

# TÄTIGKEITSBERICHT 2025



#### **Flowboard**

Zum Patent angemeldeter Testaufbau des Fraunhofer IWM zur Charakterisierung der Fließeigenschaften granularer Medien. Der Hindernisparcours wird je nach Anwendungsfall modifiziert. Damit kann eine Vielzahl von Modellparametern gleichzeitig kalibriert werden. Mit unserer SimPARTIX-Software können wir anschließend die Dynamik von Partikelprozessen beschreiben und simulieren und darauf aufbauend industrielle Prozesse optimieren.

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

---

## Tätigkeitsbericht 2025

# Vorwort

Sehr geehrte Geschäfts- und Forschungspartner,

selten zuvor wirkten so viele transformative Kräfte gleichzeitig auf die werkstoffintensive Industrie und deren Forschung und Entwicklung ein. Innovationsdruck, Sicherheit, Regulierung und geopolitische Herausforderungen erzeugen ein enormes Spannungsfeld.

Für Unternehmen bedeutet das: Sie müssen in hohem Tempo Innovationen schaffen, regulatorische Vorgaben erfüllen und geopolitische Risiken abfedern – oft unter widersprüchlichen Anforderungen. Wir spüren, wie sich FuE-Budgets von Performance-Optimierung zur Beschleunigung von Entwicklungsprozessen, Resilienz und Anpassungsfähigkeit hin verschieben. Unsere Herausforderung ist es, in diesem Wettbewerbsgefüge unsere Fachkompetenzen in transferfähige Lösungen zu übersetzen, die unmittelbaren Nutzen bringen. Zugleich gilt es, unsere FuE-Vorsprünge zu erhalten und weiterzuentwickeln.

Das Fraunhofer IWM positioniert sich hier als Partner und Qualifizierungsinstanz für werkstofftechnologische Transformationen in Unternehmen. Unser Ansatz verbindet drei strategische Säulen: Geschwindigkeit durch simulationsgestützte und hochdurchsatzfähige Qualifizierungsmethoden, Souveränität durch Materialdatenräume, Resilienz für Lieferketten und Bauteilsicherheit durch umfassende Bewertungskonzepte sowie die Mitgestaltung und Weiterentwicklung von Regelwerken.

## Qualifizierung für Wasserstoffinfrastrukturen

Im Bereich der Wasserstofftechnologien haben wir am Fraunhofer IWM unsere Prüfkapazitäten systematisch ausgebaut. Mit Hohlprobentechnik, Mikroautoklaven und bauteilnahen Prüfständen ermöglichen wir die Charakterisierung von Werkstoffen unter realistischen Einsatzbedingungen – bei Drücken bis 1000 bar und Temperaturen von kryogen bis

zu Hochtemperaturanwendungen. Unsere Arbeiten fließen in die Weiterentwicklung von Regelwerken ein. Die von uns konzipierte Nachweisführung für Maschinenbaukomponenten orientiert sich an den etablierten FKM-Richtlinien und macht deren Systematik für Wasserstoffanwendungen nutzbar.

## Digitalisierung als Enabler

Die Digitalisierung von Werkstoffdaten und -wissen ist für uns kein Selbstzweck, sondern Voraussetzung für beschleunigte Innovation und Produktintegrität. Unsere Datenraumkonzepte und die semantischen Technologien aus Projekten wie MaterialDigital schaffen die Infrastruktur für einen souveränen, unternehmensübergreifenden Datenaustausch. Wenn Materialdaten FAIR – also auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar – vorliegen, verkürzen sich Entwicklungszyklen erheblich. Mit dem Fraunhofer-Leitprojekt ORCHESTER, das wir koordinieren, stellen wir diese Erfolgshypothese unter Beweis: Ein digitales Ökosystem, das Werkstoffdaten, Prozessinformationen und Nachhaltigkeitskennzahlen so vernetzt, dass Unternehmen gut informiert Materialentscheidungen treffen können – selbst wenn Lieferketten unter Druck geraten oder Recyclinganteile steigen.

## Nachhaltigkeit und Substitution

Und nicht zuletzt stellt die Kreislaufwirtschaft die Werkstoffmechanik vor besondere Herausforderungen. Recyclingmaterialien bringen Eigenschaftsstreuungen mit sich, die mit klassischen Qualifizierungsansätzen kaum beherrschbar sind. Gleichzeitig fordern Regularien wie die EU-Altfahrzeugverordnung oder der europäische Grenzausgleichsmechanismus (Carbon Border Adjustment Mechanism) einen höheren Anteil an Sekundärrohstoffen oder die Substitution gewisser Materialien. Die Berechenbarkeit von Werkstoffen unbestimmter Herkunft wird damit zum kritischen Erfolgsfaktor.

Unsere Antworten darauf sind probabilistische Bewertungskonzepte, die Materialstreuungen explizit berücksichtigen oder Bewertungsketten für die Substitution kritischer Stoffe wie PFAS. So entstehen Entscheidungsgrundlagen, die technologische, ökologische und ökonomische Aspekte integrieren.

Wie wir aktuelle Herausforderungen der Industrie in Forschungsergebnisse umwandeln und letztlich in FuE-Leistungen überführen, entdecken Sie in unserem Tätigkeitsbericht. Lassen Sie sich inspirieren und konfrontieren Sie unsere Expertinnen und Experten mit den Gedanken und Fragen, die Ihnen bei der Lektüre kommen.

Das Fraunhofer IWM lebt von Verbindungen: zu unseren Auftraggebern, Forschungspartnern, Kuratorinnen und Kuratoren sowie unseren Fördermittelgebern. Dass Sie uns Ihr Vertrauen schenken, uns fördern und fordern und gemeinsam mit uns denken, das empfinden wir als Fundament unserer Arbeit. Dafür danken wir Ihnen herzlich.

Prof. Dr. Peter Gumbsch, Institutsleiter



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

# Inhalt

<b>Das Profil des Fraunhofer IWM</b> .....	6
<b>Unsere Geschäftsfelder im Profil</b>	
Bauteilsicherheit und Leichtbau .....	10
Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte .....	11
Fertigungsprozesse .....	12
Tribologie .....	13
<b>Das Fraunhofer IWM in Zahlen</b> .....	14
<b>Organisation des Fraunhofer IWM</b> .....	15
<b>Das Kuratorium des Fraunhofer IWM</b> .....	16
<b>Die Fraunhofer-Gesellschaft</b> .....	17
<b>Fachbeiträge</b>	
Der gläserne Druckgussprozess – Mit digitaler Transparenz zu Resilienz und Innovation beim Druckgießen .....	20
Mit dem digitalen Schmiedelabor zum Wunschgefüge: Ressourceneffizientes Freiformschmieden durch berechenbare Mikrostruktur ..	22
Materialwissen über Unternehmensgrenzen hinweg nutzen: Entwicklung eines digitalen Materialdatenraums .....	24
Bewertungskette für PFAS-Ersatz in reibungs- und verschleißbeanspruchten Systemen .....	26
Digitaler Zwilling für Schmierstoffe in hochbelasteten Reibkontakten .....	28
Reibung für Geräuschminderung und Leichtbau nutzen .....	30
Verschleißbeständige Lager- und Gleitkomponenten für Tiefseeanwendungen ..	31
Qualifizierung von Bauteilen in Wasserstoffanwendungen .....	32
Schneller zur Bauteilsicherheit bei Verbrennungsprozessen mit Wasserstoff ..	34
Wie wir Quantencomputing für die Materialforschung nutzbar machen .....	36
<b>Wissenschaftlicher Output</b> .....	38
<b>Impressum</b> .....	40

# Digitalisierte Material- und Bauteilforschung für nachhaltige Wertschöpfung

## Die Relevanz

Materialien sind Wissensprodukte. Mit den Funktionen und Informationen, die sie in sich tragen, sind sie als Hardware und in ihrer digitalen Repräsentation Gegenstand industrieller Wertschöpfung.

Der Umgang mit Werkstoffdaten und -informationen entscheidet über das Tempo in Entwicklungs- und Innovationsprozessen und über die Resilienz von vernetzten, werkstoffintensiven Lieferketten.

Der intelligente Einsatz von Materialien bestimmt über Materialeffizienz, Energieeinsatz und Nachhaltigkeit.

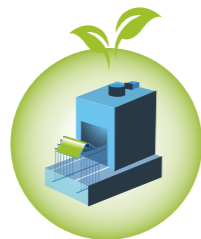
## Unser Selbstverständnis

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM forscht für die Nachhaltigkeit in der industriellen Wertschöpfung. Für Industrieunternehmen und öffentliche Auftraggeber eröffnet das Institut Wege und Innovationsräume zur Langlebigkeit und Sicherheit von Bauteilen, zur Ressourceneffizienz in Prozessketten sowie zur Energieeffizienz von Maschinen.

Dazu erzeugt das Institut digitale Abbilder von Werkstoffen in Prozessketten, Bauteilen und Maschinen und macht deren Verhalten und Eigenschaften berechenbar.

Das Institut befähigt Unternehmen für den datenbasierten Einsatz von Werkstoffen als Schlüssel für Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit.

## Unsere Forschungsmärkte



### Bauteilsicherheit und wirtschaftlicher Anlagenbetrieb

Neue Einsatzbedingungen, steigende Anforderungen an die Anlagensicherheit und das Bestreben, Leistungspotenziale voll auszuschöpfen, machen ein umfassendes Wissen über die Werkstoff- und Bauteilzustände unverzichtbar.



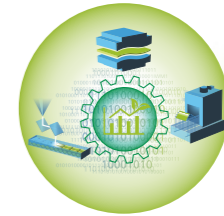
### Digitalisierung & KI – Management von Werkstoffdaten und -informationen

Die Verfügbarkeit von Werkstoff- und Prozessdaten sowie die digitale Repräsentation der Werkstoffe mit ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten in Bauteilen werden zu Erfolgsfaktoren in Entwicklungs- und Fertigungsprozessen.



### Energieeffiziente und funktionale Systeme

Die Energiewende erfordert höchste Leistungsfähigkeit bei der Erzeugung, Wandlung und Speicherung von Energie. Die in Energieanlagen und Maschinen eingesetzten Werkstoffe müssen dafür multiple Funktionen erfüllen und zuverlässig arbeiten.



### Werkstoffintensive Fertigungsprozesse

Steigende Materialkosten und Rohstoffknappheiten erfordern fertigungsgerechte Werkstoffnutzung bei minimalem Ausschuss. Die gezielte Einstellung von Werkstoffeigenschaften im Fertigungsprozess ist der Schlüssel für ressourcenschonende Produktion und die Herstellung innovativer Bauteile.



### Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit von Werkstoffen und Bauteilen

Der Einsatz von Recycling-Materialien, auch in Hochleistungssystemen, gewinnt an Bedeutung. Die Berechenbarkeit von Werkstoffen trotz fehlender Detailinformationen und ein »Design for Circularity« werden dabei unerlässlich.

## Unsere Geschäftsfelder im Profil

---

Bauteilsicherheit und Leichtbau .....	10
Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte .....	11
Fertigungsprozesse .....	12
Tribologie .....	13

# Ressourceneffizienz bei maximaler Sicherheit

## Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau

Geschäftsfeldleiterin Dr. Silke Sommer



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, datenbasierte und numerische Bauteilbewertung, um Entscheidungsgrundlagen für die Freigabe oder sicheren Einsatz, Inspektion, Wartung, Ersatz oder Weiterbetrieb zu schaffen.

# Zuverlässigkeit in Energiesystemen

## Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte

Geschäftsfeldleiter Dr. Christoph Schweizer



Für Hersteller und Betreiber thermo-mechanisch 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.

### Was uns beschäftigt

- Wie müssen Bauteile für den Einsatz unter Wasserstoff qualifiziert und ausgelegt werden?
- Wie kann Werkstoff- und Prozesswissen digital verfügbar gemacht werden?
- Wie kann ein wartungsarmer Betrieb von Anlagen gewährleistet werden?
- Wie kann die Sicherheit von Composite-Bauteilen bewertet werden?
- Wie kann die Sicherheit von Batteriesystemen bewertet werden?

### Was wir für Sie tun können

- Wir bewerten die Strukturintegrität von Bauteilen.
- Wir klären fertigungs- und einsatzbedingte Schäden an Bauteilen auf.
- Wir charakterisieren Werkstoffe und Fügeverbindungen und entwickeln dafür Modelle.
- Wir bewerten Verbundwerkstoffe und führen probabilistische Analysen durch.
- Wir bestimmen meso- und mikromechanische Eigenschaften an Bauteilen und lokalen Bauteilbereichen.

### Was uns beschäftigt

- Wie wirken sich Hochtemperatur in Verbindung mit Wasserstoff oder ein Brennstoffwechsel auf die Materialeigenschaften aus?
- Wie kann die Restlebensdauer von Komponenten, die unter Hochtemperatur eingesetzt werden, wirtschaftlich bewertet werden?
- Wie können Lebensdauerkonzepte in Online-Monitoring Systeme integriert werden?
- Wie können Werkstoffdaten aus unterschiedlichen Quellen verknüpft und KI-fähig gemacht werden?
- Wie kann die Leistungsfähigkeit von Batterien und Funktionsmaterialien gesteigert werden?

