewegungsbedingte Reibung gezielt zu minimieren. Während Wälzlager jedoch Kosten-, Gewichts- und Lebensdauernachteile haben, weisen Gleitlager höhere Reibwerte auf. Durch die Verwendung neuer reibungsmindernder Werkstoffe und Schmierstoffe können allerdings viele dieser Verluste bei Gleitlagern reduziert werden.

Eine Lösung ist die Supraschmierung: Sie ermöglicht Reibwerte, die selbst unter realen Einsatzbedingungen weit unter denen herkömmlicher Gleitlager liegen. Im Rahmen des Fraunhofer-internen Projektes »SupraSlide« wurde ein Baukastensystem entwickelt, das verschiedene supraschmierende Gleitpaarungen wie Keramik, Diamant, Graphen und Kohlenstoffschichten in Kombination mit nachhaltigen Schmierstoffen umfasst. Diese perfekt aufeinander abgestimmten Material-Schmierstoff-Kombinationen können nun in Supragleitlagern eingesetzt werden; mit den extrem niedrigen Reibwerten von weniger als 0,01 eröffnen sich nahezu verlustfreie Anwendungsmöglichkeiten in verschiedensten Systemen der Antriebstechnik, der Mikroelektronik oder der Medizintechnik.

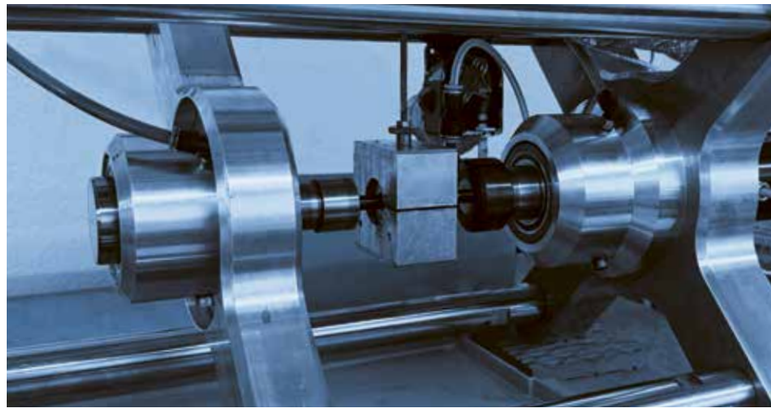
Am Fraunhofer IWM wurden hierfür Prüfstände zum Nachweis der Supraschmierung aufgebaut und die tribochemischen Prozesse zur Ausbildung der Supraschmierung für verschiedene Reibregime modelliert und aufgeklärt. Ein besonderer Fokus des Projektes lag auf der Langzeitstabilität der niedrigen Reibwerte: Mit ausgewählten Materialkombinationen wurde Supraschmierung über mehr als 60 Stunden nachgewiesen. Hierbei schnitten Gleitpaarungen aus Si-basierten Keramiken und sehr harten Kohlenstoffschichten, die durch umweltfreundliche Schmierstoffe wie Glycerol oder Polyethyl-englycole geschmiert werden, besonders gut ab.

Voraussetzung für den Durchbruch war zunächst ein umfangreiches Screening von Material-Schmierstoff-Kombinationen mit hocheffizienten tribologischen Modelltests am Fraunhofer IWM. Die ermittelten Daten flossen in eine Datenbank ein, mit deren Hilfe nun Anfragen zu speziellen Lastkollektiven zielgenau beantwortet werden können und Designvorschläge für supragleitschmierte Gleitsysteme abgeleitet werden können.

Kontakt

Prof. Dr. Michael Moseler
michael.moseler@iwm.fraunhofer.de

Dr. Tobias Amann
tobias.amann@iwm.fraunhofer.de

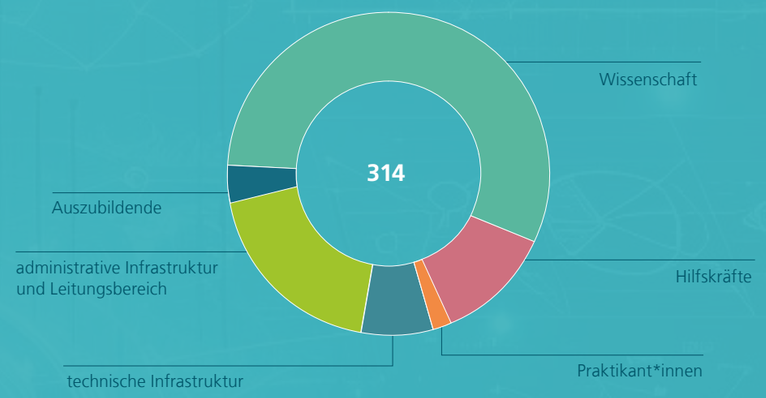


Das neue in-situ-Tribometer (»GLEX«) zur direkten Messung von Verschleiß und Reibwerten.

Das Fraunhofer IWM in Zahlen

83*
Publikationen in referierten Zeitschriften und Konferenzbänden

21
Studentische Abschlussarbeiten (Master, Bachelor)

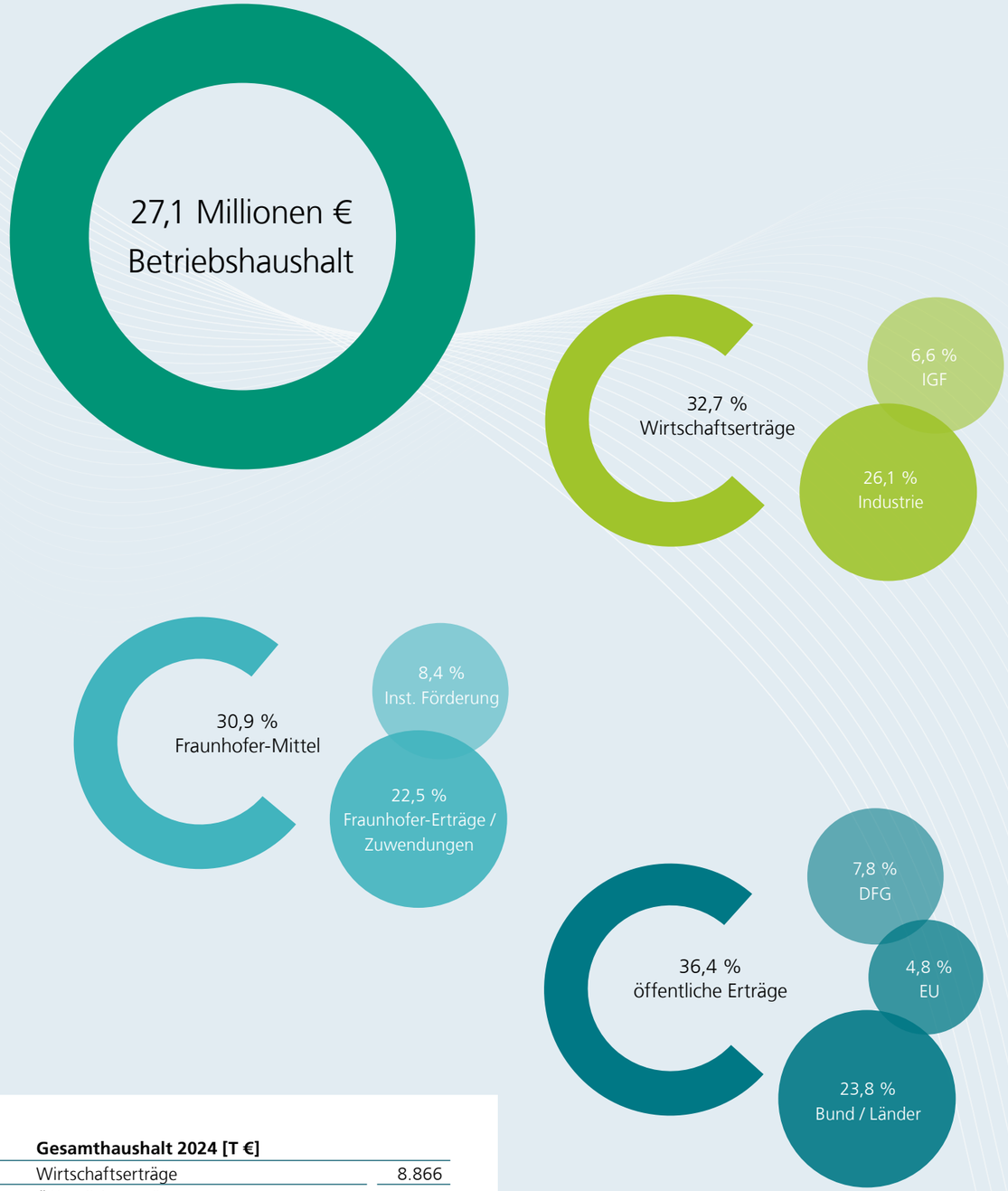


Personal

Ende 2024 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 314 Personen beschäftigt. Davon sind 253 Mitarbeitende als Stammpersonal und 61 Mitarbeitende als Hilfspersonal angestellt (Hilfskräfte, Praktika, Ausbildung, Abschlussarbeiten). Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus 165 wissenschaftlichen Mitarbeitenden, 29 Beschäftigten aus der technischen Infrastruktur sowie 59 Angestellten in der administrativen Infrastruktur sowie dem Leitungsbereich. 12 Auszubildende werden in vier Berufsbildern ausgebildet.

11
Dissertationen

*Eine vollständige Übersicht unserer Publikationen aus dem Jahr 2024 finden Sie hier.



Gesamthaushalt 2024 [T €]	
Wirtschaftserträge	8.866
Öffentliche Erträge	9.870
Fraunhofer-Projekterträge / Zuwendungen	6.096
Institutionelle Förderung (Grufi)	2.294
Investitionen	1.738
Summe	**28.864**

Stand März 2025

Organisation des Fraunhofer IWM

Besuchen Sie uns online!

Institutsleitung

Institutsleiter

Prof. Dr. Peter Gumbsch

stelllv. Institutsleiter

Prof. Dr. Chris Eberl

stelllv. Institutsleiter

Dr. Rainer Kübler

Verwaltungsleiterin

Elke Schubert

Kontakt

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

Geschäftsfelder

Fertigungsprozesse

Dr. Dirk Helm

- Pulvertechnologie und Partikelsimulation
- Umformprozesse
- Glasformgebung und -bearbeitung

Tribologie

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

- Tribologische Bauteilprüfung und Systemanalyse
- Multiskalenmodellierung und Tribosimulation
- Tribologische und funktionale Schichtsysteme
- Tribokonditionierung und -analytik (Standort Karlsruhe)

Bauteilsicherheit und Leichtbau

Dr. Michael Luke
Dr. Silke Sommer

- Ermüdungsverhalten und Bruchmechanik
- Crashsicherheit und Schädigungsmechanik
- Verbundwerkstoffe
- Meso- und Mikromechanik

Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte

Dr. Christoph Schweizer

- Mikrostruktur und Eigenspannungen
- Lebensdauerkonzepte und Thermomechanik
- Materialmodellierung
- Lebensdauerkonzepte für Wasserstoffanwendungen

Administrative Infrastruktur

Elke Schubert

- Finanzen und Verträge
- Personalmanagement
- Veranstaltungs- und Besuchsmanagement

Technische Infrastruktur

Dr. Rainer Kübler

- Werkstatt, Technik, Logistik
- IT Services
- Scientific IT

Das Kuratorium des Fraunhofer IWM

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 (Kuratoriumsvorsitz)
Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Dr. Denise Beitelschmidt
NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb

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 IMWS, Halle

Tolulope Martin
Shell Deutschland GmbH, Hamburg

Dr. Katrin Mädler
DB Systemtechnik GmbH,
Brandenburg-Kirchmöser

Dr. Juliane Mentz
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg

Bruno Posset
Märkisches Werk GmbH, Halver

MR Dr. Christian Renz
Ministerium für Wirtschaft,
Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg,
Stuttgart

Dr. Heike Riel
IBM Research, Zürich

Prof. Dr. Katja Schenke-Layland
NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut, Reutlingen

Dr. Till Schneiders
Stemcor Special Products GmbH, Düsseldorf

Dr. Dietmar Völkle
Diehl Aviation Laupheim GmbH, Laupheim

Dr. Silke Wagener
Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG,
Weinheim

Die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Seit ihrer Gründung als gemeinnütziger Verein im Jahr 1949 nimmt sie eine einzigartige Position im Wissenschafts- und Innovationssystem ein. Mit knapp 32 000 Mitarbeitenden betreibt Fraunhofer 75 Institute und selbstständige Forschungseinrichtungen in Deutschland. Im Innovationsprozess spielt Fraunhofer eine zentrale Rolle – mit Forschungsschwerpunkten in zukunftsrelevanten Schlüsseltechnologien und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zur Stärkung unseres Wirtschaftsstandorts und zum Wohle unserer Gesellschaft.

Die zentrale Kundengruppe stellen große und mittelständische Unternehmen dar. Sie nutzen die Expertise von Fraunhofer, um mit neuen Technologien ihre Wettbewerbsfähigkeit auszubauen. Seit Jahren zählt Fraunhofer zu den aktivsten Patentanmeldern in Deutschland und Europa. Ein internationales Patentportfolio bildet die Grundlage für den Technologietransfer durch Forschungsprojekte, Ausgründungen und Lizenzierung. Darüber hinaus adressiert Fraunhofer gesamtgesellschaftliche Ziele in wichtigen Technologiebereichen durch interdisziplinäre und internationale Kooperationen im konkreten Marktumfeld. Beispiele sind Entwicklungen für die Sektoren Mikroelektronik, KI und Quanten, Gesundheit, Kreislaufwirtschaft und neue Materialien sowie für Energie, die Sicherheit kritischer Infrastrukturen und den Verteidigungssektor.

Im Bereich öffentlich geförderte Konsortialvorhaben mit Industriepartnern ist Fraunhofer ein attraktiver und etablierter Akteur. Darüber hinaus trägt die Fraunhofer-Gesellschaft maßgeblich zur Stärkung und Zukunftsfähigkeit des Innovations- und Wirtschaftsstandorts Deutschland bei. Durch ihre Aktivitäten entstehen Arbeitsplätze in Deutschland, Investitionseffekte in der Wirtschaft erhöhen sich, Unternehmen erlangen Wettbewerbsvorteile und es steigt die gesellschaftliche Akzeptanz moderner Technik. Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Austausch mit den einflussreichsten Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Das jährliche Finanzvolumen der Fraunhofer-Gesellschaft beträgt 3,6 Mrd. €. Davon entfallen 3,1 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung. Im Vergleich zu anderen öffentlichen Forschungseinrichtungen bildet die Grundfinanzierung durch Bund und Länder lediglich das Fundament des jährlichen Forschungshaushalts. Sie ist die Basis für wegweisende Vorlaufforschung, die in den kommenden Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft bedeutend wird. Das entscheidende Alleinstellungsmerkmal ist der hohe Anteil an Wirtschaftserträgen, der Garant ist für die enge Zusammenarbeit mit Wirtschaft und Industrie und die stetige Marktorientierung der Fraunhofer-Forschung: 2024 beliefen sich die Wirtschaftserträge auf 867 Mio. € des laufenden Haushalts. Ergänzt wird das Forschungsportfolio durch im Wettbewerb eingeworbene öffentliche Projektmittel, wobei eine ausgewogene Balance zwischen öffentlichen und wirtschaftlichen Erträgen angestrebt wird.

Hoch motivierte Mitarbeitende sind der wichtigste Erfolgsfaktor für Fraunhofer. Daher öffnet die Wissenschaftsorganisation Freiräume für eigenverantwortliches, gestaltendes und zielorientiertes Arbeiten. Durch gezielte Förderung der fachlichen und persönlichen Entwicklung unterstützt Fraunhofer Karrierechancen in der Wissenschaft wie auch in der Wirtschaft.

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. Sein Erbe prägt den Innovationsgeist der Organisation bis heute.

Stand: April 2025

Unsere Geschäftsfelder im Profil

Geschäftsfeld Fertigungsprozesse **26**

Geschäftsfeld Tribologie **30**

Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau **34**

Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte . . . **38**

Geschäftsfeld Fertigungsprozesse

Prozessinnovationen durch vernetzte Materialdaten

Web-Applikationen nach Maß

Mit unseren anwendungsnahen WebApps ziehen unsere Kunden aus komplexem Werkstoffwissen maximalen Nutzen: besseres Prozessverständnis, Entscheidungshilfen in der Entwicklung, Vorhersagen zu Bauteilen.

Massiv-umgeformt und nachhaltig

Mithilfe von physikalischer Modellierung und künstlicher Intelligenz gestalten wir im neuen EU-Projekt »AID4GREENEST« eine umweltfreundliche und nachhaltige Stahlverarbeitung mit.

Anwendungsorientierte Digitalisierung

Im Leitprojekt »ORCHESTER« demonstrieren wir, wie valide multidimensionale Entscheidungsgrundlagen in Werkstoffkreisläufen aussehen – für mehr Nachhaltigkeit und Resilienz.

Glas formen wie Metall

Um Schutzfunktionen mit modernen Designs zu kombinieren, biegen und formen wir Flachglas innovativ, scharf und präzise »um die Ecke« – ohne Verluste bei den optischen Eigenschaften.

Geschäftsfeld Fertigungsprozesse

Wir unterstützen unsere Auftraggeber darin, Qualität, Funktion und Formgenauigkeit von Bauteilen in Fertigungsschritten gezielt einzustellen. Dazu analysieren wir experimentell und numerisch die Entwicklung der Werkstoffeigenschaften entlang der Prozessschritte und stellen diese in Beziehung zu Prozessparametern. Die abgeleiteten Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen ermöglichen die Identifikation und Steuerung kritischer Faktoren für Material- und Energieeffizienz sowie Bauteilperformance – mit starkem Fokus auf formgebende Prozesse der Glas- und Blechverarbeitung sowie Pulvertechnologie und additive Fertigung.

Geschäftsfeldleitung
Dr. Dirk Helm

Gruppenleitung
Dr. Claas Bierwisch

Pulvertechnologie und Partikelsimulation

Wir helfen Ihnen dabei, die Produktion formgenauer und fehlerfreier Bauteile effizienter zu gestalten, indem wir pulvertechnologische Prozessschritte und -ketten simulieren. Ein zweiter Schwerpunkt liegt in der Modellierung und Simulation von Mechanismen und Prozessen, bei denen komplexe oder partikelbeladene Fluide eine wesentliche Rolle spielen. Durch diese Arbeit verbessern wir Produkte und Prozesse, verkürzen Entwicklungszeiten und helfen unseren Kunden, Kosten zu sparen.

Glasformgebung und -bearbeitung

Wir forschen daran, dass Flachglas wie Metall gebogen, geformt, geprägt, getrennt, gefügt werden kann. Mit entsprechenden Fertigungsverfahren eröffnen wir nicht nur neue Möglichkeiten für anspruchsvolle Anwendungen in der Architektur, Energietechnik und Fahrzeugbau, sondern auch für die nachhaltige Nutzung von Glas als High-Tech-Material. Unsere Expertise in der Bearbeitung spröder Materialien unter extremen Bedingungen bildet die Grundlage für diese zukunftsweisenden Entwicklungen.

Gruppenleitung
Tobias Rist

Gruppenleitung
Dr. Alexander Butz

Umformprozesse

Technologiewechsel und Prozessanpassungen gehören aufgrund von Nachfrageänderungen, Kosten- und Innovationsdruck, gesetzlichen Vorgaben aber auch der Digitalisierung zum Tagesgeschäft in der Blech- und Massivumformung. Mit Werkstoffdaten, Simulationen und digitalen Repräsentationen schaffen wir die Wissensbasis und die Entscheidungsgrundlagen, damit Sie in Ihrem Unternehmen Technologiewechsel und Prozessanpassungen wirksam, wirtschaftlich und effizient bewerkstelligen können.

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

Geschäftsfeld Tribologie

Reibung und Verschleiß berechenbar machen

Neue Anwendungen

Leichtbaukonstruktionen können unter dynamischen Belastungen störende Geräusche erzeugen. Im Projekt »Leicht_Diss« bewerteten wir Reibelemente, die Schwingungsenergie absorbieren.

Reibungslos

Die kreative Reibung zwischen den Forschungspartnern hat im Projekt »SupraSlide« zu einem suprageschmierten Gleitlager mit Reibwerten unter 0,01 geführt.

Hochviskos und kreislauffähig

Im Projekt »GearOilLoop« entwickeln wir ein Hochleistungs-Getriebeöl, das mindestens 50 Prozent recyceltes Basisöl enthält.

15 Jahre µTC

Das MikroTribologie Centrum µTC ist mit 110 Expert*innen ein echter Keyplayer für nachhaltige Lösungen zur Minderung von Reibung und Verschleiß.

Geschäftsfeld Tribologie

Neue Antriebssysteme, Wasserstofftechnologien, Systemanforderungen durch Offshore-Betrieb oder alternative Kraftstoffe, und die Substitution kritischer Materialien wie in Schmiermitteln oder Dichtungen führen zu vielfältigen und neuen Reibungs- und Verschleißmechanismen – mit Auswirkungen auf die Material- und Energieeffizienz von Systemen. Mit kombiniertem multiskaligen Ansatz aus Experiment, Analytik und Simulation sowie der Entwicklung passender Werkstofflösungen machen wir Reibung und Verschleiß berechenbar – für mehr Leistungsfähigkeit und Effizienz.

