



# Jahresbericht 2022



**Langlebigkeit**



**Wirtschaftlichkeit**



**Funktionalität**

**Das sind die »Zutaten«, damit technische Systeme im industriellen Alltag wertschöpfend wirken können und lebensfähig sind.**

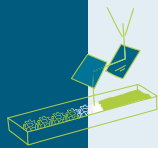
Was selbstverständlich klingt, ist verbunden mit komplexen Anforderungen an das Verhalten und das Zusammenspiel verwendeter Materialien. Die Umbrüche bei der Versorgung mit Rohstoffen und Energie, unterbrochene Lieferketten, aber auch die Energiewende und Kreislaufwirtschaft bringen zusätzliche Ansprüche an Bauteile und Systeme in vielen Anwendungen mit sich.

**Beispiele solcher Anforderungen sind:**



Die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Energiespeichern durch die eingesetzten Materialien

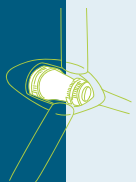
Der Einfluss von elektrischem Strom auf die Tribologie von Elektrofahrzeugen



Die Verbesserung von Bauteileigenschaften in der additiven Fertigung



Die Anpassung von Pumpen oder Kompressoren für den Einsatz in Wasserstofftechnologien



Die zuverlässige Vorhersage von Schäden in Windkraftgetrieben

Wir möchten Sie dazu inspirieren, über unerschlossene werkstofftechnologische Potenziale bei sich nachzudenken!



Lassen Sie uns diese gemeinsam heben –  
Kontaktieren Sie uns!



Am Fraunhofer IWM schlagen wir die Brücke zwischen dem Verhalten und den Eigenschaften von Materialien, und der Langlebigkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Funktion technischer Systeme. Somit können wir für verschiedenste Anwendungsfelder und zur Bewältigung großer gesellschaftlicher und industrieller Herausforderungen neue werkstofftechnologische Innovations- und Gestaltungsräume eröffnen.«

# Jahresbericht 2022

# Vorwort

---

Die aktuelle Weltlage zeigt deutlich, wie fragil unser Wertschöpfungssystem ist – sowohl auf volkswirtschaftlicher Ebene wie auch auf der Ebene von Unternehmen. Gleichzeitig erfahren wir in der Zusammenarbeit mit unseren Auftraggebern aus der Zulieferindustrie, der Energietechnik oder dem Fahrzeugbau, wie diese sich der Dynamik des Wandels stellen und neue Anforderungen als Chance begreifen. Sie sehen auch die Notwendigkeit, Werkstofffragen im Kontext ihrer Produkte und Prozesse neu anzugehen.

Aus unserer Sicht liegen dieser werkstofftechnologischen Transformation drei Trends zugrunde, die die Entwicklung, die Verarbeitung und den Einsatz von Werkstoffen in Systemen in den nächsten Jahren bestimmen werden:

- Der effiziente Umgang mit Werkstoffdaten und -informationen wird für werkstoffintensive Prozesse in der Industrie immer erfolgsbestimmender. Vernetzte Workflows und Strukturen zur produktiven Nutzung von verteilten Daten in Unternehmen aber auch von Daten aus dem gesamten Lebenszyklus von Produkten werden zum Erfolgsfaktor in Entwicklungsprozessen und Fertigungsketten. Digitale Repräsentationen realer Werkstoffe werden eine Schlüsselrolle in vernetzten Wertschöpfungsketten und Innovationsprozessen einnehmen und ein zentraler Baustein für die technologische Souveränität sein.
- Unsichere Versorgungslagen, aber auch begrenzte Verfügbarkeiten bei Rohstoffen, die Notwendigkeit der Weiterentwicklung oder der Umnutzung von Bestandsanlagen im

Sinne der Ressourcenschonung und die Abfederung von Risiken in Lieferketten, werden dazu führen, dass die Einsatzbedingungen und -belastungen für Werkstoffe in technischen Systemen größeren Schwankungen unterliegen und die Fahrweisen von Maschinen und Anlagen flexibler werden müssen. Damit rücken das Wissen um die Betriebszustände technischer Systeme, um die Spielräume bei der Anpassungsfähigkeit und letztlich um deren Resilienz immer stärker in den Fokus der Unternehmen.

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

Auch am Fraunhofer IWM arbeiten wir intensiv daran, uns auf diese Entwicklungen einzustellen.

Ein strategischer Baustein dabei ist die digitale Repräsentation von Materialien bei der uns insbesondere die Durchgängigkeit entlang von Workflows oder Prozessketten wichtig ist. Hier binden wir unsere Prüfmaschinen sukzessive an unseren Datenraum an, um zu einer neuen Qualität der Erzeugung von Werkstoffdaten zu kommen. Wovon wir seit Jahren sprechen,





nimmt zunehmend Gestalt an. Viele Herausforderungen der Digitalisierung sind nicht nur technischer, sondern organisatorischer und kultureller Natur, da die vielbesagten durchgängigen Workflows die Verständigung auf Standards und Vereinheitlichungen beispielsweise bei Datenformaten fordern.

Der Auf- und Ausbau unseres Forschungs- und Entwicklungsportfolios zur Wechselwirkung von Werkstoffen im Kontakt mit Wasserstoff ist ein weiterer Schwerpunkt unseres Handelns. Der Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft bringt für viele Erstausrüster, für Zulieferer und für Anlagenbetreiber zahlreiche Fragen zur Sicherheit und Zuverlässigkeit von Wasserstofftechnologien und den entsprechenden Systemen und Bauteilen mit sich. Mit Werkstoffkennwerten, Lebensdauerbewertungen, Schadensanalysen und Lösungen zur Lebensdauersteigerung unterstützen wir viele Unternehmen bereits heute. Jedes erfolgreiche Projekt zeichnet sich nicht nur durch die daraus resultierenden Forschungs- und Entwicklungsergebnisse aus, sondern auch durch die neuen Forschungsfragen, die dabei entstehen. Um gut gerüstet zu sein, bauen wir ein integriertes Labor auf, in dem wir mit experimenteller Charakterisierung in Kombination mit Multiskalensimulation durchgängige Bewertungsketten von Werkstoffproben in verschiedenen Größenordnungen bis zum Bauteil darstellen können. Für tribologische Systeme entwickeln wir zudem angepasste Werkstoffe, Schmierstoffe und Schichtsysteme.

Noch immer haben wir Mühe, unsere Wirtschaftserträge wieder auf das »Vor-Corona-Niveau« zu bringen. Hier haben wir damit

begonnen, die Leistungsangebote in unseren Geschäftsfeldern strategisch zu überdenken und neu auszurichten. Im Sommer 2023 stellen wir die Ergebnisse in einem Strategieaudit zur Diskussion.

Seine großen und kleinen Erfolge, aber auch seine Fähigkeit, sich kontinuierlich weiterzuentwickeln, verdankt das Fraunhofer IWM vielen Menschen: seinen Mitarbeitenden in den technischen, wissenschaftlichen und administrativen Bereichen, die sich tagtäglich für das Fraunhofer IWM engagieren und seinen Auftraggebern und Kunden, die das Institut mit Aufgaben und Herausforderungen versorgen. Wir danken unseren Fördermittelgebern, die unserer Leistungsfähigkeit vertrauen, aber auch Anforderungen formulieren, an denen wir wachsen und unseren Ansprechpartner\*innen in den Ministerien im Land Baden-Württemberg und auf Bundesebene für die vielfältige Unterstützung.

Es ist alles andere als selbstverständlich in Zeiten des Umbruchs unter wohlwollenden und förderlichen Rahmenbedingungen arbeiten, gestalten und beim nachhaltigen Umbau unseres Wertschöpfungssystems mitwirken zu können.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.

Prof. Dr. Peter Gumbsch

# Inhalt

---

Institutsprofil .....	6
Community Building und Technologieplattformen für digitalisierte Materialien .....	8
Sicherheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit für Wasserstofftechnologien .....	10
Vernetzung für Transfer, Forschung und Ausbildung .....	12
Organisation des Fraunhofer IWM .....	14
Das Institut in Zahlen .....	16
Kuratorium .....	18

<b>Geschäftsfeld Fertigungsprozesse</b> .....	<b>21</b>
Materialsimulation zur Senkung des Mahlenergiebedarfs von porösen Hüttensanden .....	22
Optimierung von Warmumformprozessen durch Simulation der Mikrostrukturentwicklung .....	24
Perowskit-Solarmodule für eine nachhaltige Energieversorgung .....	26
Digitale Methoden zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Resilienz von Fertigungsprozessen .....	28
<b>Geschäftsfeld Tribologie</b> .....	<b>31</b>
Entwicklung und Qualifizierung einer ressourceneffizienten Gleitlagertechnologie für Pumpen .....	32
Grüne Tribologie: Auf dem Weg zur Supraschmierung in Maschinenelementen .....	34
Adaptive Strukturbildung sortenreiner Polyolefin-Komposite .....	36
Nachhaltige und umweltfreundliche Elastomerdichtungen .....	38
<b>Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau</b> .....	<b>41</b>
Digitale Methoden für die Lebensdauerbewertung am Beispiel hochfester Stähle .....	42
CO <sub>2</sub> -bindende Materialien: Technisch und ökologisch nachhaltig bewertet .....	44
Entwicklung eines Simulationsverfahrens für akustisches Design von Polymerblends .....	46
Neue Prüftechniken für die Werkstoffcharakterisierung unter Hochdruckwasserstoffatmosphäre .....	48
<b>Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte</b> .....	<b>51</b>
Simulationsgestützte Entwicklung und Qualifizierung von neuen Legierungen für die additive Fertigung .....	52
Lebensdauerbewertung von additiv hergestellten Bauteilen für Hochtemperaturanwendungen .....	54
Batterieoptimierung durch atomistisches Materialverständnis .....	56
Bewertung der Betriebssicherheit von Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur .....	58
<b>Publikationen</b> .....	<b>60</b>
<b>Preise und Ehrungen</b> .....	<b>70</b>
<b>Abschlussberichte öffentlich geförderter Projekte</b> .....	<b>71</b>
<b>Vorlesungen</b> .....	<b>72</b>
<b>Impressum</b> .....	<b>74</b>

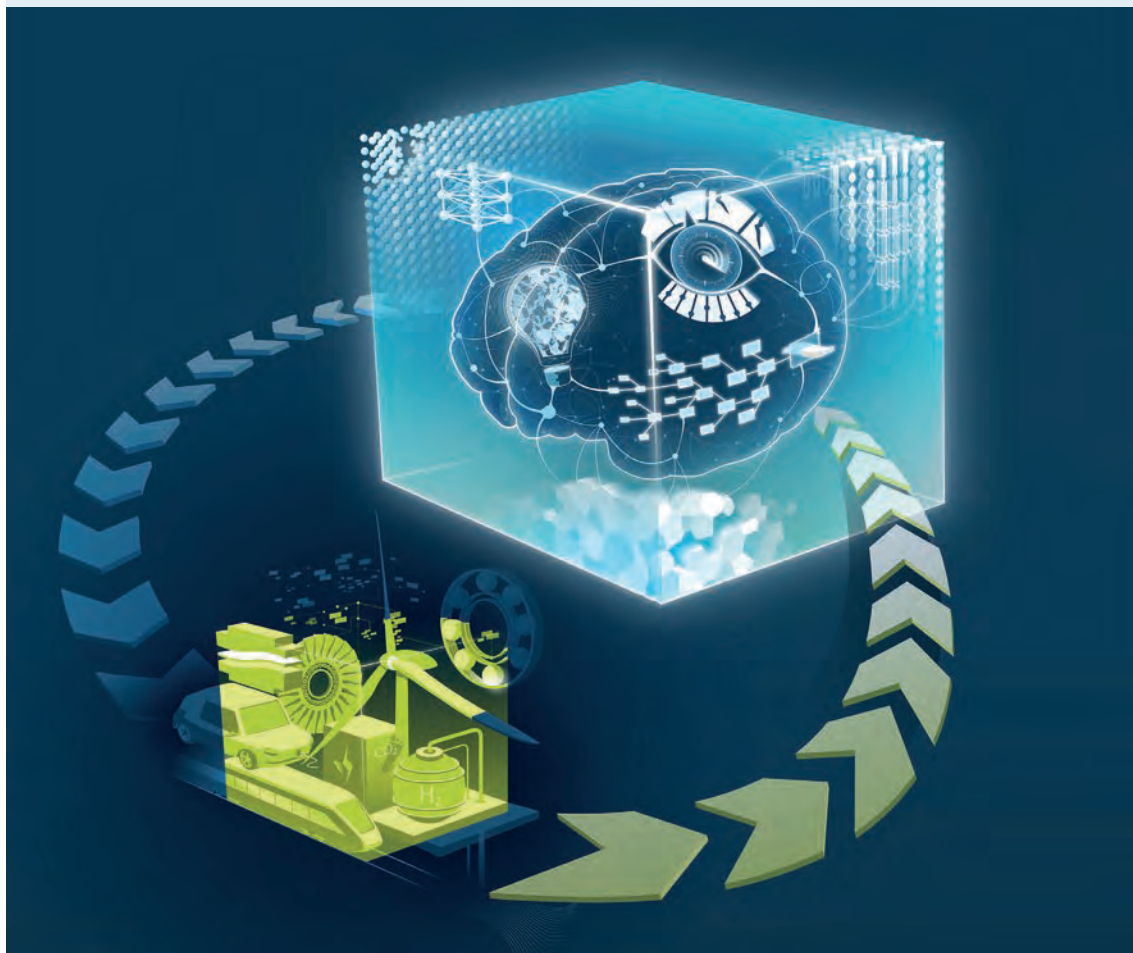
# Institutsprofil

---

Die Funktionalität, die Wirtschaftlichkeit und die Lebensdauer von technischen Systemen werden von dem Verhalten und den Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe bestimmt. Die Crux dabei ist, dass Werkstoffe veränderlich, vergänglich und unvollkommen sind, und in vielen Anwendungen Unwissenheit zu ihrem Innenleben herrscht. Der Schlüssel ist daher die Beherrschung der intrinsischen Merkmale der eingesetzten Materialien – zu jedem Zeitpunkt ihres Lebens.

Wir schaffen die Wissensbasis, damit Werkstoffe mit ihrem Verhalten und ihren Eigenschaften wie einstellbare, kontrollierbare und auch programmierbare Systeme genutzt werden können. Mit dieser Wissensbasis klären wir die Prozesse auf, die in Werkstoffen ablaufen, und entwickeln Bewertungskonzepte, Prognosemethoden und Fertigungsschritte.

Für unsere Auftraggeber eröffnen wir werkstofftechnologische Innovations- und Gestaltungsräume für ressourceneffiziente und leistungsfähige technische Systeme und tragen so zur Bewältigung der großen industriellen und gesellschaftlichen Herausforderungen bei.





Lesen Sie in unserem Jahresbericht, wie wir unsere Mission zum Nutzen unserer Auftraggeber umsetzen.

**Aus der ganzheitlichen Analyse und Bewertung von Beanspruchungen in Fertigung und Betrieb von Bauteilen leiten wir Maßnahmen zur Produkt- oder Prozessoptimierung, oder zur Steigerung der Material oder Energieeffizienz ab.**

Beispiele dazu sind die Senkung des Energiebedarfs beim Mahlen von Hüttensanden (S. 22), die Entwicklung ressourcenschonender Gleitlager für Pumpen (S. 32) und die Vermeidung von Reibungsverlusten mit DLC-beschichteten Elastomerdichtungen (S. 38).

**Wir entwickeln Simulationmethoden, mit denen Prozesse, die in Materialien und Bauteilen auf verschiedenen Skalen ablaufen, beschrieben und letztlich beeinflusst werden können.**

Im Jahresbericht finden Sie Simulationstools und -workflows für unterschiedlichste Anwendungsgebiete: zur Optimierung der Speicherkapazität von Lithium-Ionen-Batterien (S. 56), zur beschleunigten Legierungsentwicklung für die additive Fertigung (S. 52), zum akustischen Design von Polymerblends (S. 46), zur Vorhersage der Gefügeentwicklung bei der Warmumformung (S. 24) und zum virtuellen Design nahezu reibungsfreier Maschinenelemente (S. 34).

**Wir digitalisieren werkstoffintensive Prozesse in Entwicklung und Fertigung und erzeugen digitale Abbilder von Materialien. Damit können diese wie variable Systeme mit einstellbaren Eigenschaften genutzt und optimiert werden.**

Dies illustrieren wir mit einer Ontologie-basierten Wissensbasis zum Ermüdungsverhalten hochfester Stähle (S. 42) und dem Konzept eines Datenraums für Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen in Wärmebehandlungsprozessen (S. 28).

**Wir konzipieren Prüfverfahren und bilden damit Beanspruchungssituationen, die Werkstoffe und Bauteile im Betrieb oder in der Fertigung erfahren, im Labormaßstab ab. Oft in Verbindung mit Simulationsrechnungen bewerten wir die Zuverlässigkeit und Lebensdauer und identifizieren Ansatzpunkte, um diese zu verbessern.**

Entsprechende Themen sind eine Biegeprüftechnik zur Lebensdauerbewertung additiv hergestellter Bauteile für Hochtemperaturanwendungen (S. 54), eine Prüftechnik für Mikroproben unter Hochdruck-Wasserstoff (S. 48), die Bewertung von Pflanzkohle-Beton (S. 44) sowie die Analyse von Normen für die sichere und zuverlässige Auslegung von Bauteilen für Wasserstoffanwendungen (S. 58).