### Was wir für Sie tun können

- Wir bestimmen Werkstoffkennwerte und entwickeln Lebensdauerkonzepte, die für die Auslegung von Bauteilen (auch in Abwesenheit von Standards) erforderlich sind.
- Wir sagen die (Rest)-Lebensdauer von Bauteilen und Systemen auf der Basis von Betriebsdaten vorher.
- Wir klären Schädigungs- und Degradationsmechanismen unter Hochtemperatur, Wasserstoffkontakt und in Funktionsmaterialien auf.
- Wir analysieren und bewerten Schadensfälle.

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

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

# Prozessinnovationen durch vernetzte Materialdaten

## Geschäftsfeld Fertigungsprozesse

Geschäftsfeldleiter Dr. Dirk Helm



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.

### Was uns beschäftigt

- Wie verändern sich Werkstoffeigenschaften in Fertigungsprozessen?
- Wie kann die Bauteilqualität in der additiven Fertigung systematisch verbessert werden?
- Wie können Umformprozesse für spezifische Bauteileigenschaften ausgelegt werden?
- Was sind die Ursachen von Schäden an Glasbauteilen?
- Wie können wir Glas kreativ verformen?

### Was wir für Sie tun können

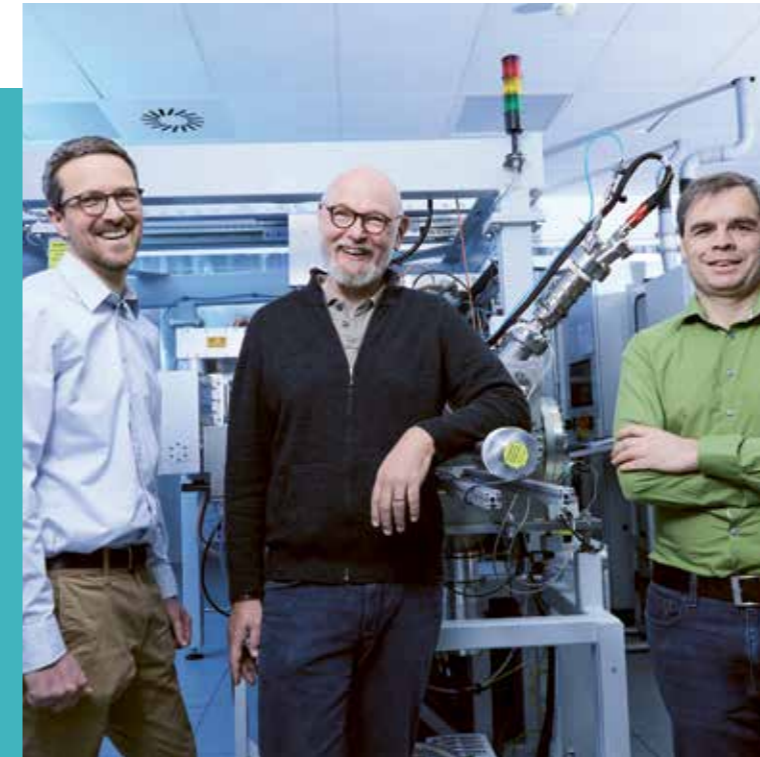
- Wir simulieren Prozessketten zur Pulvertechnologie, zur Partikelverarbeitung, zur additiven Fertigung und zur Umformtechnologie.
- Wir entwickeln Fertigungsprozesse für die Glasverarbeitung.
- Wir klären die Ursachen von Schäden an Glasbauteilen auf.
- Wir bestimmen experimentell und virtuell Werkstoffkennwerte für leistungsfähige Umformsimulationen.
- Wir entwickeln digitale Technologien für den effizienten Umgang mit Werkstoffdaten.

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

# Reibung und Verschleiß berechenbar machen

## Geschäftsfeld Tribologie

Geschäftsfeldleiter Prof. Dr. Michael Moseler | Geschäftsfeldleiter Prof. Dr. Matthias Scherge



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 einem kombinierten multiskaligen Ansatz aus Experiment, Analytik und Simulation sowie der Entwicklung passender Werkstofflösungen machen wir Reibung und Verschleiß berechenbar – für mehr Leistungsfähigkeit und Effizienz.

### Was uns beschäftigt

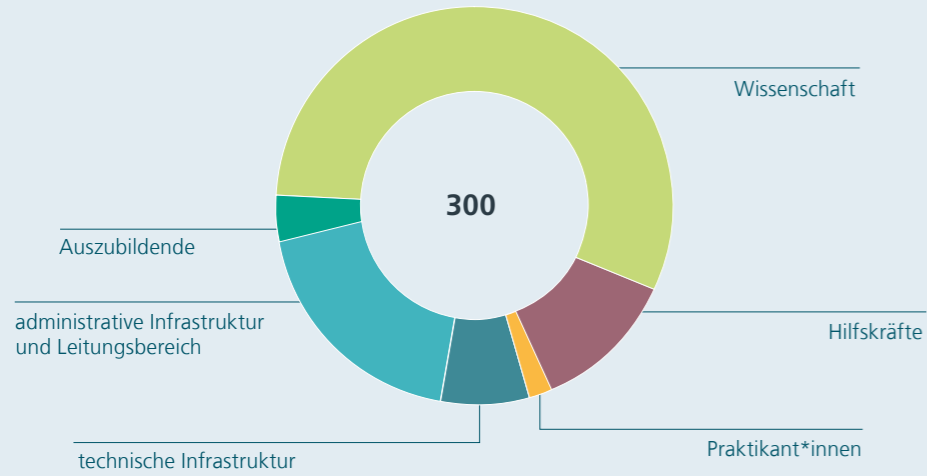
- Wie können Reibung und Verschleiß oder Korrosion und Oxidation reduziert werden?
- Wie können kritische Rohstoffe oder Bestandteile in Schmierstoffen und Tribowerkstoffen substituiert werden?
- Wie können Maschinen auf den Betrieb mit alternativen Energieträgern umgestellt werden?
- Wie reagieren Bauteiloberflächen auf den Kontakt mit Wasserstoff?
- Wie müssen Tribosysteme für die Anforderungen aus immer komplexeren Beanspruchungskollektiven angepasst und ausgelegt werden?

### Was wir für Sie tun können

- Wir klären Reibungs- und Verschleißmechanismen auf der Mikro- und Nanoskala von Werkstoffen und Schmierstoffen experimentell, analytisch und numerisch auf und machen diese beschreibbar.
- Wir entwickeln Lösungen zur Reibungsminderung und zum Verschleißschutz für Lager, Dichtungen und Antriebssysteme.
- Wir entwickeln multifunktionale Tribowerkstoffe.
- Wir identifizieren schädliche chemische Reaktionen in Tribosystemen und sagen Bauteilschäden vorher.

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

# Das Fraunhofer IWM in Zahlen



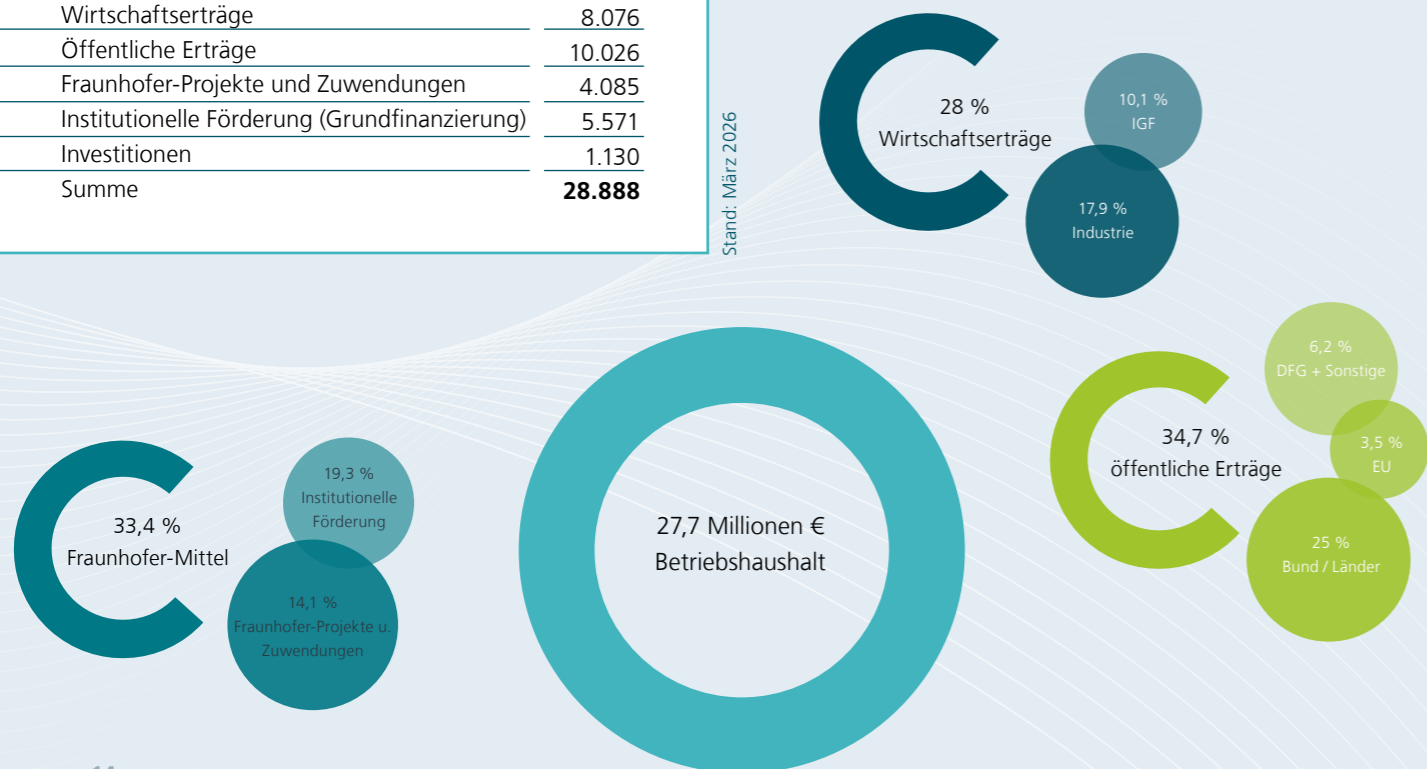
## Personal

Ende 2025 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 300 Personen beschäftigt. Davon sind 247 Mitarbeitende als Stammpersonal und 53 Mitarbeitende als Hilfspersonal angestellt. Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus 158 wissenschaftlichen Mitarbeitenden, 31 Beschäftigten in der technischen Infrastruktur sowie 58 Beschäftigten in der administrativen Infrastruktur sowie dem Leitungsbereich. Zum Hilfspersonal zählen Hilfskräfte, Praktikant\*innen, Auszubildende und Studierende, die Abschlussarbeiten erstellen. 9 Auszubildende werden in vier Berufsbildern ausgebildet.

## Gesamthaushalt 2025 [T €]

Wirtschaftserträge	8.076
Öffentliche Erträge	10.026
Fraunhofer-Projekte und Zuwendungen	4.085
Institutionelle Förderung (Grundfinanzierung)	5.571
Investitionen	1.130
<b>Summe</b>	<b>28.888</b>

Stand: März 2026



# Organisation des Fraunhofer IWM

Sie erreichen uns per E-Mail unter [Vorname.Nachname@iwm.fraunhofer.de](mailto:Vorname.Nachname@iwm.fraunhofer.de)

Besuchen Sie uns online!



## Institutsleitung

Prof. Dr. Peter Gumbach	Prof. Dr. Chris Eberl	Dr. Rainer Kübler	Elke Schubert
Institutsleiter	stellv. Institutsleiter	stellv. Institutsleiter	Verwaltungsleiterin

Unternehmenskommunikation und Institutsstrategie

## Geschäftsfelder

Bauteilsicherheit und Leichtbau	Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte	Fertigungsprozesse	Tribologie
Dr. Silke Sommer	Dr. Christoph Schweizer	Dr. Dirk Helm	Prof. Dr. Matthias Scherge Prof. Dr. Michael Moseler
Ermüdungsverhalten und Bruchmechanik	Mikrostruktur und Eigenspannungen	Pulvertechnologie und Partikelsimulation	Tribologische Bauteilprüfung und Systemanalyse
Crashsicherheit und Schädigungsmechanik	Lebensdauerkonzepte und Thermomechanik	Umformprozesse	Multiskalenmodellierung und Tribosimulation
Verbundwerkstoffe	Materialmodellierung	Glasformgebung und -bearbeitung	Tribologische und funktionale Schichtsysteme
Meso- und Mikromechanik	Lebensdauerkonzepte für Wasserstoffanwendungen		Tribokonditionierung und -analytik (Standort Karlsruhe)

Administrative Infrastruktur	Technische Infrastruktur
Elke Schubert	Dr. Rainer Kübler
Finanzen und Verträge	Werkstatt, Technik, Logistik
Personalmanagement	IT Services
Veranstaltungs- und Besuchsmanagement	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 EBlinger**  
MTU Aero Engines AG, München

**Dr. Christina Hack**  
Brose Fahrzeugteile SE & Co, Bamberg

**Prof. Dr. André Haufe**  
DYNAmore GmbH, Stuttgart

**Dr. Roland Herzog**  
Everllence 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

**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**  
Nationaler Wasserstoffrat, ThinkTank-H2

# 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 mehr als 30 000 Mitarbeitenden betreibt Fraunhofer 74 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, Künstliche Intelligenz 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 3,2 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung. Dabei bildet die institutionelle Förderung durch Bund und Länder mit maximal einem Drittel im Vergleich zu anderen öffentlichen Forschungseinrichtungen lediglich das Fundament. Mindestens zwei Drittel der Vertragsforschung wirbt Fraunhofer im Wettbewerb ein, aus Aufträgen der freien Wirtschaft sowie bei öffentlichen Auftraggebern. Der daraus resultierende hohe Akquise-Anreiz, verglichen mit weitestgehend institutionell geförderten Organisationen, fördert unternehmerisches Denken und Handeln. So stellt die Fraunhofer-Gesellschaft sicher, dass sie kontinuierlich Lösungen für aktuelle und künftige wirtschaftliche und gesellschaftliche Bedarfe entwickelt. Im Jahr 2025 beliefen sich die Wirtschaftserträge auf 966 Mio. €.