Geschäftsfeldleitung (v. l. n. r.)
Prof. Dr. Matthias Scherge
Prof. Dr. Michael Moseler

Gruppenleitung
Dr. Andreas Kailer

Tribologische Bauteilprüfung und Systemanalyse

Für die zielgerichtete Auslegung tribologischer Systeme müssen die Reibpartner, eingesetzte Schmierstoffe und die Beanspruchungen genau verstanden werden. Wir stellen Tribosysteme im Labor nach und bestimmen Reibwerte und Verschleißraten unter realen Einsatzbedingungen. So schaffen wir eine fundierte Datenbasis und leiten Designempfehlungen für robuste und steuerbare tribologische Systeme ab.

Multiskalenmodellierung und Tribosimulation

In vielen Anwendungen der Antriebstechnik, Prozesstechnik oder Energietechnik entscheiden oberflächenchemische Reaktionen, atomar dünne Flüssigkeitsfilme oder quantenmechanische Prozesse im Reibspalt über die Leistungsfähigkeit und den Energieverbrauch von Lagerungen oder Dichtungen. Mit unserer virtuellen Materialsonde klären wir Reibungseffekte im atomaren Bereich auf und identifizieren die kritischen Parameter für die Einstellung von Reibung und Verschleiß.

Gruppenleitung
Dr. Gianpietro Moras

Gruppenleitung
Dr. Frank Burmeister

Tribologische und funktionale Schichtsysteme

Um kundenspezifische Beschichtungen für Funktionalität, Leistungsfähigkeit und Lebensdauersteigerung von Bauteilen und Komponenten zu realisieren, erarbeiten wir ressourcenschonende und plasmabasierte Prozesse bis hin zur Nullserie. Schichtmaterial, Prozesstechnologie und Anlagentechnik stimmen wir so aufeinander ab, dass für unsere Kunden echte Wettbewerbsvorteile entstehen.

Tribokonditionierung und -analytik

Verschleiß erhöht nicht nur den Energieverbrauch tribologischer Systeme; auch ihre Funktionsweise wird durch Verschleißpartikel beeinträchtigt. Dies ist besonders kritisch in Hochpräzisionsanwendungen oder sehr wartungsarmen Systemen, wie sie in der Halbleiter- oder Satellitentechnologie vorkommen. Wir messen ultrakleine Verschleißraten und bewerten das Zusammenspiel von Mikrostruktur, Rauheit, Oberflächenfestigkeit und Schmierstoffen bis auf die Nanoskala, damit Ihre Systeme auch unter anspruchsvollsten Bedingungen beständig und leistungsfähig bleiben.

Gruppenleitung (v. l. n. r.)
Prof. Dr. Martin Dienwiebel
Dr. Dominik Kürten

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

Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau

Sicherheit und Einsatzeignung von mechanisch und thermisch belasteten Strukturbauteilen

Zirkularität

Werkstoff- und Bauteilforschung für nachhaltige Materialkreisläufe sind die Zukunft. Als Weichensteller integrieren wir technologische, ökologische und ökonomische Bewertungskonzepte.

Bruchflächen und KI

Für die Bruchflächenanalyse inkl. Defekterkennung und Klassifizierung von Stählen – etwa für Lager oder Gussbauteile – nutzen wir erfolgreich KI und erzeugen schneller hochwertige Aussagen.

Handlungsdruck in der Energiewende

Wir haben gezeigt, wie die etablierten Berechnungsrichtlinien zur sicheren Bauteilauslegung für Wasserstoffanwendungen genutzt werden können.

H_2-Mikroproben

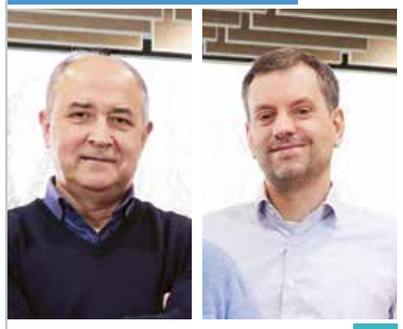
In dem neuen Wasserstoff-Mikroautoklaven erzeugen wir mit schnellen Screening-Tests wirtschaftlich industrierelevante statische und zyklische Werkstoffkennwerte an Proben im Millimeterbereich und darunter.

Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau

FuE-Leistungen zur Bewertung, Vorhersage oder Gewährleistung von Sicherheit, Zuverlässigkeit, Strukturintegrität und Eignung von Bauteilen – ob in Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen oder für Wasserstofftechnologien: Das ist unser Kerngeschäft; mit dem Ziel, sicher mit Fehlern in Bauteilen umzugehen. Wir kombinieren experimentelle, daten-basierte und numerische Bauteilbewertung, um Entscheidungsgrundlagen für die Freigabe oder sicheren Einsatz, Inspektion, Wartung, Ersatz oder Weiterbetrieb zu schaffen.

Geschäftsfeldleitung (v. l. n. r.)
Dr. Silke Sommer
Dr. Michael Luke

Gruppenleitung (v. l. n. r.)
Dr. Igor Varfolomeev
Dr. Sascha Fliegener



Ermüdungsverhalten und Bruchmechanik

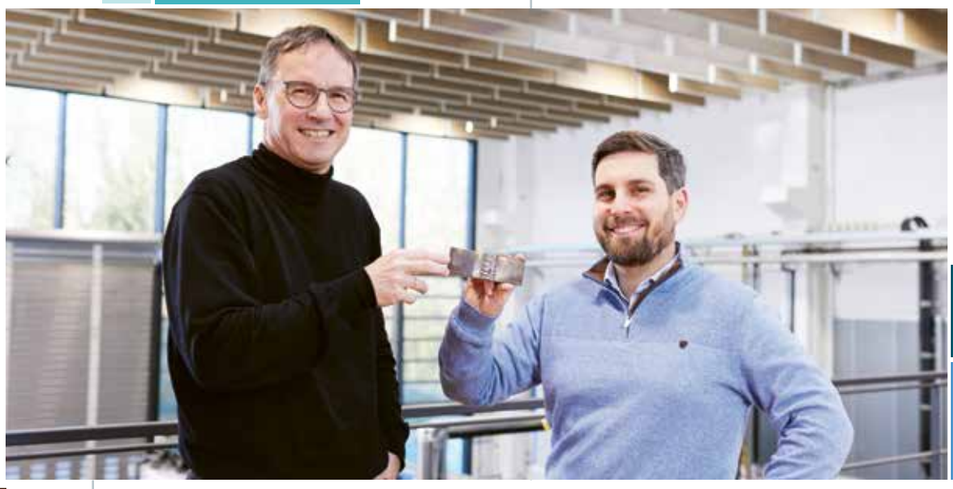
Damit unsere Kunden die Festigkeitsreserven ihrer Konstruktionswerkstoffe unter extremen Belastungen bestmöglich ausschöpfen können, führen wir für ermüdungsgefährdete Bauteile und Strukturen zuverlässige Lebensdauerberechnungen durch; für den Einsatz kritischer Komponenten ist die Beschreibung der Materialermüdung entscheidend. Mit unseren Werkstoff- und Schädigungsmodellen sowie defektbasierten bruchmechanischen Bewertungsmethoden für lasttragende Bauteile und Strukturen – im Automobilbau, Schienenfahrzeugbau, Stahlbau oder der Luftfahrt – machen wir komplexe Belastungsszenarien beherrschbar.

Crashsicherheit und Schädigungsmechanik

Für die Crashsicherheit im Auto-mobilbereich, oder für unfallbedingte Stoßbelastungen bei Transportbehältern, ist das Wissen um das Bauteilverhalten in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit beziehungsweise Dehnrate erforderlich. Wir bestimmen crashrelevante Werkstoffkennwerte und Modellparameter, und entwickeln Ersatzmodelle für Fügeverbindungen und bewerten die Einflüsse von Fertigungsprozessen auf Komponentenverhalten.

Gruppenleitung (v. l. n. r.)
Frank Huberth

Gruppenleitung
Dr. Jörg Hohe



Gruppenleitung
Dr. Thomas Straub

Meso- und Mikromechanik

Viele Bauteilverbesserungen scheitern, weil entscheidende Werkstoffeigenschaften und fehleranfällige Bereiche nicht genau genug bewertet werden können. Übliche Werkstoffcharakterisierungsmethoden stoßen an ihre Grenzen, weil Probengeometrien zu groß oder die Messverfahren nicht sensitiv genug sind. Wir bestimmen Bauteil- und Materialeigenschaften im Mikrometerbereich, um fundierte Aussagen über das Verhalten und Schwachstellen von Werkstoffen unter realen Einsatzbedingungen zu treffen.

Verbundwerkstoffe

Wir helfen unseren Kunden, Zeit und Kosten bei der Material- und Bauteilentwicklung einzusparen, indem wir mit anwendungsspezifisch entwickelten Materialmodellen das Einsatz- und Versagensverhalten von Verbundwerkstoffen und Bauteilen vorhersagen. Durch die Kombination experimenteller und numerischer Methoden erstellen wir werkstoffangepasste Struktur-Eigenschafts-Beziehungen für Verbundwerkstoffe mit Polymer-, Keramik- und Metall-Matrix oder auch Recyclingmaterialien, um ihr Einsatzverhalten zu bewerten.

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

Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte

Zuverlässige Systeme zur Energieumwandlung

Wasserstoff und Wasserdampf

Wie sich diese Kombination auf die Lebensdauer von Flugtriebwerke auswirkt, untersuchen wir im Projekt »TurbinLe«. Damit rückt die H_2-Verbrennung für Triebwerkskonzepte näher.

Starthilfe für Ariane 6

Unsere Risswachstumsbewertungen in 3D-gedruckten Wärmetauschern haben zur Freigabe von Triebwerkstests und letztlich dem erfolgreichen Start beigetragen.

Lebensdauerverbrauch

Ein digitaler Zwilling von Schweißverbindungen, etwa für Energieanlagen, kann gekoppelt mit Echtzeit-Betriebsdaten die Restlebensdauer vorhersagen.

Quantencomputing für bessere Materialmodelle

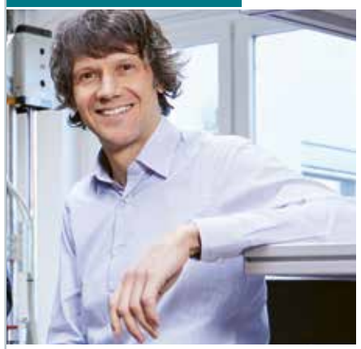
Um Energiematerialien fundamental verbessern zu können, entwickeln wir hybride Simulationsmethoden und nutzen die riesigen Potenziale des Quantencomputing.

Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte

Für Hersteller und Betreiber thermomechanisch oder chemisch-strukturell hochbeanspruchter Systeme treffen wir zuverlässige Aussagen zur Lebensdauer eingesetzter Bauteile und Werkstoffe und erarbeiten Maßnahmen zur Absicherung und Optimierung. Ob für die Nutzung von Infrastrukturen zum Wasserstoff-Transport, zur Steigerung der Kapazität von Energiespeichern oder die Gewährleistung der Zuverlässigkeit von Turbinen: Wir stellen die Verbindung zwischen den Prozessen her, die in der Mikrostruktur von Materialien ablaufen, und bilden ihre Auswirkungen auf die Langlebigkeit und funktionellen Eigenschaften entsprechender Systeme ab.

Geschäftsfeldleitung
Dr. Christoph Schweizer

Gruppenleitung
Dr. Johannes Preußner



Mikrostruktur und Eigenspannungen

Schadensfallanalysen, analytische Werkstoffcharakterisierung sowie Eigenspannungsmessungen gehören zu unseren Schwerpunkten. Unterstützt durch Simulationen auf der Gefügeebene bewerten und beschreiben wir, wie die Mikrostruktur und der Eigenspannungszustand Werkstoffe und Bauteile beeinflussen. Damit schaffen wir die Basis für eine zielsichere Werkstoffauswahl, die Optimierung von Werkstoffen und Prozessketten sowie die Vorhersage des Betriebsverhaltens.

Lebensdauerkonzepte und Thermomechanik

Kritische Komponenten in Verbrennungsmotoren, stationären Gasturbinen oder Triebwerken unterliegen hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen und müssen eine lange Betriebsdauer aufweisen. Zur Unterstützung von Herstellern und Betreibern im Auslegungsprozess und der Betriebsphase entwickeln und nutzen wir Werkstoffmodelle, die prozessbedingte Variationen der Mikrostruktur beschreiben und Vorhersagen zur Schädigungsentwicklung und Ausfallwahrscheinlichkeit ermöglichen.

Gruppenleitung
Dr. Christoph Schweizer

Gruppenleitung (v. l. n. r.)
Dr. Thorsten Michler
Dr. Frank Schweizer

Lebensdauerkonzepte für Wasserstoffanwendungen

Unser Anliegen ist es, die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bauteilen der Wasserstoff-Infrastruktur zu gewährleisten. Dafür bestimmen wir Werkstoffkennwerte unter realen Einsatzbedingungen, betreiben Schadensanalytik bei wasserstoffinduziertem Bauteilversagen, erstellen Lebensdauervorhersagen und entwickeln Designrichtlinien für Bauteile unter Wasserstoff. Dabei betrachten wir Wasserstoff als hochreines Gas in feuchter Umgebung, als Bestandteil von Ammoniak und anderen Medien.

Materialmodellierung

Der Verzicht auf kritische Rohstoffe bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit von Materialien oder die Realisierung maßgeschneiderter physikalischer Eigenschaften erfordern intelligentes Materialdesign. Mit unseren Simulationsrechnungen bieten wir Einblicke in die inneren Wirkungsweisen von Werkstoffen und klären die Wechselbeziehung zwischen den physikalischen Eigenschaften und der atomistischen und elektronischen Struktur auf. So ermöglichen wir unseren Kunden, erfolgskritische Materialien an spezifische Anforderungen anzupassen.

Gruppenleitung
Dr. Daniel Urban

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

Fachbeiträge zu zentralen Herausforderungen der nachhaltigen Wertschöpfung

Wertschöpfender Umgang mit Werkstoffdaten 45

Energieeffiziente und funktionale Systeme 55

Nachhaltiger Betrieb und Umnutzung von Anlagen 63

Kreislauffähigkeit von Werkstoffen und Bauteilen 71

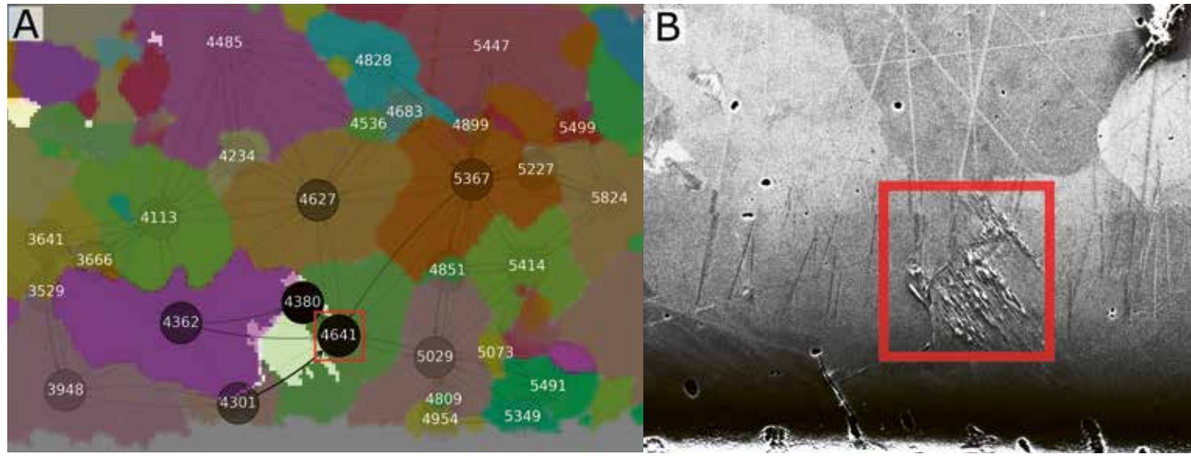
Wertschöpfender Umgang mit Werkstoffdaten

Der Umgang mit Werkstoff- und Prozessdaten sowie die digitale Repräsentation realer Werkstoffe mit ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten in Bauteilen werden zu entscheidenden Erfolgsfaktoren in Entwicklungs- und Fertigungsprozessen.

Künstliche Intelligenz für die Lebensdauervorhersage

Large Language Models und Deep Learning: Graph Neural Networks erkennen mikrostrukturelle Schwachstellen in polykristallinen Werkstoffen

Thomas Akhil | thomas.akhil@iwm.fraunhofer.de
Dr. Thomas Straub | thomas.straub@iwm.fraunhofer.de



Bilder, die die Ergebnisse der Interpretationsanalyse des besten GCN-Modells unter Verwendung der integrierten Gradienten-Methode (IG) zeigen. Unterfigur (a) zeigt ein beschädigtes Zielkorn (#4641), das korrekt vom GCN-Modell vorhergesagt wurde. Der Mikrostrukturgraph und der Schaden (weiß) werden auf das IPF-farbige Mikrostruktur-Bild überlagert. Je opaker die Knoten und Kanten sind, desto höher ist ihr IG-Wert und damit ihre Bedeutung für das Vorhersageergebnis. Ergänzend dazu zeigt Unterfigur (b) das Sekundärelektronen-REM-Bild des Schadens.

Polykristalline Werkstoffe werden überall dort eingesetzt, wo mechanische Belastbarkeit und Dauerfestigkeit gefragt sind; besonders aber in der Luftfahrt, Bauindustrie und im Automobilbereich. Sie bestehen aus vielen mikroskopisch kleinen Kristallkörnern mit unterschiedlichen Orientierungen; dabei können individuelle Kornorientierung, Korngröße und Korngrenzen stark variieren und lokale Schwachstellen begünstigen; insbesondere bei zyklischer Belastung – also einem ständigen Wechsel von Spannung und Entlastung, wie er etwa in rotierenden Bauteilen, bei Schwingungen im Fahrbetrieb oder durch Druckwechsel in thermischen Anlagen auftritt. Unter solchen Bedingungen entstehen Schäden oft nicht plötzlich, sondern schleichend – beginnend im Inneren des Materials; entlang von Korngrenzen oder innerhalb einzelner Kristalle.

Die präzise Vorhersage der Ermüdungslebensdauer dieser Werkstoffe erweist sich aufgrund ihrer polykristallinen Struktur als herausfordernd; sie ist für die Gewährleistung von Sicherheit, Verbesserung der Leistung und Reduzierung von Wartungskosten jedoch absolut entscheidend. Die Herausforderung liegt vor allem darin, dass gängige physikbasierte Modelle zur Vorhersage von Ermüdungsschäden hinsichtlich des komplexen Zusammenspiels mikrostruktureller Merkmale unzulänglich sind. Unter zyklischer Belastung können in polykristallinen Werkstoffen lokale Inhomogenitäten zu unvorhergesehenem Versagen führen – insbesondere, wenn die Mikrostruktur nicht im Detail erfasst wird. Traditionelle Modelle vereinfachen diese Mikrostruktur entweder oder erfordern unverhältnismäßig hohe Rechenressourcen. Diese Einschränkung erschwert die genaue Vorhersage von Materialversagen erheblich, was zu konservativen Designs oder unerwarteten Betriebsfehlern führt.

Ein neuartiger Ansatz, der bei diesem Problem Abhilfe verschaffen soll, basiert auf der Nutzung von Graph Convolution Networks (GCN), einer Variante der Graph Neural Networks (GNN). Es handelt sich dabei um eine datengestützte Methode, die es ermöglicht, die Initiierung von Ermüdungsschäden in polykristallinen Materialien mit bislang unerreichter Präzision zu modellieren. Die Methode wurde jüngst in Nature Scientific Reports[1] veröffentlicht und positioniert das Fraunhofer IWM dabei an der innovativen Schnittstelle zwischen Werkstoffmechanik, Datenwissenschaft und KI-gestützter Modellierung.

Graph Neural Networks für holistische und präzise Vorhersagen

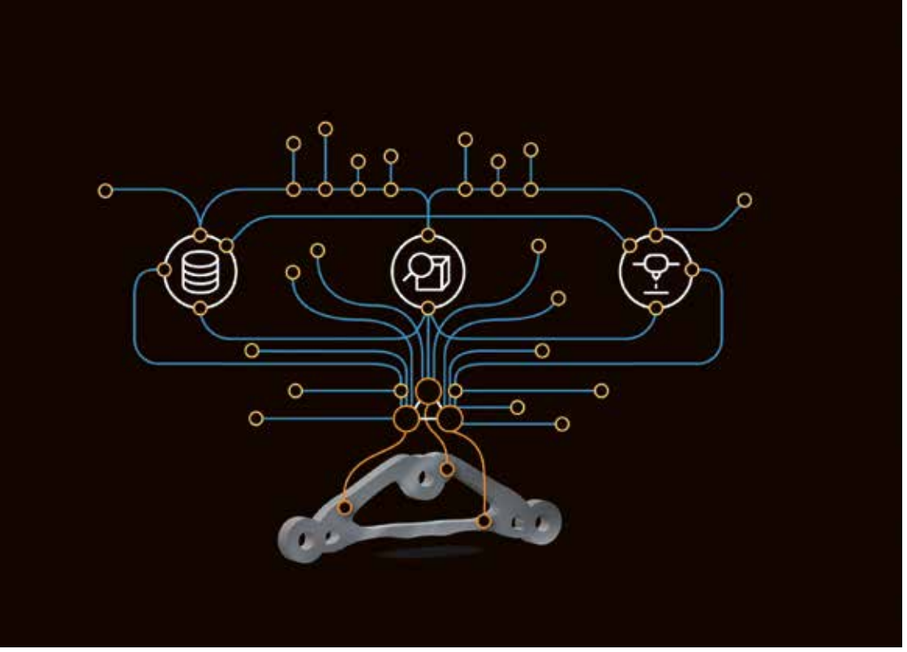
Ausgangspunkt der Arbeit ist die Abbildung ferritischer Stahl-Mikrotexturen in sogenannte Mikrostrukturgraphen. Dabei werden einzelne Körner als Knoten und ihre gemeinsamen Grenzflächen als Kanten modelliert – so entsteht ein Netzwerk, das die relevanten mikrostrukturellen Wechselwirkungen erfasst. Solche Graphen erlauben es außerdem, werkstoffspezifisches Vorwissen direkt ins Modell einfließen zu lassen. So ist es beispielsweise möglich, durch die Erstellung verschiedener Knotentypen und Zwillingsgrenzen – basierend auf bekannten Korrelationen in der Literatur – komplexe mikrostrukturelle Zusammenhänge effektiver darzustellen. Mittels der hier möglichen Erstellung von Knoten für Körner und Zwillingsgrenzen können etwa parallele Gleiteinstellungen identifiziert werden, von denen bekannt ist, dass sie beispielsweise in Inconel-Materialien mit dem Beginn von Ermüdungsschäden korrelieren.