**Wir realisieren Prozess- oder Materialinnovationen, in denen unsere fundierte Expertise zum Verhalten von Werkstoffen in Fertigung und Einsatz zu oft unerwarteten Lösungen führt.**

Beispiele dafür sind ein Fügeprozess für Flachglasscheiben zum Bau von Perowskit-Solarmodulen (S. 26) und kreislauffähige Hochleistungsverbundkunststoffe für selbstadaptierende Lageranwendungen (S. 36).

# Community Building und Technologieplattformen für digitalisierte Materialien

---

In zwei großen Verbundprojekten treibt das Fraunhofer IWM in führender Rolle die digital integrierte Materialforschung voran: in der industrienahen »Plattform MaterialDigital« (PMD), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), sowie in der wissenschaftsnahen »Nationalen Forschungsdateninfrastruktur für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik« (NFDI-MatWerk), gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

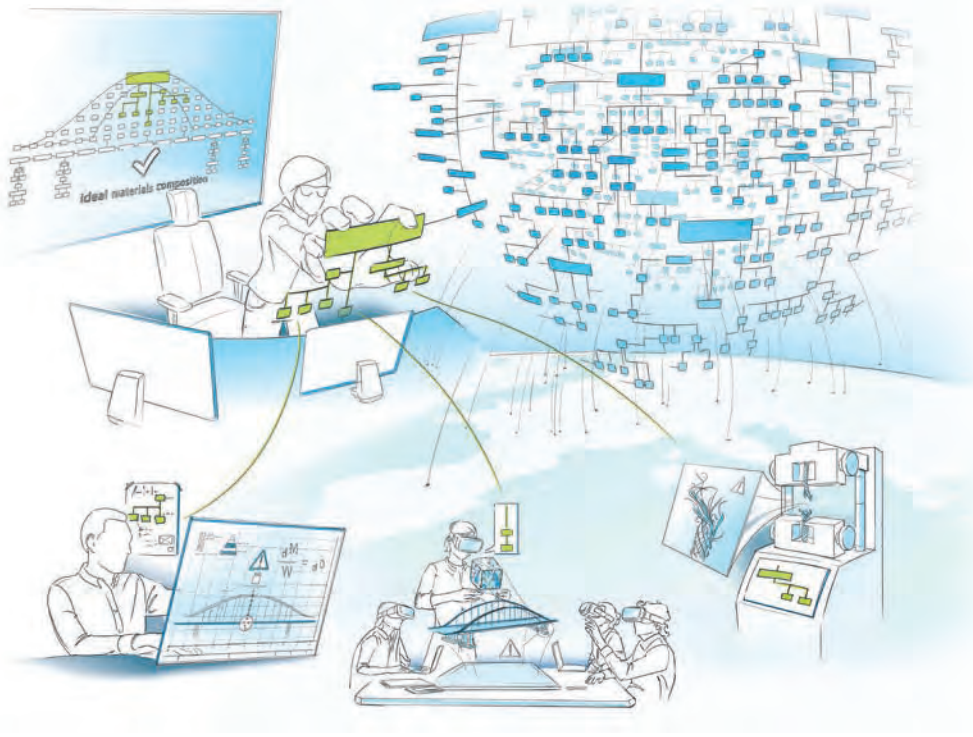
Die PMD und die NFDI-MatWerk entwickeln und organisieren Dateninfrastrukturen, in denen Informationen und Wissen aus Materialforschung und Werkstoffwissenschaft verknüpft und integriert werden können, um daraus Mehrwerte für werkstofftechnologische Innovationen abzuleiten.

Signifikante Fortschritte bei der nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen und dem innovativen Umgang mit Werkstoffen sind ohne einen Paradigmenwechsel bei der Vernetzung von Materialinformationen zwischen verschiedenen Akteuren in der Wertschöpfung nicht möglich. Die digitale Interoperabilität ist die Grundlage dafür, große Datenmengen aus einer Vielzahl dezentraler Quellen im Lebenszyklus eines technischen Systems sinnvoll kombinieren zu können. Erst auf dieser Basis werden ausgeklügelte Voraussagen beispielsweise zum Schädigungsverhalten oder zur Abnutzung eines Bauteils möglich, die wiederum Grundlage für Entscheidungen zur Weiternutzung, zur Wartung, zur Reparatur und für Neuentwicklungen sind. Ähnlich verhält es sich mit der Wiederverwertung von Werkstoffen: Stehen beim Recycling Informationen aus der Produktentstehung zur Verfügung, fällt es leichter, die eingesetzten Werkstoffe erneut zu verwenden.

Die PMD ist ein Kooperationsprojekt zwischen sechs großen deutschen Forschungsinstituten der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Gemeinsam mit der wissenschaftlichen Community aus dem akademischen Bereich und der Industrie entwickelt die PMD einen Prototyp dieses Werkstoffdatenraums und Prozesse für einen nachhaltigen Umgang mit Materialdaten.

Materialdaten sollen dazu innerhalb der PMD »FAIR« sein: Die notwendigen Voraussetzungen, um Daten nachnutzbar zu machen, sind, dass sie auffindbar (»Findable«), zugänglich (»Accessible«), interoperabel mit gängigen Verarbeitungsformen kompatibel (»Interoperable«) und so letztlich wiederverwendbar (»Reusable«) werden. Das bedeutet natürlich nicht, dass die Daten kostenlos oder frei zugänglich sein müssen – aber sie müssen »FAIR« strukturiert sein.

Dies erfordert als Basis eine gemeinsame Sprache, sogenannte Materialontologien. Mit der Veröffentlichung der »PMD Core Ontology« (PMDco) bietet die PMD eine materialzentrierte und prozessgeleitete Basis-Ontologie an. Neben den Daten sollen auch die Auswertungsroutinen im Rahmen der Plattform in Zukunft »FAIR« sein. Dazu werden beispielhafte Workflowumgebungen bereitgestellt. Diese erlauben es, einzelne Prozessschritte in einer Kette nachvollziehbar und automatisiert ablaufen zu lassen. Die nach diesen Standards ausgelegten Methoden können in der Wissenschaft und der Industrie später um ein Vielfaches besser nachgenutzt werden, als es heute gängige Praxis ist.



Die Serverinfrastruktur ermöglicht unterschiedlichen Usergruppen die lokale Speicherung ihrer Daten auf eigenen PMD-Servern innerhalb eines vernetzten Datenraums. Sämtliche Ressourcen verbleiben immer in der Hand ihrer Urheber, die darüber entscheiden, ob und mit wem diese geteilt werden. Forschungseinrichtungen, große Industrieunternehmen und Mittelstand erhalten durch die PMD so einen universellen digitalen Werkzeugkasten, der es erlaubt, Forschungsergebnisse immer wieder neu zu verwenden, und zwar ohne Souveränität abzugeben.

Die vom BMBF geförderte PMD umfasst neben der Plattform selbst auch spezifische Projekte, in denen Forschungsorganisationen und Unternehmen materialwissenschaftliche Forschung betreiben und die dabei generierten Daten im Sinne der PMD zur Verfügung stellen. Das Fraunhofer IWM ist auch hier an drei Projekten beteiligt:

- **StahlDigital:** Ziel sind digitale Strategien für die schnelle und passgenaue Entwicklung von Stahlwerkstoffen.
- **KupferDigital:** Es wird ein digitales Datenökosystem aufgebaut, um den Lebenszyklus von Kupfer, von der Erzgewinnung bis zum Recycling, digital zu erfassen.
- **IBain:** Der Schwerpunkt liegt auf künstlicher Intelligenz zur Optimierung hochfester Stähle

Während die »Plattform MaterialDigital« auf Infrastrukturlösungen für industrielle Bedarfe zielt, arbeitet die »Nationale Forschungsdateninfrastruktur für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik« an Infrastrukturlösungen, mit denen Materialforschungsdaten für die Wissenschaft »FAIR« und in diesem Kontext auch bevorzugt offen und kostenfrei verfügbar gemacht werden können.

Das Konsortium der NFDI-MatWerk deckt über 80 Prozent der deutschen Material Science and Engineering (MSE) Forschungseinrichtungen ab. Das Projekt wird bis 2026 mit rund 13 Mio. Euro gefördert. Im Konsortium der NFDI-MatWerk ist das Fraunhofer IWM Konsortialführer und wirkt vorrangig auf der Entwicklungs- und Organisationsebene, aber auch in einzelnen Entwicklungsprojekten.

Ein entscheidender Erfolgsfaktor ist dabei die Konformität wissenschaftlicher Arbeitsabläufe und der Verarbeitung von Forschungsdaten mit den Infrastrukturanforderungen. Dafür werden in Participant-Projekten (PPs) und Infrastruktur-Projekten (IUCs) Dienste und Produkte realisiert, die sich leicht zu individuellen Arbeitsabläufen zusammenfügen lassen und den Forschenden helfen, ihre Arbeit zu beschleunigen und die Qualität und Wiederverwendbarkeit ihrer Daten und Werkzeuge zu verbessern (FAIR-Prinzipien).



**Plattform  
MaterialDigital**

**Mehr  
Informationen**



**NFDI-  
MatWerk**

# Sicherheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit für Wasserstofftechnologien

---

**Mit »H<sub>2</sub>Mare« und »TransHyDE« ist das Fraunhofer IWM an zwei der drei Wasserstoff-Leitprojekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) beteiligt.**

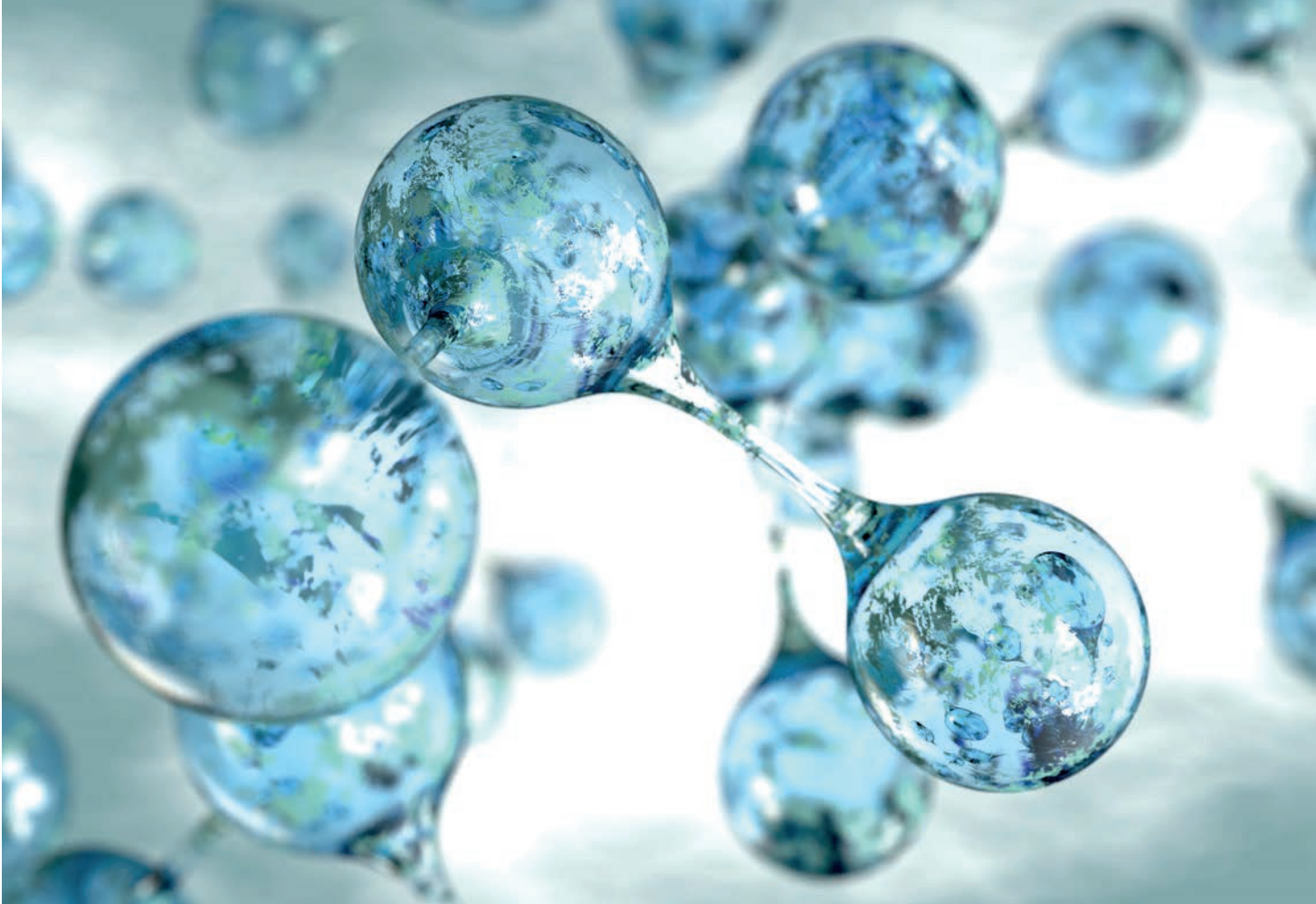
Das Fraunhofer IWM verfolgt in den BMBF-Wasserstoff-Leitprojekten seinen integrativen Ansatz, die in Wasserstofftechnologien allgegenwärtigen Fragen zur Unfallsicherheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Werkstoffen im Kontakt mit Wasserstoff. Es kombiniert dafür multiskalige Materialcharakterisierung und Werkstoffsimulation bis zur Bauteilbewertung. Das passende und überzeugende Forschungs- und Entwicklungsportfolio sowie das hohe Engagement der vielen Expert\*innen aus den verschiedenen Gruppen des Hauses hat dazu geführt, dass sich das Fraunhofer IWM in diesen Leitprojekten als ein prominenter Mitwirkender etablieren konnte.

Diese Leitprojekte sind ein zentraler Beitrag des BMBF zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie. In Summe bilden sie die größte Förderinitiative des Bundesforschungsministeriums zum Thema Energiewende und setzen somit einen entscheidenden Impuls für Deutschlands Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft.

Das Projekt »TransHyDE« entwickelt, bewertet und demonstriert Technologien zum Wasserstoff-Transport. An dem Projekt sind 85 Partner sowie 20 weitere assoziierte Partner beteiligt. Es wird mit 139 Millionen Euro gefördert und läuft bis März 2025. Im Projekt »H<sub>2</sub>Mare« werden Möglichkeiten erforscht, Wasserstoff und seine Folgeprodukte direkt auf See mithilfe von Windrädern zu produzieren. Hier arbeiten 32 Partner sowie zwei assoziierte Partner zusammen. Die Projektförderung liegt bei über 100 Millionen Euro bis Mitte 2025.

Die systemische Spannweite der Wasserstoff-Leitprojekte, von der Erzeugung (on-shore und off-shore) über die Speicherung und die Verteilung bis zur Nutzung (energetisch oder stofflich) von Wasserstoff ermöglicht es dem Institut, relevante Aspekte für die Unfallsicherheit, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft aufzugreifen. Die hierbei erarbeiteten Kenntnisse können dann in die Bewertung der Eignung von Bauteilen in Anlagen für deren wirtschaftlichen und zuverlässigen Betrieb einfließen.

In diesen Projekten hat das Fraunhofer IWM ein hervorragendes Umfeld, um Zuverlässigkeitsaspekte von Wasserstofftechnologien systemisch anzugehen, neue Bewertungskonzepte zu entwickeln und zu erproben, um auf dem Zukunftsmarkt »Wasserstoff« für schwierige Probleme seiner (gegenwärtigen und zukünftigen) Industriekunden passende Lösungen anzubieten.



Das Leitprojekt »TransHyDE« wird Transport-Technologien umfassend weiterentwickeln und in vier Demonstrationsprojekten je eine Transport-Technologie testen und hochskalieren: Wasserstofftransport in Hochdruckbehältern, Wasserstofftransport in bestehenden Gasleitungen, Transport von in Ammoniak gebundenem Wasserstoff und Wasserstofftransport mittels flüssiger organischer Wasserstoffträger (engl.: »Liquid organic hydrogen carriers«, LOHC). Schon jetzt ist klar: Für den Markteinstieg von Wasserstoff-Transporttechnologien braucht es neue Standards, neue Normen und neue Zertifizierungen. Daher widmet das Projekt diesem Themenbereich ein eigenes Arbeitspaket, ebenso wie dem Thema Materialtestung, Sensorik und Sicherheit. So wird sichergestellt, dass alle entwickelten Lösungen langlebig, effizient und sicher sein werden.