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). Durch seinen Forscherdrang und sein unternehmerisches Denken entwickelte sich Joseph von Fraunhofer vom Glasschleifer zum wissenschaftlichen Pionier, der als Erfinder und Unternehmer Ideen in verkaufsfertige Produkte umsetzte und vermarktete. Sein Innovationsgeist und seine Marktorientierung, die Haltung, dass Forschung und praktische Anwendung zusammengehören, prägen die Arbeit der Fraunhofer-Gesellschaft, die seiner Tradition verpflichtet ist.

Stand: April 2026

## Fachbeiträge

---

Der gläserne Druckgussprozess – Mit digitaler Transparenz zu Resilienz und Innovation beim Druckgießen .....	20
Mit dem digitalen Schmiedelabor zum Wunschgefüge: Ressourceneffizientes Freiformschmieden durch berechenbare Mikrostruktur .....	22
Materialwissen über Unternehmensgrenzen hinweg nutzen: Entwicklung eines digitalen Materialdatenraums .....	24
Bewertungskette für PFAS-Ersatz in reibungs- und verschleißbeanspruchten Systemen .....	26
Digitaler Zwilling für Schmierstoffe in hochbelasteten Reibkontakten .....	28
Reibung für Geräuschminderung und Leichtbau nutzen .....	30
Verschleißbeständige Lager- und Gleitkomponenten für Tiefseeanwendungen .....	31
Qualifizierung von Bauteilen in Wasserstoffanwendungen .....	32
Schneller zur Bauteilsicherheit bei Verbrennungsprozessen mit Wasserstoff .....	34
Wie wir Quantencomputing für die Materialforschung nutzbar machen .....	36

# Der gläserne Druckgussprozess – Mit digitaler Transparenz zu Resilienz und Innovation beim Druckgießen

Dr. Johannes Tlatlik | johannes.tlatlik@iwm.fraunhofer.de  
 Dr. Elena García Trelles | elena.garcia.trelles@iwm.fraunhofer.de

Getrieben durch disruptive Technologien im Fahrzeugbau, verschärfte Nachhaltigkeitsanforderungen und fragile Lieferketten müssen viele Unternehmen Prozesse, Materialien und Methoden grundlegend überdenken. Die Gießerei-Industrie im Mobilitätssektor steht vor der Aufgabe, gleichzeitig Kosten zu senken, höchste Qualität zu erreichen und Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Der gläserne Druckgussprozess bietet einen vielversprechenden Ansatz, diese scheinbar widersprüchlichen Ziele zu vereinen. Mit der durchgängigen Wissensrepräsentation, mit datengetriebenen Erkenntnissen und systematischer Rückverfolgbarkeit transformiert er die Gießerei von einer erfahrungsbasierten zu einer wissensbasierten Fertigung.

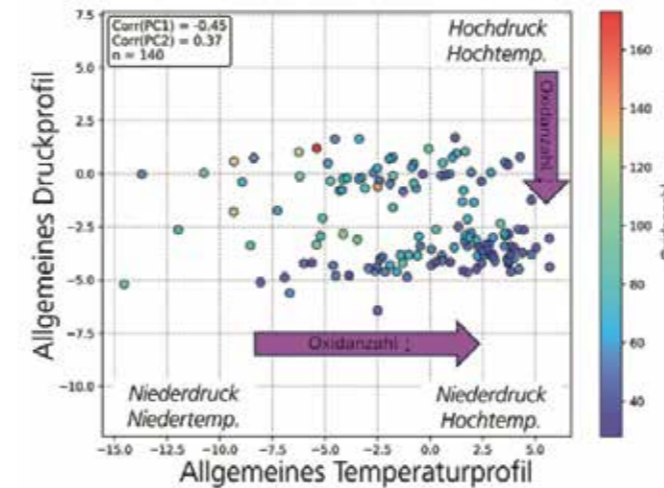
Die 2020 von Tesla eingeführte Giga-Casting-Technologie hat Design- und Produktionsweisen im Karosseriebau weltweit infrage gestellt. Die Fertigung großer Karosserie-segmente in einem Stück aus Aluminium-Druckguss ermöglicht eine dramatische Reduktion der Teilezahl sowie Kostensenkungen von 20 bis 40 Prozent. Mittlerweile setzen etliche OEMs auf diese Bauweise und schaffen damit erheblichen Wettbewerbsdruck in der Gießerei-Industrie.

Parallel dazu verschieben sich durch die Transformation zur Elektromobilität die CO<sub>2</sub>-Hotspots von der Nutzungsphase in die Fahrzeugproduktion. Die Klimaziele 2030 und die angestrebte CO<sub>2</sub>-Neutralität bis 2050 sind gesetzlich fixiert, und die EU-Verordnung zum digitalen Produktpass (DPP) fordert künftig eine lückenlose Dokumentation von Nachhaltigkeits- und Kreislaufwirtschaftsinformationen.

## Werkstofftechnologische Herausforderungen

Großgussteile stellen die Branche vor neue technische Herausforderungen. Die Komplexität der Bauteile sorgt für enge Prozessfenster, deren Verfehlung Gussfehler wie Porosität, Lunker oder Oxidverunreinigungen nach sich zieht, die aber je nach Position und Bauteilbeanspruchung nicht zwangsläufig zum Ausschuss führen. Großflächige Strukturbauteile neigen infolge inhomogener Abkühlung zu Verzug, der durch aufwendige Nachbearbeitung oder präzise gesteuerte Temperaturführung kompensiert werden muss.

Der Einsatz von Sekundäraluminium bietet enormes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial – das CO<sub>2</sub>-Äquivalent sinkt von etwa 9,8 kg pro Kilogramm Primäraluminium auf rund 2 kg für Sekundärmaterial. Allerdings enthält Aluminiumschrott Verunreinigungen, die für Karosserie-Struktur-guss möglicherweise ungeeignet sind.



Analysebeispiel aus dem Wissensgraphen des gläsernen Druckgussprozesses: Untersucht wurde der Zusammenhang zwischen den Prozessparametern und dem Oxidanteil abgessener Gussproben. Man erkennt, dass Proben im Niederdruck- und Hochtemperaturbereich (rechts unten) tendenziell weniger Oxide aufweisen. Dies liefert Ansatzpunkte für die Prozessoptimierung und Vorhersage von Gussqualität. Jeder Messpunkt repräsentiert eine abgessene Probe.

## Der gläserne Druckgussprozess als Lösungsansatz

Das am Fraunhofer IWM entwickelte Konzept des gläsernen Druckgussprozesses adressiert diese FuE-Bedarfe durch einen integrierten, ontologiebasierten Ansatz. Kernelement ist ein Wissensgraph, der alle relevanten Schritte der Prozesskette, von der Schmelzeherstellung über den Gießprozess und die Wärmebehandlung bis zur Prüfung und zum Bauteileinsatz, in standardisierter Form abbildet. Er ist maschinenlesbar, erweiterbar und so strukturiert, dass er sowohl klassische Auswertungen als auch KI-Methoden unterstützt. Damit wird der Wissensgraph zur zentralen, semantischen Datendrehscheibe für den digitalen Zwilling.

Der digitale Zwilling wird mit Daten aus Maschinensteuerung, Prozesssensoren, Werkstoffeigenschaften und Mikrostrukturanalysen gefüllt. Dies ermöglicht Abfragen zur druckgusstechnischen Historie spezifischer Bauteile, zu Prozessfenstern mit erhöhtem Fehlerisiko oder zu den Chargen und Parametern beanstandeter Produkte. Die systematische Rückverfolgbarkeit ersetzt aufwendige Versuch-Irrtum-Schleifen durch datenbasierte Entscheidungen.

Durch maschinelles Lernen werden aus den Prozessdaten quantitative Korrelationen abgeleitet – etwa zwischen zeitlich und örtlich aufgelösten Gießtemperatur und -druckverteilung zu Porosität oder zwischen Umgebungsbedingungen und Prozessparametern. Das System liefert eine präzise Wahrscheinlichkeitsprognose zur Gussqualität und zu mechanischen Materialeigenschaften für jeden Abguss und ermöglicht so eine risikobasierte Prüfung statt starrer Vollprüfung. Dies spart Ressourcen in der Qualitätskontrolle und erlaubt den Fachkräften, sich auf kritische Bauteile zu konzentrieren.

Der Wissensgraph integriert zudem wirtschaftliche und ökologische Kennzahlen wie Ausschussraten, Energieeinsatz und perspektivisch CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, sodass unterschiedliche Prozessvarianten multikriteriell verglichen werden können.

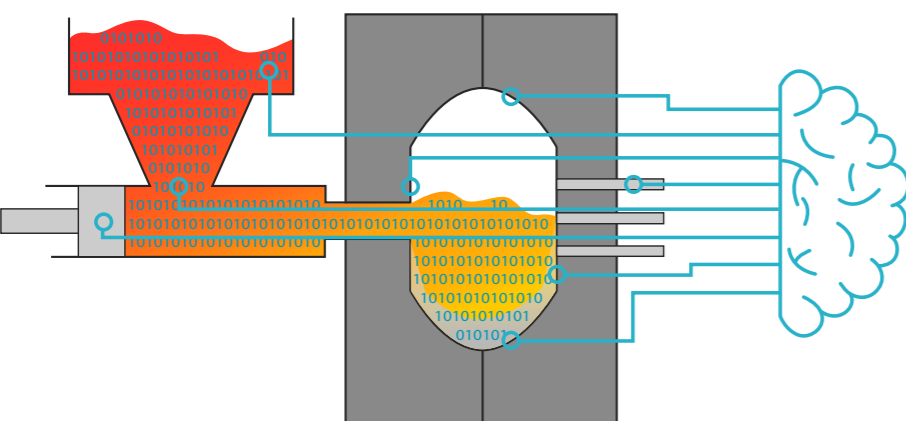
Als ideale Ausgangsbasis für den digitalen Produktpass erfüllt er künftige regulatorische Anforderungen an die Dokumentation von Nachhaltigkeitsinformationen.

Neben Abfragen zu spezifischen Informationen können mit digitalen Druckgusszwillingen Korrelationen mathematisch beschrieben werden. So wurden im Forschungsprojekt die Auswirkung von Prozessparametern wie Gießtemperatur und -druck auf Oxidverunreinigungen und Porosität und der Zusammenhang zwischen Außentemperatur bzw. Feuchtigkeit und dem Gießdruck beschrieben. Ziel ist letztlich, Vorhersagen machen zu können, die aufwendige Analyseschritte in der Qualitätssicherung einsparen und Versuch-Irrtum-Schleifen in Entwicklung und Fertigung durch systematische Prozessparameterstudien ersetzen.

Jeder Druckgussprozess ist einzigartig und erst recht die spezifischen Informationsbedarfe der Gießereien und der Anwender der Gussbauteile. Die Konfiguration des digitalen Zwillings beginnt daher mit einer umfassenden Bestandsaufnahme zu den Prozessschritten und zu den notwendigen und verfügbaren Daten. Für die Prozessbeschreibung werden die bestehenden Wissensgraphmodule angepasst bzw. erweitert. Ist die Datenstruktur erstellt, werden die Abfragen programmiert, sodass die digitale Wissensbasis zu mehr Wertschöpfung und Qualität führen kann.

Der »gläserne Druckgussprozess« wurde im Fraunhofer-Leitprojekt Future Car Production entwickelt. Dabei wurden Prozessdaten vom Fraunhofer IFAM und CT-Scandaten vom Fraunhofer IIS verwendet.

Das Projekt wird von der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.



Der gläserne Druckgussprozess – mit einer integrierten Wissensbasis zu Material- und Prozessdaten den wirtschaftlichen, technologischen und ökologischen Anforderungen an Gussbauteile gerecht werden.

# Mit dem digitalen Schmiedelabor zum Wunschgefüge: Ressourceneffizientes Freiformschmieden durch berechenbare Mikrostruktur

Dr. Maxim Zapara | maxim.zapara@iwm.fraunhofer.de  
Dr. Alexander Butz | alexander.butz@iwm.fraunhofer.de

Ein neues Simulationsmodell des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg sagt Schwachstellen in Schmiedebauteilen voraus, die durch unvollständige Kornneubildung (Rekristallisation) entstehen. Eingebettet in einen effizienten digitalen Ablauf entsteht so ein virtuelles Schmiedelabor, das Material- und Energieeinsparungen bei Schmiedeprozessen ermöglicht.