Auf dieser Basis werden Graph Convolutional Networks (GCNs) trainiert, die sowohl die Eigenschaften einzelner Körner als auch deren Einbettung im Netzwerk berücksichtigen. Die eingesetzten GCNs basieren auf dem Prinzip des »message passing«: Dabei wird die Repräsentation eines einzelnen Korns iterativ durch Informationen aus seiner Nachbarschaft ergänzt – also von angrenzenden Körnern entlang der gemeinsamen Korngrenzen. Diese Form der Informationsweitergabe erlaubt es, nicht nur lokale, sondern auch kontextuelle Merkmale der Mikrostruktur zu erfassen, etwa die plastische Inkompatibilität benachbarter Körner oder Orientierungsunterschiede entlang von Zwillingsgrenzen. Der Lernalgorithmus berücksichtigt dabei über mehrere Schichten hinweg sowohl direkte als auch entferntere Nachbarn und entwickelt so eine immer differenziertere Sicht auf das mikrostrukturelle Umfeld. Die resultierenden Modelle zeichnen sich durch hohe Ausdruckskraft aus und ermöglichen eine robuste Unterscheidung zwischen schadensanfälligen und widerstandsfähigen Körnern; auch in hochkomplexen Gefügen wie ferritischen Stählen.
In der Auswertung zeigen die GCNs eine klar überlegene Vorhersageleistung gegenüber klassischen ML-Methoden und etablierten mechanischen Modellen wie z. B. phänomenologischen Kristallplastizitätssimulationen: Sie erkennen mit hoher Treffsicherheit, welche mikrostrukturellen Konstellationen mit der Initiierung von Ermüdungsschäden korrelieren.

Durch den vielversprechenden Einsatz von GNNs kann nun ein zentraler Bedarf der Industrie adressiert werden: Modelle, die hochdimensionale Daten verarbeiten und dabei die Abhängigkeiten zwischen Körnern erfassen – ohne übermäßige Rechenressourcen zu beanspruchen. Die im Rahmen der Studie durchgeführte Interpretationsanalyse identifizierte zudem jene Mikrostrukturmerkmale, die die Vorhersage von Ermüdungsschäden besonders stark beeinflussen – ein wertvoller Erkenntnisgewinn etwa für das Design ermüdungsbeständiger Legierungen. Neben dem Werkstoffdesign eröffnet der graphbasierte Ansatz allerdings auch Perspektiven für die datenbasierte Lebensdauervorhersage in technischen Anwendungen; langfristig etwa auch für automatisierte Mikrostrukturanalysen oder als Baustein digitaler Werkstoffmodelle – etwa im Rahmen simulationsgestützter Prüf- und Wartungskonzepte.

Aus anwendungsorientierter Perspektive unterstützt der Ansatz gezielt industrielle Ziele: Die verbesserte Vorhersage von Materialermüdung ermöglicht eine optimierte Werkstoffauswahl, ein robusteres Komponentendesign und effizientere Wartungsstrategien – mit messbarem Beitrag zu Sicherheit, Kostenreduktion und Leistungsfähigkeit technischer Systeme. Somit stellt die Anwendung graphenbasierter neuronaler Netzwerke zur Vorhersage der Materialermüdung einen bedeutenden Fortschritt in der Materialwissenschaft und -technik dar und liefert ein praxisnahes Werkzeug zur datenbasierten Bewältigung eines der zentralen Probleme der Materialwissenschaft: die verlässliche Vorhersage von Ermüdung.

[1] 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 (2023) Art. 122562, 16 Seiten, *Link*



Verknüpfung von Daten- und Wissensinseln zu Bauteilanforderungen, Werkstoffeigenschaften und AM-Prozessen für den Leichtbau

Dezentrale Werkstoffdatenräume für virtuelles Design

Strukturierung und Verknüpfung von Werkstoff-, Prozess- und Bauteildaten zur gezielten Bauteiloptimierung

Dr. Christoph Schweizer | christoph.schweizer@iwm.fraunhofer.de
Dr. Elena Garcia Trelles | elena.garcia.trelles@iwm.fraunhofer.de
Dr. Johannes Preußner | johannes.preussner@iwm.fraunhofer.de

Die additive Fertigung gilt als Schlüsseltechnologie für leistungsfähigere Bauteile und verkürzte Entwicklungszeiten. Für Leichtbauanwendungen eröffnen sich hier neue Spielräume – für Struktur- und Halteelemente in der Luft- und Raumfahrt, Gehäuseteile in der Mobilität oder Kühlstrukturen in der Energiewirtschaft. Gleichzeitig steigen mit der zunehmenden Komplexität additiver Prozessketten auch die Anforderungen an belastbare Werkstoff- und Prozessdaten: Bauteile werden individueller ausgelegt, Fertigungsparameter variieren stärker und datenbasierte Optimierungen erfordern eine präzise Dokumentation. Häufig fehlt es an standardisierten Strukturen, um Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette effizient zu erfassen, auszutauschen und für die Entwicklung und Absicherung von Bauteilen nutzbar zu machen.

Besonders in vernetzten Produktionsumgebungen erschwert das die Nachvollziehbarkeit von Materialverhalten und Bauteileigenschaften und führt dazu, dass Optimierungspotenziale oft ungenutzt bleiben.

Diese Lücke erfordert Lösungen, mit denen Daten nicht nur erfasst, sondern strukturiert, vernetzt und standortübergreifend verfügbar gemacht werden. Einen solchen Ansatz hat das Fraunhofer IWM in einem spannenden Projekt umgesetzt: Mit unserer Expertise im Aufbau semantischer Datenstrukturen und der werkstofftechnischen Charakterisierung konnte die Grundlage für eine digital vernetzte Werkstoff- und Bauteiloptimierung geschaffen werden. Die entwickelten Methoden und Datenstrukturen lassen sich nun auf weitere Werkstoffe und Fertigungsverfahren übertragen und bieten somit eine fundierte Basis, um datenbasierte Produktionsprozesse effizient umzusetzen. Ziel war es, die Datensouveränität zu wahren und gleichzeitig eine Plattform zu schaffen, die Unternehmen befähigt, Werkstoffdaten wirtschaftlich und ökologisch optimal einzusetzen – etwa für die Herstellung leichter, hochfester Aluminium-Komponenten.

In dem Projekt[1] »AluTrace« wurde ein unternehmensübergreifender Werkstoffdatenraum implementiert, der Materials Data Space®. Darin wurden die über Produktentwicklungs- und Produktherstellungszyklen entstehenden Daten- und Wissensinseln so strukturiert und miteinander verknüpft, dass die Daten künftig gezielt für die Entwicklung, Optimierung und Absicherung additiv gefertigter Leichtbaukomponenten genutzt werden können. Der Fokus lag dabei auf der Legierung AlSi10Mg, die sich insbesondere durch eine Kombination aus geringer Dichte, hoher spezifischer Festigkeit, guter Korrosionsbeständigkeit und Rezyklierbarkeit auszeichnet. Aufgrund ihrer prozessbedingten Porenneigung, mikrostrukturellen Inhomogenitäten und richtungsabhängigen Eigenschaften stellt sie jedoch hohe Anforderungen an die Datenerfassung und -auswertung.

Mit unserer werkstoffmechanischen Expertise und umfassenden Erfahrung in der Erfassung und Bewertung von Prozess-Werkstoff-Zusammenhängen spielte das Fraunhofer IWM eine Schlüsselrolle beim Aufbau des Datenraums: Durch die systematische Verknüpfung mechanischer Prüf- und Gefügedaten aus der Charakterisierung von Probekörpern mit Prozessparametern aus der additiven Fertigung entstand eine belastbare Grundlage für datengetriebene Analysen und Optimierungen entlang der gesamten Prozesskette.

Werkstoff- und Prozessdaten zur gezielten Bauteiloptimierung im LPBF-Verfahren

Im Rahmen des Projektes wurde am Fraunhofer IWM die komplette LPBF-Prozesskette (»laser bed powder fusion«, LBPF) für AlSi10Mg strukturiert – vom Pulver über Fertigungsparameter bis zum fertigen Bauteil. Grundlage war die Erstellung Ontologie-basierter Wissensgraphen, die Daten aus unterschiedlichen Quellen standardisiert zusammenführten und verknüpften. Erfasst wurden unter anderem Chargeninformationen des Aluminiumpulvers, Laserparameter wie Leistung und Belichtungsgeschwindigkeit, Pulverbett-Temperaturführung sowie die Geometrie- und Bauinformationen der Probekörper. Diese Daten wurden einheitlich dokumentiert, durch Ontologie-Bausteine strukturiert und in eine dezentrale Datenraum-Architektur auf Basis des IDS-Referenzmodells integriert.

Parallel dazu wurden werkstoffmechanische Untersuchungen an den additiv gefertigten Proben durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen Prozessführung, Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften abzubilden. Zugversuche ermittelten die Festigkeitseigenschaften, während Härtemessungen lokale Eigenschaftsvariationen aufzeigten. Metallographische Schliffbilder machten Mikrostruktur, Porenverteilung und Lagenaufbau sichtbar, ergänzt durch Bruchflächenanalysen zur Bewertung von Schädigungsmechanismen. Alle Daten wurden in den dezentralen Werkstoffdatenraum überführt und konnten über eine Web-Applikation standortübergreifend abgefragt und ausgewertet werden, wodurch Zusammenhänge zwischen Prozessparametern, Mikrostruktur und Werkstoffeigenschaften für nachgelagerte Optimierungen nutzbar gemacht wurden.

Das Potenzial des entwickelten Datenraums erwies sich bei der Optimierung eines Aluminium-Leichtbauteils. Grundlage dafür war die vom Fraunhofer IWM bereitgestellte Datenbasis aus mechanischer Charakterisierung und digital strukturierter Prozessinformation, die in den Datenraum integriert wurde. Darauf aufbauend führte der Projektpartner Fraunhofer EMI eine prozessspezifische Topologieoptimierung des Bauteils durch. Durch die Integration realer Prozess- und Werkstoffdaten in den digitalen Designprozess war es möglich, Gewicht und Fertigungsaufwand bei gleichzeitig verbesserter mechanischer Belastbarkeit signifikant zu reduzieren: Im Vergleich zum Referenzgussbauteil und einer ersten additiv gefertigten Variante erreichte das Bauteil eine Gewichtsreduktion von etwa 23 Prozent und eine Verringerung der benötigten Stützstrukturen um 67 Prozent. In einem quasistatischen Überlastszenario zeigte das Bauteil zudem eine verbesserte Tragfähigkeit – ein klarer Nachweis für den Mehrwert datengetriebener Optimierungen.

Der dezentrale Datenraum adressiert eine Herausforderung, die weit über den Leichtbau hinausgeht: Überall dort, wo Materialverhalten, Prozessführung und Bauteileigenschaften eng zusammenwirken, bietet eine strukturierte, kontextbezogene Datenbasis die Möglichkeit, Entwicklungs- und Fertigungsprozesse gezielt, effizient und nachvollziehbar zu gestalten. Als langfristiger Partner für Unternehmen, die ihre Werkstoff- und Prozessdaten systematisch erschließen und für datengetriebene Produktentwicklungen nutzen möchten, bringen wir unsere werkstoffmechanische Expertise und Erfahrung im Aufbau semantischer Datenstrukturen gezielt ein, um datenbasierte Optimierungen entlang der gesamten Prozesskette umzusetzen – von der Bauteiloptimierung bis hin zur Absicherung von Materialeigenschaften in vernetzten Lieferketten.

[1] Projektkonsortium: Fraunhofer EMI, Fraunhofer IWM, fem Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie ; Zuwendungsgeber: Ministerium für Arbeit, Wirtschaft und Tourismus Baden-Württemberg

Datengetriebene Optimierung von Tribosystemen

Standardisierte Versuchsdaten, automatisierte Analysen und Datenplattformen zur Effizienzsteigerung bei Reibungs- und Verschleißanwendungen

Dr. Tobias Amann | tobias.amann@iwm.fraunhofer.de
Prof. Dr. Michael Moseler | michael.moseler@iwm.fraunhofer.de
Dr. Andreas Kailer | andreas.kailer@iwm.fraunhofer.de

Die komplexe Wechselwirkung von Mechanik, Physik und Chemie auf unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen in tribologischen Systemen zu verstehen und zu beherrschen ist der Schlüssel zu Reibungsminderung und Verschleißschutz. Datengetriebene Analysen eröffnen neue Gestaltungsräume für die Optimierung von Reibung, Verschleiß und Schmierung durch eine größere Datenbasis, eine automatisierte Datenanalyse und letztlich fundiertere Entscheidungsgrundlagen und Vorhersagen.

Am Fraunhofer IWM treiben wir diese Entwicklung mit datenbasierten Lösungen voran, um Tribosysteme effizienter, nachhaltiger und leistungsfähiger zu gestalten. Basis dafür ist die Abbildung des gesamten Datenflusses bei tribologischen Prüfungen – von der Projektaufnahme über die Datengenerierung und -analyse bis hin zur Bereitstellung der wissenschaftlichen Daten in openBIS, einem quelloffenen Datenverwaltungswerkzeug.

Werkstoffentwicklung durch vernetzte tribologische Daten

Der entscheidende Faktor für die datengetriebene Wertschöpfung besteht in der Organisation der Datenströme aus verschiedenen Datenquellen, beispielsweise tribologischen Versuchsständen oder Prüfmaschinen, und deren virtuelle Verknüpfung und Auswertung. In Zusammenarbeit mit einem Arbeitskreis der VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) haben wir in dem Projekt »StaPu – Standardisierte Verschleißprüfung von Pumpenwerkstoffen« haben wir diesen Ansatz erfolgreich umgesetzt. Ziel des Projektes war die Entwicklung einer standardisierbaren Prüfmethodik zur Ermittlung tribologischer Kennwerte von Werkstoffen für Pumpenanwendungen. Dabei war der industrielle Anspruch, die Auswahl und Qualifizierung für reibungs- und verschleißbeanspruchte Werkstoffe in Pumpen zu vereinheitlichen und dazu eine Datenbasis zu schaffen, die kontinuierlich erweitert werden kann und Entwicklungs- und Entscheidungsprozesse beschleunigt.

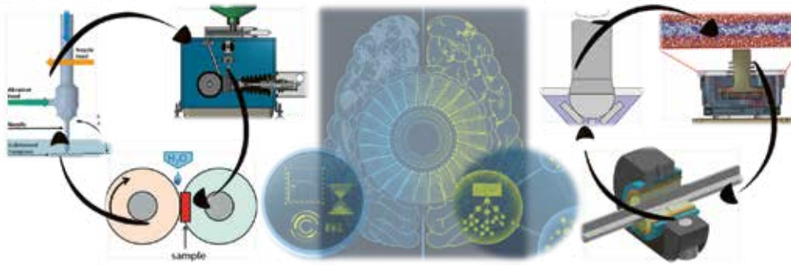
Dazu wurden in enger Zusammenarbeit standardisierbare Prüfverfahren definiert und zu bewertende Materialien ausgewählt. Die erzeugten Daten wurden in die Forschungsdatenbank openBIS überführt und mit bereits bestehenden Materialkennwerten zu tribologischen Eigenschaften verknüpft. Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgte automatisiert mit Python-Skripten, sodass eine schnelle Analyse und systematische Vergleichbarkeit gewährleistet werden konnten. Mit dieser strukturierten, erweiterbaren Datenbasis für die Prüfung und Qualifizierung von Materialien beziehungsweise Materialvariationen, lassen sich nun neue Materialien für den Einsatz in Pumpen identifizieren. Die Qualität derzeit eingesetzter Materialien lässt sich damit zudem kontinuierlich überwachen.

Mit dem Einsatz einer zentralen Plattform zur Datenverwaltung kann sichergestellt werden, dass die gesammelten tribologischen Daten in einem digitalen Format organisiert sind und sich leicht mit anderen industriellen Datenquellen verknüpfen lassen. Diese Daten dienen als Referenz für die Evaluierung neuer Werkstoff- bzw. oberflächentechnischer Lösungsansätze und können deutsche Industrieunternehmen dazu befähigen, innovative Lösungsansätze zu erkennen und neue, leistungsfähigere und effizientere Produkte zu entwickeln. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen profitieren hiervon, wenn sie die Möglichkeit haben, neue Produkte oder Werkstoffe mit Prüfverfahren testen zu lassen, deren Ergebnisse von deren Kunden als plausibel und vertrauenswürdig erachtet werden und mit anderen werkstofftechnischen Varianten direkt verglichen werden können.

Ein zweiter Anwendungsfall, in dem wir die Potenziale der datengetriebenen Tribologie ausschöpfen konnten, ist die Entwicklung suprageschmierter Gleitlager, die im Rahmen des kürzlich abgeschlossenen Fraunhofer-internen Projektes »SupraSlide« erfolgte. Die zentrale Herausforderung hier war, aus dem enormen Möglichkeitsraum aus Gleitpaarungen und Schmierstoffen, vielversprechende Kombinationen einzugrenzen und diese weiter zu untersuchen. Supraschmierende Systeme arbeiten dadurch, dass alle Komponenten des Gleitsystems – Werkstoffe, Beschichtung, Schmierstoff – ideal aufeinander abgestimmt sind, nahezu reibungsfrei, und somit zur Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung beitragen.

Die gewonnenen Daten aus Modellversuchen und anwendungsnahen Gleitlagerversuchen wurden ebenfalls in openBIS integriert und mittels Python-gestützter Analysen ausgewertet. Die Ergebnisse konnten durch die Integration in einer Datenbank mit praxisnahen Anwendungsparametern wie dem pv-Wert korreliert und mit publizierten Literaturdaten verglichen werden, um ihre Innovationskraft zu belegen. Mit der digitalen Verknüpfung der experimentellen Daten und der Ergebnisse der Simulation von Mikrostrukturprozessen und oberflächenchemischen Reaktionen und des Verhaltens der Schmierfilme konnte die Validität der Modelle überprüft und die experimentellen Parameter weiter verfeinert werden. Aus der so geschaffenen Datenbasis kann nun zielgerichtet und effizient eingegrenzt werden, ob und welche suprageschmierten Modellsysteme zur Weiterentwicklung für spezifische Anforderungen geeignet sind. Des Weiteren ist es mittels dieser Integration möglich, die Daten nicht nur längerfristig verfügbar zu machen, sondern auch für zukünftige Projekte einen hohen Mehrwert liefern können.

Perspektivisch werden wir unsere Datenbank mit ökologischen und ökonomischen Daten zu Tribosystemen erweitern, um deren Umweltwirkungen mit LCA-Analysen (engl.: »life cycle assessment«, LCA; Lebenszyklusanalyse) bewerten zu können. Die Rückverfolgbarkeit von Produkten gewinnt zunehmend an Bedeutung, auch im Bereich Schmierstoffe. Um regulatorische Anforderungen dahingehend zu erfüllen, sind datenbasierte Nachweise unerlässlich. Letztlich werden wir in unserem Datenpool durch KI-gestützte Methoden neue Innovationsmöglichkeiten für eine ressourcenschonende Industrieproduktion und Kreislaufwirtschaft identifizieren.



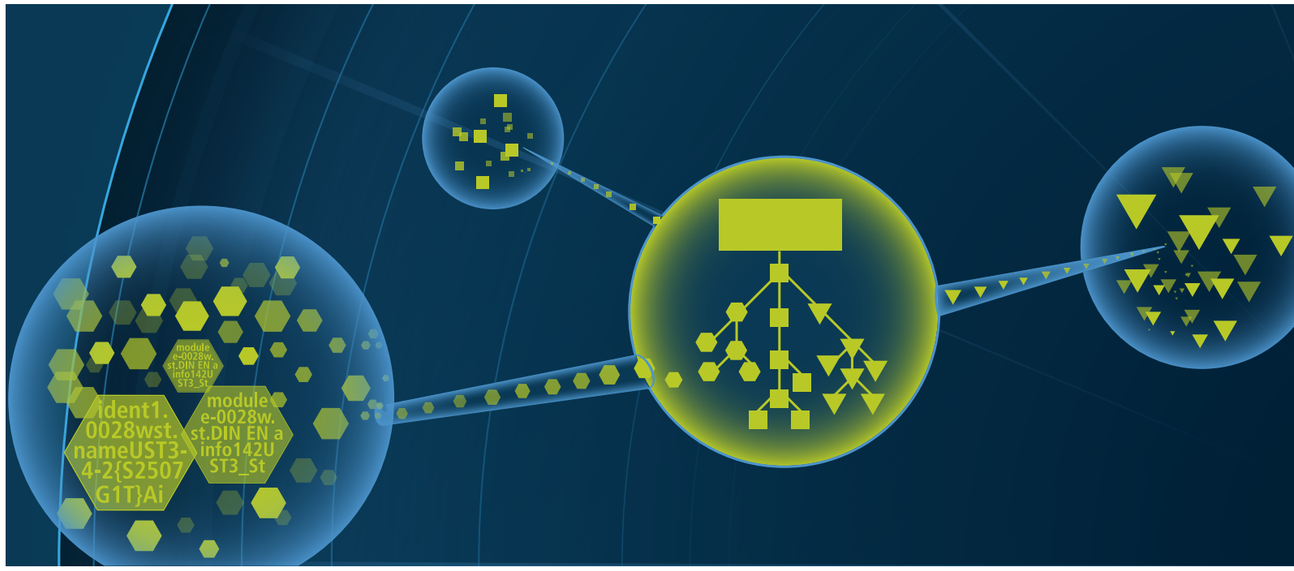
(a) (b)

Datengetriebene Tribologie bei standardisierten Prüfmethoden im Projekt »StaPu«: Zwei-Körper-Abrasion, Drei-Körper-Abrasion und Wasserstrahl-Erosionsverschleiß (a) und bei Modellversuchen und anwendungsnahen Gleitlagerversuchen im Projekt »SupraSlide« (b).