Das Projekt »H<sub>2</sub>Mare« erforscht Möglichkeiten, Wasserstoff und seine Folgeprodukte bereits auf See mithilfe von Windrädern zu produzieren. Dabei wollen die Projektpartner den Wasser-Elektrolyseur direkt in eine Windkraftanlage integrieren. Wegen der zahlreichen Vorteile der Produktion auf See arbeitet »H<sub>2</sub>Mare« auch an Lösungen, um mit Grünem Wasserstoff Folgeprodukte wie Grünes Methanol oder Grünen Ammoniak zu erzeugen. Damit das gelingt, wollen die Partner auch zukunftsweisende Ansätze wie die Wasserdampf-Elektrolyse und die Meerwasser Elektrolyse weiter vorantreiben. Zudem braucht es als Eingangsstoffe für die Power-to-X-Produkte zusätzlich Kohlendioxid und Stickstoff, die aus der Luft oder dem Meerwasser gewonnen werden sollen. Offene Fragen zu Sicherheit der Anlagen und möglichen Umweltauswirkungen werden erarbeitet, ebenso wie Lebenszyklusanalysen und umfassende Technologiebewertungen.

# Vernetzung für Transfer, Forschung und Ausbildung

---

Unser Auftrag als Fraunhofer-Institut ist die Verwertung von Forschungsergebnissen und deren Transfer in die Industrie. Unser Anspruch dabei ist, Innovations- und Gestaltungsräume für den ressourceneffizienten und wertschöpfenden Umgang mit Werkstoffen zu schaffen. Eine tragende Säule ist unsere enge und produktive Kooperation mit der Wissenschaft und der Wirtschaft. Durch unsere Vernetzung schaffen wir Konsortien und Allianzen, in denen wir die entsprechenden werkstofftechnologischen Herausforderungen systemisch angehen und einen bestmöglichen Nutzen für unsere Auftraggeber erzeugen.

Der wissenschaftliche Nachwuchs profitiert von unseren starken Verbindungen zu Hochschulen. Lehre, Ausbildung und Forschung sind so aufs engste miteinander verknüpft. Wir sorgen für die Aus- und Weiterbildung unseres eigenen, aber auch der dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchskräfte in der Wirtschaft.

Besonders leistungsstark ist unser Netzwerk innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. In vielen institutsübergreifenden Projekten und in der partnerschaftlichen Zusammenarbeit im Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS kommen unsere Stärken als Querschnittsinstitut besonders gut zum Tragen. Die Werkstoffmechanik des Fraunhofer IWM umfasst nämlich alle Fragen der Funktion, des Verhaltens und der Eigenschaften von Werkstoffen während ihrer Entwicklung, Herstellung, Verarbeitung und ihres Einsatzes. Das Know-how des Instituts wirkt in Produkt- und Technologieentwicklungen als eine Art Beschleuniger, der seinen Partnern zu mehr Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Funktionalität oder Effizienz verhilft. Besonders wirkungsvoll ist die Expertise des Fraunhofer IWM dort, wo Werkstoffe in Bauteilen und Fertigungsverfahren extremen und komplexen Belastungen ausgesetzt sind und wo Verbesserungen in Leistungsfähigkeit und Funktionen nur durch ein ganzheitliches Verständnis realisiert werden können.

In Freiburg sind wir Teil des Leistungszentrums Nachhaltigkeit Freiburg (LZN). Hier hat die enge Kooperation mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und den Freiburger Fraunhofer-Instituten den Transfer im Fokus. Eine zentrale Aufgabe des Leistungszentrums ist es, Ergebnisse ingenieurwissenschaftlicher Nachhaltigkeitsforschung von Universität und Fraunhofer in Innovationen umzusetzen.



Um das Forschungsgebiet der Programmierbaren Materialien zu erschließen, haben wir ein starkes Fraunhofer-internes Netzwerk initiiert. Im daraus hervorgegangen Fraunhofer-Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM heben wir das systemrelevante Potenzial programmierbarer Materialien und arbeiten daran, eine neue wissenschaftliche Community zu formieren. Das Pendant auf der akademischen Seite ist zum einen die intensive Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg im Rahmen des Exzellenzclusters Living, Adaptive and Energy-autonomous Materials Systems (livMatS), das sich zum Ziel gesetzt hat, adaptive und autonome Materialsysteme zu entwickeln, die von der Natur inspiriert sind. Zum anderen profitieren wir in vielfältiger Weise von der Einbindung in das Exzellenzcluster 3D Matter Made to Order (3DMM2O) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Um unsere strategischen Forschungsfelder »Werkstoffe im Kontakt mit Wasserstoff« und »Digitalisierung von Materialien« ganzheitlich voranzubringen, sind wir den Wasserstoff-Leitprojekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), im Fraunhofer-Wasserstoff-Netzwerk, in der BMBF-geförderten »Plattform MaterialDigital« (PMD) und der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten »Nationalen Forschungsdateninfrastruktur für Materialwissenschaft und Werkstofftechnik« (NFDI-MatWerk) hervorragend vernetzt.

Neue Technologien und Herausforderungen brauchen immer wieder neue Köpfe und neue Ideen. Jedes Jahr betreuen wir circa 40 Bachelor-, Master- und Promotionsstudierende. Etwa 19 Mitarbeitende halten Vorlesungen an vier Hochschulen. Besonders fruchtbar ist die Vernetzung mit der Universität Freiburg und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) über Lehrstuhlanbindungen: In Freiburg besetzt Prof. Chris Eberl den Lehrstuhl für Mikro- und Werkstoffmechanik und Prof. Michael Moseler den Lehrstuhl für funktionale Nanosysteme. Am KIT leiten Prof. Peter Gumbsch und Prof. Martin Dienwiebel den Bereich Zuverlässigkeit und Mikrostruktur des Instituts für Angewandte Materialien (IAM).

Transfer, Forschung und Ausbildung in Netzwerken ist in unserem Selbstverständnis fest verankert und die Netzwerksarbeit ist eine Investition in unsere Zukunft.

# Organisation des Fraunhofer IWM

## Institutsleitung




**Institutsleiter**

**Prof. Dr. Peter Gumbsch**



**stellv. Institutsleiter**

**Prof. Dr. Chris Eberl**



**stellv. Institutsleiter**

**Dr. Rainer Kübler**



**Verwaltungsleiterin**

**Elke Schubert**

**Unternehmenskommunikation und Institutsstrategie**  
 Thomas Götz  
 Prof. Dr. Christian Elsässer

## Geschäftsfelder




**Fertigungsprozesse**

**Dr. Dirk Helm**

**Pulvertechnologie und Fluidodynamik**  
 Dr. Torsten Kraft

**Umformprozesse**  
 Dr. Alexander Butz

**Glasformgebung- und bearbeitung**  
 Tobias Rist



**Tribologie**

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

**Verschleißschutz und Technische Keramik**  
 Dr. Andreas Kailer

**Multiskalenmodellierung und Tribosimulation**  
 Prof. Dr. Michael Moseler  
 Dr. Gianpietro Moras

**Polymertribologie und biomedizinische Materialien**  
 Dr. Raimund Jaeger

**Tribologische und funktionale Schichtsysteme**  
 Bernhard Blug  
 Dr. Frank Burmeister

**Tribokonditionierung und -analytik**  
 (Standort Karlsruhe)  
 Dr. Dominic Linsler



**Bauteilsicherheit und Leichtbau**

**Dr. Michael Luke**  
**Dr. Silke Sommer**

**Ermüdungsverhalten und Bruchmechanik**  
 Dr. Igor Varfolomeev  
 Dr. Sascha Fliegener

**Crashsicherheit und Schädigungsmechanik**  
 Dr. Silke Sommer  
 Frank Huberth

**Verbundwerkstoffe**  
 PD Dr. Jörg Hohe

**Meso- und Mikromechanik**  
 Dr. Thomas Straub



## Kontakt

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



**Werkstoffbewertung und  
Lebensdauerkonzepte**

**Dr. Christoph Schweizer**

**Mikrostruktur und  
Eigenspannungen**  
Dr. Johannes Preußner

**Lebensdauerkonzepte  
und Thermomechanik**  
Dr. Christoph Schweizer

**Materialmodellierung**  
Dr. Daniel Urban

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



**Administrative  
Infrastruktur**

**Elke Schubert**

**Finanzen und Verträge**  
Nina Halaczinsky

**Personal- und  
Reisemanagement**  
Kerstin A. Drüsedau

**Veranstaltungs- und  
Besuchsmanagement**  
Elke Schubert (komm.)



**Technische  
Infrastruktur**

**Dr. Rainer Kübler**

**Werkstatt, Technik, Logistik**  
Stefan Frei

**IT Services**  
Klaus Merkel

**Scientific IT**  
Dr. Heiko Hafok

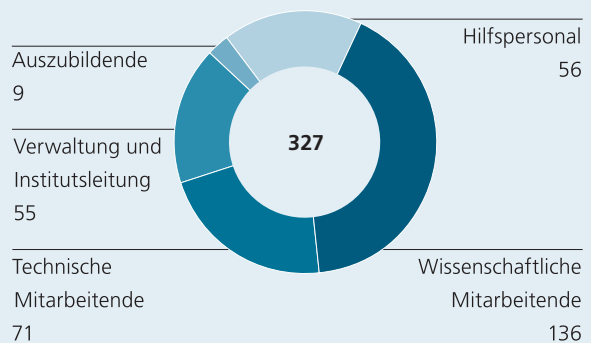
**Arbeitsicherheit**  
Dr. Rainer Kübler

# Das Institut in Zahlen

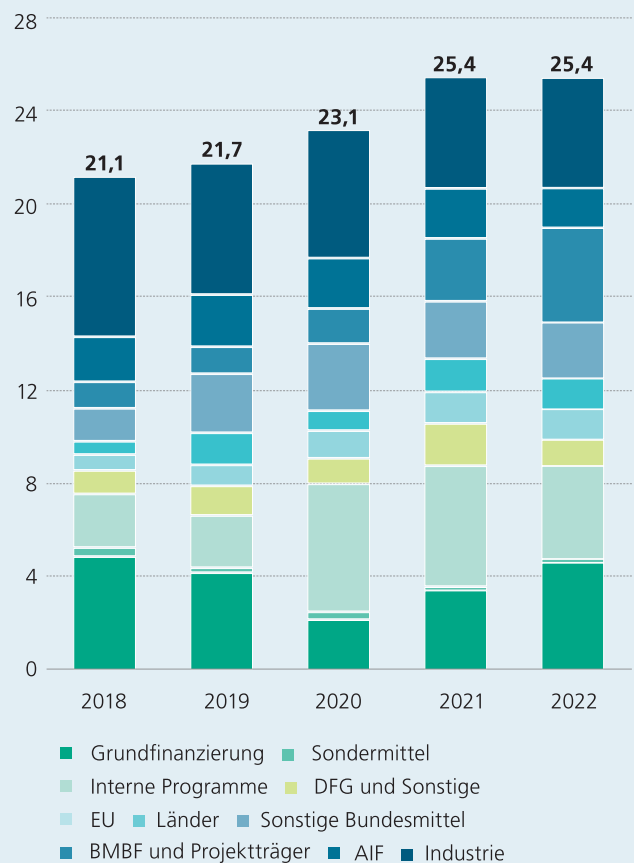
Der Haushalt des Fraunhofer IWM setzt sich zusammen aus einem Betriebshaushalt und einem Investitionshaushalt. Der Betriebshaushalt des Fraunhofer IWM ist mit 25,4 Millionen Euro gegenüber dem Vorjahr praktisch unverändert geblieben. Im Betriebshaushalt sind alle Personal- und Sachaufwendungen enthalten. Er wird finanziert durch externe Erträge aus Industrie und öffentlicher Hand sowie durch die institutionelle Förderung (Grundfinanzierung). Der Anteil der Industrieerträge am Betriebshaushalt 2022 liegt bei 25,1 Prozent. Investiert wurden 2,3 Millionen Euro.

Ende 2022 sind am Fraunhofer IWM insgesamt 327 Personen beschäftigt. Davon sind 271 Mitarbeitende als Stammpersonal und 56 Mitarbeitende als Hilfspersonal (Hilfskräfte, Praktika, Ausbildung, Abschlussarbeiten). Das Stammpersonal setzt sich zusammen aus 136 wissenschaftlichen Mitarbeitenden, 71 technischen Beschäftigten sowie 55 Angestellten in Verwaltung und Institutsleitung. 9 Auszubildende werden in vier Berufsbildern ausgebildet.

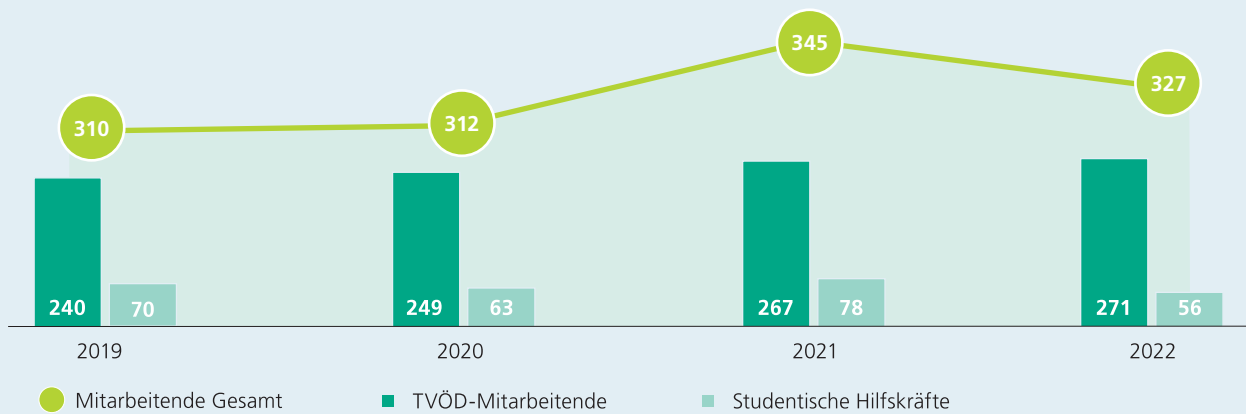
## Personalstruktur



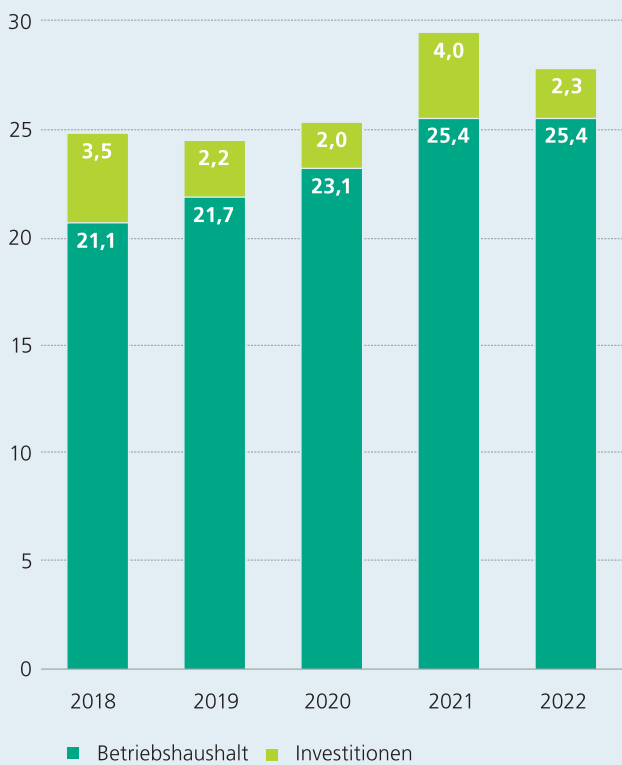
## Entwicklung Betriebshaushalt in Mio. €



### Personalentwicklung



### Entwicklung Investitions- und Betriebshaushalt in Mio. €



# Kuratorium

---

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

**Dr. Markus Hermle**

Kuratoriumsvorsitzender,  
Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

**Alexander Essig**

Rosswag GmbH, Pfinztal

**Prof. Dr. Jörg Eßlinger**

MTU Aero Engines AG, München

**Dr. Jürgen Groß**

Robert Bosch GmbH, Renningen

**Prof. Dr. André Haufe**

DYNAmore GmbH, Stuttgart

**Dr. Roland Herzog**

MAN Energy Solutions SE, Oberhausen

**Bernhard Hötger**

HEGLA GmbH & Co. KG, Beverungen

**Prof. Dr. Oliver Kraft**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Karlsruhe

**Prof. Dr. Erica Lilleodden** (Gast)

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

**Dr. Katrin Mädler**

Deutsche Bahn AG, Brandenburg

**Dr. Juliane Mentz**

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH,  
Duisburg

**Bruno Posset**

Märkisches Werk GmbH, Halver

**MR Dr. Christian Renz**

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und  
Tourismus BW, Stuttgart

**Dr. Heike Riel**

IBM Research, Zürich

**Prof. Dr. Katja Schenke-Layland**

Naturwissenschaftliches und medizinisches  
Institut an der Universität Tübingen, Reutlingen