Steigende Energiekosten und strengere gesetzliche Vorgaben zum Klimaschutz setzen der Schmiedebbranche zu. Gleichzeitig erfordert der Wandel hin zu nachhaltig produziertem »grünem« Stahl (»Green Steel«) ein Umdenken in der Fertigung. Denn neue Herstellungsverfahren bringen schwankende chemische Zusammensetzungen und veränderte Materialeigenschaften mit sich, was das Verhalten beim Schmieden schwerer vorhersagbar macht. Hinzu kommt, dass eine fehlerhafte Mikrostruktur in sicherheitskritischen Bauteilen nicht nur ein Qualitätsproblem darstellt, sondern zu katastrophalem Versagen führen kann. Dieser Konflikt zwischen mehr Nachhaltigkeit und höchsten Qualitätsanforderungen setzt die Schmiedebbranche unter Druck.

## Unausgeschöpfte Optimierungspotenziale

Auf dem Weg vom Rohling zum Bauteil durchläuft das Metall zahlreiche energieintensive Schritte: Erwärmen, Umformen, Zwischenglühen und erneutes Umformen. Jeder Schritt hängt von zahlreichen Parametern ab, wie Temperaturen, Umformgraden, Haltezeiten und Pressenkräften, die präzise aufeinander abgestimmt sein müssen. Der Status quo in vielen Schmiedebetrieben basiert auf jahrzehntelanger Erfahrung und teuren Versuch-Irrtum-Schleifen. Doch dieses Konzept stößt an seine Grenzen, wenn es darum geht, Unsicherheiten durch schwankende Materialqualitäten zu beherrschen. Der Versuch, reale Tests durch Computersimulationen zu ersetzen, scheitert oft an fehlenden, exakt auf den Werkstoff zugeschnittenen Modellen, an unzureichenden Daten und an der Schwierigkeit, Simulationsergebnisse zuverlässig in Handlungsempfehlungen zu übersetzen.

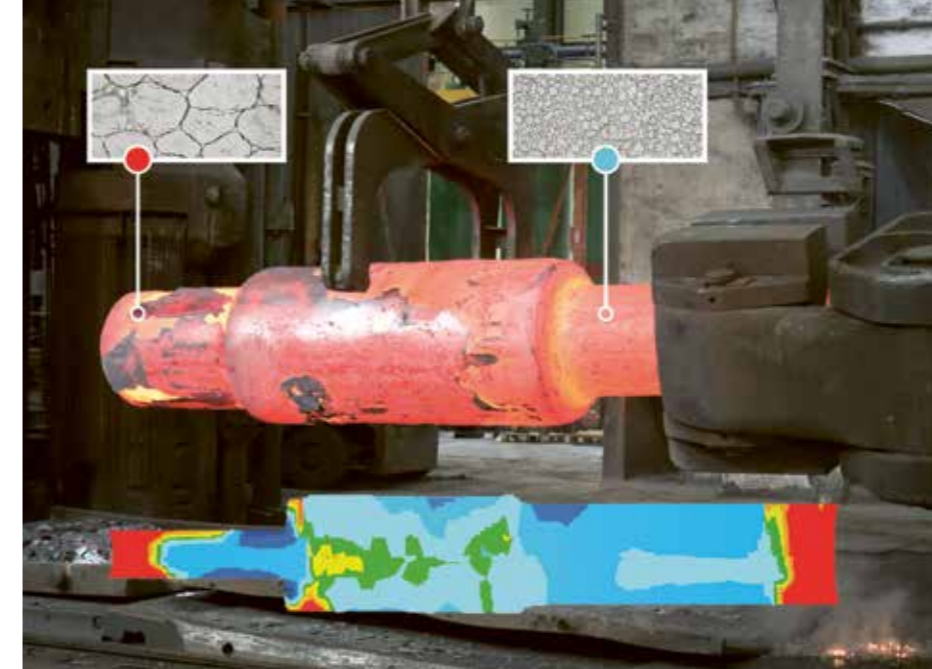
## Die werkstofftechnologische Herausforderung

Die eigentliche Herausforderung liegt im Material selbst: Während der Warmumformung ist das innere Gefüge des Stahls kein starres Gebilde, sondern ein dynamisches System, das sich ständig verändert. Einerseits verfestigt sich das Material durch die Verformung, andererseits bilden sich durch die sogenannte Rekristallisation beständig neue, spannungsfreie Körner im Gefüge. Ein anschließendes Kornwachstum kann das Gefüge wieder vergrößern, während winzige Partikel (Ausscheidungen) diese Bewegung im Material bremsen können. All diese Mechanismen werden maßgeblich durch die Temperatur, den Umformgrad und die chemische Zusammensetzung des Stahls beeinflusst.

## Digitales Schmiedelabor in einem traditionell geprägten Umfeld

Genau hier setzt das Fraunhofer IWM mit einem praxisnahen digitalen Ablauf an, der diese komplexen Vorgänge im Werkstoff berechenbar macht. Im Zentrum steht ein physikalisches Werkstoffmodell, das sich besonders auf die Kornneubildung (Rekristallisation) konzentriert. Das dafür entwickelte sogenannte Mean-Field-Modell vereint die Vorteile zweier Welten: Es basiert auf thermodynamischen Prinzipien und ist dadurch sehr zuverlässig – selbst bei den komplexen, wechselhaften Bedingungen industrieller Schmiedevorgänge. Gleichzeitig arbeitet es so recheneffizient, dass sich selbst tonnenschwere Bauteile in einer akzeptablen Zeit am Computer simulieren lassen. Da das Modell auf realen physikalischen Größen beruht, liefert es belastbare Vorhersagen, auch wenn neue Legierungen oder veränderte Prozessbedingungen ins Spiel kommen.

Der Ablauf beginnt mit einer sogenannten Materialkarte: In Laborversuchen werden zunächst die wichtigsten Werkstoffdaten ermittelt, wie etwa das Fließverhalten und die Entwicklung der Korngröße unter bestimmten Bedingungen. Auf dieser Basis folgt eine Finite-Elemente-Simulation, die für jeden Punkt



Die geschmiedete (rot-glühende) Turbinenwelle, zeigt an den beiden Enden ein grobkörniges Gefüge, im mittleren Bereich ein feinkörniges Gefüge. Dieses wurde nach dem Schmieden analysiert. Das grobkörnige Gefüge hat eine geringere Festigkeit und Zähigkeit. Mit dem Simulationsmodell wird die gemessene Gefügeverteilung richtig vorhergesagt (unten). In den roten Bereichen ist das Gefüge grobkörnig, in den blauen/grünen Bereichen ist das Gefüge feinkörnig.

im Bauteil berechnet, welchen Temperaturen und Kräften das Material im Zeitverlauf ausgesetzt war. Diese umfangreichen Daten fließen anschließend in das Mean-Field-Modell ein, welches daraus die Entwicklung des Materialgefüges vorhersagt. Das Ergebnis ist eine dreidimensionale Landkarte des Bauteils, die genau zeigt, wo sich welche Korngrößen im Inneren bilden werden. So lassen sich verschiedene Fertigungsverfahren virtuell vergleichen und bewerten und Empfehlungen zur Fehlervermeidung ableiten.

## Nachweis der Leistungsfähigkeit des digitalen Schmiedelabors

Wie gut dieses Modell in der Praxis funktioniert, wurde im EU-Projekt »AID4GREENEST« unter Beweis gestellt. Das Ziel dieses Projekts ist es, die Verarbeitung von nachhaltig produziertem Stahl zu erleichtern, dessen chemische Zusammensetzung materialbedingt stärker schwanken kann. Dafür wurde der komplette Schmiedeprozess einer 22 Tonnen schweren Turbinenwelle aus einem hochfesten Stahl am Computer nachgestellt – ein mehrstündiger, mehrstufiger Prozess mit mehrfachem Umformen und Wiedererwärmen.

Die Simulation hat kritische Zonen im Vorfeld richtig erkannt, für die Enden der Welle wurde ein unerwünscht grobkörniges Gefüge prognostiziert, da das Material in diesen Bereichen beim letzten, entscheidenden Schmiedeschritt nicht ausreichend durchgeknetet wurde.

Das Modell sagte dabei nicht nur die Schwachstellen voraus, sondern lieferte auch direkt die Ursache: Während der Kern der Welle beim finalen Schmiedeschritt ausreichend verformt wurde und sich das Gefüge dort komplett neu und fein bildete, blieb dieser wichtige »Reset« an den Enden aus. Diese virtuelle Vorhersage wurde später durch Materialuntersuchungen am real geschmiedeten Bauteil bestätigt.

Das digitale Schmiedelabor eröffnet neue Spielräume für Innovationen: Der Fokus verlagert sich von der nachträglichen Qualitätskontrolle hin zur vorausschauenden Prozessplanung. Statt Fehler erst am fertigen Bauteil zu bemerken, können sie im Rechner vorhergesagt und vermieden werden. Statt monatelanger Versuchsreihen für neue Werkstoffe lassen sich nun hunderte Szenarien innerhalb weniger Stunden virtuell durchspielen. Das Wissen um die Zusammenhänge zwischen den Maschineneinstellungen und den Materialeigenschaften ermöglicht optimierte Abläufe. So lassen sich beispielsweise Erwärmungszyklen verkürzen und Presskräfte reduzieren. Eine präzisere, endkonturnahe Fertigung senkt zudem den Energieverbrauch, die Maschinenbelegung und den Aufwand für die spätere Nachbearbeitung.

In Zukunft könnte jedes Schmiedebauteil sogar einen »digitalen Pass« erhalten – eine vollständige Dokumentation seiner inneren Struktur, die dessen Qualität und Sicherheit von der Herstellung bis zum fertigen Einsatz nachweist.

Die Forschungsergebnisse entstanden im EU Horizon Europe Projekt AID4GREENEST (Grant Agreement Nr.101091912)



# Materialwissen über Unternehmensgrenzen hinweg nutzen: Entwicklung eines digitalen Materialdatenraums

Yoav Nahshon | yoav.nahshon@iwm.fraunhofer.de

Im Forschungsprojekt **Unternehmensübergreifende Materialdaten und Materialsimulation in der Produktion, PMD-X-MAPRO**, das vom Bundesforschungsministerium BMFTR gefördert wird, entwickeln Fraunhofer IESE und Fraunhofer IWM gemeinsam mit Unternehmen einen digitalen Materialdatenraum. Ziel ist, Materialdaten digital und maschinenlesbar verfügbar zu machen und Informationen über Werkstoffeigenschaften und Fertigungsdaten so aufzubereiten, dass sie entlang der gesamten Lieferkette automatisch genutzt und ausgetauscht werden können.

## Warum Materialdaten digital wichtig sind

Materialdaten sind zentrale Informationen, die in vielen Bereichen der Produktion gebraucht werden, etwa für Simulationen, zur Festlegung von Fertigungsparametern, zur Reduktion von Ausschuss oder zur Optimierung von Produktionszeiten. Bislang werden viele dieser Daten in nicht-maschinenlesbaren Formaten wie PDFs oder gedruckten Tabellen weitergegeben. Das bedeutet viel manuelle Arbeit, Verzögerungen und Risiken durch Übertragungsfehler und Informationsverluste. Die Partner entwickeln im Projekt PMD-X-MAPRO digitale Lösungen, mit denen Materialdaten schon vor der physischen Anlieferung bereitstehen und bidirektional (also in beide Richtungen) entlang der Lieferkette ausgetauscht werden können. Dadurch sollen Produktionsprozesse effizienter und zuverlässiger werden. Zudem können durch die Verfügbarkeit vertrauenswürdiger und maschineninterpretierbarer Daten gesetzliche Informations- und Nachweispflichten, wie digitaler Produktpass oder CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, einfacher erfüllt werden. Demonstriert wird die Machbarkeit an mehrstufig gefertigten Stahlbauteilen.

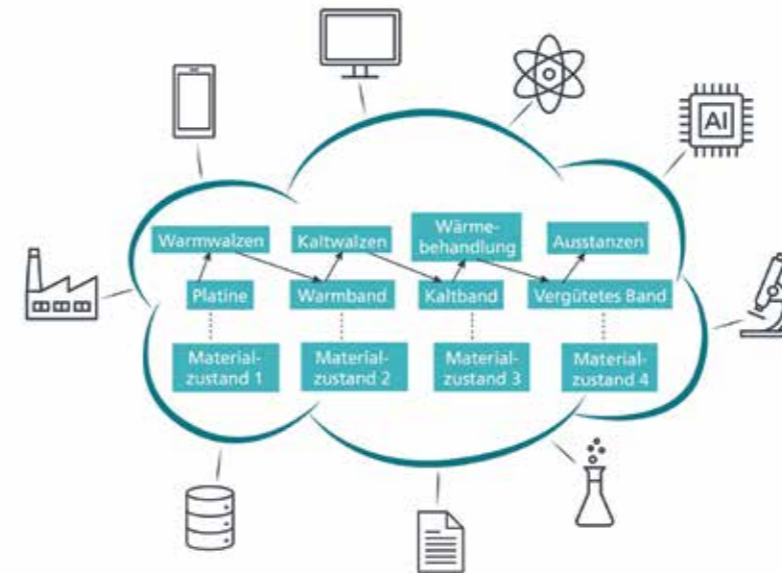
## Kontext als Erfolgsfaktor

Materialdaten an industrielle Datenräume anschlussfähig zu machen, ist deutlich komplexer als die reine Konvertierung von Dateiformaten. Materialwissen muss so modelliert werden, dass Computer die Daten nicht nur lesen, sondern auch deren Bedeutung verstehen können: Um welche Werkstoffe handelt es sich? Welche Eigenschaften haben sie? Wie wurden sie hergestellt und wie geprüft? Um all diese Informationen zusammenhängend und strukturiert darzustellen, kommen im Projekt MAPRO Ontologien zum Einsatz. Damit lassen sich Daten aus unterschiedlichen Quellen, etwa aus ERP-Systemen, Laborprüfungen oder Simulationen, zu einem digitalen Gesamtbild zusammenführen. Solche semantischen Modelle ermöglichen es auch KI-Systemen, Daten mit ihrem Kontext zu interpretieren und in Entscheidungsprozesse einzubeziehen. In modernen Datenplattformen bilden Ontologien das strukturelle Rückgrat: Sie verbinden Daten, Prozesse und Anwendungen mit ihren realen Gegenständen.