Vokabularmanagement für interoperable Werkstoff- und Fertigungsdaten

Einheitliche Datenstrukturen für eine vernetzte Industrie

Yoav Nahshon | yoav.nahshon@iwm.fraunhofer.de
Kiran Kumaraswamy | kiran.kumaraswamy@iwm.fraunhofer.de
Matthias Büschelberger | matthias.bueschelberger@iwm.fraunhofer.de
Dr. Dirk Helm | dirk.helm@iwm.fraunhofer.de



Die Digitalisierung von Werkstoffen und industriellen Prozessen stellt eine zentrale Herausforderung: den effizienten Austausch und die gemeinsame Nutzung von Werkstoff- und Fertigungsdaten über System- und Unternehmensgrenzen hinweg. Besonders in der Werkstofftechnik entstehen in allen Phasen des Materiallebenszyklus – von der Entwicklung bis hin zum Recycling – enorme Datenmengen, deren Potenziale häufig ungenutzt bleiben. Das liegt mitunter an unterschiedlichen Datenformaten, proprietären Systemen und uneinheitlichen Begriffsverwendungen, die die Integration und den Informationsaustausch erschweren.

Insbesondere die Vielzahl an Standards und individuellen Modellen führt zu einer fragmentierten Datenlandschaft. Unterschiedliche Definitionen von Materialeigenschaften verhindern eine übergreifende Vergleichbarkeit von Daten und machen die Zusammenführung aufwändig, fehleranfällig und teuer. Datensilos und inkompatible Systeme hemmen nicht nur die interne Prozessoptimierung, sondern auch die Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Damit wird die fehlende Interoperabilität von Werkstoffdaten zum Innovationshemmnis für die Industrie 4.0. Hier bieten Ontologien eine große Chance: Mit einem innovativen Ansatz, der das Vokabularmanagement neu denkt, stellen wir eine modulare Lösung bereit, die individuell anpassbar und durch eine große Zeitersparnis geprägt ist – und ungeahnte Innovationsräume öffnet.

Vokabularmanagement – ein Bottom-up Ansatz

Kontrollierte Vokabulare bieten eine Lösung, um Daten aus unterschiedlichen Quellen, Systemen und Disziplinen interoperabel zu machen. Unser Ansatz beginnt mit der Entwicklung des Vokabulars im Kontext von spezifischen Anwendungsfällen. Die Vokabularbegriffe werden erst in späteren Phasen mit übergeordneten Ontologien verknüpft, sodass die Begriffe unmittelbar nach erster Prüfung einsetzbar sind. Zentral ist ein benutzerfreundliches Vokabularmanagementsystem, das die Zusammenarbeit zwischen Anwender*innen sowie Domänen- und Ontologieexpert*innen erleichtert. Dieses harmonisierte System ermöglicht eine effektive Ausrichtung von Datensätzen, Prozessen und anderen Ressourcen. Durch die konsequente Verbindung dieser technologischen Methoden mit tiefem materialtechnischem Know-how und einer klar auf industrielle Praxis ausgerichteten Methodik hebt das Fraunhofer IWM das Potenzial dieser Lösung jedoch weiter: Während viele bisherige Ansätze stark akademisch oder informationstechnologisch getrieben sind, verfolgen wir einen pragmatischen, flexiblen Bottom-up-Ansatz: Im Mittelpunkt steht nicht die Entwicklung einer universellen, statischen Ontologie, sondern der schrittweise Aufbau eines modularen Vokabulars, das sich an realen Anwendungsfällen, bestehenden Datenbeständen und konkreten Bedarfen der Industrie orientiert.

Dabei werden zentrale Begrifflichkeiten – Materialeigenschaften und -kennwerte, Messmethoden und Prozesse – in einem Basisvokabular definiert und anschließend sukzessive erweitert. Über Ontologien und Wissensgraphen werden diese in strukturierte Beziehungen gebracht, sodass ein dynamisches, wachsendes System entsteht, das sich mit bestehenden Standards[1] verbinden lässt.

[1] EMMO (European Materials Model Ontology), PMDco (Platform Material Digital core ontology), BFO (Basic Formal Ontology)

Diese methodische Eigenständigkeit zeigt sich auch in der Entwicklung spezifischer Werkzeuge und Software-Lösungen; mit dem Vokabularmanager oder Data Space Management System (DSMS) stellen wir praxisnahe Softwaretechnologien bereit, die Unternehmen selbst ohne tiefgehende IT- oder Ontologie-Expertise bei der Einführung, Pflege und Nutzung von Vokabularen unterstützen. Fehlerquellen bei der Datenübertragung werden reduziert, redundante Tests vermieden und Entwicklungs- sowie Produktionsprozesse beschleunigt. Der modulare Aufbau erlaubt dabei eine schnelle Implementierung mit niedrigschwelligem Einstieg und hoher Skalierbarkeit für weiterführende Anwendungen – etwa digitale Zwillinge, KI-gestützte Analysen oder vorausschauende Wartungssysteme.

Daten vernetzen, Prozesse optimieren, Effizienz steigern

Im kürzlich abgeschlossenen Projekt »StahlDigital« wurde ein standardisiertes Vokabular für die Stahlindustrie entwickelt, das Herstellern und deren Partnern ermöglicht, Materialdaten digital zu beschreiben und nahtlos auszutauschen. Eingesetzt wurde das Vokabular zur semantischen Repräsentation von Versuchsdaten aus unterschiedlichen Quellen, welche interoperabel nutzbar waren. Dieser Mehrwert erlaubt es, die Versuchsdaten nahtlos auszuwerten und weitere Daten für die Prozess- und Bauteilsimulation auf einer semantischen Ebene vereinheitlicht zu erstellen, und für verschiedene Softwareprogramme in ein programmspezifisches Format zu exportieren. Durch die Einführung eines einheitlichen Vokabulars konnte die Datenprozessierung erheblich beschleunigt und fehlerfrei gestaltet werden. Die Interoperabilität wurde verbessert, was zu einer Kostenreduktion und einer erhöhten Effizienz in der gesamten Wertschöpfungskette führte und letztlich eine schnellere Entscheidungsfindung und verbesserte Qualitätskontrolle ermöglichte.

Mehrere europäische Forschungsinstitute arbeiteten im EU-Projekt »DiMAT« zusammen, um eine Toolsuite für das Materialdaten- und Materialwissensmanagement sowie die Material- und Prozesssimulation zu entwickeln. Hier zeigte sich, wie die Harmonisierung von Begrifflichkeiten den Austausch und die Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg förderte. Durch das Vokabularmanagement konnte der Aufwand für Datenaufbereitung und Datenvergleich erheblich gesenkt werden; für effiziente Zusammenarbeit und eine präzisere Analyse von Materialien und Prozessen.

Im neuen Fraunhofer-Leitprojekt »ORCHESTER« kommt das Vokabularmanagement ebenfalls zum Tragen, um alle relevanten Werkstoff-, Prozess- und Bauteilinformationen entlang des Lebenszyklus eines Werkstoffes zu vernetzen. Die Integration von Rohstoff-, Material- und Prozessdaten in einem gemeinsamen Vokabular soll bereits im Entwicklungsprozess die Nachhaltigkeit und Resilienz von Werkstoffen, Prozessen und Bauteilen verbessern und zu einer optimierten Steuerung von Wertschöpfungsketten- und Produktionsprozessen führen, bei der Fehler frühzeitig erkannt und proaktive Maßnahmen ergriffen werden können.

Das Vokabularmanagement wird eine Schlüsselrolle für datengetriebene Produktions- und Wertschöpfungsprozesse spielen. Die Integration von KI-Methoden und Big-Data-Technologien wird es zudem ermöglichen, Werkstoff- und Fertigungsdaten noch effizienter zu analysieren und automatisiert in Entscheidungsprozesse einzubinden. Mit unserem modularen Ansatz ist das System schnell auf andere Branchen und Werkstoffklassen übertragbar und bietet eine praxisbewährte Lösung, um die Interoperabilität von Werkstoffdaten zu gewährleisten und digitale Innovationspotenziale zu erschließen.

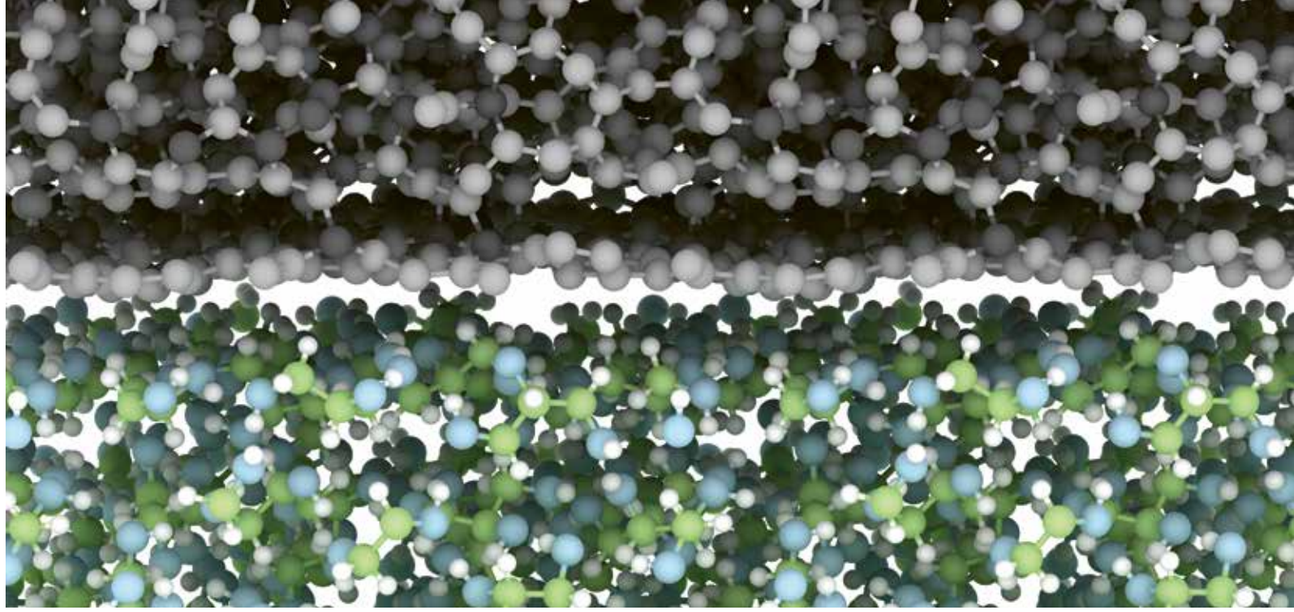
Energieeffiziente und funktionale Systeme

Die Energiewende braucht hohe Wirkung bei der Erzeugung, Wandlung und Speicherung von Energie. Die in energieeffizienten Maschinen eingesetzten Werkstoffen, müssen multiple Funktionen wahrnehmen, präzise eingestellt und zuverlässig betrieben werden.

Mit der virtuellen Reibspaltsonde zur Supraschmierung

Fraunhofer-Projekt »SupraSlide«: Supraschmierung in Gleitlagern ermöglichen

Dr. Thomas Reichenbach | thomas.reichenbach@iwm.fraunhofer.de
Dr. Gianpietro Moras | gianpietro.moras@iwm.fraunhofer.de



Die virtuelle Reibsonde gibt detaillierte Einblicke in die Reibmechanismen supraschmierender Systeme; hier anhand diamantähnlichen Kohlenstoffbeschichtungen (Grautöne, oben) in Kontakt mit Glycerin (weiß, grün und blaue Atome, unten) zu erkennen.

Die Realisierung verschwindend geringer Reibung in Maschinenelementen – der sogenannten Supraschmierung – ist ein signifikanter Durchbruch in der Forschungswelt, der zur deutlichen Steigerung der Energieeffizienz und Reduzierung von CO_2-Emissionen beitragen wird; Reibungsverluste machen nämlich einen erheblichen Anteil am Energieverbrauch in industriellen Prozessen aus. Hinsichtlich zunehmend verschärfter Klimaziele sowie steigender Energiepreise wächst die Dringlichkeit nach energieeffizienten Technologien, die nicht nur ökologische, sondern auch wirtschaftliche Vorteile bieten. Bislang wurde Supraschmierung für unterschiedliche tribologische Materialsysteme unter verschiedensten Bedingungen im Labor erreicht. Im Rahmen eines Fraunhofer-internen Projektes gelang der Nachweis robuster und anwendungsnaher Supraschmierung über unterschiedlichste Belastungsszenarien mittels eines effektiven und kreislauffähigen Schmierstoffes in Kombination mit perfekt darauf abgestimmten Werkstoffen und Beschichtungen. Die am Fraunhofer IWM entwickelte virtuelle Reibspaltsonde erwies sich dabei als unverzichtbares Werkzeug.

Gebündelte Fraunhofer-Kompetenz auf dem Weg zur Supraschmierung: »SupraSlide«

In klassischen Maschinenelementen geht ein erheblicher Anteil der eingesetzten Energie durch Reibungsverluste verloren. Im Rahmen des Fraunhofer-internen Projektes »SupraSlide« arbeiteten die Institute Fraunhofer IWM, IPA, IWS und IKTS nun an der Realisierung der Supraschmierung in Gleitlagern, mit der Reibungsverluste drastisch minimiert werden können. Das Konsortium deckte dabei die gesamte Entwicklungskette ab: von der Werkstoff- und Beschichtungsentwicklung über die tribologische Charakterisierung und Simulation bis hin zur Demonstratorenentwicklung.

Diese Gleitlager stellen eine kostengünstige, einfache und leise Alternative zu klassischen Wälzlagern dar – mit weitreichenden Anwendungsmöglichkeiten unter anderem in Elektromotoren für E-Bikes, in Pumpen und Gleitringdichtungen sowie der Robotik. Neben dem zentralen Aspekt der Energieeinsparung durch Supraschmierung steht dabei die Umweltverträglichkeit der Materialien – insbesondere des Schmierstoffs – im Fokus. Am Fraunhofer IWM wurde nun ein entscheidender Fortschritt erzielt, indem Forschende die Kombination von Glycerin mit Silizium-basierten Keramikwerkstoffen oder auch mit diamantähnlichen Kohlenstoffbeschichtungen als herausragende Materialsysteme für eine stabile Supraschmierung über einen weiteren Bereich an Lastkollektiven identifizierten.

Mit der virtuellen Reibspaltsonde in den Reibspalt blicken

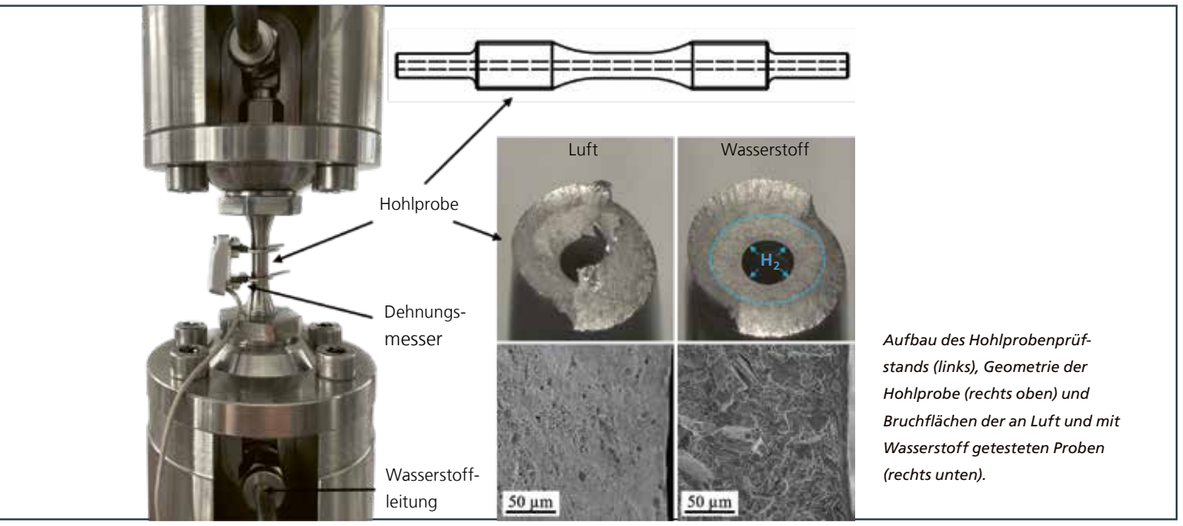
Herauszufinden, was im Reibspalt passiert, ist knifflig: Die Reibmechanismen, die einer stabilen Supraschmierung zugrunde liegen, sind komplex und hängen unter anderem von Gleitgeschwindigkeit, Normallast, Schmierstoff und Oberflächenmaterial ab. Um supraschmierende Systeme gezielt auslegen zu können, müssen dessen einzelne Komponenten präzise aufeinander abgestimmt werden – was ein tiefgehendes Verständnis der im Reibkontakt wirkenden Mechanismen voraussetzt. Mit der am Fraunhofer IWM[1] entwickelten virtuellen Reibspaltsonde steht dafür ein einzigartiges Analysewerkzeug zur Verfügung, das multiskalige Materialsimulationen mit realen Versuchsdaten verknüpft. Sie ermöglicht es, Rückschlüsse auf Temperaturverläufe, Spannungen oder Materialveränderungen im Reibspalt zu ziehen – und das über mehrere Größenskalen hinweg, von der Millimeter- bis zur atomaren Ebene. Im Projekt »SupraSlide« kam die Reibspaltsonde gezielt zum Einsatz, um die Wirkmechanismen eines supraschmierenden Materialsystems zu identifizieren und die entscheidenden Voraussetzungen für Supraschmierung zu bestimmen.

Um eine große Bandbreite an Schmierstoff-Material-Kombinationen unter unterschiedlichen tribologischen Bedingungen zu untersuchen, wurden anwendungsnahe Hochdurchsatz-Experimenten durchgeführt: Dabei erzielten Forschende des Fraunhofer IWM einen entscheidenden Fortschritt, indem sie Glycerin – in Kombination mit Silizium-basierten Keramikwerkstoffen oder mit diamantähnlichen Kohlenstoffbeschichtungen – für eine robuste Supraschmierung über einen weiteren Bereich an Lastkollektiven identifizieren konnten. Als kostengünstiger und umweltverträglicher Alkohol findet Glycerin etwa in der Pharmazie, Kosmetik und Nahrungsmittelindustrie weitreichend Verwendung; zudem kann es aus Abfallstoffen hergestellt werden, die in großen Mengen beispielsweise in der Biodieselproduktion anfallen. Somit bietet Glycerin als Schmierstoff nicht nur technische Vorteile, sondern auch eine kreislauffähige Option; eine nachhaltige Alternative zu mineralölbasierten Schmierstoffen.

Mit der virtuellen Reibspaltsonde wurde untersucht, wie und weshalb Glycerin mit Silizium-basierten Keramikwerkstoffen oder mit diamantähnlichen Kohlenstoffbeschichtungen supraschmierend sein kann; dies ist auf spezifische Eigenschaften von Glycerin zurückzuführen, die je nach Betriebsparametern eine entscheidende Rolle für Supraschmierung spielen: Wird Glycerin bis auf wenige Restmoleküle aus dem Reibspalt gedrängt, spielen die unter tribologischer Belastung auftretenden chemischen Reaktionen die zentrale Rolle, die zur Ausbildung von supraschmierenden Kohlenstoffoberflächenstrukturen führen. Dabei kann der Kohlenstoff entweder aus Glycerin oder den Oberflächen selbst stammen. Sind die Reibspalte hingegen durch nanoskalige Glycerinfilme geschmiert, so wird Supraschmierung durch Wandschlupf zu ermöglicht: Dadurch tritt die Scherung nicht innerhalb des hochviskosen Fluids auf, sondern an der Grenzfläche zwischen Fluid und Oberfläche. Für deutlich dickere Schmierstofffilme hingegen stellt sich das Verhalten der Schmierstoffviskosität gegenüber Druck und Temperatur sowie die Präsenz von Wasser als entscheidend heraus.