**Dr. Dietmar Völkle**

Aviation Laupheim GmbH, Laupheim

**Dr. Silke Wagener**

Freudenberg Technology Innovation SE & Co. KG,  
Weinheim



**Fraunhofer**  
IWM  
IWM



**Mit Kreativität und Begeisterung untersuchen wir das Verhalten von Werkstoffen in Fertigungsprozessen und tragen zur Lösung von fertigungstechnischen Herausforderungen bei. Zur Verbesserung der Herstellbarkeit nutzen wir unsere Versuchstechnik und Simulationsmethoden und entwickeln diese weiter. Mit Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen identifizieren wir kritische Faktoren in der Fertigung sowie für die Performance von Bauteilen. Für den effektiven Umgang mit den heterogenen Werkstoff-, Simulations- und Prozessdaten entwickeln wir digitale Technologien auf der Basis von semantischen Methoden.«**

**Dr. Dirk Helm,**  
Geschäftsfeldleiter

# Geschäftsfeld Fertigungsprozesse

## Prozessinnovationen durch vernetzte Materialdaten

### 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.

*Simulation der Entstehung einer kolumnaren Mikrostruktur im Laser-Schmelzbad.*



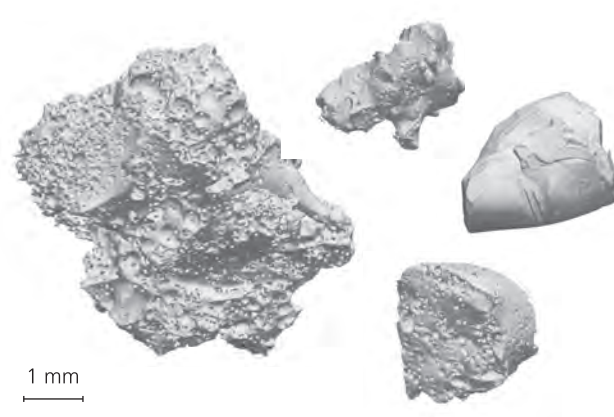
# Materialsimulation zur Senkung des Mahlenergiebedarfs von porösen Hüttensanden

**Dr. Claas Bierwisch**

Hüttensand ist ein weitestgehend glasig erstarrtes Hochofenschlackengranulat, das nach dem Hochofenabstich aus der flüssigen Schlacke mittels Zerteilung und Abschreckung durch hohen Druckwasserüberschuss in Granulationsanlagen gewonnen wird. Er wird auf Zementfeinheit gemahlen und seit Jahrzehnten bei der Herstellung von Zement und Beton eingesetzt. Der Energiebedarf für den Mahlprozess ist außerordentlich hoch und steigt mit der Feinheit exponentiell an. Jährlich entfallen ca. 38 Prozent des Strombedarfs der deutschen Zementindustrie auf die Mahlung der verschiedenen Bestandteile des Zements. Um den Mahlenergiebedarf zu reduzieren, ist eine genauere Kenntnis und Verbesserung der zerkleinerungsrelevanten Eigenschaften des Hüttensandes notwendig. In dem gemeinsamen IGF-Projekt Nr. 20187 N untersuchten das Fraunhofer IWM und das FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V. den Einfluss der Porosität von Hüttensanden (Abbildung unten links) auf deren Zerkleinerungsverhalten.

## Erzeugung von Kornmodellen mit Poren, Einschlüssen und Rissen

Im Rahmen partikelbasierter Materialsimulationen wurde ein Spröbruchmodell zur Beschreibung der Zerkleinerung der Hüttensandkörner verwendet. Es wurden Modellkörner algorithmisch generiert, die 100 Prozent Dichte oder eine definierte

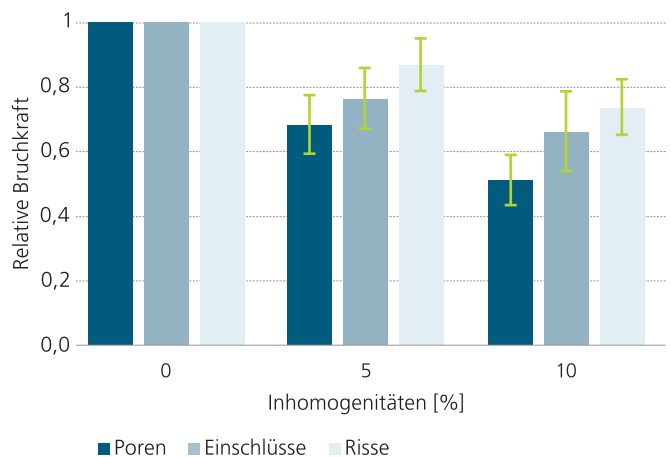


3D-CT-Rekonstruktionen ausgewählter Körner von vier in der Porosität stark unterschiedlichen Hüttensanden.

Porosität beziehungsweise harte Einschlüsse aufweisen. Die Poren oder Einschlüsse sind dabei kugelförmig und monodispers (Abbildung unten links). Darüber hinaus wurde ein Ansatz entwickelt, um Risse in den Körnern in der Modellierung berücksichtigen zu können. Solche Risse in Hüttensandkörnern sind in REM-Aufnahmen und zum Teil auch in 3D-CT-Analysen, die an einer Vielzahl von Hüttensanden vorgenommen worden waren, gut erkennbar. Dazu wird vor Beginn der Mahlsimulation ein vorgegebener Anteil der inneren Kraftbrücken, die den Zusammenhalt des Kornes verursachen, aufgelöst. Dies entspricht einer Vorschädigung des Kornes durch Risse vor dem Mahlvorgang.

## Simulation der Bruchfestigkeit einzelner Hüttensandkörner

Modellkörner wurden in numerischen Simulationen unter uniaxialer Kompression zwischen zwei Flächen oder unter Scherung zwischen zwei Winkeln bis zum Bruch belastet. Der Effekt, den Poren und Risse oder Einschlüsse auf die für die Modellkörner benötigte Bruchkraft haben, wurde systematisch über alle Simulationen hinweg ausgewertet (Abbildung unten rechts). Die Simulationen zeigen, dass der Einfluss der Porosität am größten ist. Schon bei 5 Volumenprozent Porosität sinkt die Bruchkraft im Mittel auf 70 Prozent des Ausgangswertes. Bei



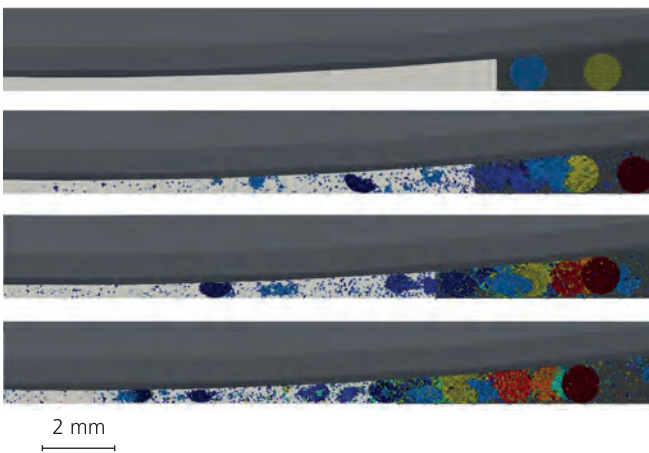
Simulierte relative Bruchkräfte gemittelt über alle Belastungsarten als Funktion des Anteils der Inhomogenitäten.



10 Volumenprozent Porosität beträgt die Bruchkraft nur noch 50 Prozent des Referenzwertes für ein vollständig dichtes Korn. Verglichen mit den Poren ist der Effekt durch kristalline Einschlüsse etwas geringer, gefolgt von dem Einfluss durch Risse. Ein Anteil von 10 Prozent Rissen im ansonsten dichten Korn führt zu etwa 70 Prozent der Referenzbruchkraft.

### Praxisnahe Modellierung einer Walzenschüsselmühle

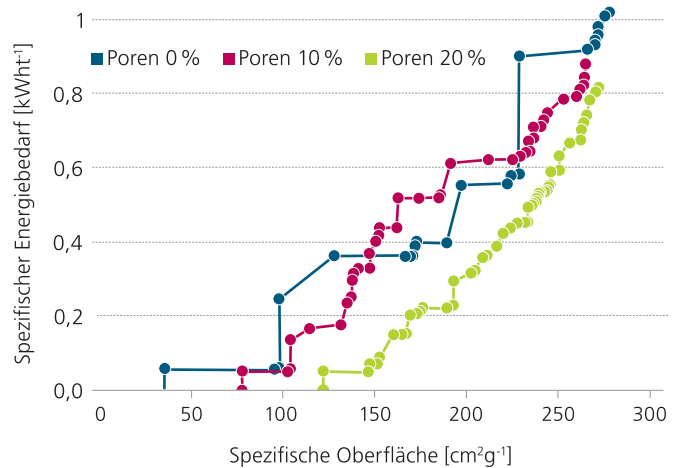
Walzenschüsselmühlen haben für die Zementherstellung und insbesondere für die Hüttensandmahlung aufgrund ihrer Energieeffizienz und anderer Vorteile große Bedeutung erlangt. Daher wurde am Fraunhofer IWM in Zusammenarbeit mit der Loesche GmbH ein Simulationsmodell einer Walzenschüsselmühle im Technikumsmaßstab erstellt. Um die Zerkleinerung im Mahlpalt untersuchen zu können, wurden mikroskopische Simulationen unter Verwendung eines Kornbruchmodells durchgeführt. In Schnappschüssen einer solchen Simulation (Abbildung unten links) befinden sich die farblich unterscheidbaren Körner zunächst vor dem Mahlpalt und sind in der nächsten Aufnahme bereits teilweise fragmentiert. Die Walze und der Mahlteller rotieren mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, während die Höhe des Mahlpalts konstant gehalten wird. Für die so modellierte



Simulation des Mahlens einzelner Modellkörner im Mahlpalt einer Walzenschüsselmühle.

Walzenschüsselmühle wurde der spezifische Mahlenergiebedarf als Funktion der spezifischen Oberfläche berechnet und aufgetragen (Abbildung unten rechts). Es zeigt sich ein sinkender spezifischer Mahlenergiebedarf mit steigender Porosität für eine spezifische Oberfläche. Dies steht im Einklang mit dem Ergebnis einer sinkenden Bruchkraft bei steigender Kornporosität (Abbildung Seite 22 rechts). Somit sollte aus mahltechnischer Sicht bei der Granulation von flüssiger Hochofenschlacke zu Hüttensand nach Möglichkeit eine hohe Kornporosität eingestellt werden.

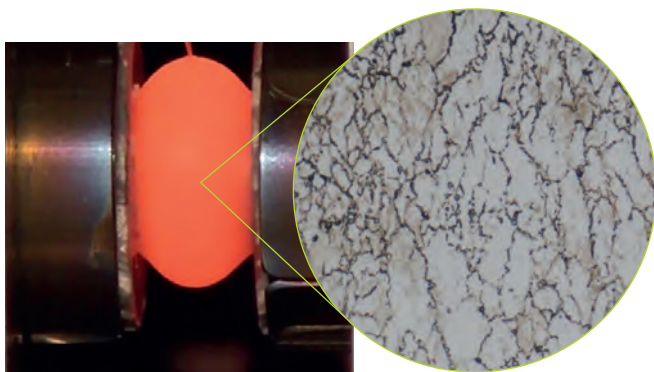
Die im Projekt entwickelten Modelle können leicht auf Walzenschüsselmühlen anderer Hersteller übertragen werden oder auch auf andere Zerkleinerungsanlagen, wie Kugelmühlen oder Rotormühlen, um deren Energiebedarf zu senken.



Spezifischer Mahlenergiebedarf in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche für Modellkörner unterschiedlicher Porosität.

# Optimierung von Warmumformprozessen durch Simulation der Mikrostrukturentwicklung

Dr. Lukas Kertsch, Dr. Maksim Zapara

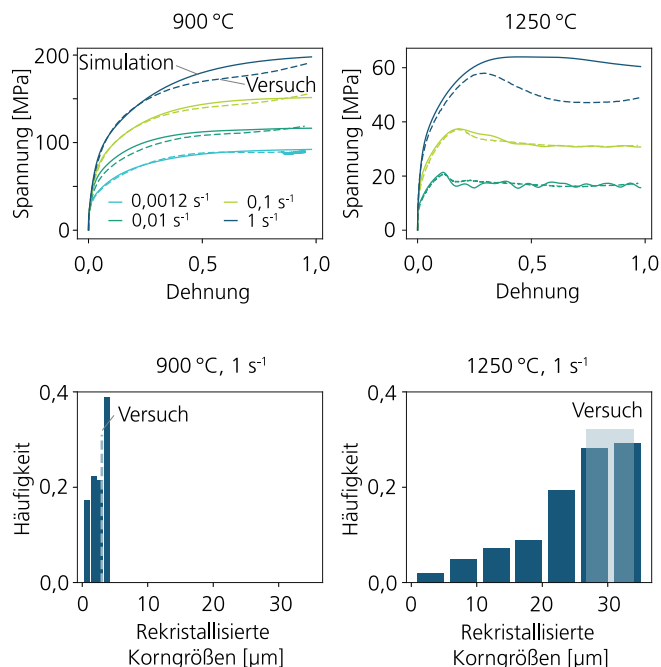


Das Warmumformen durch Prozesse wie Schmieden, Strangpressen und Walzen ermöglicht große Formänderungen bei begrenzten Umformkräften. Dabei kommt es zu ausgeprägten Veränderungen im Gefüge des Werkstücks. Je nach Situation werden Gefügeveränderungen gezielt ausgenutzt oder sie sollen vermieden werden. Beispielsweise ermöglicht erst die Rekristallisation zwischen den Stichen einer Walzstraße den erforderlichen hohen Umformgrad. Allerdings kann es bei längeren Schmiedeoperationen zu unerwünschter Kornvergrößerung kommen. Zudem können sich in vielen Legierungen Ausscheidungsteilchen bilden, die festigkeitssteigernd und rekristallisationshemmend wirken. Das Verständnis der Mikrostrukturentwicklung und seine gezielte Beeinflussung sind daher entscheidend für die Entwicklung und Optimierung von Umformprozessen.

## Physikalisch basierte Mikrostrukturmodellierung

Mit unserem physikalisch basierten Materialmodell können wir Mikrostrukturveränderungen durch Rekristallisation, Kornwachstum und Ausscheidungsbildung sowie das thermomechanische Materialverhalten präzise abbilden. Mögliche Anwendungen umfassen die Warmumformung und Wärmebehandlung vieler Stähle, Aluminium-, Kupfer- und Nickelbasislegierungen. Das Modell wurde ursprünglich in einem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanzierten Projekt entwickelt und steht nun in Form von Softwarelösungen zur Verfügung. Diese werden bereits in der Industrie für die Warmumformung verwendet, und wir arbeiten kontinuierlich an Erweiterungen.

Aufgrund der physikalischen Modellbildung sind viele der benötigten Materialdaten leicht verfügbar. Beispielsweise wird der Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Phasenbildung durch CALPHAD-Datenbanken beschrieben (CALPHAD: »Calculation of Phase Diagrams«), die für die meisten technisch relevanten Legierungssysteme frei zugänglich oder kommerziell erhältlich sind. Um die übrigen Modellparameter für einen bestimmten Werkstoff zu kalibrieren, führen wir thermomechanische Versuche wie Stauch- und Glühversuche unter verschiedenen Bedingungen durch und untersuchen die dabei auftretenden Mikrostrukturveränderungen



*Thermomechanische Versuche und metallografische Gefügeuntersuchungen (oben) liefern die Grundlage zur Kalibrierung und Validierung des Materialmodells für einen bestimmten Werkstoff (unten), hier einen mikrolegierten Stahl.*

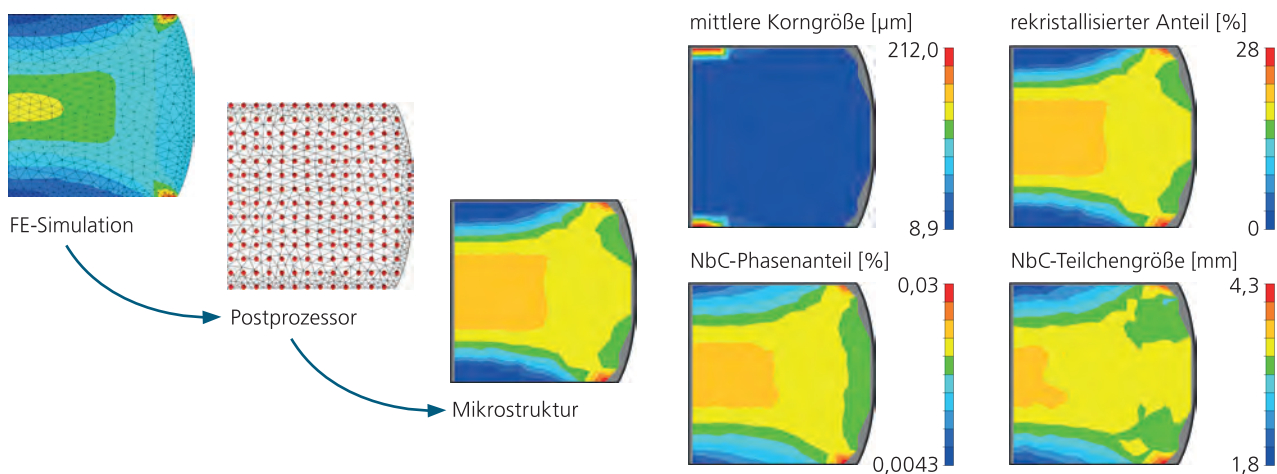
metallografisch. Hierfür nutzen wir unter anderem die thermo-mechanische Prüfeinrichtung »Gleeble 3150« sowie Licht- und Rasterelektronenmikroskopie.