## Digitale Zwillinge und Datenräume – so funktioniert der Austausch

Im Kern des Projekts steht der Aufbau digitaler Materialzwillinge. Dabei handelt es sich um digitale Abbildungen realer Materialien, die alle wichtigen Eigenschaften und Kontextinformationen enthalten. Diese Zwillinge werden in datenraumfähige Strukturen eingebettet, damit sie zwischen Partnern ausgetauscht werden können.

Ein zentraler Punkt dabei ist die bidirektionale Kommunikation: Partner können Daten nicht nur erhalten, sondern auch zurückspielen und so gemeinsam an der Datenbasis arbeiten. Beispielsweise können Messdaten aus der Produktion direkt in den Digitalen Zwilling einfließen und ihn verbessern. Ziel ist ein Materialdatenraum, in dem Daten sicher geteilt werden können, ohne dass Unternehmen ihre Kontrolle über sensible Informationen verlieren. Am Beispiel einer Nockenwelle werden Prüfdaten,



*Schematischer Aufbau eines semantischen Datenraums*  
In einem semantischen Datenraum werden Daten aus unterschiedlichsten Quellen (z.B. Rohstoff, Fertigung, Labor, Betrieb, etc.) und in unterschiedlichen Formaten (Datenblatt, Prüfbericht, KI-Analyse, Simulation, etc.) mithilfe eines Wissensgraphen zusammengeführt und strukturiert, um eine einheitliche Sprache zu schaffen. Damit werden alle Informationen zu einem Bauteil maschinenlesbar. Die ist die Grundlage für Rückverfolgbarkeit, Prognosen, Optimierungen oder bauteilbegleitende Datenprodukte.

Simulationsergebnisse und Lieferanteninformationen für drei verschiedene Anforderungen in einem semantischen Rahmen zusammengeführt: der unternehmensübergreifenden Verifikation von Materialeigenschaften, der automatisierten Datenbereitstellung für digitale Produktpässe sowie der Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Produkten. Für Industrieunternehmen reduziert sich dadurch der manuelle Aufwand für die Datenübertragung und -validierung. Gleichzeitig entsteht eine konsistente Datenbasis, auf der Entwicklungs- und Entscheidungsprozesse KI-gestützt ablaufen können.

## Kompetenzen für digitale Materialdatenräume

Das Fraunhofer IWM entwickelt im Projekt die semantische Grundlage für den Materialdatenraum und kodiert das Domänenwissen der Materialwissenschaft in formalen Ontologien. Diese Ontologien beschreiben die Beziehungen zwischen Werkstoffen, Herstellungsprozessen, Prüfverfahren und resultierenden Eigenschaften.

Als Konsortialführer schafft das Fraunhofer IESE mit der Eclipse BaSyx Industrie-4.0-Middleware und dem AAS Dataspace for Everybody für föderierte Datenräume die Anschlussfähigkeit an Catena-X und weitere Manufacturing-X-Umsetzungen.

Beteiligt sind neben dem Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE und dem Fraunhofer-Institut für

Werkstoffmechanik IWM weitere Wirtschaftspartner: Siemens AG, SHS – Stahl-Holding Saar GmbH & Co. KGaA, tec4U-Solutions GmbH, credativ GmbH, Deutz AG. Die Partner erstellen Schnittstellen zu Unternehmens-IT (z. B. PLM/ERP-Systeme) und integrieren Aspekte zur Nachhaltigkeit und zu Recyclingdaten direkt in die Materialzwillinge.

Das Projekt PMD-X-MAPRO Unternehmensübergreifende Materialdaten und Materialsimulation in der Produktion wird über eine Laufzeit von einem Jahr vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen der Plattform MaterialDigital des BMFTR bis Ende Juni 2026 gefördert. Förderkennzeichen 13XPM506B).

Gefördert durch:



# Bewertungskette für PFAS-Ersatz in reibungs- und verschleißbeanspruchten Systemen

Dr. Andreas Kailer | andreas.kailer@iwm.fraunhofer.de

**Für PFAS-haltige Schmierstoffe und Dichtungen haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Fraunhofer IWM in einem vom Land Baden-Württemberg geförderten Projekt und einem Fraunhofer-Projekt eine Substitutionskette entwickelt und erprobt. Damit können geeignete PFAS-freie Materiallösungen effizient identifiziert und bewertet werden.**

»Die ich rief, die Geister, werd ich nun nicht los«, ruft der Zauberlehrling im gleichnamigen Gedicht von Johann Wolfgang von Goethe, aus dem Jahr 1797. In einem der großen technologisch-wissenschaftlichen Dilemmas unserer Zeit sind PFAS die Geister. Sie sind extrem temperaturstabil und chemisch beständig, und wir genießen ihre Vorzüge wie Haltbarkeit, Wasser-, Fett- und Schmutzabweisung in vielen Alltagsprodukten und insbesondere in hochbeanspruchten Materialien und Systemen. Beispiele sind Textilien, Kochgeschirr, Sportprodukte, Fahrzeuge, Pumpen, Antriebe, u. v. a. m. Viele Tausende per- and polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind aufgrund ihrer molekularen Struktur und der geringen Oberflächenenergie der Schlüssel zu Performance und Zuverlässigkeit in technischen Systemen.



Prüfstand für Radialwellendichtungen

Andererseits sind die gesundheitlichen Gefahren von PFAS-Verbindungen offensichtlich: Durch ihre chemische Beständigkeit haben PFAS-Verbindungen eine sehr lange Lebensdauer und gelangen über die Umwelt in den menschlichen Körper, wo sie angereichert werden und die Entstehung von Krankheiten begünstigen können. Auf EU-Ebene wird an einer PFAS-Regulierung und an Verboten gearbeitet, die ab 2026 schrittweise in Kraft treten sollen. Unabhängig von Stand der Regulierung ist eine große Marktdynamik entstanden, und in vielen Unternehmen wächst das Bewusstsein für die Thematik: In welchen Produkten ist PFAS enthalten? Wie verändern sich Lieferketten bei einem PFAS-Verzicht? Was bedeutet ein PFAS-Verzicht für die Produktkosten? Welche Investitionen in der Fertigung wären bei einer Umstellung nötig?

Ein Industriebereich von vielen, denen die PFAS-Problematik Sorgen bereitet, sind Hersteller von Pumpen, Getrieben, Führungen, Lagern, also Komponenten des klassischen Maschinenbaus. Dort sorgen PFAS-haltige Schmierstoffe für Energieeffizienz, PFAS-haltige Dichtringe trotz hohen Betriebstemperaturen und gewährleisten die Funktionalität, PFAS-haltige Zuschlagstoffe in Kunststoffen sind verantwortlich für hohe Verschleißfestigkeit.

Führt man sich vor Augen, wie viele Schmierstoffe es gibt, wie viele Elastomere für Dichtungen und wie viele Kunststoffvarianten, wird schnell klar, dass es die eine optimale PFAS-freie Lösung nicht gibt. Eine Substitution muss den Kundenanforderungen, der wirtschaftlichen Herstellung, der Ausfallsicherheit und letztlich auch der wettbewerbsfähigen Kostenstruktur gerecht werden.

Hier hat das vom Land Baden-Württemberg geförderte Projekt PFASfrei angesetzt. Die Tribologie-Experten des Fraunhofer IWM in Freiburg haben darin eine Substitutionskette konzipiert, die es erlaubt, sich schrittweise, effizient und systemspezifisch PFAS-Ersatzlösungen zu nähern. Diese wurde exemplarisch am Anwendungsfall einer PFAS-freien Schmierung für ein

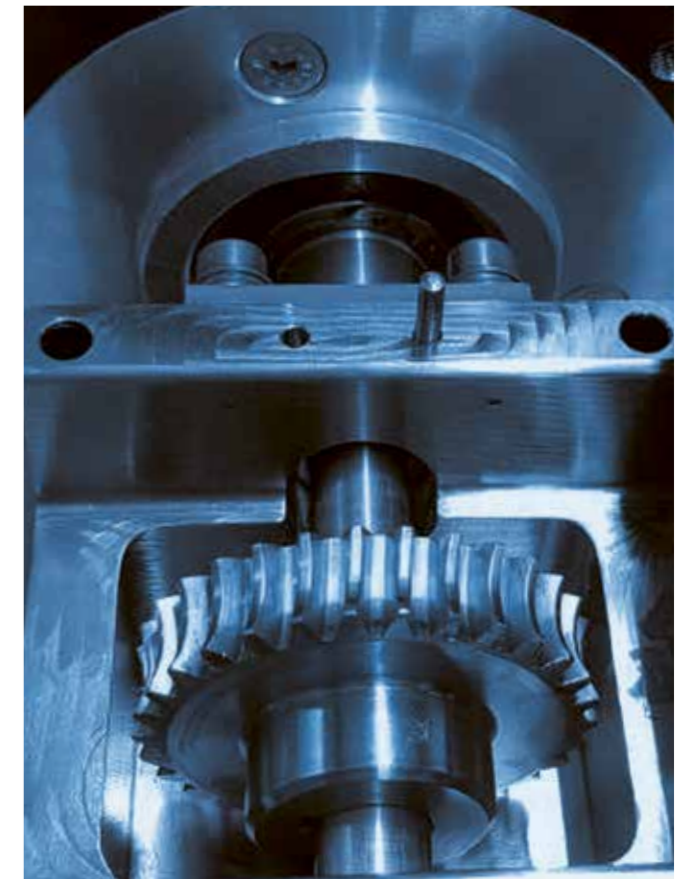
Planetengetriebe erprobt. Im Entwicklungsprojekt PureWater-Seal, gefördert von der Fraunhofer-Zukunftsstiftung, wurden PFAS-freie Elastomerdichtungen entwickelt und erprobt. Die Versuchsergebnisse aus der Bewertung von alternativen Materialkombinationen bilden eine digitale Wissensbasis, die dabei hilft, bei zukünftigen PFAS-Substitutionen Zeit und Geld zu sparen.

Werkstofftechnologisch spielt bei den Substitutionsansätzen die Kombination von Schmierstoffen mit reibungsmindernden Beschichtungen eine elementare Rolle. Um die Einbußen an Leistungsfähigkeit durch den PFAS-Wegfall zu kompensieren, wurden Beschichtungslösungen aus diamantähnlichem Kohlenstoff DLC entwickelt, variiert und in Kombination mit verschiedenen Schmierstoffen erprobt. Im Fall der Elastomerdichtungen wurde der Mix aus Vorbehandlung des Dichtungsmaterials, der Haftfestigkeit der Schichten und der Verschleißfestigkeit optimiert.

Für beide Anwendungsfälle – Schmierung von miniaturisierten Planetengetrieben und PFAS-freie Dichtringe konnten attraktive Substitutionslösungen identifiziert und qualifiziert werden.

Anders als im Gedicht gibt es keinen Meister, der die PFAS-Geister einfach verbannt. Die Substitution erfordert individuelle Systemlösungen, und genau dafür haben wir die Bewertungskette entwickelt. Die meisten tribologischen Systeme wie Lager, Dichtungen, Schmierstoffe sind aus wirtschaftlichen Gründen bis an ihre Belastungsgrenzen ausoptimiert, weshalb PFAS-Substitute Einzelfalllösungen sind, die eine individuelle Systembetrachtung erfordern. Die entwickelte Substitutionskette kann den Weg dahin erleichtern.

Das Projekt wurde vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg gefördert (Förderkennzeichen 032764, BW8\_1584)



Schneckengetriebeprüfstand zur Bewertung PFAS-freier und PFAS-haltiger Schmierstoffe.

# Digitaler Zwilling für Schmierstoffe in hochbelasteten Reibkontakten

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

Das ERC-geförderte LubeTwin-Projekt macht schwer zugängliche reibungsverursachende Mechanismen in Maschinen und technischen Systemen berechenbar. Dazu wird ein digitaler Zwilling entwickelt, der alle Schmierregime – von Trockenreibung bis hydrodynamische Schmierung – abbildet. Mithilfe fortschrittlicher Molekulardynamiksimulationen und maschinellem Lernen verknüpft LubeTwin die atomaren Prozesse der Reibung mit der makroskopischen Reibung in technischen Bauteilen. Die Erforschung und Entwicklung des digitalen Zwillings wird vom Europäischen Forschungsrat (ERC) mit einem Advanced Grant gefördert.