Insgesamt konnte durch die virtuelle Reibspaltsonde herausgearbeitet werden, welche Eigenschaften Schmierstoffe für Supraschmierung mit diamantähnlichen Kohlenstoff-Beschichtungen und Silizium-basierten Keramiken erfüllen müssen. Die systematische Verknüpfung von Experiment und Simulation ermöglichte die Ableitung materialspezifischer Designregeln für supraschmierende Systeme. Sie bilden eine belastbare Grundlage für die gezielte Entwicklung neuer Schmierstoff-Oberflächen-Kombinationen – angepasst an tribologische Anforderungen und spezifische Betriebsbedingungen. Je nach Anwendungsgebiet können dabei auch zusätzliche Kriterien wie Korrosionsbeständigkeit berücksichtigt werden, sodass die Designregeln eine differenzierte Auslegung supraschmierender Systeme unter praxisrelevanten Einsatzbedingungen ermöglichen.

[1] Die Entwicklung der virtuellen Reibspaltsonde wurde 2022 mit dem Wissenschaftspreis des Stifterverbandes ausgezeichnet. Erfahren Sie hier mehr: *https://s.fhg.de/6VBK*



Aufbau des Hohlprobenprüfstands (links), Geometrie der Hohlprobe (rechts oben) und Bruchflächen der an Luft und mit Wasserstoff getesteten Proben (rechts unten).

Additive Hybridbauweisen zum Einsatz in kryogenen Wasserstoffantrieben

Werkstoffqualifizierung und modellmäßige Lebensdauervorhersage additiver Werkstoffe unter Wasserstoffatmosphäre und bei tiefkalter Temperatur

Fabien Ebling | fabien.ebling@iwm.fraunhofer.de
Dr. Ken Wackermann | ken.wackermann@iwm.fraunhofer.de

Die Mobilitätswende fordert nicht nur neue Energieträger, sondern auch neue Technologien für deren sichere und effiziente Nutzung. Flüssiger Wasserstoff gilt dabei als zentraler Baustein einer klimaneutralen Zukunft – doch seine Anwendung stellt extreme Anforderungen an Materialien, Fertigung und Systemdesign. Im Rahmen des BMWK-geförderten Projektes »AdHyBau« wird genau diese Schnittstelle adressiert: Hier wurde ein umfassendes Forschungsprogramm durchgeführt, mit dem Ziel, einen effizienten, leistungsfähigen und emissionsfreien Antrieb für mobile Anwendungen zu schaffen, der Flüssigwasserstoff als Energieträger nutzt. Das Projekt umfasste die Entwicklung neuer additiver Verfahren und Hybridbauweisen, die Qualifizierung von Werkstoffen sowie die Untersuchung ihrer Eigenschaften unter tiefkalten Temperaturen und Wasserstoffeinfluss.

Im Zusammenspiel von Werkstofftechnik, Leichtbau und multiphysikalischer Modellierung entsteht so ein belastbares Fundament für die nächste Generation emissionsfreier Antriebe. Mit dem Projekt konnten so nicht nur belastbare Daten für die simulationsgestützte Auslegung generiert werden, sondern auch neuartige Hybridbauweisen entstehen, die durch die gezielte Kombination von Faserverbundstrukturen mit additiv gefertigten Metallkomponenten zur Leistungssteigerung elektrischer Antriebe beitragen. Zudem wurden durchgängige Design-, Simulations- und Werkstoffqualifizierungsprozesse etabliert, die den Weg für eine systematische, simulationsgestützte Entwicklung kryogener Antriebe unter realitätsnahen Bedingungen ebnen.

[1] Siemens AG, MT Aerospace AG, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden, Institut für Technische Physik (ITEP) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Additive Drives GmbH

Das Projekt »AdHyBau« vereinte ein breit aufgestelltes Konsortium aus Industrie und Wissenschaft mit komplementären Schwerpunkten: von der Werkstoff- und Leichtbautechnik über Kryo- und Wasserstoffsysteme bis hin zu Antriebsdesign und additiver Fertigung. Diese enge interdisziplinäre Zusammenarbeit macht es möglich, dem ambitionierten Ziel einer Entwicklung eines durchgängig gestalteten, wasserstoff-elektrischen Antriebsstrangs entscheidend näherzukommen.

Werkstoffprüfung unter Wasserstoff und Kryo-Bedingungen

Am Fraunhofer IWM lag der Fokus auf der werkstoffmechanischen Charakterisierung unter extremen Bedingungen: Für die Qualifizierung additiv gefertigter Werkstoffe wurden systematische Untersuchungen zur Wasserstofflöslichkeit, -diffusion und zu den mechanischen Kennwerten bei Temperaturen bis –196 °C durchgeführt – ein Bereich, in dem bislang kaum belastbare Daten vorlagen. Zum Einsatz kam dabei die sogenannte Hohlprobentechnik, bei der eine Prüfprobe über eine innere Bohrung mit Wasserstoff beaufschlagt wird. Diese Methode erlaubt nicht nur eine ressourcenschonende Durchführung der Tests, sondern lässt sich auch flexibel in vorhandene Prüfstände integrieren. Im Rahmen von »AdHyBau« wurde ein neuer Versuchsaufbau entwickelt, der es ermöglicht, Hohlproben simultan mit Wasserstoffdruck zu beaufschlagen und mit flüssigem Stickstoff kryogen zu kühlen.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden in einer systematisch aufgebauten Materialdatenbank dokumentiert und bilden die Grundlage für simulationsbasierte Werkstoffmodelle. Diese digitalen Abbilder des realen Materialverhaltens tragen nicht nur zur sicheren Auslegung wasserstoffgekühlter Antriebe bei, sondern ebnen auch den Weg für zukünftige Normungsprozesse – etwa für die Qualifizierung von Werkstoffen unter realitätsnahen Einsatzbedingungen.

Die im Projekt entwickelten Methoden, Daten und Werkstoffsysteme leisten einen wesentlichen Beitrag zur Ausarbeitung klimaneutraler Mobilitätslösungen und stärken zugleich die technologische Handlungsfähigkeit in einem strategischen Zukunftsfeld. Mit »AdHyBau« zeigen wir exemplarisch, wie sich Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Entwicklung verzahnen lassen, um neuartige Werkstofflösungen für herausfordernde Einsatzbedingungen bereitzustellen – etwa für wasserstoffgekühlte Antriebe. Im August 2024 startete das Folgeprojekt »AdHyBau 2«, indem die gewonnen Erkenntnisse weiter vertieft werden. Das Projekt hat eine vierjährige Laufzeit und wird ebenfalls vom BMWK gefördert.

Die am Fraunhofer IWM entwickelten Prüfstrategien und digitalen Werkstoffmodelle ermöglichen nicht nur eine sichere Auslegung additiv gefertigter Komponenten unter kryogenen Bedingungen – sie schaffen auch die Grundlage für standardisierte Qualifizierungsverfahren und wirken als Impulsgeber für nachfolgende Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Damit trägt »AdHyBau« zur nachhaltigen Etablierung einer leistungsfähigen Wasserstoffwirtschaft bei und stärkt gleichzeitig die technologische Souveränität Europas im globalen Innovationswettbewerb.

Werkstoffuntersuchung in flüssigem Stickstoff bei –196 °C.

DLC: Prozess- und Materialentwicklung für tribologisch hochbeanspruchte Oberflächen

Individuell anpassbare DLC-Schichten für tribologische, chemische und regulatorisch anspruchsvolle Anwendungen – skalierbar von Labor bis Serienfertigung

Mark Bernauer | mark.bernauer@iwm.fraunhofer.de
Manuel Mee | manuel.mee@iwm.fraunhofer.de

Diamantähnliche Kohlenstoffschichten (engl.: »Diamond-like carbon«, DLC) sind in zahlreichen Industriebranchen etabliert – insbesondere dort, wo Reibungsreduktion, Verschleißschutz und Energieeffizienz zusammenwirken müssen. Ihre Kombination aus hoher Härte, geringer Reibung und chemischer Inertheit schützt stark beanspruchte Oberflächen und verlängert die Lebensdauer mechanischer Systeme. Die steigende Nachfrage nach anwendungsspezifischen Schichtlösungen in Bereichen wie der Automobilindustrie, dem Maschinenbau und der Medizintechnik trifft jedoch auf ein begrenztes Spektrum an verfügbaren Varianten. Standardisierte DLC-Systeme – geprägt durch das Paradigma »je härter, desto besser« – werden den differenzierten Anforderungsprofilen oft nicht gerecht. Eng gefasste Prozessfenster, geringe Abscheideraten und begrenzte Schichtdicken schränken das industrielle Einsatzspektrum zusätzlich ein.

Um diese Lücke zu schließen, entwickelt das Fraunhofer IWM maßgeschneiderte Lösungen – von der prozessorientierten Schichtauslegung über die gezielte Eigenschaftsmodifikation bis hin zur industriellen Skalierung. Im Fokus stehen tribologisch hochbeanspruchte Anwendungen, bei denen klassische Beschichtungsprozesse an ihre technologischen und wirtschaftlichen Grenzen stoßen.

Skalierbare Prozessarchitektur für anpassbare DLC-Systeme

Um die Lücke zwischen technologischem Potenzial und industrieller Umsetzung der PECVD-Beschichtungstechnologie (engl.: »plasma-enhanced chemical vapor deposition», PECVD) zu schließen, hat das Fraunhofer IWM einen systematischen Forschungsansatz etabliert: Durch die gezielte Verknüpfung von prozesstechnischem Know-how, intelligenter Anlagenarchitektur und adaptiver Steuerung konnte der Eigenschaftsraum von DLC-Schichten deutlich erweitert werden. Dies erlaubt stabile Beschichtungsprozesse auch für großflächige oder komplex geformte Bauteile – mit hoher Reproduzierbarkeit, Skalierbarkeit und gezielter Einstellbarkeit funktionaler Schichteigenschaften. Damit werden neue industrielle Einsatzbereiche für DLC-Schichten erschlossen – insbesondere bei Anwendungen mit hohen tribologischen Anforderungen, die mit bisherigen Technologien nicht abbildbar waren.

Möglich sind nun Schichtdicken jenseits von 5 µm, gezielte Härteanpassungen sowie extrem homogene Verteilungen mit geringen Abweichungen. Auch weiche Varianten unter 10 GPa lassen sich stabil erzeugen – etwa für leistungsfähige Einlaufschichten. Mit einer um den Faktor zehn erhöhten Depositionsrate verbessert die Technologie zudem die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Verfahren.

»SupraSlide«: Qualifizierung supraschmierender Systeme

Im Fraunhofer-internen Projekt »SupraSlide« stand die systematische Qualifizierung supraschmierender Tribosysteme im Fokus. Ziel war es, nahezu reibungsfreie mechanische Komponenten durch spezialisierte Beschichtungssysteme und nachhaltige Schmierstoffkonzepte technisch nutzbar zu machen. Hierzu wurde ein breites Spektrum an DLC-Varianten untersucht, die in Kombination mit verschiedenen Gegenkörpermaterialien tribologisch getestet wurden.

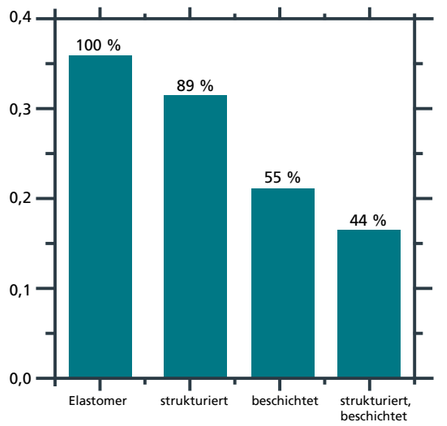
Die Bewertung der supraschmierenden Eigenschaften erfolgte über anwendungsnahe Reibwert- und Verschleißanalysen in modifizierten Tribometern sowie über detaillierte Oberflächenanalytik und tribochemische Charakterisierung der Reibfilme. Ergänzt wurde dies durch atomistische Simulationen zur Aufklärung der chemisch-physikalischen Wechselwirkungen im Grenzschichtbereich. Die Ergebnisse zeigen, dass auch DLC-Schichten mit moderater Härte und erhöhtem Wasserstoffgehalt in spezifischen Konfigurationen Reibwerte unter 0,01 erreichen – der Maßstab für Supraschmierung. Entscheidend ist dabei die holistische Betrachtung des Gesamtsystems: Neben der Beschichtung und dem Substratmaterial beeinflussen auch die Gegenkörperauswahl, Oberflächenrauheit, Schmierstoffchemie und Betriebsbedingungen das tribologische Verhalten. Im Projekt konnten wasserbasierte Schmierstoffe wie Glycerin in Kombination mit DLC-beschichteten Komponenten tribologisch so abgestimmt werden, dass supraschmierende Effekte unter praxisnahen Bedingungen reproduzierbar auftraten – mit deutlich reduzierter Reibung und vernachlässigbarem Verschleiß.

Innovation: PFAS-freie Beschichtungen für weiche Substrate

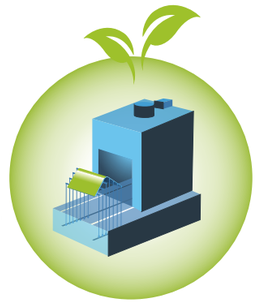
Ein stetig wachsendes Forschungsfeld ist die plasmabasierte Funktionalisierung polymerer Substrate, mit besonderem Fokus auf Elastomere. In Vorgängerprojekten wurden bereits bemerkenswerte wissenschaftliche Fortschritte erzielt, die angesichts der akuten Restriktionen bezüglich des Einsatzes Per- und polyfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) immer mehr an Relevanz gewinnen.

In dem Projekt »pureWaterSeal«, das durch die Fraunhofer-Zukunftsstiftung gefördert wird, steht die Übersetzung dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse in marktfähige Produkte im Fokus. Auf technischer Ebene zielt das Projekt auf die Entwicklung PFAS-freier Funktionsschichten und Materialsysteme, die zentrale Eigenschaften fluorhaltiger Systeme wie Hydrophobie, Chemikalienresistenz und Barrierewirkung ersetzen sollen. Beschichtet werden unterschiedlichste Elastomere, deren Oberflächeneigenschaften hohe Anforderungen an Haftung und Schichtintegrität stellen. Zum Einsatz kommen plasmagestützte Verfahren wie PECVD, mit denen funktionale Reibungs- und Verschleißschutzschichten abgeschieden werden. Die Systeme werden unter realitätsnahen Bedingungen getestet und in Bezug auf Benetzungsverhalten, Medienbeständigkeit und Alterungsstabilität charakterisiert. Erste Ergebnisse beinhalten wasserabweisende Oberflächen sowie den Nachweis stabiler Schichteigenschaften bei thermischer und chemischer Belastung. In Zusammenarbeit mit Industriepartnern werden derzeit anwendungsnahe Validierungen durchgeführt, etwa für PFAS-freie Dichtungen in Trinkwasser- oder Hydrauliksystemen. Die Überführung in eine skalierbare Serienfertigung erfolgt im Rahmen einer geplanten Industrie-Ausgründung.

Durch die enge Verzahnung von Grundlagenforschung, prozessorientierter Entwicklung und industrieller Validierung positioniert sich das Fraunhofer IWM als technologischer Impulsgeber im Bereich funktionaler Beschichtungssysteme. Die entwickelten Schichtlösungen verbinden materialspezifische Leistungsprofile mit skalierbaren Prozessstrategien – von PECVD-basierten DLC-Systemen über supraschmierende Triboschichten bis hin zu PFAS-freien Schutzbeschichtungen für chemisch, tribologisch oder regulatorisch anspruchsvolle Anwendungen.



PFAS-freies Elastomer mit DLC-Beschichtung und Laser-Strukturierung (im Vergleich): niedrigster Reibwert (Diagramm oben); kein Verschleiß feststellbar (Aufnahmen unten, blauer Pfeil).



Nachhaltiger Betrieb und Umnutzung von Anlagen

Neue Einsatzbedingungen und die Frage der sicheren Nutzung von Anlagen über ihre geplante Lebensdauer hinaus machen das Wissen um die Werkstoffzustände sowie die Anpassungsfähigkeit und Resilienz von Anlagen absolut notwendig.

Digitale Lebensdauerbewertung für Schweißverbindungen

KI-gestützte Analyse der komplexen Oberflächengeometrien von Schweißverbindungen als Grundlage für objektive Lebensdauerprognosen und neue Bewertungsverfahren

Dr. Jan Schubnell | jan.schubnell@iwm.fraunhofer.de

Schweißverbindungen zählen zu den kritischsten Schwachstellen vieler technischer Strukturen – insbesondere unter zyklischer oder dynamischer Belastung, wie sie in Offshore-Windkraftanlagen, Baumaschinen, Kränen, Druckbehältern oder tragenden Stahlkonstruktionen auftritt. Dort führen Wind- und Wellenbelastung durch Gezeiten, Fahrbewegungen oder Betriebsbeanspruchungen zu zyklischen Lasten, die sich an ungünstigen Nahtübergängen zu lokalen Spannungsspitzen konzentrieren. Schweißnähte weisen eine deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit auf als der ungeschweißte Grundwerkstoff. Die rissauslösende Stelle ist meist die geometrische Kerbe am Nahtübergang – bedingt durch die Schweißraupe, die Spannungskonzentrationen begünstigt. Um Schäden zu vermeiden, erfolgt die Auslegung bislang nach dem konservativen »worst-case«-Prinzip: Auf Basis vieler Schwingfestigkeitsversuche werden stark idealisierte Parameter verwendet. Das führt zu Überdimensionierung, hohem Materialeinsatz und eingeschränkter Ressourceneffizienz, während die tatsächliche Belastbarkeit individueller Nähte unbekannt bleibt.

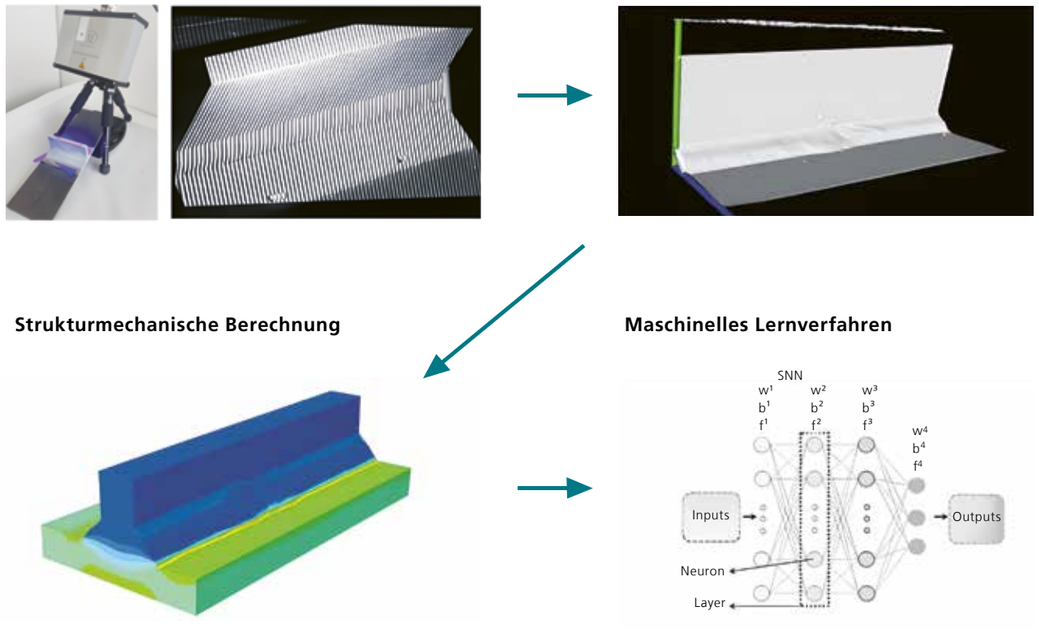
Ein Verbundprojekt[1] verfolgt nun das Ziel, ein automatisiertes Verfahren zur objektiven Bewertung von Schweißverbindungen auf Basis realer 3D-Oberflächengeometrien zu entwickeln. Diese Geometrien sollen in digitale Spannungsmodelle überführt und mithilfe neuronaler Netze analysiert werden – direkt im Produktionsprozess. Das Fraunhofer IWM besetzt innerhalb des Projektes eine Schlüsselrolle mit seiner Expertise in der strukturmechanischen Bewertung komplexer Nahtgeometrien, der Kerbanalyse und der Simulation realer Spannungsverläufe. So können bestehende Prüfverfahren nicht nur ergänzt, sondern auch neue Bewertungsstandards etabliert werden – für mehr Sicherheit, weniger Materialeinsatz und ein realistischeres Verständnis von tragenden Strukturen.

Von der Nahtgeometrie zur digitalen Lebensdauerbewertung

Das zu entwickelnde Verfahren bietet die Möglichkeit, die Schweißnahtqualität während des Produktionsprozesses effizient zu überwachen. Im Zentrum des Projektes steht ein digitaler Bewertungsprozess, der reale Nahtgeometrien mit mechanischer Modellierung und maschinellem Lernen verknüpft. Ausgangspunkt ist die vollständige Vermessung der Schweißnahtoberfläche mittels 3D-Scanverfahren. Die dabei entstehende Punktewolke bildet die tatsächliche Topographie der Naht ab – inklusive Übergangsradien, Schweißraupen und kleinster Geometrieabweichungen. Diese Rohdaten werden anschließend über Flächenrückführung in ein Finite-Elemente-Modell (FEM) überführt. Das Modell ermöglicht die strukturmechanische Analyse lokaler Spannungskonzentrationen am Nahtübergang – also genau dort, wo Risse entstehen können.