In der Abbildung auf Seite 24 ist das typische Vorgehen zur Modellkalibrierung am Beispiel eines mikrolegierten Stahls dargestellt. In Stauchversuchen wurden die Fließkurven des Materials in Abhängigkeit von Temperatur und Umformgeschwindigkeit aufgezeichnet. Die Proben wurden vor und nach den Versuchen metallografisch untersucht, um die Veränderung der Korngrößenverteilung unter den verschiedenen Prozessbedingungen zu erfassen. Das kalibrierte Modell bildet die Fließkurven und die sich einstellenden Korngrößen mit guter Genauigkeit ab. So steht es nun für die Anwendung auf komplexe Warmumformprozesse zur Verfügung.

### Softwarelösungen für die Auslegung von Warmumformprozessen

Das Materialmodell bieten wir in Form von zwei verschiedenen Softwarelösungen für die praktische Anwendung an: Einerseits ist es als eigenständiges Simulationsprogramm implementiert, mit dem die Entwicklung der Werkstoffeigenschaften und

der Mikrostruktur an ausgewählten Punkten innerhalb des Werkstücks detailliert simuliert werden kann. Für die Berechnung der Mikrostrukturentwicklung im gesamten Werkstück hingegen haben wir das Modell der Mikrostrukturentwicklung in einen Postprozessor für Nachlaufrechnungen im Anschluss an die Finite-Elemente-Simulation überführt. Wir nutzen hierfür die Schnittstelle DynamiX GUI, die in Verbindung mit dem kommerziellen Finite-Elemente-Programm FORGE® angeboten wird. Der Postprozessor kann auch für die Verwendung mit anderen weit verbreiteten kommerziellen Finite-Elemente-Programmen wie DEFORM, Simufact Forming oder QForm angepasst werden. Die Abbildung unten zeigt den Arbeitsablauf zur Verwendung des Postprozessors. Hier wird als Beispiel die Simulation eines Stauchversuchs an mikrolegiertem Stahl dargestellt. Als Ergebnis können Mikrostrukturinformationen wie die mittlere Korngröße, der rekristallisierte Anteil sowie der Phasenanteil und die Teilchengröße der Niobcarbid-Ausscheidungen (NbC) auf dem Querschnitt der verformten Probe betrachtet werden. Es wird deutlich, dass sich aufgrund der inhomogenen Belastung innerhalb der Probe erhebliche Unterschiede in der Mikrostruktur einstellen. Mithilfe dieser Informationen lassen sich die Prozessparameter hinsichtlich der Umformbarkeit und der erzielten Mikrostruktur optimieren.



Arbeitsablauf zur Verwendung des Postprozessors mit der DynamiX GUI (links). Berechnete Korn- und NbC-Ausscheidungsstruktur nach Stauchversuchen an mikrolegiertem Stahl (Darstellung der halben Stauchprobe) (rechts).

# Perowskit-Solarmodule für eine nachhaltige Energieversorgung

## Matthias Quast

Die Photovoltaik (PV)-Industrie wächst seit Jahrzehnten; 2021 lag die globale Produktion von PV-Modulen bei 168 GWp/a. Der weltweite Bedarf an Photovoltaik wird dabei zurzeit fast ausschließlich durch Silicium-Solarzellen aus Ost-Asien gedeckt – die PV-Produktion in der EU macht hingegen weniger als 3 Prozent aus. Dabei sind in den letzten Jahren die Kosten von Silizium-Photovoltaikmodulen stark gesunken. Dies wurde durch die Integration von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen, den schnellen Ausbau an Produktionskapazitäten und die Verlagerung der materialbedingt aufwendigen Produktion nach Asien erreicht. Durch die sich daraus ergebenden Transportwege wird das klimapolitische Ziel der Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks bei der Energiegewinnung erschwert, weshalb die Entwicklung einer europäischen Produktionskette von zunehmender Bedeutung ist. Gleichzeitig ist es notwendig, den exportorientierten deutschen Maschinen- und Anlagenbau durch innovative Produkte zu stärken.

In den vergangenen fünf Jahren hat das Fraunhofer ISE mit dem PeroTec™-Ansatz eine neue Perspektive der nachhaltigen, lokalen und kostengünstigen PV-Herstellung aufgezeigt. Beim PeroTec™-Ansatz werden die klassischen Herstellungsschritte für Solarmodule umgekehrt. Für Prozesse und Materialeinsatz steht die Reduzierung auf das Glassubstrat im Fokus. Alle notwendigen Elektrodenschichten können über etablierte Druckprozesse auf dem Glassubstrat aufgebracht werden. Die robuste Verkapselung erfolgt durch einen thermischen Fügeprozess basierend auf einem anorganischen Glaslot. Die Entwicklung des Fügeprozesses erfolgt am Fraunhofer IWM. Die Glaslotversiegelung garantiert hierbei eine sehr hohe Dichtigkeit gegenüber Gasen sowie Feuchtigkeit und gewährt letztlich einen sicheren und langen Betrieb.



*Großflächige, siebgedruckte Elektroden und Lotbahnen eines PeroTec™-Moduls auf Glas (links) und Befüllung eines PeroTec™-Moduls mit Perowskit-Lösung (rechts). Die Menge von 2 ml ist ausreichend für die Herstellung von 4 Quadratmetern Modulfläche.*

## Fügeprozess und Herstellung von Leermodulen

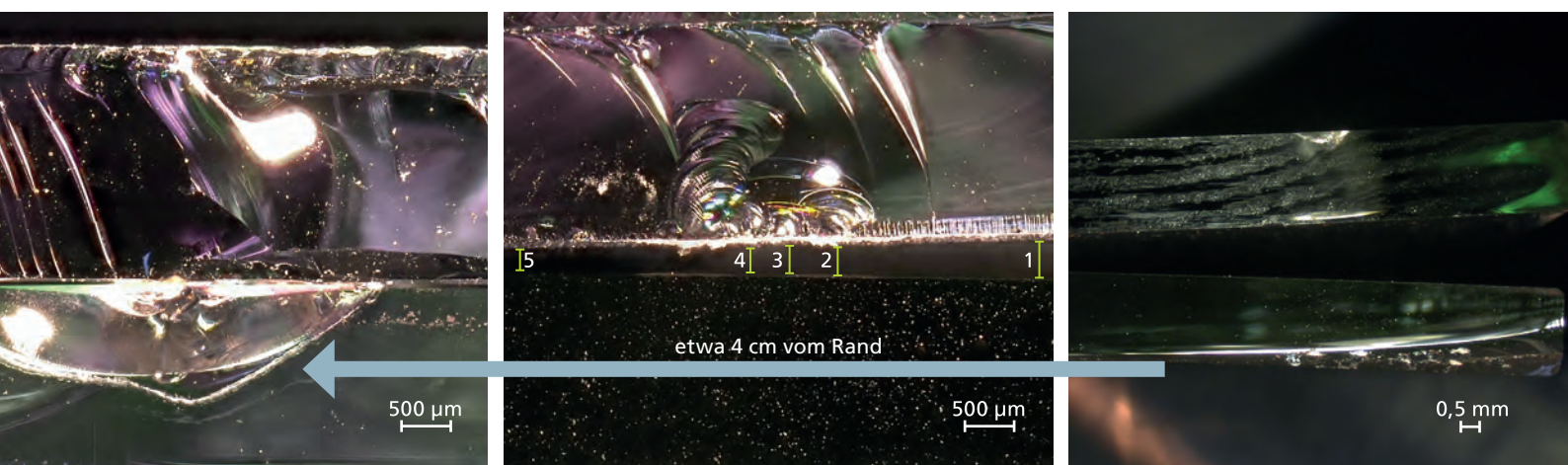
Zur Herstellung wird der bisher bekannte Prozessablauf eines Silizium-PV-Moduls – von der Zelle zum ganzen Modul – umgekehrt: Zuerst wird ein Leermodul gefertigt und anschließend das photoaktive Perowskit-Salz eingebracht, und dann im Inneren des Moduls »in-situ« durch Kristallisation aktiviert.

Das Leermodul besteht aus zwei strukturierten und mehrfach bedruckten und vakuumbeschichteten Flachglasscheiben, die in einem Fügeprozess auf 10 µm Scheibenabstand verbunden werden. Im Anschluss daran erfolgt die »in-situ« PV-Aktivierung des Perowskit-Salzes. Die Abbildung auf Seite 26 zeigt den Schichtaufbau, den Fügeschritt und die Befüllung. Das Fraunhofer IWM konzentriert sich im Rahmen des Projekts »PeroTec« auf die Ausgestaltung und Optimierung des Fügeprozesses. Die Entwicklung des Glaslots übernimmt das Fraunhofer ISC. Die Schichtentwicklung, Strukturierung und Befüllung der am Fraunhofer IWM hergestellten Leermodule erfolgen am Fraunhofer ISE in Freiburg.

## Vielversprechende Ergebnisse

Arbeiten am Fraunhofer IWM konzentrieren sich auf die Ausbildung einer sicheren Glas(-lot) zu Glas(-scheiben)-fügung. Dazu werden Fügeversuche im Demonstratorformat (0,8 m × 0,6 m) durchgeführt. Prozessparameter, wie Temperatur, Lotmaterial, Unterdruck, Heiz- und Kühlprofil werden dabei variiert.

In ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Fügung mittels Glaslot funktioniert und mechanischer Belastung standhält. Die hier hergestellten Module müssen jedoch hinsichtlich Spaltbildung und ganzflächiger Verlötung verbessert werden (Abbildung unten). Auf Basis dieser Zwischenergebnisse wurden konkrete Optimierungsmöglichkeiten identifiziert. Zum einen soll durch ein im Zwischenraum angelegtes Vakuum ein gleichmäßiger zusätzlicher Anpressdruck erzeugt werden und zum anderen sollen mithilfe einer neuen Vorrichtung Temperaturunterschiede – insbesondere zwischen oberem und unterem Modul – minimiert werden. Aktuell werden zusammen mit den Projektpartnern neue Versuch(-designs) vorbereitet. Dabei wird auch die Expertise in numerischer Simulation der Gruppe Glasformgebung und -bearbeitung des Fraunhofer IWM auf dem Gebiet der Aufheiz- und Abkühlprozesse hinzugezogen.



Ober- und Unterseite eines gefügten Moduls im Querschnitt. Gut zu erkennen ist das Aufspreizen der Moduloberseite am Rand, während in Richtung Modulmitte ein Spalt durch Fügung mittels Glaslot realisiert wird.

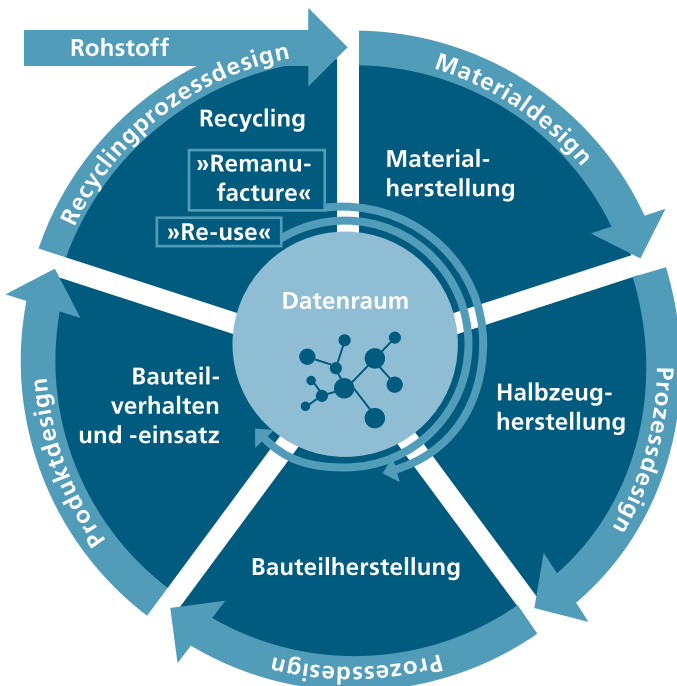
# Digitale Methoden zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Resilienz von Fertigungsprozessen

Dr. Dirk Helm, Dr. Paul Zierrep, Yoav Nahshon

Die Nachhaltigkeit und Resilienz von Fertigungsprozessen gewinnen stetig an Bedeutung. Materialeffizienz, Energie-reduktion und bessere Material- und Bauteilqualität leisten einen wichtigen Beitrag für die Reduzierung von Treibhausgasen und die Vermeidung von problematischen Stoffen (Abbildung unten). Die Gestaltung solcher Fertigungsprozesse und Produkte erfordert einen holistischen Ansatz, der den Lebenszyklus des Produkts und des eingesetzten Werkstoffs einschließt. Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems ist es erforderlich, heterogene Daten und Informationen aller relevanter Entitäten so zu erfassen, dass Wissen, Erkenntnis und Weisheit entstehen können. Hierbei helfen zum einen das FAIR-Daten-Prinzip (»Findable«, »Accessible«, »Interoperable«, »Reusable«) sowie das Verfügbarmachen und Verknüpfen von Daten aus unterschiedlichen Quellen. Damit diese Daten interoperabel verarbeitet werden können, sind gemeinsame Sprache und Verständnis von Begriffen im Sinn der Semantik zielführend. Um die relevanten semantischen Bedeutungen und Beziehungen abzubilden, haben Ontologien großes Potenzial.

## Gestaltung von Fertigungsprozessen mittels semantischer Technologien

Im Fraunhofer IWM Teilprojekt »Ontologie-basierter Datenraum und interoperable Workflows«, das im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts »StahlDigital« entstand, entwickeln wir einen Ontologie-basierten Datenraum, das »Data Space Management System (DSMS)«, in dem heterogene Daten und Datenquellen unterschiedlichen Ursprungs integriert und vernetzt werden können. Die integrierten Daten liegen hier in einer interoperablen Form vor, und die Vernetzung wird durch einen Wissensgraphen ermöglicht. So können die Daten einheitlich weiterverarbeitet werden, obwohl sie eventuell in unterschiedlichen Einheiten gespeichert sind. Zudem ist über die Ontologie der Bezug von verschiedenen Größen in Form von Wissen leicht darstellbar. Beispielsweise ist die mechanische Spannung, die in einem Zugversuch ermittelt wird, das Ergebnis einer Kraftmessung an einer bestimmten Probengeometrie unter Anwendung einer bestimmten Prüfnorm. Die Kraftmessdose wiederum ist mit weiteren Informationen verbunden, wie etwa der Modellbezeichnung, der Genauigkeitsklasse und zugehörigen Kalibrierungsinformationen. Die weitere Einbeziehung von Prozessfolgen, wie der Materialanlieferung, Probenentnahme und -fertigung und gegebenenfalls nachfolgenden Untersuchungen, erhöht den Mehrwert, sofern die Prozessfolge über eine ontologische Darlegung semantisch beschrieben und mit den entsprechenden Daten verknüpft wird. Technologisch besteht der Datenraum im Backend aus verschiedenen Speichersystemen, um die Daten und Metadaten effizient abzulegen. Zentrales Element ist eine Graphdatenbank, welche im Wesentlichen die Metadaten, jedoch nicht die Daten selbst erfasst (Abbildung Seite 29). Ergänzt wird das System über Module, die verschiedene »Microservices« anbieten, wie etwa die Datenintegration via Data2RDF-Module (RDF: »Resource Description Framework«). Suchen im Datenraum erfolgen derzeit via SPARQL-Abfragen. Die Schnittstelle für die Anwendung ist über ein GUI gegeben. Der Datenraum wird aktuell entwickelt und liegt in Form eines »StahlDigital«-Demonstrators mit Grundfunktionalitäten vor, welcher bisher im Rahmen der »Plattform MaterialDigital« demonstriert wurde.