Reibung ist allgegenwärtig. Wo sich Bauteile gegeneinander bewegen, wird Energie verbraucht. Weltweit kostet das Berechnungen zufolge bis zu 20% des Energieverbrauchs – und das trotz vieler technologischer Lösungen zur Reibungsminderung, wie neuen Schmierstoffen und Beschichtungen.

Wie dieses noch unerschlossene Potenzial zur Energieeinsparung und Nachhaltigkeit gehoben werden kann, will Michael Moseler mit der Entwicklung eines digitalen Zwillings für geschmierte Reibkontakte zeigen. Für die Umsetzung des ambitionierten Forschungsvorhabens erhält er vom Europäischen Forschungsrat einen »ERC Advanced Grant« in Höhe von 2,5 Millionen Euro für fünf Jahre.

Die Herausforderung besteht darin, experimentell unzugängliche reibungsverursachende Prozesse in technischen Systemen, die auf der atomaren Ebene ablaufen, wie beispielsweise Viskositätsveränderungen von Schmierstoffen in nanoskaligen Reibspalten oder das Gleiten des dadurch verfestigten Schmierstoffs über Werkstoffoberflächen, berechenbar zu machen.

Traditionelle klassische thermo-elasto-hydrodynamische Schmierungsmodelle gehen davon aus, dass ein mikroskopisch dicker Schmierfilm die Reibpartner trennt. Dadurch, dass viele Bauteile immer mehr an ihrer äußersten Leistungsgrenze ausgelegt werden, kommt es vermehrt zur Grenzreibung, bei der die Schmierfilme nur noch wenige atomare Lagen dick sind oder sogar vollständig aus den Kontakten gedrückt werden.

Dieses Reibregime wollen wir mathematisch beschreiben, um die nächsten Generationen von tribologischen Kontakten zu optimieren.

Hier kommt ein neuartiger Ansatz von Computersimulationen zum Einsatz. Simulationsmethoden und Rechenmodelle, welche die Mechanismen auf den unterschiedlichen Skalen beschreiben, werden in einem einzigen Werkzeug so miteinander kombiniert, dass die reibungsverursachenden Merkmale erfasst und das Verhalten des Reibungssystems vorhergesagt werden können. Sind die Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen den atomaren Prozessen und der energieverzehrenden Reibung für das jeweilige technische System mathematisch beschrieben, kann dieses auch optimiert werden.

Bei den Berechnungen kommen Molekulardynamiksimulationen in extremem Maßstab zum Einsatz, welche die atomistischen Effekte in diesem Reibungsbereich berücksichtigen. Die Entwicklung von physikalisch basierten Materialmodellen, die das molekulardynamisch beobachtete Verhalten genau wiedergeben, ist ein Schlüsselaspekt des Projekts. So müssen beispielsweise präzise Konstitutivgleichungen für die Rheologie und die tribochemischen Reaktionen von wenigen Nanometer dicken Schmierfilmen unter Gigapascal-Drücken bestimmt werden. Diese werden in Kontinuumsgleichungen integriert und bilden den Kern des digitalen Zwillings, der die thermo-elasto-hydrodynamische Schmierung in hochbelasteten Bauteilen (z.B. Wälzlager und Zahnradpaarungen) berechenbar machen soll. Das Projekt wird automatisierte Workflows für molekulare Hochdurchsatzrechnungen von Reibkontakten unter einer Vielzahl von Lastparametern nutzen. Außerdem wird die neueste Generation von maschinell erlernten interatomaren Potenzialen (MLIPs), die quantenmechanische Genauigkeit zu einem Bruchteil der Rechenkosten bieten, zum Einsatz kommen.

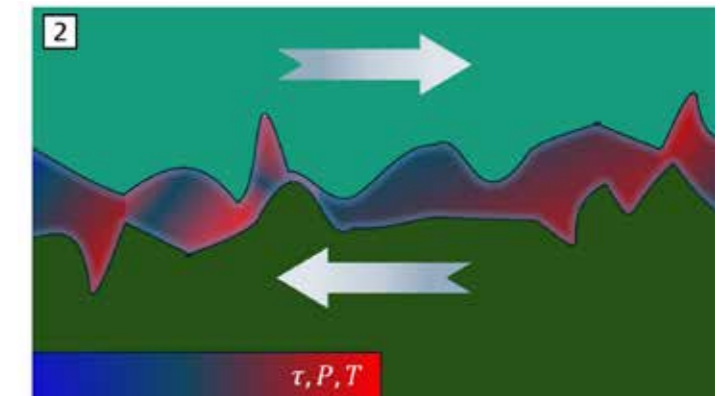
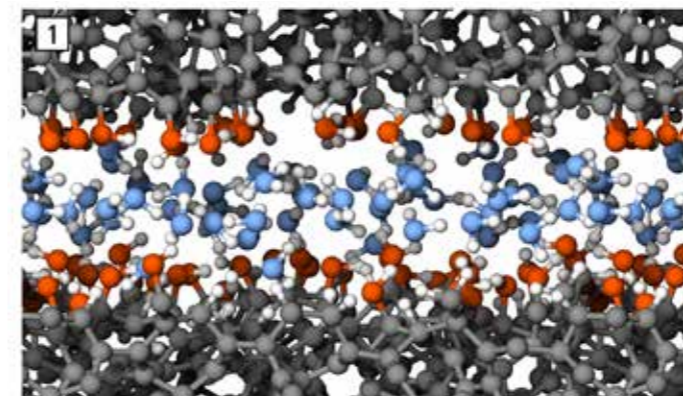
Einzigartig ist die durchgängige Verknüpfung: von extremskaligen atomistischen Simulationen über KI-trainierte Kraftfelder bis hin zu physikalischen Konstitutivgleichungen, die in eine Kontinuumsbeschreibung des hochbelasteten Schmierstoffs münden. Weitere Erfolgsfaktoren sind die intelligente und effiziente Nutzung enormer Rechenkapazität für die Simulation

von bis zu einer Milliarde Atome und der Aufbau einer leistungsfähigen digitalen Infrastruktur für die entstehenden Datenströme und die Datenauswertung.

In fünf Jahren soll der digitale Zwilling durch den Brückenschlag zwischen atomaren Reibungsphänomenen und der Konstruktion von Lagerungen und Getrieben für mehr Nachhaltigkeit und Energieeffizienz in Maschinen, Geräten und Fahrzeugen sorgen.

Für Konstrukteure und Entwickler wird im LubeTwin ERC-Projekts ein Python-basierter Baukasten zur Berechnung hochbelasteter tribologischer Reibkontakte entstehen, der freizugänglich gemacht werden wird. Natürlich wird das LubeTwin-Team nach Beendigung des Projekts auch der Ingenieurwelt zur Verfügung stehen, um bei der optimalen Nutzung dieses Baukastens zu unterstützen.

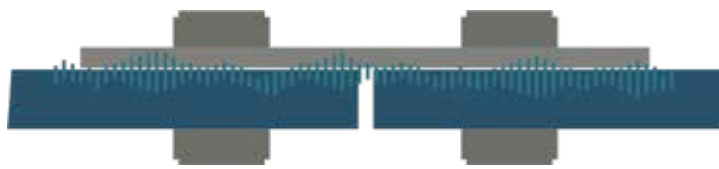
Die Entwicklung eines Digitalen Zwillings für Schmierstoffe in hochbelasteten Reibkontakten wird von der Europäischen Union im Rahmen eines »ERC Advanced Grant« gefördert (ERC-2024-ADG, Project 101201061 – LubeTwin).



Der digitale Zwilling für Schmierstoffe in hochbelasteten Reibkontakten stellt eine mathematische Verbindung her zwischen der atomaren Dynamik im Schmierpalt und der makroskopischen Reibung. Mit dem Wissen um die fundamentalen Ursachen des reibungsbedingten Energieverbrauchs von technischen Systemen wie Lagerungen oder Antrieben können energieeffizientere Maschinen, Anlagen oder Fahrzeuge konstruiert werden. Abb. 1: Molekulardynamiksimulation eines Glycerol-geschmierten Reibkontakts aus zwei diamant-ähnlichen Kohlenstoffschichten unter hoher mechanischer Belastung. Mit derartigen Tribosystemen können beispielsweise neuartige suprageschmierte Gleitlager gebaut werden. Die Molekulardynamiksimulation liefert Materialgesetze für das Schmierstoffverhalten. Diese wiederum sagen in höherskaligen Fluidodynamiksimulationen von geschmierten rauen Oberflächen die makroskopische Reibung vorher (Abb. 2).

# Reibung für Geräuschminderung und Leichtbau nutzen

Prof. Dr. Martin Dienwiebel | martin.dienwiebel@iwm.fraunhofer.de  
Marion Kugler | marion.kugler@iwm.fraunhofer.de



Modell eines Reibelement, das als Teil von Leichtbaukonstruktionen Schwingungsenergie absorbiert und die Geräuschentwicklung mindert.

Leichtbaukonstruktionen können unter dynamischen Belastungen in Schwingungszustände versetzt werden, die einerseits störende Geräusche erzeugen und andererseits zu Materialermüdung führen. Im Projekt »LEICHT\_DISS« wurden Reibelemente entwickelt und bewertet, die als Teil der Leichtbaukonstruktionen Schwingungsenergie absorbieren und zu einer Stabilisierung des Systems führen. Neben einer erhöhten Funktionalität und Sicherheit ermöglicht der Einsatz dieser neuen Technologien auch Gewichtseinsparungen sowie ökonomische und ökologische Potenziale beim Bauteildesign.

Gewichtseinsparungen ohne Einbußen bei der Funktionalität, Stabilität und Sicherheit zu realisieren, ist Dauerthema in vielen Industriebereichen. Eine zusätzliche Anforderung ist die Geräuschentwicklung bei dynamisch belasteten Leichtbaukonstruktionen. Diese sind anfällig für Resonanzphänomene, die zu erhöhten Schwingungsamplituden führen und neben der Lebensdauer der Bauteile auch den Komfort der Nutzer beeinträchtigen können. Ziel des Projekts »LEICHT\_DISS« war es deshalb, durch innovative energiedissipative Elemente die strukturdynamischen Eigenschaften von Leichtbaustrukturen dynamisch belasteter Systeme zu optimieren und gleichzeitig die Masse der eingesetzten Bauteile zu minimieren.

Das Projektteam kombinierte experimentelle Untersuchungen mit fortschrittlichen Simulationsmethoden, um eine Familie von anpassbaren Dämpfungselementen zu konzipieren, die über Reibungseffekte die Schwingungsenergie dissipieren und das dynamische Antwortverhalten von Leichtbaukonstruktionen verbessern. Die entwickelten Dämpfungselemente wurden in einem Demonstratorbauteil, einer Heckklappe, getestet. Durch die gezielte Integration dieser Elemente in die Struktur konnten

die massiven Schwingungstilger ersetzt werden, die bisher zur Dämpfung eingesetzt wurden. Damit können signifikante Gewichtseinsparungen erzielt werden, ohne die Funktionalität und Sicherheit der Bauteile zu beeinträchtigen.

## Projektergebnisse

### Innovative Dämpfungselemente für Leichtbaustrukturen

Im Projekt »LEICHT\_DISS« wurden neue energiedissipative Elemente entwickelt, die nahtlos in dynamisch belastete Leichtbaustrukturen integriert werden können. Durch den Einsatz von Fügstellendämpfung wurde eine erhebliche Reduktion der Schwingungsamplituden bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion erreicht. Diese innovativen Dämpfungselemente ermöglichen eine effizientere Materialnutzung und fördern die Entwicklung leichter und leistungsfähiger Bauteile.

### Optimierter digitaler Entwicklungsprozess

Ein virtueller Produktentwicklungsprozess wurde aufgesetzt, der experimentelle Tests und Simulationen kombiniert. Durch die Verknüpfung von MBSE (Model Based Systems Engineering) mit realistischen Modellen konnte die Vorhersagequalität des dynamischen Verhaltens von Leichtbauteilen erheblich verbessert werden. Dies ermöglicht eine frühzeitige Performanceprüfung und Gewichtsoptimierung und führt zu verkürzten Entwicklungszeiten und geringeren Kosten, da Anpassungen bereits in der Entwurfsphase vorgenommen werden können.

Das Projekt LeichtDISS wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWF gefördert (Förderkennzeichen 03LB2027D).



# Verschleißbeständige Lager- und Gleitkomponenten für Tiefseeanwendungen

Dr. Andreas Kailer | andreas.kailer@iwm.fraunhofer.de

Die Rohstoffförderung in großen Meerestiefen erfordert extrem belastbare Komponenten – besonders in Pumpen. Im Projekt »SubseaSlide« wurde ein neuartiger Diamant-SiC-Verbundwerkstoff entwickelt und qualifiziert, der unter realitätsnahen Bedingungen höchste Verschleißfestigkeit und Betriebssicherheit bewiesen hat. Die Forschung liefert damit einen entscheidenden Beitrag zur Effizienz, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit in der maritimen Rohstoffgewinnung.