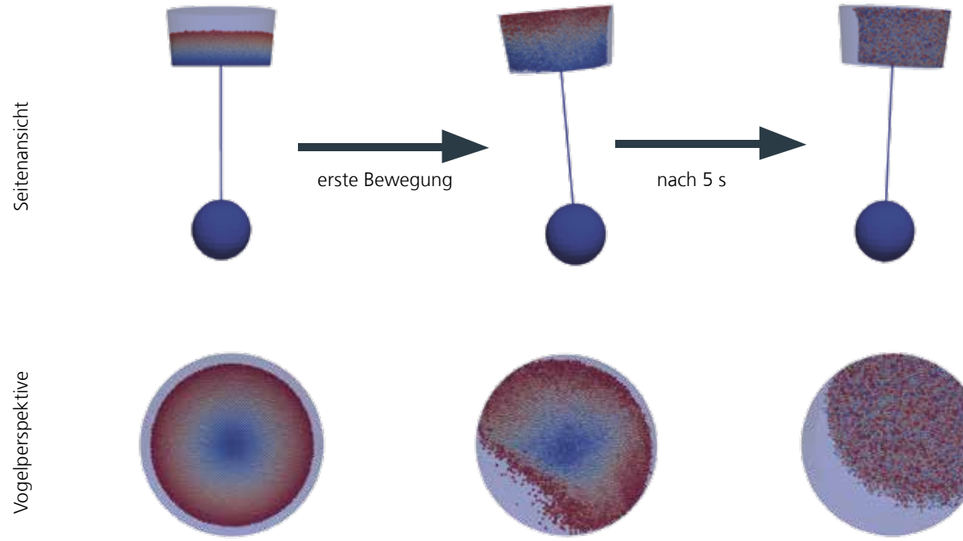
Die berechneten Spannungsfelder dienen als Eingangsdaten für ein maschinelles Lernverfahren, u. a. neuronale Netze, das auf die Detektion kritischer Belastungssituationen trainiert wird. Ziel ist es, belastbare Aussagen über die zu erwartende Lebensdauer der Verbindung zu ermöglichen – objektiv, konsistent und unabhängig vom Erfahrungsstand einzelner Prüfer*innen. Im Unterschied zu herkömmlichen Prüfmethoden lässt sich dieser Ansatz direkt an reale Geometrien anpassen – und eröffnet damit neue Möglichkeiten für die digitale Qualitätssicherung. Die Umsetzung dieser Methodenkette – von der Geometrieaufnahme über die strukturmechanische Bewertung bis zur KI-gestützten Analyse – erfordert spezifisches Know-how in der Modellierung geometrisch-bedingter Spannungskonzentrationen. Wir bringen hierfür unsere Expertise in der mechanischen Bewertung komplexer Nahtübergänge und in der numerischen Analyse von Ermüdungsmechanismen ein. Diese fundierte mechanische Sichtweise bildet die Grundlage dafür, dass die abgeleiteten Aussagen zur Lebensdauerbewertung über die reine Datenstatistik hinaus belastbar sind. Durch die Kombination von 3D-Oberflächenscans, FEM und maschinellem Lernen entsteht so ein Verfahren, das perspektivisch dazu beitragen kann, Prüfaufwände zu reduzieren, Schwachstellen frühzeitig zu erkennen und die Auslegung geschweißter Konstruktionen effizienter zu gestalten.

Hier entsteht ein Bewertungskonzept, das über Einzelfalllösungen hinausweist: Die digitale Erfassung realer Nahtgeometrien und ihre strukturmechanisch fundierte Interpretation können künftig als Grundlage für neue, geometriebasierte Bewertungsstandards dienen – deutlich näher an der Realität als idealisierte Referenzparameter. Damit leistet das Projekt nicht nur einen Beitrag zur ressourceneffizienten Auslegung geschweißter Strukturen, sondern auch zur Modernisierung bestehender Regelwerke. Die entwickelten Methoden lassen sich prinzipiell auf verschiedenste Fertigungskontexte übertragen – von der Offshore-Gründungsstrukturen bis zum Baumaschinen oder Druckbehälter. Durch die Möglichkeit, die Bewertung automatisiert und inline-nah durchzuführen, eröffnen sich konkrete Anwendungsperspektiven für die prozessintegrierte Qualitätssicherung in der Serienfertigung. Das Verfahren unterstützt dabei, Prüfaufwand zu reduzieren, Auslegungslasten gezielter zu definieren und langfristig auch Predictive-Maintenance-Konzepte auf eine neue Datengrundlage zu stellen. Mit seiner Kompetenz in der Bewertung spannungsführender Strukturen und in der Entwicklung simulationsgestützter Lebensdauermodelle trägt das Fraunhofer IWM entscheidend dazu bei, diese technologischen Grundlagen in anwendungsrelevante Bewertungsverfahren zu überführen.



Bewertung von Schweißverbindungen auf Basis von 3D-Oberflächenscans

[1] Das Verbundprojekt »ORka3D– Optimierung des Ressourceneinsatzes bei Schweißkonstruktionen durch die automatisierte in-line Lebensdauerbewertung auf Basis von 3D-Scans«, wird im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Das Konsortium setzt sich aus den Industrieunternehmen Volvo Construction Equipment, Liebherr Werke Biberach GmbH, Salzgitter Mannesmann Forschung Gmbh sowie den Sensorhersteller Quelltech GmbH, Mikroepsilon GmbH und der Carl Zeiss AG sowie zwei Forschungseinrichtungen, dem Fraunhofer IWM und Fraunhofer LBF, zusammen.



1 Exemplarische Simulation des Mischvorgangs: Anfangsbedingung (links), Mischvorgang nach dem ersten Schwenken (Mitte) und nach 5 Sekunden (rechts). Seitenansicht des Mischvorgangs (oben): Die Mischkammer rotiert um die Kugel, die im Apparat fixiert ist und als Drehzentrum gilt. Die Partikel sind nach ihrer Höhenposition zu Beginn eingefärbt. Vogelperspektive auf den Mischbehälter (unten): Hier sind die Partikel entsprechend ihrer radialen Position im Mischbehälter zu Beginn eingefärbt. In beiden Bildreihen dient die Färbung dazu, einen Einblick in die Mischeffizienz zu bekommen.

SimPARTIX®

Simulationen für innovatives Mischkonzept

Einsatz von Simulationen für energieeffizientes Trajektionsmischen von Batteriematerialien

Dr. Bastien Dietemann | bastien.dietemann@iwm.fraunhofer.de
Dr. Claas Bierwisch | claas.bierwisch@iwm.fraunhofer.de

Das Mischen von Schüttgütern stellt eine grundlegende verfahrenstechnische Operation dar, die in zahlreichen Industrien Anwendung findet; etwa bei pulverförmigen Wirkstoffen, Füllstoffen oder Granulaten in der Pharmazie, Lebensmitteln wie Mehl, Zucker und anderen Trockenzutaten, oder bei Metalloxiden und Graphit- oder Elektrolytpulver in der Batterieherstellung. Die Anforderungen an eine hohe Produktqualität – für die Sicherheit unerlässlich – erfordern eine gründliche Durchmischung des Schüttguts, mit entsprechend langen Mischzeiten als Folge. Bis zu einem Drittel des Gesamtenergiebedarfs dieser Prozesse kann allein auf das Mischen entfallen. Angesichts steigender Energiekosten und im Zuge von Nachhaltigkeitsbestrebungen besteht ein wachsender Bedarf an Lösungen zur Reduzierung dieses Energiebedarfs.

Wir haben genau diesen Bedarf in einem innovativen Lösungsansatz adressiert. In Zusammenarbeit mit der Firma hs-tumbler wurde im Laufe des vergangenen Jahres ein neuartiges Mischkonzept (*1*) optimiert, das sowohl die Mischzeit als auch den Energiebedarf des Mischprozesses signifikant reduziert. Dieses Konzept basiert auf dem Prinzip des Trajektionsmischens (Trajektorie = Bahnkurve), in dem ein Behälter mit dem zu mischenden Schüttgut vordefinierte, mathematisch beschriebene Bahnen (*2*) durchläuft. Abrupte Richtungswechsel und damit verbundene Beschleunigungen führen zu einer raschen Durchmischung bei gleichzeitig geringem Energieeintrag in das Schüttgut. Das gezielte Führen des Behälters entlang vordefinierter Bahnen stellt dabei einen grundlegenden Bruch mit herkömmlichen, stochastisch geprägten Mischprinzipien dar. Durch die Anwendung dieses Ansatzes können Mischzeiten von Stunden auf wenige Sekunden verkürzt werden, während der Grad der Durchmischung vergleichbar mit dem in herkömmlichen Mischverfahren bleibt oder diese sogar übertrifft.

Die Reduktion der Mischzeit auf wenige Sekunden ermöglicht einen erheblich erhöhten Umsatz an gemischtem Schüttgut und verbessert somit die Flexibilität in der Produktionsplanung, etwa durch kürzere Umrüstzeiten und schnellere Produktwechsel. Eine Herausforderung, die sich jedoch in diesem Prozess ergibt, liegt darin, die am besten geeignete Trajektorie zu finden, die jedes Mischgut individuell abgestimmt sein muss. Eine Lösung, die sich hier als äußerst effektiv erwiesen hat, ist die detaillierte Untersuchung des Prozesses mittels numerischer Simulation; mit dieser Methode lässt sich der Grad der Durchmischung für ein breites Spektrum an Schüttgütern als Funktion der verwendeten Trajektorie abschätzen.

Durch den Einsatz der hauseigenen und am Fraunhofer IWM entwickelten Software[1] SimPARTIX®, die für vielfältige pulvertechnologische Prozesse anwendbar ist, konnte der Mischvorgang im Trajektionsmischer numerisch nachgebildet und detailliert analysiert werden. Diese Simulationen erlauben es, den Grad der Durchmischung über die Zeit zu ermitteln und geben Aufschluss darüber, wie lange unterschiedlich kohäsive (haftende) Schüttgüter gemischt werden müssen sowie welche Trajektorie (Mischbahn) die besten Ergebnisse liefert. Die Verbindung aus gezielter Bahnsteuerung und simulationsgestützter Optimierung eröffnet damit einen neuartigen, datenbasierten Ansatz zur materialspezifischen Prozessauslegung. Somit ist es möglich, für jedes Material das optimale Mischsetup zu bestimmen.

Untersuchungen mittels numerischer Simulation ermöglichen zudem datengestützte Aussagen zur optimalen Mischzeit und Mischtrajektorie. Somit müssen sich Hersteller nicht ausschließlich auf Erfahrungswerte bestehender Schüttgüter stützen und das mühselige Suchen nach Antworten auf Fragen nach der Mischdauer oder ob sich ein aktueller Parametersatz auch für ein neuartiges Material eignet, erübrigt sich. Das Verfahren erlaubt damit erstmals eine gezielte, vorhersagbare und ressourcenschonende Anpassung des Mischprozesses an das jeweilige Materialverhalten – und liefert damit eine wertvolle Grundlage für die sichere und effiziente Produktionsplanung.

2 Trajektionsmischer J4-Mixer von hs-tumbler mit 4 Mischkammern (links); beispielhafte Mischbahn der Mischkammer (rechts).

[1] SimPARTIX® ist ein Simulationstool, das am Fraunhofer IWM entwickelt wurde, um verschiedenste Materialien in Fertigungsprozessen und im Betrieb zu untersuchen.

Vom digitalen Werkstoff zum klimaneutralen Stahl

KI, Datenräume, Prozesssimulation: Digitale Methoden zur nachhaltigen Gestaltung komplexer Werkstoff- und Prozessbeziehungen in der Stahlindustrie

Dr. Maksim Zapara | maksim.zapara@iwm.fraunhofer.de
Dr. Lukas Morand | lukas.morand@iwm.fraunhofer.de
Dr. Alexander Butz | alexander.butz@iwm.fraunhofer.de
Dr. Dirk Helm | dirk.helm@iwm.fraunhofer.de

Die Bewältigung der Klimakrise und Sicherung einer stabilen, ressourcenschonenden Werkstoffversorgung zählen zu den zentralen Herausforderungen der industriellen Transformation. Die Stahlindustrie steht dabei unter doppeltem Druck: Sie liefert Schlüsselmaterialien für Zukunftstechnologien und ist zugleich eine der CO_2-intensivsten Branchen weltweit. Für den Übergang zu einer klimaneutralen, resilienten Stahlproduktion braucht es daher technologische wie infrastrukturelle Innovationen; besonders bei der Auswahl geeigneter Werkstoffe: Gefordert sind Stähle, die unter wechselnden Belastungen zuverlässig funktionieren, energieeffizient hergestellt, ressourcenschonend eingesetzt und im Kreislauf geführt werden können. Das erfordert nicht nur ein tiefes Verständnis der Beziehungen zwischen Mikrostruktur, Prozessführung und Anwendung, sondern auch die Entwicklung neuer datenbasierter Ansätze.

Hochleistungsstähle stellen hier erhöhte Anforderungen: Ihre Eigenschaften entstehen aus der komplexen Beziehung zwischen chemischer Zusammensetzung, Mikrostruktur und Prozessgeschichte, welche oft über kostenintensive Trial-and-Error-Zyklen erschlossen wird. Um dies zu verbessern, entwickelt das Fraunhofer IWM modellbasierte, KI-gestützte Werkzeuge und semantische Datenräume, mit denen sich Werkstoffe systematisch und nachvollziehbar gestalten lassen – von der chemischen Zusammensetzung, der Mikrostruktur bis zur Anwendung. Zwei Projekte zeigen exemplarisch, wie sich Datenhoheit, Materialinnovation und CO_2-Reduktion in digitalen Infrastrukturen vereinen lassen.

»AID4GREENEST«: Digitalisierte Werkstoffentwicklung: Von der Simulation zur Wissensplattform

Im EU-Projekt »AID4GREENEST« werden Methoden entwickelt, um Hochtemperaturstähle ressourcenschonender und schneller zu qualifizieren. Ziel ist es, Werkstoffe nicht mehr über langwierige Versuchsreihen, sondern datenbasiert und simulationsgestützt zu bewerten; etwa zur Substitution kritischer Elemente oder der Vermeidung CO_2-intensiver Prozessschritte.

Mit unserer Expertise in Materialmodellierung und -prüfung sowie digitaler Technologien entwickeln wir im Rahmen des Projektes ein physikalisch fundiertes Modell zur Kornstrukturentwicklung, das in Finite-Elemente-Simulationen (FE) eingebettet ist und Gefügeveränderungen in Schmiedebauteilen über den gesamten Prozessverlauf präzise beschreibt. Diese Vorhersagen fließen direkt in eine intelligente Kriechlebensdauerabschätzung ein – ein hybrider Modellansatz, der das Langzeitverhalten neuer Legierungen auch ohne mehrjährige Prüfzyklen vorhersagbar macht.

Beide Methoden sind Teil einer vom Fraunhofer IWM konzipierten digitalen Wissensplattform, die strukturierte Simulations- und Prüfdaten FAIR -konform[1] bereitstellt. Neben der Entwicklung der Modelle übernehmen wir auch die Gestaltung der Datenstruktur und der Repräsentation digitaler Workflows, anhand der sich Prozessparameter, Mikrostruktur und Lebensdauerkennwerte automatisiert verknüpfen lassen. Ergänzend werden Prozesse etabliert, um experimentelle Daten standardisiert aufzubereiten und mit Modellen anzureichern.

Auf normativer Ebene bringen wir uns in die Entwicklung eines europaweit abgestimmten Vorstandards zur digitalen Werkstoffcharakterisierung ein – als Grundlage für interoperable Datenstrukturen und Plattformintegration. Ein konkreter Anwendungsfall ist die Bewertung von Hochtemperaturstählen für Windkraftanlagen, Gasturbinen und den Großmaschinenbau: Hier konnten simulationsgestützt Prozessvarianten entwickelt werden, die gleichzeitig zur Reduktion kritischer Elemente, verbesserten Gefügeeigenschaften und längeren Lebensdauern führen.

»StahlDigital«: Datenräume und Ontologien für die Prozesskette von Karosseriestahl

Das kürzlich abgeschlossene BMBF-Projekt »StahlDigital«, Teil der BMBF-Plattform »MaterialDigital«, adressierte die vollständige Digitalisierung der Prozesskette für Karosseriestähle – von der Herstellung bis zur Crashsimulation. Das Fraunhofer IWM entwickelte hierfür eine domänenspezifische Ontologie sowie das »Data Space Management System« (DSMS), ein Technologie-Stack zum Management heterogener Werkstoff- und Prozessdaten.

Im Zentrum des Projektes stand die Frage, wie Laborversuche, Prozesssimulationen und Produktionsergebnisse so verknüpft werden können, dass daraus automatisiert verwertbare Material-modelle entstehen. Die Lösung bestand in einem semantischen Datenraum, in dem reale Zugversuche, Crashdaten, Bulge- und Scherversuche sowie mikroskalige Simulationen zusammengeführt und direkt in FE-Programme überführt werden. Materialkennwerte werden automatisch – simulationsgestützt und reproduzierbar – in Materialkarten übersetzt. Neben der Konzeption und Entwicklung des DSMS stellten wir auch die notwendigen experimentellen, numerischen und semantischen Schnittstellen bereit. Die Integration von Versuch, Simulation und Ontologie auf einer Plattform bildet die Grundlage für zukunftssichere, interoperable Datenketten in der Werkstofftechnik. Das System ist als lizenzierbares Softwareprodukt verfügbar und lässt sich an unternehmensspezifische Anfor-derungen anpassen.

Diese Projekte und unsere Forschung zeigen, wie sich analoge Materialentwicklung in digitale, datenbasierte Prozesse überführen lässt – fundiert, nachvollziehbar und reproduzierbar. Die Kombination aus KI, Simulation und strukturierter Datenhaltung verbessert nicht nur Effizienz, sondern auch Transparenz und Rückverfolgbarkeit entlang der Wertschöpfungskette. Wir schaffen mit unserer Expertise in Modellierung, Werkstoffcharakterisierung, Datenmanagement und Normung die Grundlage für eine nachhaltige, souveräne Materialentwicklung in Europa – und stärken zugleich die Anschlussfähigkeit an strategische Datenräume und Plattforminitiativen.

Mehr erfahren

»AID4GREENEST«

»MaterialDigital«

DSMS

[1] Findable, Accessible, Interoperable, Reusable (FAIR)

Kreislauffähigkeit von Werkstoffen und Bauteilen

Der Einsatz von Recycling-Materialien auch in Hochleistungssystemen gewinnt an Bedeutung. Die Berechenbarkeit von Materialien unbestimmter Herkunft insbesondere für das »Design for Circularity« wird dabei unerlässlich.

Nachhaltiges Design im Fahrzeugbau

Werkstoffmechanische Bewertung und digitale Modellierung von Rezyklaten für nachhaltige Fahrzeugkomponenten

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

Angesichts ambitionierter Klimaziele und knapper Rohstoffe rücken recyclingfähige Materialien auch in der Mobilitätsbranche zunehmend in den Fokus. Besonders herausfordernd sind Hochleistungswerkstoffe wie faserverstärkte Kunststoffe, deren Verhalten bei Wiederverwendung und Belastung bislang schwer einzuschätzen sind. Parallel dazu verschärft sich der regulatorische Rahmen: So fordert ein neuer EU-Verordnungsvorschlag[1] eine tiefgreifend Neuausrichtung von Leichtbau und Materialentwicklung im Mobilitätssektor. Angestrebt wird unter anderem, dass 25 Prozent der in Neufahrzeugen verbauten Kunststoffe künftig aus Recyclingmaterial bestehen sollen – ein Viertel davon direkt aus Altfahrzeugen.

Um diese neuen Anforderungen umzusetzen, braucht es verlässliche Ansätze, um Rezyklatwerkstoffe frühzeitig und anwendungsgerecht zu bewerten. Das Fraunhofer IWM entwickelt hierfür experimentelle und digitale Methoden, mit denen sich Materialeigenschaften präzise erfassen, strukturmechanisch bewerten und simulationsgestützt in den Entwicklungsprozess integrieren lassen. Im Mittelpunkt stehen dabei Verfahren, die Recyclingmaterialien systematisch vergleichbar machen und Potenziale wie Grenzen transparent aufzeigen.

Materialbewertung für Rezyklate im Fahrzeugleichtbau

Bislang gelten hochfeste Faserverbundkunststoffe zwar als Schlüsselwerkstoffe für leichte, energieeffiziente Fahrzeuge; die Wiederverwertung und verlässliche Materialbewertung sind jedoch anspruchsvoll. Zum einen schwankt die Qualität von Rezyklaten je nach Herkunft deutlich, zum anderen bestehen hohe Anforderungen an Sicherheit und Crash-Performance, die es im Materialdesign zu berücksichtigen gilt. Im Rahmen des BMWK-geförderten Projektes »VaDiMat« werden deshalb faserverstärkte Kunststoffe ohne und mit Matrixrezyklatanteilen vergleichend für Fahrzeuganwendungen untersucht. Der Schwerpunkt des Fraunhofer IWM liegt dabei auf der werkstoffmechanischen Analyse und modellbasierten Beschreibung faserverstärkter Kunststoffe mit Rezyklatanteil. Um das komplexe Materialverhalten dieser Sekundärwerkstoffe zuverlässig zu erfassen, werden systematisch mechanische Prüfungen an Mikroproben sowie an Matrixmaterialien durchgeführt. So lassen sich Schädigungsmechanismen durch Faserverteilungen, Alterungseffekte oder Inhomogenitäten identifizieren. Ergänzend werden strukturmechanische Kennwerte wie Steifigkeit, Bruchdehnung und Energieaufnahme unter realitätsnahen Belastungen bestimmt.