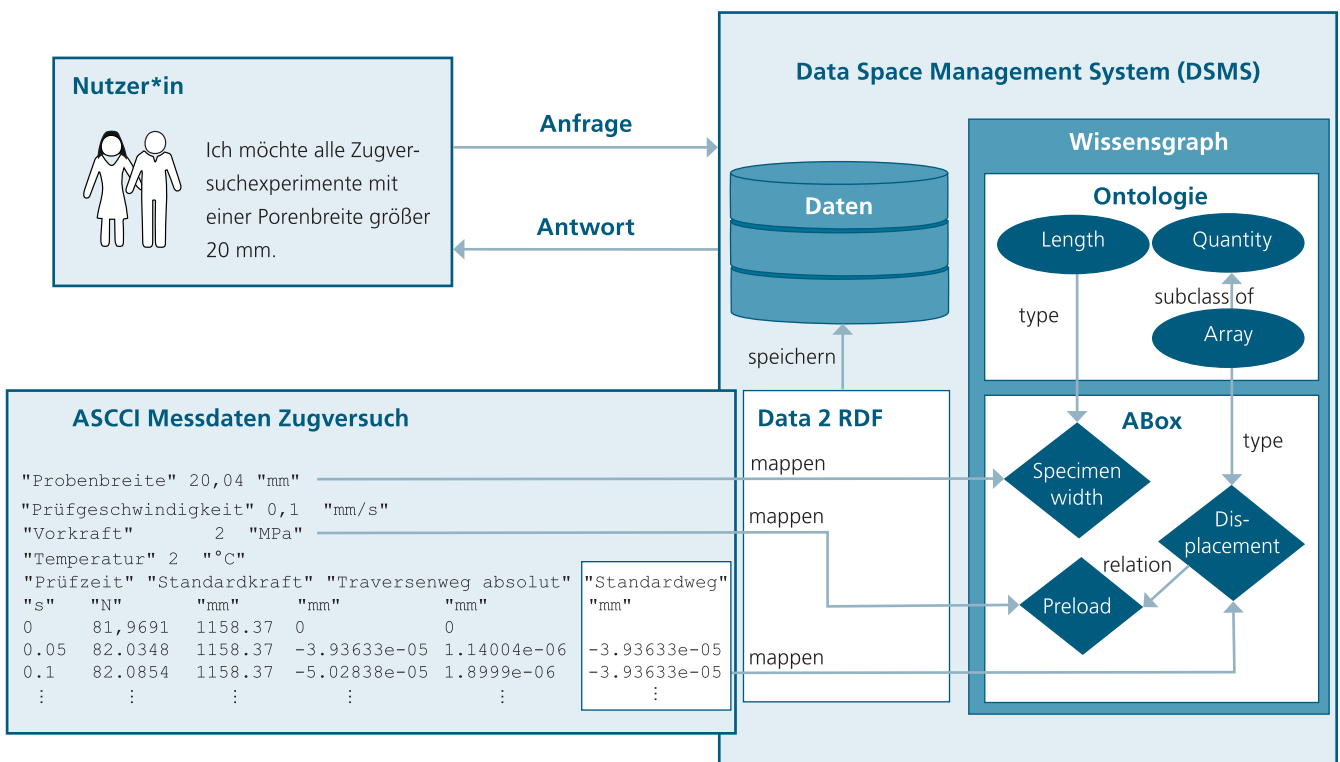


Lebenszyklus eines Werkstoffs vom Rohstoff bis zum Produkt und der Wiederverwertung.

## Nutzen für die Gestaltung nachhaltiger und resilienter Fertigungsprozesse

Im Ontologie-basierten Datenraum können heterogene Daten entlang des Lebenszyklus harmonisiert und ganzheitlich auswertbar gemacht werden. Perspektivisch wird es möglich sein, Nachhaltigkeitsdaten mit Daten der Herstellungsprozesse und der resultierenden Werkstoffeigenschaften zu verbinden, sodass der Datenraum und die semantischen Technologien die Gestaltung von nachhaltigen und resilienten Fertigungsprozessen und Produkten unterstützt. Sind beispielsweise Daten über die Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung einer Wärmebehandlung im Datenraum verfügbar, können energie-sparende Wärmebehandlungsprozesse identifiziert werden, die

zu maßgeschneiderten Eigenschaften führen. Für den einzelnen Prozessschritt mag dies trivial erscheinen. Betrachten wir jedoch komplexe Prozessketten bis zum Bauteileinsatz, ist die Frage nach einer energieeffizienten Prozessroute mit maßgeschneiderten Werkstoffeigenschaften alles andere als trivial. Um die zugehörige Prozessdesignfragestellung mit der Nebenbedingung der Nachhaltigkeit und Resilienz zu lösen, werden perspektivisch Künstliche Intelligenz oder Maschinelles Lernen auf den Daten operieren und somit Erkenntnisse und Prozessdesignentscheidungen abgeleitet werden.



Rohdaten semantisch transformieren am Beispiel eines Zugversuchs; Data2RDF.



**Wir begreifen die Tribologie immer mehr als Enabling-Technologie, mit der wir signifikante Sprünge in der Leistungsfähigkeit und in der Ressourceneffizienz von technischen Systemen für unsere Auftraggeber ermöglichen.«**

Prof. Dr. Michael Moseler,  
Geschäftsfeldleiter

### 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.



# Geschäftsfeld Tribologie

Reibung und Verschleiß berechenbar machen



**Neue Antriebssysteme, alternative Kraftstoffe, der Verzicht auf kritische Rohstoffe in Schmiermitteln aber auch in Maschinenelementen oder Wasserstofftechnologien: Sie alle bringen eine Vielzahl neuer tribologischer Fragestellungen mit sich.**

**Mit unserem kombinierten und multiskaligen Ansatz von Experiment, Analytik und Simulation in Verbindung mit der Entwicklung geeigneter Werkstofflösungen sind wir für die neuen Herausforderungen bestens aufgestellt.«**

Prof. Dr. Matthias Scherge,  
Geschäftsfeldleiter

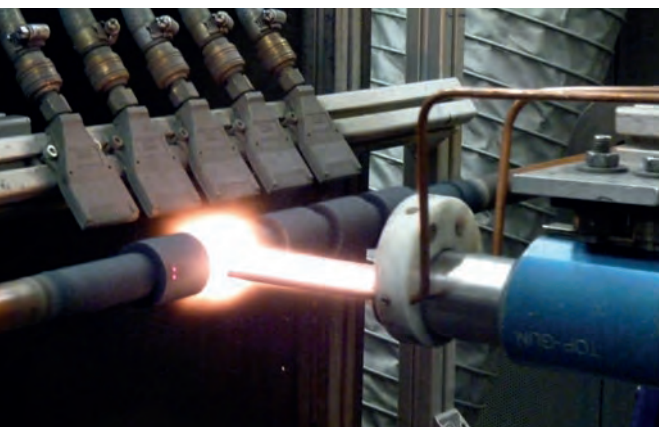
# Entwicklung und Qualifizierung einer ressourcen-effizienten Gleitlagertechnologie für Pumpen

**Dr. Andreas Kailer**

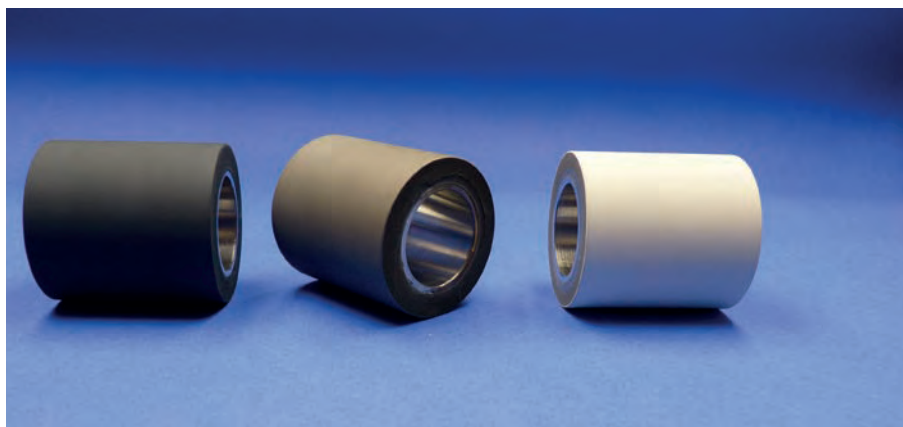
In der Chemie- und Anlagentechnik sind viele Pumpen im Betrieb, in denen die Gleitlager und Gleitringdichtungen nur durch die geförderten Medien geschmiert werden. Dabei kommen häufig Wolfram-, Nickel- und Cobalthaltige Hartmetallkomponenten und -schichten zum Einsatz. Bei einigen Rohstoffen, wie Wolfram oder Cobalt, ist jedoch die Verfügbarkeit unsicher, wohingegen andere, beispielsweise Nickel, gesundheitsbedenklich sind. Diese kritischen Rohstoffe gilt es zu ersetzen. Aus der Expertise des Fraunhofer IWM zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Keramiken in wässrigen Medien entstand das Konzept, Keramiksichten zur Substitution der Hartmetalle zu verwenden. In einer vom Land Baden-Württemberg geförderten Zusammenarbeit des Fraunhofer IWM mit dem Institut für Fertigungstechnik keramischer Bauteile (IFKB) der Universität Stuttgart sowie dem Kompetenzzentrum Spanende Fertigung (KSF) der Hochschule Furtwangen wurden neuartige keramische Schichten entwickelt und für den Einsatz in Pumpen qualifiziert.

## Entwicklung, Fertigung und Bewertung Hand in Hand

Am IFKB wurde mit dem Hochgeschwindigkeits-Suspensionsflammspritzen ein Verfahren entwickelt, mit dem keramische Schichten von hoher Qualität auf metallische Grundkörper aufgebracht werden können (Abbildung unten links). Mit diesem Verfahren ist es nun möglich, Lagerhülsen mit verschiedenen, mehrphasigen Keramiken zu beschichten. Dafür wurden am Fraunhofer IWM drei verschiedene Mischkeramiken identifiziert und in tribologischen Modellversuchen unter Berücksichtigung der pumpenspezifischen Beanspruchungen als zielführend eingestuft. Diese zeigten im Vergleich zu einem Referenzmaterial aus Hartmetall ein verbessertes oder mindestens vergleichbares Reibungs- und Verschleißverhalten. Für pumpennahe tribologische Bauteilprüfungen wurden mit den favorisierten Materialsystemen beschichtete Wellenhülsen gefertigt. Eine fertigungstechnische Herausforderung dabei war die Einstellung einer sehr guten Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit der beschichteten Gleitlager. Außerdem musste eine möglichst hohe tribologische Belastbarkeit und Korrosionsbeständigkeit erreicht werden, damit die Gleitlager später in Chemieanlagen eingesetzt werden können.



*HVFSF-Beschichtungsprozess für Lagerhülsen.*



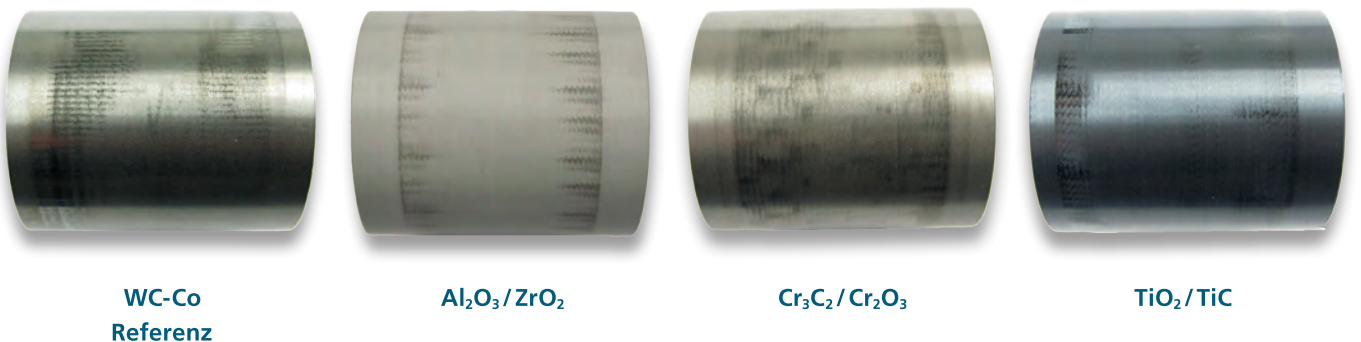
*Beschichtete Demonstratorbuchsen:  $\text{TiO}_2/\text{TiC}$  (links),  $\text{Cr}_x\text{C}_y/\text{Cr}_2\text{O}_3$  (Mitte),  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  (rechts).*

## Qualifizierung und Demonstration eines einsetzfähigen Lagersystems

Die tribologischen Bauteilprüfungen haben gezeigt, dass die keramischen Lagerhülsen hinsichtlich Reibung und Verschleiß mit Hartmetallen vergleichbar oder sogar überlegen sind. Hierbei zeigte sich vor allem im vollständig keramischen System mit einer Gleitpaarung aus einer beschichteten Wellenhülse und einer vollkeramischen Lagerbuchse das vorteilhafte Verhalten im Vergleich zum Referenzzustand. Da die keramischen Oberflächen (im Gegensatz zu Hartmetall) im Gleitkontakt in wässrigen Medien geglättet werden, werden insgesamt geringere Reibungs- und Verschleißwerte erreicht. Auch im Dauerversuch in einer von der HERMETIC-Pumpen GmbH zur Verfügung gestellten Pumpe erwiesen sich die keramikbeschichteten Lagerhülsen als sehr stabil: Selbst nach jeweils 2 000 An- und Abfahrzyklen, bei denen in der Pumpe die größten tribologischen Beanspruchungen auftreten, wurden auf den Wellenhülsen keinerlei kritische Veränderungen der Beschichtungen festgestellt. Damit ist der Funktionsnachweis erbracht und es wurde gezeigt, dass die neuen Schichten tatsächlich Hartmetallschichten ersetzen können. Gemeinsam mit den Industriepartnern wurden vielversprechende neue Möglichkeiten für

einen Transfer von Keramiksichten in Pumpenanwendungen diskutiert. Methodisch steht damit am Fraunhofer IWM nun eine Vorgehensweise zur Verfügung, mit der neue Materiallösungen zur Substitution kritischer Materialien in tribologischen Anwendungen vorzugsweise in Pumpen ermittelt, entwickelt, gefertigt und qualifiziert werden können.

Die Projektpartner danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg für die finanzielle Unterstützung und interessierte Betreuung des Projekts, sowie den Vertretenden der Firmen obz innovation gmbh, Voith Turbo GmbH & Co. KG, Voith Hydro GmbH & Co. KG, HERMETIC-Pumpen GmbH und ELBE Schleiftechnik GmbH für die intensive Begleitung und Unterstützung des Projekts.



*Wellenhülsen mit verschiedenen Keramiksichten nach der Prüfung in einer Pumpe. Wie auch die Hartmetallschicht (WC-Co Referenz), zeigen die keramischen Schichtoberflächen lediglich leichte Rattermarken und somit keinerlei als kritisch zu wertenden Veränderungen.*

# Grüne Tribologie: Auf dem Weg zur Supraschmierung in Maschinenelementen

Dr. Gianpietro Moras, Prof. Dr. Michael Moseler

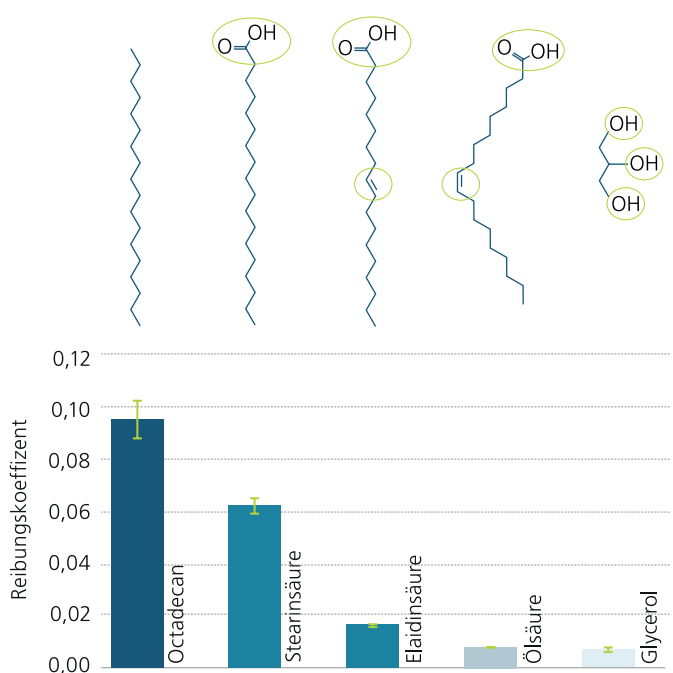
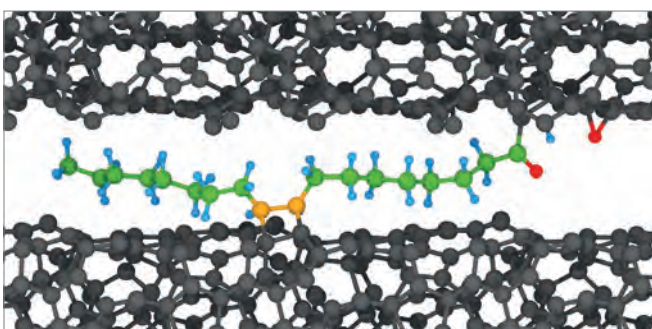
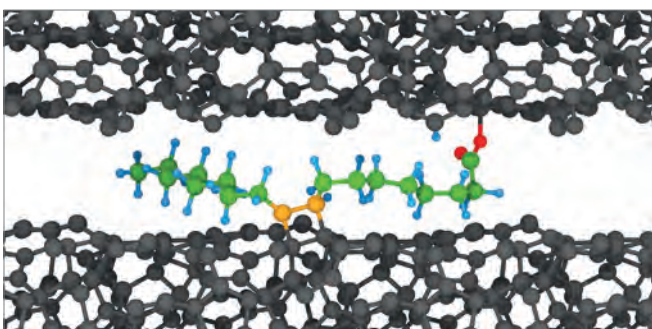
Reibungskoeffizienten von weniger als 0,01 würden in Maschinenelementen die Reibungsverluste um mehr als 90 Prozent reduzieren und den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen erheblich senken. Grundlage für tribologische Systeme mit  $\mu < 0,01$  zwischen zwei Reibpartnern ist die sogenannte Supraschmierung, die aktuell im Labormaßstab realisierbar ist. Das Fraunhofer IWM hat hier Pionierarbeit geleistet, indem die atomaren Prozesse, die bei der Supraschmierung ablaufen, erstmals für Werkstoffe wie Diamant, diamantähnlichem Kohlenstoff (engl.: »Diamond-Like Carbon«, DLC) und Siliziumnitrid beschrieben werden konnten und damit physikalisch-chemisch nachvollziehbar wurden. Dies war der Grundstein für die gezielte technische Nutzung und Übertragbarkeit der Mechanismen der Supraschmierung.