Die Förderung von Rohstoffen am Meeresboden stellt extreme Anforderungen an die eingesetzten Komponenten. Besonders in Lagern und Dichtungen von Pumpen verkürzt sich die Betriebsdauer drastisch – durch hohe Salzgehalte, starke Strömungen und abrasive Partikel im Fördermedium. Um die notwendige Langlebigkeit und Ausfallsicherheit unter diesen Bedingungen zu gewährleisten, sind fundiertes Materialverständnis und gezielte Werkstofflösungen gefragt.

Im Verbundprojekt »SubseaSlide« wurden daher verschleißbeständige, energieeffiziente und zuverlässige Gleitkomponenten für Anwendungen im Subsea-Bereich entwickelt und qualifiziert. Das Projektconsortium hat gezeigt, dass Diamant-SiC-Komposite ein idealer Werkstoff für mediengeschmierte Anwendungen unter Tiefseebedingungen sind, und erprobte ein wirtschaftliches Produktdesign für Gleitringdichtungen. Die neue Werkstofflösung verbessert nicht nur Wartungsintervalle und Betriebssicherheit, sondern leistet darüber hinaus einen Beitrag zur Ressourcen- und Energieeffizienz.

Mit steigender Nachfrage nach natürlichen Rohstoffen rückt auch deren Förderung am Meeresgrund in den Fokus. Dabei ist entscheidend, dass die eingesetzten Anlagen zum Bohren, Fördern und Transportieren ausfallsicher und langlebig betrieben werden können. Die Bedingungen in der Tiefsee – hohe Salzgehalte, enorme Strömungsgeschwindigkeiten und extreme Betriebstemperaturen – erhöhen jedoch das Risiko für Schäden drastisch. In Schlüsselkomponenten wie Gleitlagern und Gleitringdichtungen, beispielsweise in Pumpen oder Bohrwerken, können Defekte sogar zum kompletten Stillstand

führen. Die Folge sind nicht nur lange Ausfallzeiten und hoher Wartungsaufwand, sondern auch Risiken für die kontinuierliche Rohstoffförderung – und damit für die Versorgungssicherheit ganzer Industriezweige.

Gefragt sind hier Materialinnovationen, die eine Lebensdauer von bis zu 30 Jahren ermöglichen und mediengeschmiert – also mit partikelhaltigem Meerwasser – funktionieren. Der tribologisch beanspruchte Werkstoff muss dabei nicht nur den extremen Einsatzbedingungen standhalten, sondern auch wirtschaftlich herstellbar sein. Nicht zuletzt gilt: Nur wenn die entwickelten Systeme auch zuverlässig arbeiten, kann der Betrieb unter Tiefseebedingungen langfristig gesichert werden.

## Innovative Werkstoffentwicklung: Diamant-SiC-Verbundwerkstoffe

Im Projekt wurden keramische Werkstoffe auf Basis von Siliciumcarbid (SiC) mit Diamantanteilen von bis zu 60 Vol.-% entwickelt. Eine gezielte Intarsientechnologie ermöglicht es, die teure Diamantverstärkung nur an lokal hochbelasteten Stellen einzubringen. Dadurch lassen sich sowohl die Materialkosten als auch die Aufwände bei der Bauteilbearbeitung erheblich senken – bei gleichbleibend hoher Korrosions- und Verschleißbeständigkeit unter maritimen Extrembedingungen.

Das Projekt SubSeaSlide wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWF gefördert (Förderkennzeichen 03SX508).



# Qualifizierung von Bauteilen in Wasserstoffanwendungen – Forschungsprojekt mit National Institute of Standards and Technology NIST

Dr. Thomas Straub | thomas.straub@iwf.fraunhofer.de

Das Forschungsprojekt HyLife des Fraunhofer IWM und National Institute of Standards and Technology NIST, USA zielt darauf ab, ein Physik-basiertes Lebensdauerprognosewerkzeug für Materialien im Kontakt mit Wasserstoff zu entwickeln. Durch innovative Testmethoden und Materialmodelle soll die Lebensdauer von Komponenten unter Wasserstoffeinfluss zuverlässig vorhergesagt und somit entscheidend zur Sicherheit und Effizienz von Infrastrukturen der Wasserstoffwirtschaft beigetragen werden.

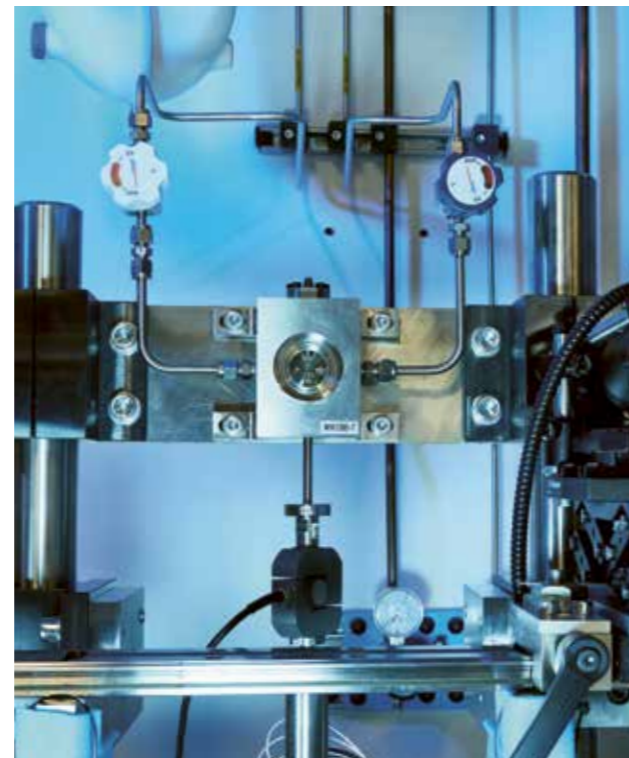
Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ist abhängig von sicheren Infrastrukturen für dessen Speicherung und Transport. Werkstoffe und Bauteile für Druckbehälter und Rohrleitungen von gasförmigem Wasserstoff müssen hinsichtlich ihrer Anfälligkeit für Wasserstoffversprödung getestet und qualifiziert werden. Aktuell werden viele Komponenten, die mit Druckwasserstoff in Kontakt kommen, sehr konservativ ausgelegt oder sehr zeit- und kostenintensiven mechanischen Bruch- und Ermüdungsprüfungen unterzogen. Die Qualifizierung neuer Werkstoffe für Wasserstoffanwendungen kann mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Die Materialcharakterisierung und -qualifizierung ist daher für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ein Erfolgsfaktor.

Genau hier setzt das Forschungsprojekt HyLife an, eine Kooperation des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik IWM mit dem National Institute for Standards and Technology (NIST) in den USA, das gerade begonnen hat und bis 2028 laufen wird. Die Fraunhofer-Gesellschaft fördert in ihrem Forschungsprogramm ICON – International Cooperation and Networking – die strategische Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer und einem herausragenden internationalen Forschungspartner.

Übergreifendes Ziel von HyLife sind weniger konservative, dennoch zuverlässige Konstruktionsrichtlinien für Komponenten, die unter Druckwasserstoff betrieben werden. Dafür werden

schnellere und aussagekräftigere Qualifizierungskonzepte für Bauteile von Wasserstoffinfrastrukturen entwickelt. Die Vorteile liegen auf der Hand: Materialeffizientere Konstruktion von Infrastrukturen, zeit- und kosteneffiziente Qualifizierung von Komponenten unterstützen den beschleunigten Aufbau der nachhaltigen Energiewirtschaft.

Der Schlüssel dafür ist ein validiertes physikalisches Vorhersagemodell für die Lebensdauer von Stahlteilen mit Schweißnähten. Mit dem Modell soll die Schädigung von Materialien im Kontakt mit Wasserstoff auf Basis ihrer Mikrostruktur und einiger physikalischer Kenndaten zuverlässig vorhergesagt werden.



Wasserstoffgas-Mikroautoklav

Eine Mikrozugprobe (6 mm Länge, Stegbreite 0,4mm) ist in der Prüfkammer in Probenhaltern montiert.



Dies soll ein Paradigmenwechsel in der Lebensdauerprognose werden und den Bedarf aufwendiger und teurer Versuche zur Entstehung und Ausbreitung von Rissen für die Sicherheitsbewertung verringern. Die Folge: gesenkte Produktionskosten und beschleunigte Innovationszyklen.

Auf dem Weg zum Modell kommt eine innovative Mikroproben-Prüftechnik des Fraunhofer IWM zur Bestimmung der Bruchzähigkeit und des Risswachstums zum Einsatz. Mit seiner neuartigen Wasserstoffgas-Hochdruckkammer für mikro-mechanische Prüfungen verfügt das Fraunhofer IWM nun über Möglichkeiten, den Wasserstoffeinfluss auf das Materialverhalten auf mikroskopischer Ebene zu untersuchen. Aus materialwissenschaftlicher Sicht spielt die Mikroskala mit Probenquerschnitten von typischerweise  $400\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  eine für Materialien entscheidende Rolle: Hier sind Verteilungen von Poren, Fremdphasen, Korngrenzen, Versetzungen, atomare Fehlstellen sowie Korngrößen und Kornorientierungen in Materialgefügen entscheidende Faktoren für die Materialeigenschaften. Mit Mikroproben werden Einblicke in grundlegende Mechanismen wie Rissentstehung und -ausbreitung, belastungsinduzierte Gefüge- und Phasenumwandlungen gewonnen. So können makroskopische Versagensereignisse bis zu ihren mikroskopischen Ursachen zurückverfolgt werden. Die kleinen Proben ermöglichen es, sowohl extrem kleine Bauteile als auch lokale Besonderheiten in größeren Bauteilen zu prüfen.

Die Messergebnisse werden mit einzigartigen Hochdurchsatz-Ermüdungstests auf der Makroskala des NIST abgeglichen. Auch bei der präzisen Messung der Dekohäsion mechanisch belasteter Korngrenzen, die zu einem besseren Verständnis von lokalen Schädigungen durch Wasserstoff führen soll, ergänzen sich die Partner bei der Mikrostrukturanalyse, Materialdatenverwertung und Modellbildung. Ziel ist, dass das Vorhersagemodell mit weniger Materialkenndaten auskommt und gleichzeitig die wasserstoffinduzierte Entstehung und Ausbreitung von Rissen auf der Mikroskala besser berücksichtigt.

Der Projektplan sieht vor, dass das HyLife-Modell direkt in den Normen ASME B31.12 und ISO 11114-4 für die Auslegung von Bauteilen Anwendung findet, und so die Sicherheit und Effizienz in der Wasserstoffwirtschaft erhöht.

Das Projekt HyLife wird von der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.



## Komplementäre Expertisen für sichere Wasserstoffinfrastrukturen

Das Fraunhofer IWM ist auf die Aufklärung von Schädigungsmechanismen in Werkstoffen spezialisiert und bringt eine einzigartige Expertise in der Charakterisierung und Modellierung von Werkstoffen auf der Mikroskala ein. So können präzise Materialkenn-daten direkt aus kritischen Bauteilbereichen gewonnen werden.

Das National Institute of Standards and Technology (NIST) ist die führende Forschungsorganisation und Normungsbehörde der USA. Die Fatigue and Fracture Group am NIST ist weltweit führend in Hochdurchsatz-Ermüdungstests in Wasserstoff auf der Makroskala. Durch die Zusammenarbeit mit Normungsgremien wie ASME und ISO fließen die Ergebnisse der Forschung am NIST direkt in die Entwicklung und Aktualisierung relevanter Normen ein.

# Schneller zur Bauteilsicherheit bei Verbrennungsprozessen mit Wasserstoff

Heiner Augenstein | heiner.augenstein@iw.fraunhofer.de

Dr. Michael Schlesinger | michael.schlesinger@iw.fraunhofer.de

Die Beimischung von Wasserstoff zu fossilen Kraftstoffen ist ein wichtiger Schritt zur Dekarbonisierung von Verbrennungsprozessen in Großmotoren oder Gasturbinen. Die dort eingesetzten Werkstoffe sind extremen Temperaturwechseln, mechanischen Beanspruchungen und dem Wasserstoffgas ausgesetzt. Je nach Anteil im Brennstoff und der Werkstoffempfindlichkeit reduziert der Wasserstoff die Ermüdungsfestigkeit zusätzlich. Wissenschaftler des Fraunhofer IWM haben gezeigt, wie die thermo-mechanische Ermüdung unter Wasserstoffeinfluss wirtschaftlich mit Hohlproben bestimmt werden kann.

Die Beimischung von Wasserstoff gilt als Übergangstechnologie, um Gasturbinen zur Stromerzeugung oder Großmotoren für Schiffe oder Fahrzeuge »grüner« zu machen, ohne die Anlagen komplett austauschen zu müssen. Ziel vieler Forschungsprojekte und Unternehmen ist, Verbrennungsmaschinen wie Motoren und Turbinen komplett mit Wasserstoff zu betreiben. Die Nachfrage nach Gasturbinen zur Stromerzeugung steigt, denn mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien sind Gaskraftwerke gefragt, die das Stromnetz bei Schwankungen in der Energieerzeugung stabilisieren, da sie eine flexible Fahrweise erlauben.