Diese experimentellen Daten bilden die Grundlage für digitale Werkstoffzwillinge, in denen das Verhalten der Rezyklate unter verschiedenen Einsatzbedingungen simulationsgestützt vorhergesagt wird. Die numerischen Modelle werden dabei mit den Messergebnissen aus der realen Werkstoffprüfung kalibriert – etwa durch den Abgleich virtueller Belastungsszenarien mit gemessenen Spannungs-Dehnungs-Verläufen. Auf diese Weise entstehen belastbare Materialkarten, die den gezielten Einsatz recycelter Werkstoffe in crashrelevanten Leichtbaustrukturen ermöglichen.

Sortenreine Materialkonzepte für geschlossene Werkstoffkreisläufe

Um einen zukünftigen sortenreinen Werkstoffkreislauf zu verbessern, wurde in dem Fraunhofer-internen Projekt »Light Materials 4 Mobility« ein neuartiges Materialkonzept für einen Leichtbau-Sandwichverbund entwickelt. Zum Einsatz kamen eine Polypropylenmatrix und thermoplastische UD-Tapes für recyclinggerechte Strukturbauteile, die sich am Ende ihres Lebenszyklus ohne aufwendige Trennprozesse wiederverwerten lassen. Die nötigen virtuellen Entwicklungsmethoden und Materialdaten wurden am Fraunhofer IWM ermittelt: So wurden die entwickelten Materialsysteme gezielt auf ihr mechanisches Verhalten unter realen Belastungsbedingungen untersucht. Die experimentellen Ergebnisse bildeten die Grundlage für simulations-fähige Materialmodelle, mit denen sich das Verhalten der Verbundwerkstoffe in virtuellen Designprozessen bewerten ließ. Darauf wurde ein Batterieschutzgehäuse als virtuelles Produkt entworfen – als Demonstrator für den Einsatz des sortenreinen PP-UD-Sandwichverbunds im Fahrzeug. Für diesen Entwicklungsprozess ist aktuell ein kombinierter Bewertungsansatz in Arbeit, der technische und ökologische Kriterien frühzeitig zusammenführt. Damit lassen sich unterschiedliche Werkstoffkonzepte bereits in frühen Entwicklungsphasen systematisch vergleichen und hinsichtlich Performance und Nachhaltigkeit bewerten.

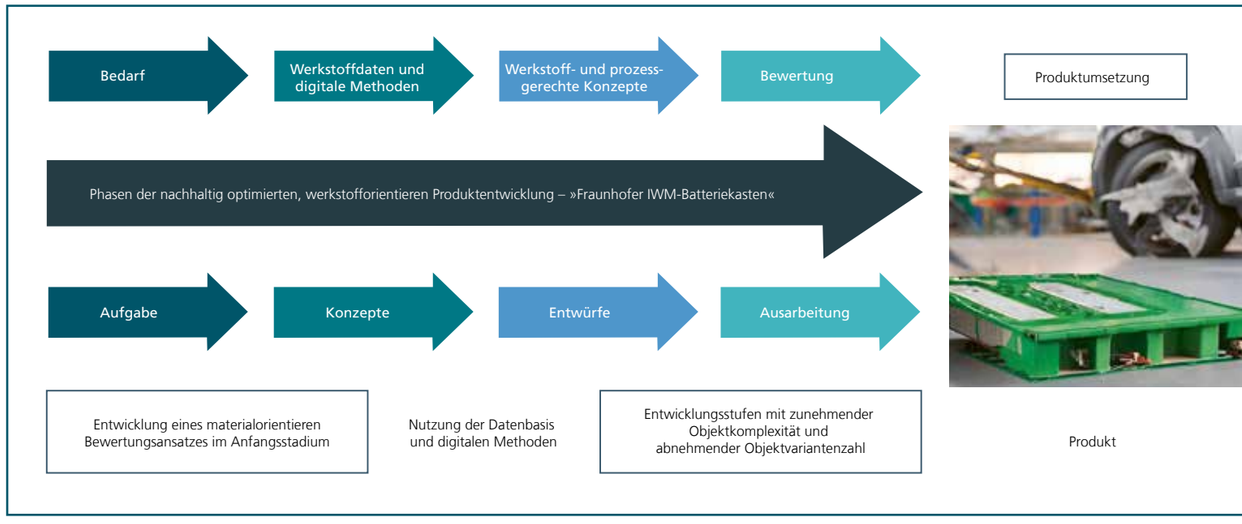
Dieser Ansatz wird bereits in dem BMWK-geförderten Konsortialprojekt »DigiTain« integriert. Ein zentrales Element des Projektes ein phasenbasiertes Entwicklungsmodell, bei dem an definierten Entscheidungspunkten (Gates) sowohl technische als auch ökologische Kriterien geprüft werden. Dies erlaubt eine ganzheitliche Bewertung von Werkstoffkonzepten und unterstützt die Entwicklung nachhaltiger Fahrzeugkomponenten – unter Berücksichtigung einer geplanten EU Regulierung[2] sowie der R-Strategien des 9R-Frameworks des United Nations Environmental Programmes; von Re-use und Repair über Repurpose bis hin zu Recycling. Der Projektfokus liegt dabei auf Komponenten mit hohen Sicherheits- und Performance-Anforderungen.

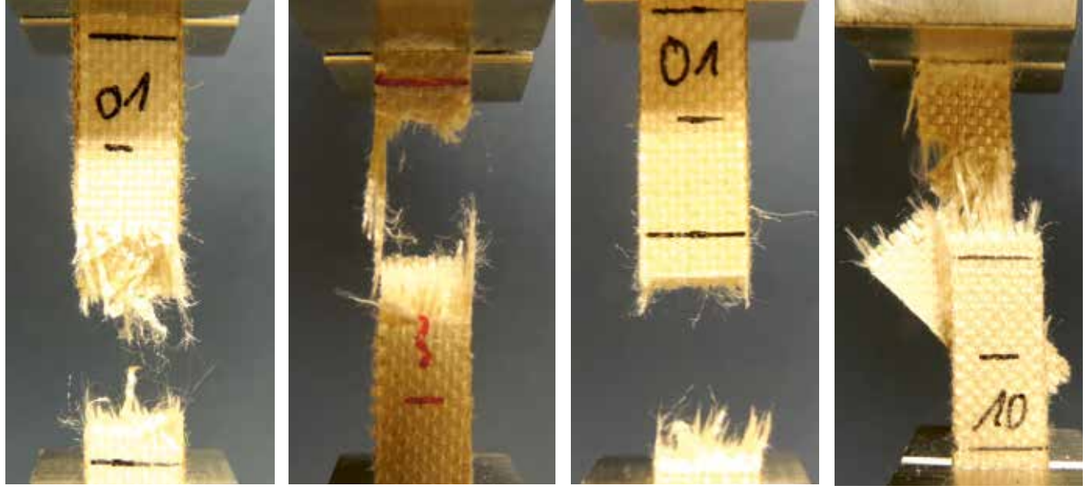
Ein konkreter Anwendungsfall ist die gezielte Weiternutzung von Carbonfasern aus Wasserstoffdrucktanks. Aufgrund von Vorschädigungen und begrenzter Rückgewinnungsqualität lassen sich diese Fasern nicht erneut für Primäranwendungen verwenden. Statt einer energetischen Verwertung wird daher eine Kaskadennutzung angestrebt: Die Fasern werden als Bewehrung in Carbonbeton eingesetzt – einem Material mit deutlich günstigerer CO_2-Bilanz und höherer Dauerhaftigkeit als klassischer Stahlbeton. Die Herausforderung liegt dabei in der strukturellen Bewertung des materialspezifischen Restnutzens. Das Fraunhofer IWM ermittelt hierfür die relevanten Kennwerte, analysiert mechanische Wechselwirkungen im neuen Einsatzumfeld und entwickelt simulationsfähige Werkstoffmodelle, um die Leistungsfähigkeit der Fasern im »zweiten Leben« präzise abzubilden und digital gestützt in Designprozesse zu überführen.

Mit der strukturellen Bewertung von Werkstoffen über mehrere Lebenszyklen hinweg schafft das Fraunhofer IWM die Grundlage für belastbare Materialentscheidungen im Sinne der Kreislaufwirtschaft für nachhaltige Mobilitätskonzepte. Digitale Methoden, simulationsfähige Modelle und experimentelle Analysen greifen dabei systematisch ineinander – von der ersten Materialauswahl bis zur Kaskadennutzung. So entsteht eine durchgängige Methodik, die Nachhaltigkeit, Performance und Ressourceneffizienz von Beginn an integriert und auf reale Anforderungen übertragbar ist.

[1] Mitteilung der Europäischen Kommission, »Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Altfahrzeuge und über die Kreislauffähigkeit von Fahrzeugen und zur Aufhebung der Richtlinien 2000/53/EG und 2005/64/EG«

[2] »Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 über kritische Rohstoffe und zur Änderung bestimmter Verordnungen (Verordnung über kritische Rohstoffe)«





1 Versagensmoden verschiedener naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe

Ermüdungsfeste naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe

Multiskalige Charakterisierung und simulationsgestützte Modellbildung von naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen für anspruchsvolle mechanische Einsatzbedingungen

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

Im Zuge des ökologischen Wandels gewinnen Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen in der technischen Anwendung zunehmend an Bedeutung. Neben klassischen Naturmaterialien wie Holz betrifft dies verstärkt auch Verbundwerkstoffe – Kombinationen meist artfremder Materialien, die durch gezielte Mikrostrukturgestaltung anwendungsangepasste Eigenschaften erhalten. Gegenüber konventionellen Faserverbunden rücken naturfaserverstärkte Werkstoffe – etwa mit Hanf- oder Flachsfasern verstärkte Materialien – in den Fokus: Sie weisen eine biobasierte Herkunft mit geringem CO_2-Fußabdruck und hohem Nachhaltigkeitspotenzial auf.

Die mechanische Belastbarkeit dieser Materialien über längere Zeiträume ist bislang jedoch nur unzureichend verstanden. Anders als bei synthetischen Faserverbunden fehlen verlässliche Auslegungsgrundlagen: Biologische Variabilität, schwankende Faser-Matrix-Haftung und Feuchteempfindlichkeit führen zu einem komplexen, streuenden Langzeitverhalten – besonders unter zyklischer Belastung. Zudem bestehen Unsicherheiten in Bezug auf Alterungs- und Klimabeständigkeit. Der industrielle Einsatz ist daher unsicheren Lebensdauervorhersagen behaftet – ein erhebliches Risiko für sicherheitsrelevante Anwendungen. Um biobasierte Verbundwerkstoffe für technische Anwendungen nutzbar zu machen, braucht es ein vertieftes Verständnis ihrer mechanischen Reaktionsweisen; unter realitätsnahen Belastungen, über lange Zeiträume hinweg und jenseits idealisierter Modellannahmen. Wie sich diese Herausforderung in tragfähige Lösungen übersetzen lässt, zeigen wir am Beispiel gewebeverstärkter Naturfaserverbundwerkstoffe – mit einem methodisch neu aufgestellten Zugang zur Bewertung von Ermüdungsverhalten, Streuung und Lebensdauer.

Naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe im Leichtbau

Klassische Faserverbundwerkstoffe, etwa auf Basis von Glas- oder Kohlenstofffasern, sind seit Jahrzehnten Schlüsselmaterialien im Leichtbau: Sie vereinen hohe spezifische Festigkeiten mit geringem Gewicht und kommen in vielfältigen Anwendungen zum Einsatz – vom Fahrzeug- und Flugzeugbau über die Windenergie bis hin zu tragenden Komponenten in Maschinen oder Infrastruktursystemen. Für Hochleistungsanwendungen kommen Werkstoffe mit klar definiertem Aufbau zum Einsatz: kontinuierliche, orientierte Fasern in polymerer Matrix, mit etablierten Verarbeitungsverfahren und normierten Auslegungsgrundlagen.

Dem gegenüber stehen naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe, bei die Fasern – etwa Hanf, Flachs oder Jute – auf biobasierten Rohstoffen beruhen. Daneben kann auch die Matrix aus Biopolymeren bestehen. Ihr ökologischer Vorteil ist evident: geringere CO_2-Emissionen, niedrigere Herstellenergien und bessere Rezyklierbarkeit. Mechanisch verhalten sie sich jedoch teils grundlegend anders – nicht nur durch die natürliche Variabilität, sondern auch durch abweichende Bruchmechanismen, höhere Feuchteempfindlichkeit und komplexe, nichtlineare Schädigungsprozesse. Bestehende Auslegungsmodelle aus dem konventionellen Leichtbau sind daher nur bedingt übertragbar. Das stellt neue Anforderungen an die werkstoffmechanische Charakterisierung: Schädigungsmechanismen wie Delamination, Faserauszug oder Matrixversagen müssen ebenso systematisch erfasst werden wie die unterschiedlichen Belastungstypen im Einsatz.

Simulation und Validierung auf Struktur- und Bauteilebene

Das Fraunhofer IWM entwickelt hierfür umfassende Methoden zur multiskaligen Charakterisierung und Modellierung. Im Fokus stehen beispielsweise gewebeverstärkte Systeme mit Flachs- oder Hanffasern, deren Verhalten experimentell und numerisch unter statischer, dynamischer, zyklischer und kriechender Belastung untersucht wird. Entlang einer durchgängigen Bewertungskette vom Faserbündel bis zum Bauteil werden mechanische Kennwerte ermittelt, Schadensmechanismen analysiert und simulationsgestützte Lebensdauermodelle kalibriert. Klassische Wöhlerversuche werden durch bildgebende Verfahren ergänzt, um das mikrostrukturelle Schädigungsverhalten präzise zu erfassen. So entstehen physikalisch fundierte Modelle, die anisotropes und streuendes Materialverhalten realitätsnah abbilden.

Ein Beispiel für die methodische Tiefe dieser Arbeiten liefert eine vergleichende Studie zum Ermüdungsverhalten von Cellulose/Polyolefin-Verbundwerkstoffen[1]. Unter zyklischer Belastung zeigten sich deutliche Unterschiede im Bruchverhalten: raue Bruchflächen mit starkem Faserauszug, glatte Frakturen oder ausgeprägte Delaminationen. Diese Unterschiede führten zu signifikant abweichenden Ermüdungsfestigkeiten – mit gegenläufigen Trends bei hohen und niedrigen Zyklenzahlen. Besonders auffällig war die Streuung: Während einige Materialien ein vergleichsweise robustes Dauerfestigkeitsverhalten aufwiesen, zeigten andere deutliche Abweichungen in der Lebensdauer. Solche Erkenntnisse sind zentral, um geeignete Werkstoffsysteme gezielt für bestimmte Belastungsprofile auszuwählen – etwa für schwingungsbeanspruchte Leichtbauteile oder sicherheitsrelevante Komponenten.

Wie sich solche Unterschiede auf reale Bauteilszenarien auswirken, wurde in einer Benchmarkstudie am Beispiel eines Fahrwerkbauteils für Schienenfahrzeuge untersucht[2]. Verglichen wurde hier das Ermüdungsverhalten eines klassischen glasfaserverstärkten Kunststoffs mit dem eines naturfaserbasierten Werkstoffs – unter identischen Lastannahmen. Das Ergebnis: In der betrachteten Lastspielregion zeigte das Naturfaserbauteil nicht nur vergleichbare, sondern sogar potenziell überlegene Dauerfestigkeitseigenschaften – bei gleichzeitig deutlich reduzierter CO_2-Bilanz und geringerem Ressourceneinsatz. Die Ergebnisse bestätigen die Anwendungsreife biobasierter Werkstoffe für sicherheitsrelevante Komponenten im Mobilitätssektor.

Mit seiner Forschung zu naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen legt das Fraunhofer IWM die Grundlagen für eine nachhaltige, mechanisch verlässliche Werkstofftechnik. Die entwickelten Bewertungsansätze und Lebensdauermodelle ermöglichen die präzise, simulationsgestützte Auslegung biobasierter Leichtbaumaterialien – über alle relevanten Skalen hinweg. Damit öffnen sich neue Anwendungsfelder in Fahrzeugbau, Bahnindustrie und Energietechnik. Indem wir komplexes Materialverhalten nachvollziehbar machen und in belastbare Designstrategien überführen, leisten wir einen substanziellen Beitrag zur Rohstoffsouveränität und zur Etablierung kreislauffähiger Wertschöpfungssysteme.

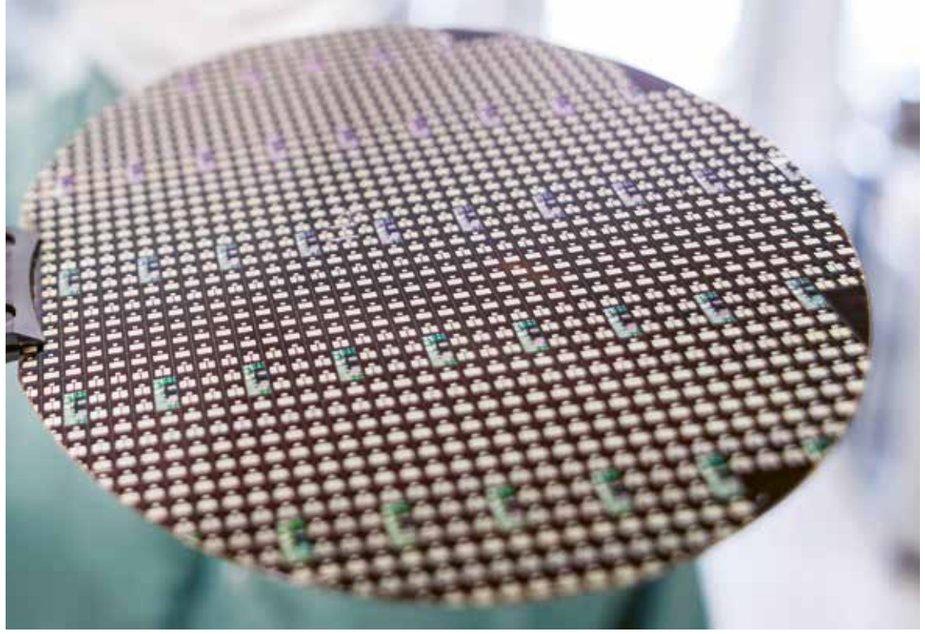
[1] Müssig, J., Kelch, M., Gebert, B., Hohe, J., Luke, M., Bahners, T.: Improvement of the fatigue behaviour of cellolose/polyolefin composites using photo-chemical fibre surface modification bio-inspired by natural role models, Cellulose 27 (2020) 5815-5827, *Link*

[2] Graupner, N., Hohe, J., Schober, M., Rohrmüller, B., Weber, D., Bruns, L., Bruns, A., Müssig, J.: A competitive study of the static and fatigue performance of flax, glass and flax/glass hybrid composites on the structural example of a light railway axle tie, Front. Mat. 9 (2022) 837289, Link

Kontrollierte Risssteuerung in Siliziumkarbid

Simulation, Charakterisierung und Delaminationsmechanik für die Herstellung ultradünner SiC-Schichten

Dr. Kai Schillinger-Engel | kai.schillinger-engel@iwm.fraunhofer.de
Tobias Rist | tobias.rist@iwm.fraunhofer.de



Leistungsbauelemente auf einem Siliziumkarbid-Wafer, hergestellt im institutseigenen Reinraum des Fraunhofer IISB im Rahmen des Projektes »ThinSiCPower«

Trotz ihrer herausragenden Eigenschaften für die Leistungselektronik gelten Siliziumkarbid-Wafer (SiC) nach wie vor als teuer und schwer zu verarbeiten. Die hohen Materialkosten resultieren hierbei primär aus dem komplexen Herstellungsprozess. –Als extrem harter, gleichzeitig jedoch spröder Werkstoff, lässt sich dieser nur langsam unter sehr hohem Aufwand und Sägeverlust in die von der Halbleiter-Technik benötigten dünnen Wafer auftrennen. Besonders kritisch wird dies, wenn ultradünne SiC-Wafer präzise vom einkristallinen Rohmaterial abgetrennt werden sollen – ein entscheidender Schritt zur effizienten Nutzung des teuren Ausgangsmaterials. Der neuentwickelte Trennprozess basierend auf einer Laserschädigung und gezielter Krafteinbringungen ermöglicht das schnelle und effiziente Abtrennen von Wafern in Dicken von 50 µm bis 400 µm.

Dieser Prozess erfordert ein tiefgehendes bruchmechanisches Verständnis – etwa darüber, wie sich Risse unter mehrachsigen Spannungen ausbreiten, wie Laserschädigungen das lokale Bruchverhalten beeinflussen und wie sich der Übergang von Mikrodefekten zu makroskopischem Versagen vermeiden lässt. Nur durch die Kombination aus experimenteller Charakterisierung, numerischer Simulation und werkstoffspezifischer Modellierung lässt sich die Rissausbreitung gezielt steuern, der Prozess reproduzierbar gestalten und der Materialverlust auf ein Minimum reduzieren. Im Rahmen eines Fraunhofer-internen Projekts demonstriert das Fraunhofer IWM seine ausgewiesene Expertise in der Werkstoffmechanik spröder Materialien – einschließlich simulationsgestützter Rissverfolgung, experimenteller Bruchcharakterisierung und der Entwicklung digitaler Werkstoffmodelle für kontrollierte Delamination.