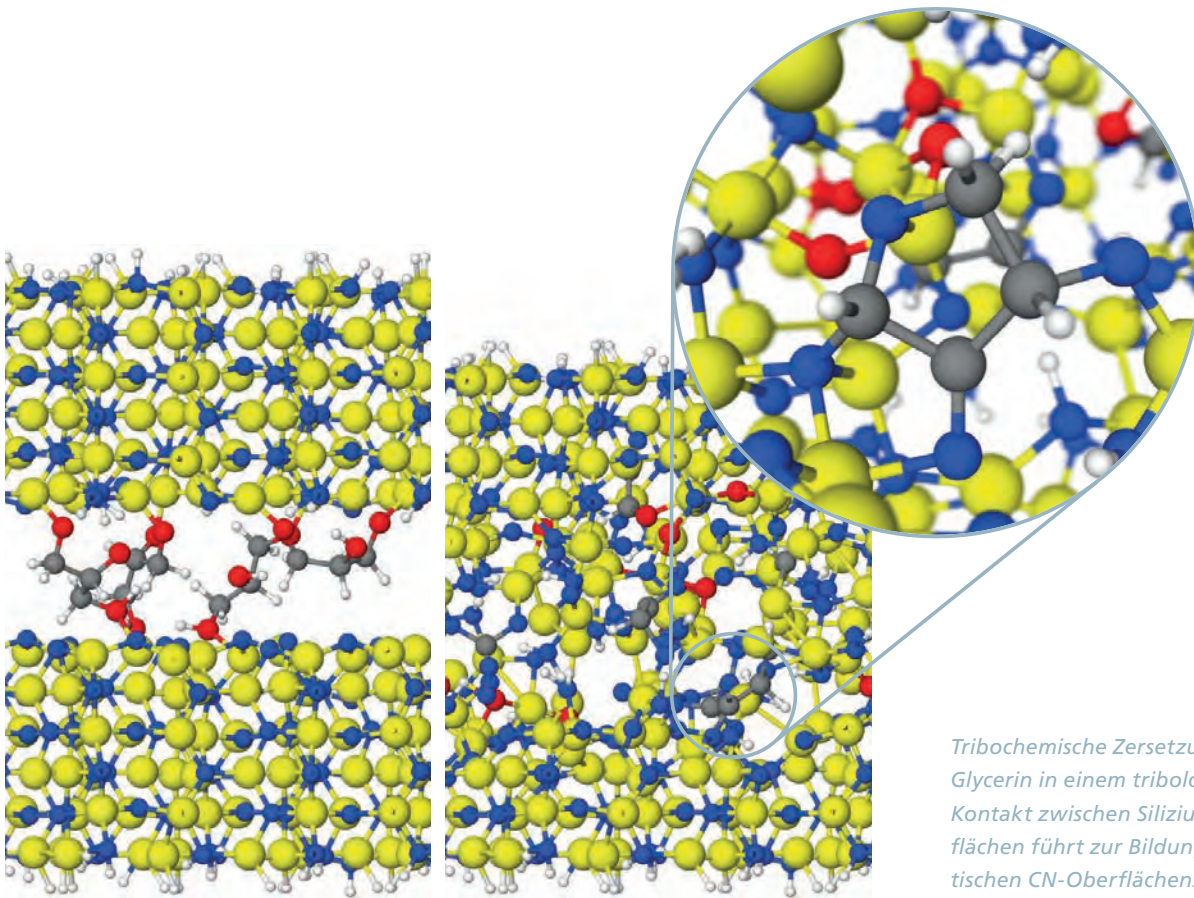
Die Expertise der atomistischen Aufklärung von Reibungsphänomenen, das molekulare Tribodesign und letztlich die kombinierte experimentelle und numerische Bewertung konkreter Modellsysteme kommen aktuell im Projekt »SupraSlide« zum Einsatz. Ein Konsortium von Fraunhofer-Instituten arbeitet daran, die Supraschmierung bei unterschiedlichen Materialsystemen in die technische Anwendung zu überführen und dafür verschiedene, mit einem Industriebegleitkreis abgestimmte Demonstratoren aufzubauen.

## Design eines supraschmierenden DLC-Reibsystems mit organischen Reibungsmodifikatoren

Mit atomistischen Simulationen und detaillierten Analysen zur Oberflächenchemie wurde ein Tribosystem mit Supraschmierung konzipiert, das jetzt umgesetzt wird: Wichtig dabei war die Verwendung von Schmierstoffen mit niedriger Viskosität zur Minimierung der hydrodynamischen Reibungsverluste. Diese erhöhen gleichzeitig das Risiko, dass das System in Grenzreibung betrieben wird, was für Reibung und Verschleiß kritisch ist. Die Kombination von tetraedrischem amorphem Kohlenstoff (ta-C) und organischen Reibungsmodifikatoren konnte hierfür als hervorragende Lösung identifiziert werden.

*Links: Molekulardynamiksimulation eines Ölsäuremoleküls, das mit seinen reaktiven Gruppen an beide ta-C-Oberflächen chemisorbiert. Das Gleiten führt zu seiner fortschreitenden Fragmentierung. Rechts: Pin-on-disc-Messungen der Reibungskoeffizienten mit verschiedenen Schmierstoffmolekülen. Grüne Kreise zeigen reaktive Teile der Moleküle an, die sehr wahrscheinlich mit den ta-C-Oberflächen reagieren.*





*Tribochemische Zersetzung von Glycerin in einem tribologischen Kontakt zwischen Siliziumnitridoberflächen führt zur Bildung von aromatischen CN-Oberflächenstrukturen.*

Supraniedrige Reibwerte werden erreicht, indem zwei amorphe, und damit inkommensurable, Oberflächen sehr glatt und vor allem chemisch passiv sind. Die Oberflächenpassivierung verhindert die Bildung starker chemischer Bindungen zwischen den gleitenden Oberflächen. Im Fall von Kohlenstoff können Oberflächen durch chemische Spezies wie Wasserstoffatome oder Hydroxylgruppen passiviert werden, oder durch die Bildung einer atomar dünnen Oberflächenschicht aus Kohlenstoff in aromatischer Form, ähnlich der amorphen Form von Graphen. In beiden Fällen erfordert der Übergang von der anfänglichen »Kaltverschweißung« zur Oberflächenpassivierung, dass der Reibungsmodifikator den Oberflächen Sauerstoff- und Wasserstoffatome zuführt. Der tribochemische Abbau des Reibungsmodifikators wird durch Molekülstrukturen begünstigt, die mehrere reaktive Gruppen aufweisen (wie Glycerin oder Ölsäure). Diese Gruppen ermöglichen den Molekülen, an beiden Oberflächen gleichzeitig zu haften, sodass sie beim Gleiten fragmentieren. Tribologische Experimente bestätigen, dass  $\mu \approx 0,01$  durch ta-C in Kontakt mit Glycerin oder Ölsäure erreicht werden kann (Abbildung Seite 34).

Darüber hinaus zeigte sich überraschenderweise, dass die Oberflächenpassivierung durch aromatische Schichten und Supraschmierung auch mit Glycerin geschmierten

Siliziumnitrid-Oberflächen erreicht werden kann. Chemische Analysen der Oberfläche und des Schmiermittels, die nach dem tribologischen Experiment durchgeführt wurden, deuten auf die Bildung einer subnanometerdicken Oberflächenschicht mit aromatischem Charakter hin, die aus Stickstoff und Kohlenstoff besteht und durch die chemische Zersetzung von Glycerinmolekülen entsteht. Atomistische Simulationen zeigen, dass die tribochemische Zerlegung von Glycerinmolekülen die selektive Oxidation von Siliziumatomen und die Bildung aromatischer Oberflächenstrukturen bewirkt. Diese ähneln in ihrer chemischen Zusammensetzung Graphen-Nitrid (Abbildung oben).

### Vom Labor in die industrielle Anwendung

Die bisher im Projekt erzielten Ergebnisse bestätigen, dass glyceringeschmierte Werkstoffe wie DLC und siliziumbasierte Keramiken eine sehr gute Wahl sind, um  $\mu \approx 0,01$  zu erreichen. Bei der Realisierung der Demonstratoren gewährleistet das virtuelle Tribodesign, dass die Bedingungen für eine effektive Supraschmierung auf der atomaren Ebene erfüllt sind, und eröffnet neue Prozessfenster für das supraschmierende Zusammenspiel von Reibpaarungen und Schmierstoff.

# Adaptive Strukturbildung sortenreiner Polyolefin-Komposite

Dr. Raimund Jaeger, Dr.-Ing. Christof Koplin

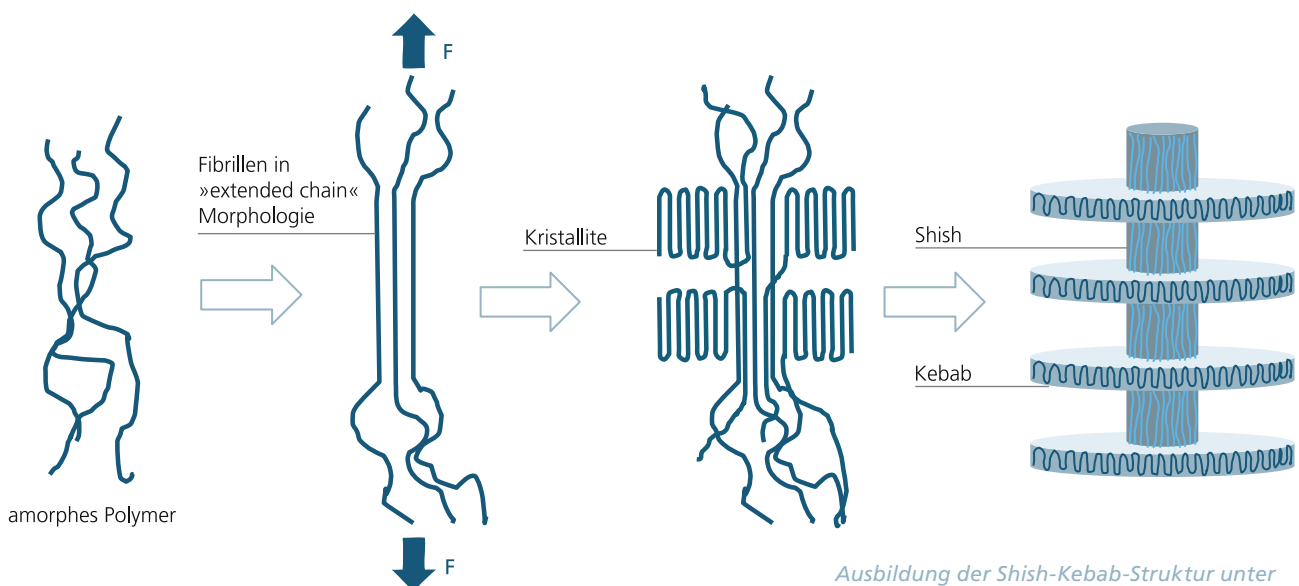
Der Übergang zur »Circular Economy« stellt vielfältige Anforderungen an Werkstoffe und die Produktentwicklung: Güter sollen zuverlässig und intensiv über lange Zeiträume in verschiedenen Anwendungen genutzt werden und nach dem Ende der Produktlebensdauer möglichst unabhängig von der Vornutzung problemlos recycelt werden können. Kunststoffe sind für nachhaltige Produkte aufgrund des verhältnismäßig geringen Energiebedarfs für die Herstellung und das Recyclen interessante Werkstoffe. Wegen ihres geringen Gewichts sind sie für Leichtbauanwendungen prädestiniert.

Insbesondere in der Polymertribologie werden bei Substitutionen von Material oder Schmierstoff maßgeschneiderte Lösungen erforderlich – mit der Bewertung und Optimierung von tribologischen Systemen kann das Fraunhofer IWM hier in der Anwendung unterstützen. Polyolefine (Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)) lassen sich energieeffizient herstellen und zählen somit zu den »low-carbon« Werkstoffen. Kunststoffe werden meist durch Fasern und Partikel verstärkt, was zur Erhöhung der elastischen und plastischen Formbeständigkeit und zu zuverlässigen und langlebigen Bauteilen führt. Allerdings lassen sich Composite schwer recyceln, da die Kunststoffmatrix von den Partikeln und Fasern getrennt werden muss. Diese Trennung erübrigt sich, wenn Matrix und Fasern aus dem gleichen Material bestehen – und einen sogenannten »sortenreinen Kompositen« bilden. Ultrahochmolekulares

Polyethylen (UHMWPE) ist ein abrasionsbeständiger Hochleistungswerkstoff, der sich aber nur in aufwendigen und energieintensiveren Verfahren auch zu hochfesten Fasern verarbeiten lässt. Forschenden des Freiburger Materialforschungszentrums (FMF) ist es nun gelungen, diese spritzgussfähig zu gestalten, indem sie Blends aus PE-Fractionen unterschiedlichen Molekulargewichts herstellen, einschließlich einer ultrahochmolekularen Fraktion. Diese Blends lassen sich mit konventionellen Verfahren verarbeiten. Treten während der Verarbeitung hohe Scherströmungen auf, wird die UHMWPE Fraktion zu Fibrillen verstreckt, die das Bauteil verstärken – so entsteht ein sortenreiner Komposit. Dessen E-Modul, Festigkeit oder Schlagzähigkeit kann im Vergleich zu konventionellem PE um einen Faktor von 4–5 erhöht werden. Da sich die verstärkenden Strukturen erst während der Verarbeitung ausbilden, lassen sich die Blends vielfach und ohne Einbußen in ihren mechanischen Eigenschaften werkstofflich recyceln.

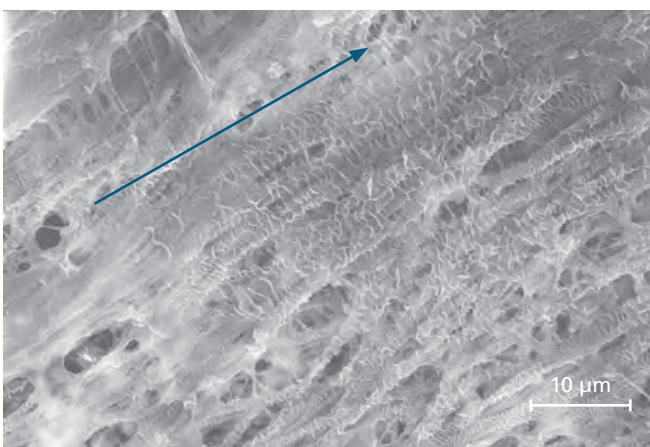
## Können Polymere tribologisch einlaufen?

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »AdapTrib« untersuchen wir nun, ob sich diese durch Orientierung verstärkenden Strukturen nicht nur während der Herstellung, sondern auch im Betrieb erzeugen lassen. Ist es möglich, den Blend durch die



Ausbildung der Shish-Kebab-Struktur unter mechanischer Belastung.

Reibung im Reibkontakt verschleißarm zu deformieren und dabei zu orientieren, sodass in der Reibspur die verstärkenden Strukturen entstehen, und können diese nachfolgend die Verschleißbeständigkeit des Bauteils erhöhen? Kann sich also ein Kunststoffbauteil an hohe Reibbelastungen anpassen, sich »adaptieren«, wie es sonst nur für metallische Bauteile beobachtet wird? Für erste tribologische Untersuchungen wurde ein Stift-Scheibe-Tribometer mit einem heizbaren Stahlstift ausgerüstet, der über eine Scheibe des Polymerblends gleitet. Durch das Aufheizen des Stifts lassen sich verschiedene tribologische Belastungssituationen gezielt simulieren, vor allem solche, bei denen im Reibkontakt die Erweichungs- oder Schmelztemperatur des Blends überschritten werden. Die verstärkenden Fibrillen kann man unter dem Rasterelektronenmikroskop an ihrer Struktur erkennen – da sie Schaschlikspießen ähneln, werden sie auch »Shish-Kebab-Strukturen« genannt (Abbildung Seite 36). Die verstärkende UHMWPE Fibrille bildet den »Spieß«, auf dem Blöcke aus Polyethylen mittleren Molekulargewichts auskristallisieren (»Kebabs«). Betrachtet man die Oberfläche einer Reibspur, über die ein 140 °C heißer Stahlstift geglitten ist, erkennt man in der Reibspur in Reibrichtung orientierte Shish-Kebab-Strukturen (Abbildung unten links). Neben der Reibspur werden nur isotrope Polyethylen-Kristallite sichtbar. Durch die tribologische Belastung können sich also die verstärkenden Strukturen ausbilden.