Mit zunehmender Wasserstoff-Konzentration bei der Verbrennung wächst die CO<sub>2</sub>-Einsparung und es wachsen die Herausforderungen für die Werkstoffe, die mit dem hoch diffusiven Wasserstoff in Kontakt kommen. Folglich nehmen die Anforderungen an die Bewertung der Sicherheit und Zuverlässigkeit zu. Der Schlüssel ist die Auslegung gegenüber der sogenannten thermomechanischen Ermüdung (TMF), die unmittelbar die Lebensdauer beeinträchtigt. Die Folgen aktuell sind höhere Sicherheitsabschläge im Bauteildesign, der Einsatz teurer Werkstoffe oder aufwendige Bauteilversuche. Gefragt sind fundierte Entscheidungsgrundlagen, die die Komplexität der Beanspruchungen berücksichtigen.

Die Werkstoffe und Bauteile im Labor zu testen und für den Einsatz im Wasserstoffkontakt zu qualifizieren, liegt auf der Hand. Aber die Praxisbedingungen müssen im Labormaßstab dargestellt werden und die Aussagekraft der ermittelten Materialeigenschaften muss zur Absicherung der Lebensdauer und zur Optimierung des Bauteildesigns in die industrielle Praxis übertragbar sein.

*Untersuchung einer mit Wasserstoff beladenen Hohlprobe aus einem Turbinenwerkstoff unter thermo-mechanischer zyklischer Belastung. Die Versuchsdurchführung erfolgt bei einer Temperatur von bis zu 900 °C. Die Werkstoffprobe hat eine Bohrung im Inneren. Der Hohlraum wird vor dem Versuch mit Druckwasserstoff (Druck bis 250 bar) beladen. Während des Versuchs diffundiert der Wasserstoff in den Werkstoff und beeinflusst dessen Festigkeit.*



Abgekühlte Hohlprobe nach dem thermomechanischen Ermüdungsversuch.

## Wasserstoffdiffusion, Temperaturwechsel, Zug-Druck-Belastung unabhängig voneinander kombinieren

Die Option, Hochtemperaturwerkstoffe in einer Wasserstoffdruckkammer zu erproben, scheidet aus, da sich die hohen und wechselnden Betriebstemperaturen mit dem Druckwasserstoff darin nicht kombinieren lassen. Die Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Freiburg setzen daher sogenannte Hohlproben ein, bei denen durch eine Bohrung im Probeninneren Wasserstoff strömt und das Probenmaterial von außen mit den thermomechanischen Betriebsbedingungen beaufschlagt wird. Damit können unabhängig voneinander der Wasserstoffdruck, die Temperaturänderungen sowie die Zug- und Druckbelastungszyklen experimentell variiert werden und so für verschiedenste Betriebsfälle Aussagen zur Werkstoffeffizienz abgeleitet werden.

Dass die Hohlproben zur Ermittlung der Auswirkungen von Wasserstoffgas auf die Werkstoffeigenschaften bei gleichbleibender Temperatur (isothermen Prüfbedingungen) und für wechselnde Temperaturen (anisotherme Prüfbedingungen) geeignet sind, konnte in aktuellen Versuchen (und im Rahmen öffentlich geförderter Projekte) gezeigt werden.

## Stufenweise Umsetzung der Versuchsergebnisse in die Praxis

Die Untersuchungsergebnisse (Spannung, Dehnung, Lebensdauer) aus den TMF-Versuchen liefern zunächst Entscheidungsgrundlagen für die Wahl geeigneter Werkstoffe. Bei der Konstruktion von Bauteilen für den Einsatz in Verbrennungsmaschinen gilt es, abzuwägen, zwischen konservativer Auslegung und erwarteter Lebensdauer, d.h. Belastungszyklen, bis die Werkstoffermüdung zur Entstehung von Rissen führt. Und nicht zuletzt können und müssen wasserstoffbedingte Abschläge in Abhängigkeit des Drucks im Lebensdauerverhalten bewertet

und berücksichtigt werden. Die vielfältigen zu optimierenden Zusammenhänge werden in einem Werkstoffmodell abgebildet und kommen so in Bauteilsimulationen zum Einsatz.

## Weiterer Meilenstein auf dem Weg zu sicheren und ressourcenschonenden Bauteilen im Kontakt in Wasserstoff.

Mit der experimentellen Kombination und der Variation der Werkstoffbelastungen in Turbinen und Motoren bei Verwendung von Wasserstoff-haltigen Brennstoffen können die Auswirkungen des Wasserstoffs nun schnell und wirtschaftlich bewertet werden. Werkstofftechnologische Weichenstellungen für die Dekarbonisierung von Verbrennungsprozessen werden damit berechenbar.

Die Bestimmung der thermomechanischen Ermüdungsfestigkeit unter Wasserstoffeinfluss mit Hohlproben basiert auf Arbeiten in folgenden öffentlich geförderten Forschungsprojekten:

- BMFTR TransHyDE | Förderkennzeichen 03HY202F
- BMW HyPower | Förderkennzeichen 03EE5150C
- BMW/IGF Efficient H2-HT-Test | Förderkennzeichen 01IF23387N

Gefördert durch:



Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



# Wie wir Quantencomputing für die Materialforschung nutzbar machen

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

**Quantencomputer versprechen einen Paradigmenwechsel in der Materialforschung. Ihre Fähigkeit, quanten-mechanische Systeme auf natürliche Weise abzubilden, eröffnet völlig neue Möglichkeiten für das Verständnis und Design komplexer Funktionsmaterialien. Wir arbeiten daran, dieses Potenzial systematisch für industrielle Anwendungen zu erschließen.**

Unseren Ausgangspunkt bildet eine realistische Einschätzung von Chancen und Grenzen: Wir erkennen, dass Quantencomputer ideale Voraussetzungen bieten, um quantenchemische Vorgänge in Materialien abzubilden. Gleichzeitig sind wir uns bewusst, dass Dekohärenz und Hardwarefehler die universelle Einsetzbarkeit der aktuellen NISQ-Hardware noch einschränken. Diese nüchterne Analyse ist kein Hindernis, sondern der Kompass für unsere strategische Ausrichtung.

Unser zentraler methodischer Ansatz sind hybride Simulationsverfahren. Wir kombinieren die Stärken klassischer Computer mit den besonderen Fähigkeiten von Quantenhardware: Aspekte, die sich zuverlässig konventionell berechnen lassen, behandeln wir mit etablierten Methoden der Dichtefunktionaltheorie. Quantenmechanisch hochkomplexe Anteile – etwa stark korrelierte Elektronensysteme – bilden wir in effektiven Modellen ab und berechnen sie auf dem Quantencomputer. Eine Iterationsschleife zwischen beiden Systemen liefert die Gesamtlösung. In unseren Projekten QuEST und QuEST+ haben wir diesen Ansatz erfolgreich für elektrochemische Prozesse entwickelt und validiert.

Wir entwickeln effektive Modelle, die sich auf heutiger Quantenhardware zufriedenstellend berechnen lassen. Diese Modelle bilden die Grundlage für übertragbare Quantenalgorithmen, die mit der rasanten Weiterentwicklung der Hardware skalieren werden. In den Projekten SiQuRe und SiQuRe II haben wir solche Modelle für Spinsysteme und Qubit-Register erarbeitet, während QuEST und QuEST+ effektive Modelle für elektrochemische Prozesse liefern.

Systematische Fehlermitigation ist ein weiterer Eckpfeiler unserer Arbeit. Wir erforschen und implementieren kontinuierlich Strategien, um die Zuverlässigkeit von Simulationsergebnissen auf aktueller NISQ-Hardware zu verbessern. In QuEST+ haben wir Fehlermitigationsstrategien explizit adressiert; in SiQuRe II konnten wir Fehlerkorrektur- und Fehlermitigationstechniken bei variationellen Algorithmen wie VQE und VQD erfolgreich einsetzen.

Unsere Algorithmenentwicklung fokussieren wir gezielt auf industriell relevante Materialprobleme. Im Zentrum stehen elektrochemische Prozesse in Batterien und Brennstoffzellen – Systeme mit stark korrelierten Elektronen, wie sie in Übergangsmetalloxiden (Mangan, Eisen, Cobalt, Nickel) mit Perowskit-Strukturen auftreten. Diese Materialien sind entscheidend für die Energiewende, und ihre physikalisch korrekte Beschreibung erfordert genau jene numerisch aufwändigen Verfahren, für die Quantencomputer prädestiniert sind.

Parallel erforschen wir alternative Qubit-Technologien. Die IBM-Quantencomputer nutzen supraleiterbasierte Qubits, die aufwändige Kühlung erfordern. Wir modellieren und simulieren Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren) in Diamant als vielversprechende Alternative – mit dem Vorteil möglicher Raumtemperatur-Operabilität und intrinsischer Robustheit. In SiQuRe haben wir untersucht, wie sich NV-Zentren entlang linearer Strukturdefekte periodisch anordnen lassen; SiQuRe II vertiefte diese Arbeit durch die Analyse gekoppelter NV-<sup>13</sup>C-Spinsysteme, ihrer Kohärenzzeiten und Verschränkungszustände.

Komplementär zum Quantencomputing setzen wir auf Quantensensorik. Mit Quantenmagnetometern – NV-Sensoren und optisch gepumpten Magnetometern (OPM) – erschließen wir neue Wege der zerstörungsfreien Materialcharakterisierung. Im Leitprojekt QMag haben wir bildgebende Systeme entwickelt, die kleinste Magnetfelder bei Raumtemperatur mit höchster Auflösung messen. Im Projekt Next Level LandBW nutzen wir diese Technologie, um magnetische »Fingerabdrücke« von Materialien zu erfassen und Ermüdungserscheinungen

zu erkennen, bevor sie sichtbar werden. Mikromagnetische Simulationen ermöglichen uns die präzise Interpretation der Messsignale.

Wir bauen aktiv Transferstrukturen auf, um unser Know-how und die entwickelten Technologien systematisch in industrielle Anwendungen zu überführen. Im Rahmen von QMag wurden ein magnetisch abgeschirmter Raum am Fraunhofer IPM sowie ein NV-Technikum am Fraunhofer IAF etabliert. Diese Infrastruktur steht interessierten Unternehmen – insbesondere KMU und Start-ups – zur Verfügung, um das Potenzial der Quantentechnologien für ihre spezifischen Anforderungen zu evaluieren.

Die Perspektiven, die wir sehen, sind weitreichend: Mit der Weiterentwicklung fehlertoleranter Quantencomputer werden unsere Algorithmen und Modelle auf größere, realistischere Materialsysteme anwendbar – unsere heutigen Vorarbeiten sind dann direkt nutzbar. Unsere prädiktiven Simulationsmethoden ermöglichen perspektivisch die gezielte Konzeption neuer Materialien für Energiespeicher und -wandler mit optimierter Lebensdauer, Sicherheit und Effizienz. Mit unserer Quantensensorik können wir Materialermüdung erkennen, bevor sie sichtbar wird – dies eröffnet neue Möglichkeiten für vorausschauende Wartung in sicherheitskritischen Branchen. Unsere Forschungsergebnisse sind branchenübergreifend übertragbar: von Elektromobilität über Medizintechnik und Chipfertigung bis zu Luft- und Raumfahrt sowie Fusionsreaktoren.

Unser langfristiges Ziel ist die Konvergenz von Quantencomputing und Quantensensorik – ein geschlossener Kreislauf aus Materialverständnis, -design und -prüfung mit Quantentechnologien. So können wir die Materialforschung in eine neue Ära führen.

## Aktuelle Projekte

### QUBE

Quantenalgorithmenentwicklung, Benchmarking und Ressourcenabschätzung für Materialsimulation mit Anwendervorteilen auf NISQ Quantencomputern



Gefördert durch:



### KQCBW Projekt 2025

Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg

- Quantenunterstützte Basiswahl für die klassische Lösung von Eigenwertproblemen von Molekülen und Festkörpern
- Zeitentwicklungsmethoden für spektrale Eigenschaften der Elektronenstruktur von Festkörpern
- Partielle Differentialgleichungen auf Quantencomputern für Strömungsprobleme



# Wissenschaftlicher Output

---

9

Dissertationen

79

Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften

16

Masterarbeiten



Eine vollständige Übersicht unseres wissenschaftlichen Outputs aus dem Jahr 2025 finden Sie hier.

[Wissenschaftliche Publikationen - Fraunhofer IWM](#)

19

Konferenzbeiträge, unreferierte Publikationen

3

Bachelorarbeiten

# Impressum

---

## **Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM**

Wöhlerstraße 11  
79108 Freiburg  
Tel.: +49 761 5142-153  
Fax: +49 761 5142-510  
info@iwf.fraunhofer.de  
www.iwf.fraunhofer.de

## **Institutsleitung**

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

## **Redaktion**

Thomas Götz (verantw.)

## **Gestaltung, Layout und Satz**

Jacqueline Göppert

## **Druck**

Fraunhofer-Druckerei

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, 2026

Stand April 2026

## **Bleiben Sie auf dem Laufenden**

Internet: [www.iwf.fraunhofer.de](http://www.iwf.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; 3  
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 6-7  
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 10-13  
© Fraunhofer IWM, Foto: Reinoso Forgings & Castings, S.L.; 23  
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 32-35  
© Fraunhofer IWM, Foto: KI generiert FhGenie; 37

Alle weiteren Abbildungen

© Fraunhofer IWM