»ThinSiCPower«: Schlüsseltechnologien für eine kosteneffiziente Siliziumkarbid-Leistungselektronik

Im Fraunhofer-internen Forschungsprojekt »ThinSiCPower« bündelt ein Konsortium aus den Instituten Fraunhofer IWM, ISE, ENAS und IISB seine Kompetenzen, um alternative Wege zur Herstellung kostengünstiger SiC-Substrate und deutlich dünnerer SiC-Chips mit ressourcenschonenden Prozesstechnologien zu erforschen. Ein zentrales Ziel des Projektes ist sowohl die Senkung der SiC-Bauteilkosten als auch der Auslegungskosten. Dies soll durch eine verbesserte Lastwechselfestigkeit erreicht werden, was die Produkte für Halbleiter- und Leistungsmodulhersteller besonders attraktiv macht. Diese leistungsstarken und kosteneffizienten SiC-Lösungen sollen die Markterschließung für SiC-Leistungselektronik deutlich beschleunigen – und damit auch einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in der Elektromobilität sowie der Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energien leisten. Eine wesentliche Herausforderung stellt dabei die Trennung des Rohkristalls dar: Schon kleinste Abweichungen in der Spannungsverteilung oder Rissinitiierung können dazu führen, dass der Riss vom vorgesehenen Pfad abweicht und wertvolles Material beschädigt wird. Um das gezielte Ablösen dünner SiC-Schichten aus dem Volumenkristall zu ermöglichen, bringt das Fraunhofer IWM eine Vielzahl werkstoffmechanischer Kompetenzen in das Projekt ein – von der Modellierung des Laserprozesses über Materialanalysen bis zur prozesssicheren Trennung. Es ist essenziell, die entlang einer durch Laserstrukturierung eingebrachten Schwächungsebene ablaufende Delamination bruchmechanisch zu verstehen, zu steuern und zu optimieren. Zum Einsatz kommen dabei Simulations- und Messmethoden, die gezielt an die spröden Eigenschaften von SiC angepasst wurden.

Modellierung und Mikroanalyse entlang der Schwächungsebene

Die Gruppe »Glasformgebung und -bearbeitung« am Fraunhofer IWM modellierten die durch das am Fraunhofer ISE entwickelte Lasertrennverfahren verursachten thermischen Spannungsfelder und strukturellen Veränderungen im SiC-Kristall – eine Voraussetzung, um die Wirkung der Schwächungsebene mechanisch und energetisch fundiert zu verstehen. Die resultierenden Mikrostrukturen wurden mithilfe von Rasterelektronenmikroskopie (REM), Raman-Spektroskopie und Elektronenrückstreubeugung (EBSD) charakterisiert, um lokale Defekte, Phasenumwandlungen und Versprödungszonen präzise zu erfassen. Auf dieser Grundlage folgte die Entwicklung bruchmechanischer Modelle zur gezielten Vorhersage und Steuerung der Rissausbreitung entlang der Trennebene.

Zur Validierung dieser Modelle wurden mit Lasertrennebene versehene Wafer und sogenannte Pucks – zylindrisch geformte Rohkristalle vor dem Zersägen – in einem speziell entwickelten Prozess in einer Universalprüfmaschine fixiert und mechanisch getrennt. Die dabei gemessenen Haftkräfte liefern Rückschlüsse auf die Qualität des Laserprozesses und machen lokale Unterschiede im Trennverhalten sichtbar. Die entstandenen Bruchflächen wurden fraktographisch untersucht; zusätzlich fertigten wir Mikroproben aus den betroffenen Bereichen an und analysierten sie mit mikromechanischen Prüfmethoden wie der Mikro-4-Balkenprüfung und Nanoindentation, um die lokalen Materialeigenschaften zu bestimmen und die Modelle weiter zu verfeinern.

Wir gehen dabei über die reine Modellierung hinaus und entwickeln auch Verfahren zur mechanischen Trennung der Schichten: Durch gezielt gesteuerte Belastungen – etwa durch definierte Biegung oder lokale Krafteinleitung – wird der Riss entlang der gewünschten Ebene geführt, ohne das umliegende Material zu schädigen. Die so gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen die Definition eines robusten Prozessfensters sowie die Ableitung materialspezifischer Trennrichtlinien für industrielle Anwendungen. Auf diese Weise entstehen aus einem teuren Rohkristall mehrere funktionale SiC-Schichten mit hoher Qualität, minimalem Ausschuss und klarer Eignung für die Weiterverarbeitung – ein entscheidender Schritt für die wirtschaftliche Skalierung dieser Schlüsseltechnologie.

Mit seinem Beitrag zu »ThinSiCPower« zeigt das Fraunhofer IWM, wie sich komplexe Trennprozesse in spröden Hochleistungsmaterialien durch tiefgreifendes werkstoffmechanisches Know-how beherrschen lassen. Die entwickelten Methoden – von simulationsgestützten Spannungsanalysen über mikromechanische Prüfverfahren bis hin zur fraktographischen Auswertung – wurden zwar ursprünglich auf das Anwendungsziel SiC-Wafer zugeschnitten, lassen sich aber ebenso auf andere spröde Werkstoffe und industrielle Prozesse übertragen. Damit leisten wir nicht nur einen Beitrag zur ressourceneffizienten SiC-Technologie, sondern stellen zugleich eine skalierbare Methodik bereit, um die Verarbeitung fragiler Materialien prozesssicher und industrienah zu gestalten. Vor allem hinsichtlich wachsender Anforderungen an Kreislauffähigkeit und »Circular Economy« liefern die entwickelten Strategien konkrete Werkzeuge, um Hochleistungsmaterialien künftig deutlich nachhaltiger und effizienter zu nutzen.

Qualitätsgesicherte Aluminiumlegierungen mit Recyclinganteilen

Einfluss von Verunreinigungen und Fremdelementen auf die Materialeigenschaften mit Hochdurchsatz-Screening beherrschen

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

Unter allen kommerziell hergestellten Metallen sticht die Erzeugung von Primäraluminium mit den höchsten Energieverbräuchen und den höchsten CO_2-Emissionswerten klar heraus. Im Gegensatz dazu können durch das Einschmelzen und die Wiederverwendung von Aluminiumschrott bis zu 95 Prozent Energie (im Vergleich zur Rohaluminiumherstellung) eingespart werden. Der Anteil an Sekundäraluminium ist daher für Unternehmen, die Aluminium verarbeiten, ein ganz entscheidender Faktor zur Herstellung nachhaltiger Produkte. Jedoch kommt es bei der Einspeisung von Recyclingaluminium in den Produktionskreislauf zu einer unbekannten Zusammensetzung und Anreicherung von Legierungselementen. Diese wiederum beeinträchtigt die Materialeigenschaften, die Verarbeitbarkeit und letztlich die Qualität der daraus hergestellten Bauteile erheblich: So kann Kupfer beispielsweise zu Spannungsrisskorrosion führen und Eisen die Umformbarkeit verschlechtern. In welchem Umfang Sekundäraluminium zur Deckung des industriellen Bedarfs an Aluminiumlegierungen eingesetzt werden kann, hängt folglich davon ab, ob und wie gut der Einfluss von Fremdelementen beherrscht werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass durch Stoffgemische oder Beschichtungen weitere Begleitelemente eingetragen werden, die beim Umschmelzen nicht vollständig entfernt werden können.

Im neuen Fraunhofer-Leitprojekt »ORCHESTER« entwickeln und qualifizieren wir daher gemeinsam mit Partner-Instituten eine Screening-Methode, mit der Schwankungen bei der Legierungszusammensetzung durch die Verwendung von Rezyklaten erkannt und deren Auswirkungen auf die resultierende Bauteilqualität beurteilt werden können. Damit befähigen wir Unternehmen, flexibel auf unterschiedliche Recyclinganteile und -güten reagieren zu können. Mit der im Leitprojekt entwickelten Methode können wir demonstrieren, dass der Recyclinganteil einer hochwarmfesten Aluminiumlegierung bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit um mindestens 50 Prozent gesteigert werden kann.

Werkstoffcharakterisierung und Legierungs-bewertung im Hochdurchsatz

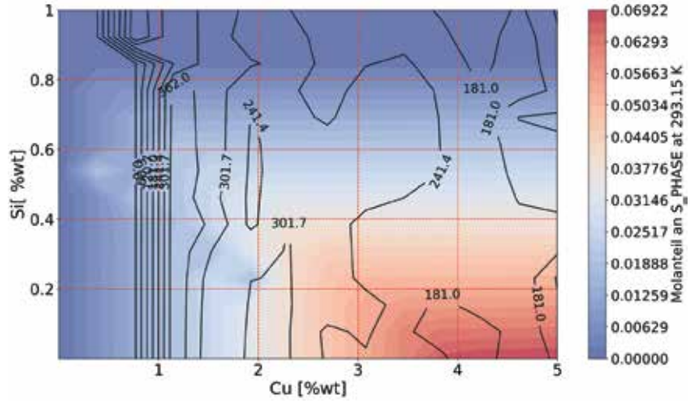
Hochdurchsatzverfahren haben sich in der Materialforschung als leistungsfähiger Ansatz etabliert, um komplexe Werkstoffsysteme schnell und systematisch zu analysieren. Durch die enge Verzahnung von Simulation, automatisierter Probenherstellung, experimenteller Charakterisierung und datenbasierter Auswertung lassen sich neue Materialkombinationen deutlich effizienter entwickeln als mit herkömmlichen Methoden. Dies ist insbesondere bei ressourcensensitiven oder stark regulierten Anwendungen ein entscheidender Vorteil. Um nun im Rahmen des Projektes Aluminiumlegierungen wirtschaftlich im Hochdurchsatz einem Screening unterziehen zu können, kombinieren wir Werkstoffsimulationen mit experimentellen Charakterisierungsmethoden. Dafür berechnen wir mit automatisierten CALPHAD-Simulationen den Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung der Legierung und der Phasenbildung bei der Verarbeitung. Diese Ergebnisse kommen dann in der Simulation der Auswirkung auf die Festigkeit und die Verarbeitbarkeit zum Einsatz. Die Simulationsergebnisse dienen letztlich dazu, den Toleranzbereich der Legierungszusammensetzung für die erforderliche Warmfestigkeit einzugrenzen.

Für das experimentelle Material-Screening erzeugen wir Materialproben entsprechend des berechneten Toleranzbereichs durch In-situ-Legieren mittels pulver- und drahtbasiertem Laserauftragsschweißen. Dabei wird der Anteil an Sekundärmaterialien und beigemischten Legierungselementen variiert. Aus der Verbindung von mechanischer Charakterisierung und der 3D-Rekonstruktion der Mikrostruktur können dann Struktur-Eigenschaftskorrelationen abgeleitet werden. Die Bewertung der Mikrostruktur spielt dabei eine zentrale Rolle – insbesondere, wenn sich Fremdelemente aus Rezyklaten lokal anreichern und zu veränderten Phasen oder Spannungszuständen führen.

Hier bringt das Fraunhofer IWM seine langjährige Erfahrung in der Analyse prozessbedingter Mikrostrukturen und Eigenspannungen ein: Mittels experimentellen und numerischen Methoden untersuchen wir, wie sich solche mikrostrukturellen Effekte auf das Verformungs- und Schädigungsverhalten auswirken – und ermöglichen so eine belastbare Einschätzung der Bauteilqualität trotz schwankender Legierungszusammensetzungen. Mit dem in »ORCHESTER« durchgeführten kombinierten experimentell-numerischen Hochdurchsatzscreening kann nun die Eignung von Sekundärmaterialien bewertet und passende Prozessparameter für einen möglichst hohen Einsatz von Sekundäraluminium abgeschätzt werden. Die so erzeugten Daten dienen außerdem dem Training von KI-Modellen und als wichtige Ergänzungen für Datenbanken zur Entwicklung von Legierungsdesign hinsichtlich höherer Toleranz gegenüber schrottbezogenen Verunreinigungen.

Das digitale Ökosystem, das im Leitprojekt entwickelt wird, sieht vor, zusätzlich zu diesen technologischen Aspekten – ökonomische und ökologische Überlegungen in die Betrachtung mit einzubeziehen. Dazu wird eine Vielzahl von Datenquellen zur Verfügbarkeit von Schrott, zur Rohstoffherkunft, zu Recyclingwegen und zu Emissionen in Verarbeitungsprozessen über ein dynamisches Stoffflussmodell für Primär- und Sekundär-Aluminium miteinander vernetzt: Mit der so orchestrierten Dateninfrastruktur können wir gesamte Wertschöpfungsketten von den Rohstoffquellen bis zum einsatztauglichen Aluminiumbauteil abbilden.

Unternehmen bekommen mit diesem holistischen und innovativen Ansatz eine Wissens- und Entscheidungsbasis für die technologische, ökologische und ökonomische Bewertung und den Vergleich alternativer Lieferketten und Fertigungsrouten – für eine nachhaltige und prozesssicherere Verarbeitung von Aluminiumlegierungen mit hohem Recyclinganteil.



Mit thermodynamischen Simulationen berechnen wir, wie die Legierungsbestandteile Silizium und Kupfer, die Ausbildung der festigkeitssteigernden S-Phase in der Aluminium-mikrostruktur beeinflussen. Die hoher Anteile an S-Phasen sind rot markiert.

Wissenschaftlicher Output

Abschlussarbeiten, Auszeichnungen und Lehre

Abschlussarbeiten

Dissertationen

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

Felix Gatti
Universität Freiburg
Programmierbare Reibung – Entwicklung von stimuli-responsiven Tribosystemen auf Basis ionischer Flüssigkeitsgemische

Hemanth Janarthanam
RWTH Aachen
Multiscale investigation of ductile damage in dual phase steels

Eduard Madirov*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Up- and Down-Conversion in Rare Earth-Doped Fluoride Crystalline Materials for Photovoltaic Applications

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

Thinh Quy Duc Pham
University of Liège
Towards microstructure prediction of Ti6Al4V using efficient data-driven physics-informed optimization approaches

Manuel Scholl*
Technische Universität München (TUM)
Impulsartige Störgeräusche aus verschraubten Fügestellen am Beispiel der Radverschraubung

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

Wei Wei
Universität Freiburg
Theoretical atomic-scale modelling of perovskite-type photo-battery materials

Franziska Wenz
Universität Freiburg
Design of programmable shape morphing metamaterials

Fabian Wolfsperger*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
The influence of snow physical properties on the ski-snow friction: From real scale measurements on skis to investigations of fundamental processes on the microscale

Studentische Abschlussarbeiten (Bachelor, Master)

Mohamed Alanany
Ruhr Uni Bochum
Development of stress intensity factor solution for fatigue life assessment of cruciform joints including the weld geometry (M)

Sanket Anand
Universität Freiburg
Microkinetic modelling of rutile TiO_2 hydrogen treatment (M)

Nadien Bamberger
Hochschule Offenburg
Die Zukunft der Kopfsicherheit nach Kraniektomie: Ein Vergleich zwischen 3D-gedruckten und den konventionell hergestellten Helmen (B)

Hrushikesh Uday Bhimavarapu
Ruhr Universität Bochum
Modelling of adiabatic shear band initiation in polycrystals (M)

Sean Chapman
Universität Freiburg
A Framework for Unterstanding Mechanochemical Couplings in Fluorine-Free Proton Exchange Membraines (M)

David Christophe*
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Konzeptstudie zur Integration von Bearbeitungslasern in ein Profilbearbeitungszentrum (M)

Olga Di Nunzio*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kombinierte Oberflächenmodifizierung und -strukturierung von reinem Titan und der Titanlegierung Ti64 für tribologische Anwendungen mittels Yb-Faserlaser (M)

Jakob Faiß
Hochschule Furtwangen
Elektrotribologische Untersuchung und Charakterisierung von Schmierstoffen mit ionischen Flüssigkeiten im Bezug zu programmierbarer Reibung (M)

David Hiller
J.W. Goethe Universität Frankfurt am Main
Electronic Structure Calculations for Perovskite-type Compounds with Correlated 3d Electrons (M)

Rui Xuan Hou
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dämpfungs- und Verschleißverhalten von Polymeren unter Frettingbedingungen (B)

Moritz Kleinholz
Universität Freiburg
Entwicklung eines temporären Klebeprozesses für einen neuartigen Prozess zur Herstellung von SiC-Halbleiterwafern (B)

Jaemyeong Lee*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Investigation of the Indentation-Induced Dislocation Microstructure Evolution in a Crystal Plasticity Model (B)

Max Thomas Lorenz
Hochschule Offenburg
Entwicklung eines Prüfstandes zur Untersuchung der temperatur- und druckabhängigen Wasserstoffpermeation durch neuartige Verbundwerkstoffe (M)

Priyabrat Mishra
Universität Freiburg
Deep learning based glass fractural analysis for double ring bending test (M)

Oliver Moreno-Gehrke*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Combined Laser Surface Modification and Texturing of Austenitic Stainless Steel 304 for Tribological Applications (M)

Kamal Kishore Pandey
Bergische Universität Wuppertal
Numerical simulation of the calendering process during battery Fabrication (M)

Rupert Pretzler*
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Modellierung und Charakterisierung von additiv gefertigten Gradientenwerkstoffen mit Hilfe der FFT-Methode (M)

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

Nils Rump
Hochschule Offenburg
Ableitung von Bruchflächen-Topographien mittels künstlicher neuronaler Netze: Angewandte künstliche Intelligenz (B)

Sylvia Schlöglmann
Universität Regensburg
Prozessoptimierung einer laserbasierten Glasformgebungstechnik (M)

Gregor Taurer
Montanuniversität Leoben
Microstructural influences on bending resonance fatigue in nickel-based superalloy Rene'88DT (M)

Arbeiten, die mit einem * gekennzeichnet sind, wurden extern betreut.

Wissenschafliche Auszeichnungen und Preise

2. Platz »Heki Shibata Early Career Award«
an Johannes Rosenberger für »Deep learning based fracture surface segmentation for microstructure feature analysis in ductile cast iron«
07.03.2024 | Yokohama, Japan

Südwestmetall-Förderpreis 2024
an Dr. Ali Riza Durmaz für seine Dissertation »Experimental and Data-driven Workflows for Microstructure-based Damage Prediction«
18.04.2024 | Stuttgart

2. Platz Ideenwettbewerb des Fraunhofer-Symposiums »Netzwert« 2024
an Kuo-I Chang für seinen Pitch »TuneGlass – Steuerung der Eigenspannung in Gläsern mittels Schall- oder Ultraschallquellen«
20.05.2024 | München

2. Platz »Rolls-Royce Innovation Award« 2024
an Stefan Eckmann und Dr. Christoph Schweizer für das Paper »Ex-situ observation of the short crack initiation and propagation behaviour of nickel-base wrought ally Inconel 718 for critical rotating components under fatigue conditions at elevated temperatures«
17.09.2024

Carl-von-Bach-Medaille
Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart
an Dr. Silke Sommer für ihre wegweisenden Beiträge zur Forschung in der Werkstoffmechanik, insbesondere in den Bereichen Crashsimulation und Leichtbautechnik
08.10.2024 | Stuttgart

Galileo-Preis
Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V.
an Dr. Christoph Schweizer für seinen besonderen Beitrag auf dem Gebiet der Werkstoffprüfung
05.12.2024 | Krefeld

Publikationen in Zeitschriften und Tagungsbänden

Eine vollständige Übersicht unserer Publikationen aus dem Jahr 2024 finden Sie hier.

Vorlesungen

Wintersemester 2024/2025

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

Continuum Mechanics II
Dr. Dirk Helm

Circularity concepts in functional ceramics
Dr. Jan Manuel Hinterstein

Polymer Theory
Dr. Michael Walter

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Nanotribologie und -mechanik
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Tribologie
Prof. Dr. Martin Dienwiebel, Prof. Dr.-Ing. Matthias Scherge

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

Prozesssimulation in der Umformtechnik
Dr. Dirk Helm

Hochschule Offenburg (FH)
Konstruktionselemente
Dr. Raimund Jaeger

Sommersemester 2024

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Theory and Modeling of Materials: Physics of Hydrogen in Metals
Prof. Dr. Christian Elsässer

Continuum Mechanics I
Dr. Dirk Helm

Computational Materials Engineering
Dr. Gianpietro Moras

Computational Physics: Materials Science
Prof. Dr. Michael Moseler

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Nanotribologie und -mechanik
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Physik für Ingenieure
Prof. Dr. Martin Dienwiebel, Prof. Dr. Peter Gumbsch

Theory and Modeling of Materials: Physics of Hydrogen in Metals
Prof. Dr. Christian Elsässer

Data Science and Scientific Workflows
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Angewandte Werkstoffsimulation
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Applied Materials Simulation
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Anwendungsorientierte Materialtheorien
Prof. Dr. Michael Moseler

Universität Siegen
Composites II – Werkstoffverbunde
Dr. Jörg Hohe

Impressum

Fraunhofer-Institut
für Werkstoffmechanik IWM
Wöhlerstraße 11
79108 Freiburg
Tel.: +49 7615142-153
Fax: +49 7615142-510
info@iwm.fraunhofer.de
www.iwm.fraunhofer.de

Institutsleitung
Prof. Dr. Peter Gumbsch
Prof. Dr. Chris Eberl (stv.)
Dr. Rainer Kübler (stv.)
Elke Schubert (Verwaltungsleiterin)

Redaktion
Thomas Götz (verantw.)
Anabel Thieme

Gestaltung, Layout und Satz
Jacqueline Göppert

Druck
Fraunhofer-Druckerei

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, 2025

Bleiben Sie auf dem Laufenden
Internt: www.iwm.fraunhofer.de
LinkedIn: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM
YouTube: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Bildnachweise
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; Titel
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; Umschlag
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 2-5
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 8-9
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 16
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 20-21
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 26-41
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 45
© Fraunhofer EMI, Grafik; 48
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 51
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 53
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 55
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 63
© hs·tumbler GmbH, 3D-Bild: Trajektionsmischer; 67
© istock.com/alexay_ds; 69
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 71
© Fraunhofer IWM, Foto KI-generier; 73
© Fraunhofer IISB, Foto: Daniel Karmann; 77

Alle weiteren Abbildungen
© Fraunhofer IWM