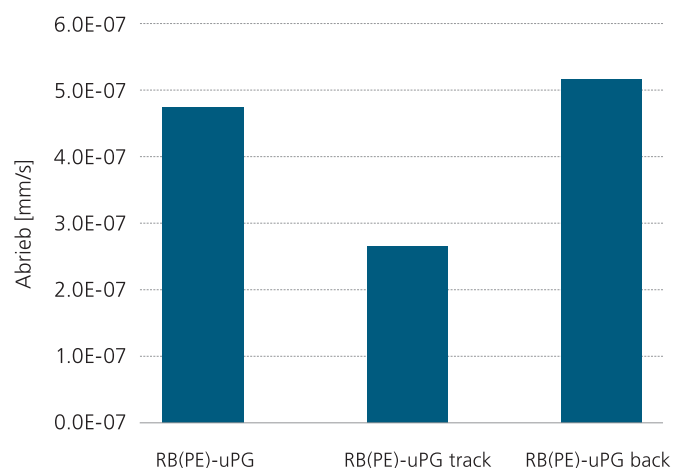


*Shish-Kebab-Struktur in der Reibspur. Der blaue Pfeil zeigt die Reibrichtung.*

### Höhere Verschleißbeständigkeit der verstärkten Reibspur

Die Verschleißbeständigkeit der so verstärkten Reibspur wurde ebenfalls mit einem Stift-Scheibe-Tribometer untersucht. Dabei wurde aus der Reibspur ein Polymerstift präpariert, der auf einer Radiallagerscheibe aus Stahl mit technischer Rauigkeit gleitet. Die Orientierung der Shish-Kebab-Struktur war in diesen Versuchen parallel zur Gleitrichtung; als Schmiermedium wurde unpolares Polyalkylenglykol verwendet. Vergleichende Messungen an Stiften mit und ohne Shish-Kebab-Strukturen ergaben, dass die verstärkenden Strukturen die Verschleißrate mindestens halbieren.

Polyolefine weisen eine hohe Medien- und Schmierstoffbeständigkeit auf. Die Verbesserung der mechanischen und tribologischen Eigenschaften durch die Strukturbildung der Blends eröffnen neue Einsatzgebiete für den Werkstoff Polyethylen. Zusammen mit den Projektpartnern wollen wir zukünftig tribologische Anwendungen identifizieren, in denen diese Eigenschaften neben der Kreislauffähigkeit der Blends wichtig sind.



*Abriebrate verschiedener Blend-Proben. Stift mit verstärkender Struktur (Mitte), Stift ohne verstärkende Struktur (links, rechts).*

# Nachhaltige und umweltfreundliche Elastomerdichtungen

**Bernhard Blug, Dr. Bernadette Schlüter**

Mit über 20 Prozent Anteil am weltweiten Energieverbrauch kann ohne eine Minimierung oder Vermeidung von Reibung und Verschleiß keine sinnvolle Energiewende vollzogen werden. Dabei entfällt ein erheblicher Teil der Reibverluste auf Dichtungen. So erzeugt eine einzelne Radialwellendichtung in einem PKW einen Verbrauch von mehr als 0,3 Gramm CO<sub>2</sub> pro gefahrenem Kilometer. In Automobilen sind teilweise viele hundert entsprechende Dichtungen verbaut, auch in Hybrid- und vollelektrischen Fahrzeugen. Durch die geringeren Verluste in Antriebsstrang und Getrieben nimmt der relative Leistungsverlust durch die Dichtungen sogar noch zu. Auch in Anwendungen wie Windkraft, Brennstoffzellen, Solarthermie, Erdwärme, Biogasanlagen und ähnlichen Bereichen bestimmen Dichtungen zu einem nicht unerheblichen Teil die Lebensdauer und vor allem den energetischen Wirkungsgrad der Energieerzeugung.

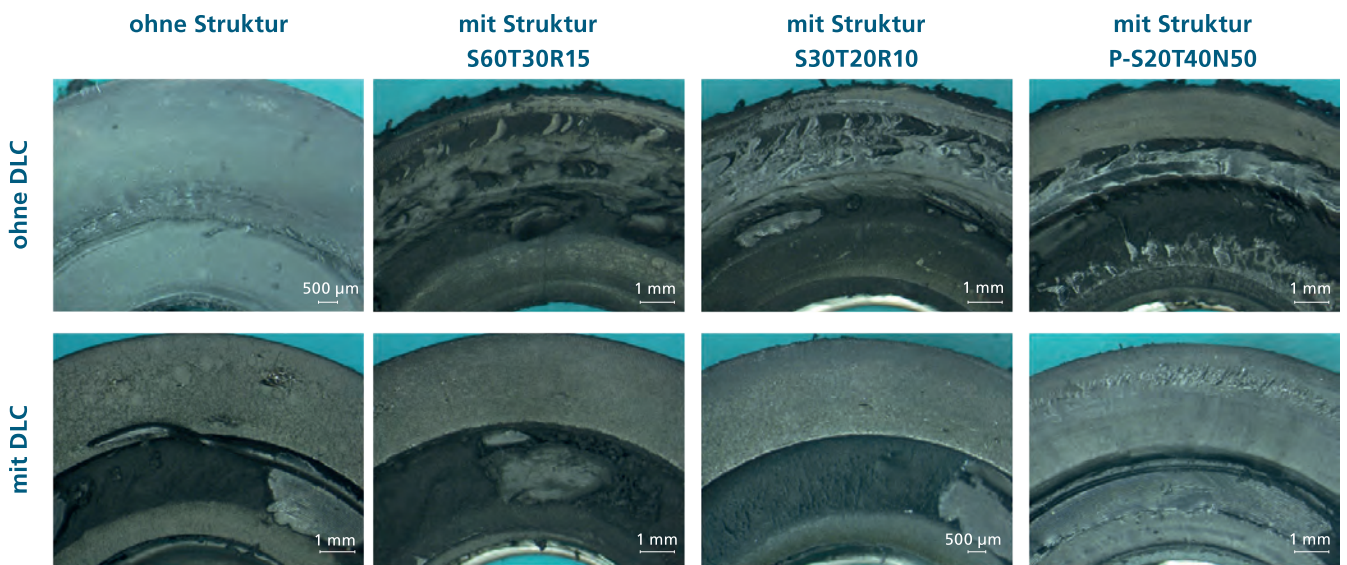
Zur Reduktion der Reibkräfte wird bei Elastomerdichtungen in der Regel das Prinzip des Abhebens der Dichtlippe über die Fliehkraft ausgenutzt. Dieses führt bei höheren Drehzahlen zu einem fast reibungsfreien Betrieb, bei niedrigeren Drehzahlen ist jedoch ein entsprechend hoher Anpressdruck nötig, um zuverlässig abzudichten. Dieser erhöhte Anpressdruck führt zu hohen Reibungen und Verschleiß, und gleichzeitig zu einem verspäteten oder sogar ausbleibenden Abheben der Dichtung. Insbesondere bei großen Dichtungen mit größeren Verwindungen wie im Windkraftbereich, die teilweise Durchmesser von über 1,5 Metern aufweisen, kann nur mit einem sehr großen Anpressdruck eine Dichtigkeit über den gesamten Betrieb gewährleistet werden. Sehr harte und reibarme diamantähnliche Kohlenstoffschichten (engl.: »diamond-like carbon«, DLC) können helfen, einerseits die Reibung zu senken und andererseits die Verschleißfestigkeit deutlich zu erhöhen. Allerdings sind DLC-Schichten in sich spröde und können von sich aus den Dehnungen der Elastomere nicht folgen, ohne zu reißen. Die Schichten »schwimmen« in diesem Fall wie ein Schuppenpanzer auf dem Material. Die Größe dieser Schuppen wird dabei von den Schichteigenschaften bestimmt. Größere Druckeigenstressungen können zum Beispiel zu großen Verwölbungen und Undichtigkeiten führen. Im tribologischen Kontakt werden die Schuppen immer kleinteiliger und begrenzen die Lebensdauer der Dichtungen.

## Strukturierte, DLC-beschichtete Elastomerdichtungen

Zusammen mit den Instituten Fraunhofer LBF und ILT hat das Fraunhofer IWM eine Kombination aus angepassten Elastomeren, einer Laserstrukturierung sowie einer entsprechenden DLC-Beschichtung entwickelt, welche den Reibwert der Dichtungen senkt, den Einsatzbereich der Dichtungen (Lasten, Temperaturen) deutlich erweitert und die Lebensdauer erheblich erhöht. Hierbei hilft vor allem die Kombination aus der Beschichtung und Strukturierung der Elastomere. Die Laserstrukturen bestimmen dabei, wie die DLC-Schichten unter starker Dehnung reißen, ohne dass dabei das Elastomer beschädigt wird oder sich die DLC-Schicht in zu kleine DLC-»Schuppen« aufspaltet. Sowohl in Zugversuchen als auch in tribologischen Tests blieben die DLC-Schichten auch bei 25 Prozent Dehnung und höher völlig intakt; der Effekt, dass sich über die Zeit immer kleinere DLC-»Schuppen« ausbilden, was sonst oft zu einer verkürzten Lebensdauer führt, bleibt aus. Die eingebrachten Laserstrukturen erfüllen dabei mehrere Zwecke: Einerseits bestimmen die Strukturen, wie und wo sich entsprechende Entlastungsrisse unter Dehnung in der DLC-Schicht bilden. Zum zweiten verhindern die Strukturen ein Aufwölben der DLC-Schichten aufgrund der hohen Eigenspannungen auf dem Elastomer. Somit sind deutlich dickere DLC-Beschichtungen auf Elastomeren möglich, ohne dass die Elastomerdichtungen im Einsatz undicht werden. Gleichzeitig dienen die Strukturen auch als Schmierstoffreservoir, sodass es vor allem in schlecht geschmierten Systemen zu einer deutlich besseren Schmierstoffverteilung auf den Dichtflächen kommt.

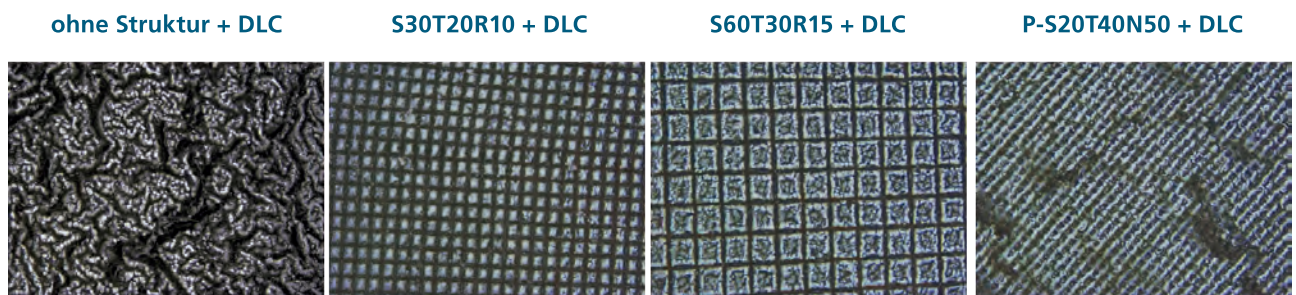
Das Zusammenspiel aus an Beschichtungen und Strukturierungen angepasste Elastomere, einer entsprechenden Strukturierung sowie einer Hochleistungsschicht ermöglichen erheblich nachhaltigere Dichtungssysteme; so können beispielsweise deutlich umweltfreundlichere und nachhaltigere Elastomere bei gleichen oder sogar besseren Einsatzbedingungen eingesetzt werden und gleichzeitig zusätzlich die Betriebsbedingungen bezüglich Einsatzlasten, Reibung und Lebensdauer signifikant verbessert werden.





nach v-sweep – 148 rpm (1 MPa)

Reibspuren (äußere Seite des Rings) auf verschiedenen strukturierten und unstrukturierten Elastomerproben mit und ohne DLC.



20-fache Vergrößerung der DLC-Beschichtungen auf Elastomer nach dem Triboversuch.



**Ein Erfolgsfaktor volldigitalisierter Entwicklungsprozesse für nachhaltige Systeme ist die Integration von Werkstoffen mit ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten.**

**Dafür entwickeln wir die geeigneten validierten und digital anschlussfähigen Werkstoffmodelle.«**

**Dr. Silke Sommer,**  
Geschäftsfeldleiterin

### **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.

# Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau

—  
Ressourceneffizienz bei maximaler Sicherheit



Wir helfen unseren Auftraggebern dabei, mit fertigungs- oder einsatzbedingten Fehlern in Werkstoffen und Bauteilen sicher umzugehen – eine Herausforderung, die im Leichtbau, in Wasserstofftechnologien oder im Fahrzeugbau gleichermaßen aktuell ist.

Mit der Kombination von experimenteller und numerischer Bauteilbewertung schaffen wir die Entscheidungsgrundlagen für Inspektion, Wartung, Reparatur und Weiternutzung.«

Dr. Michael Luke  
Geschäftsfeldleiter

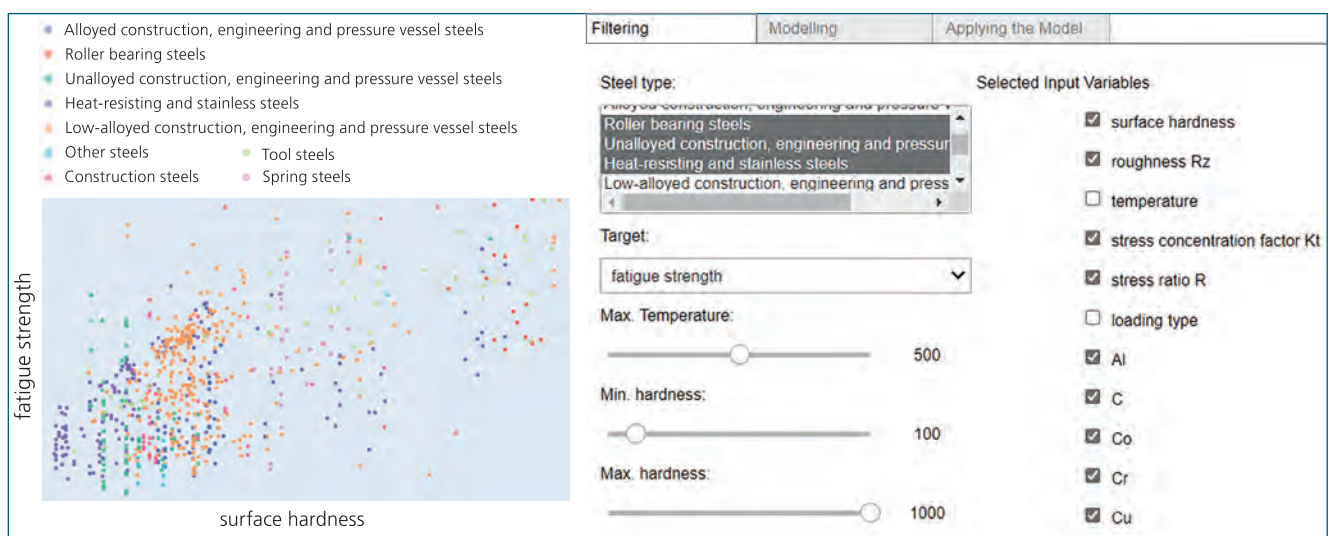
# Digitale Methoden für die Lebensdauerbewertung am Beispiel hochfester Stähle

Dr. Sascha Fliegener, Johannes Rosenberger, Dr. Michael Luke

Am Fraunhofer IWM werden digitale Konzepte geschaffen, die auf die systematische Nutzung von Werkstoffdaten für eine beschleunigte Produktentwicklung abzielen. Dem Nachhaltigkeitsgedanken folgend, können so bereits existierende Daten zielgerichtet wiederverwendet werden. Dabei ermöglichen Daten, die in entsprechend strukturierten Datenräumen und Wissensgraphen abgelegt werden, eine interoperable Anbindung verschiedener Analysewerkzeuge. Im Rahmen des Fraunhofer-internen Vorlaufforschungsprojekts »UrWerk«<sup>[1]</sup> wurde ein solcher Datenraum für den UseCase »Ermüdung hochfester Stähle« entwickelt. Dabei beeinflusst eine Vielzahl von Parametern das Ermüdungsverhalten. Sie reichen von der metallurgischen Prozessierungsrouten über verschiedene Härteverfahren, Belastungsparameter im Bauteileinsatz bis hin zu Bruchflächencharakteristika und verschiedenen Versagensmodi. In einem entsprechenden Wissensgraphen soll dazu abgebildet werden, wie sich verschiedene Parameter entlang der verschiedenen Prozessschritte entwickeln und verändern. Um Korrelationen für technische Anwendungen sichtbar zu machen und für die Lebensdauerprognose zu nutzen, wird dabei eine Datenanalyse mittels Machine Learning (ML) an den Datenraum angekoppelt.

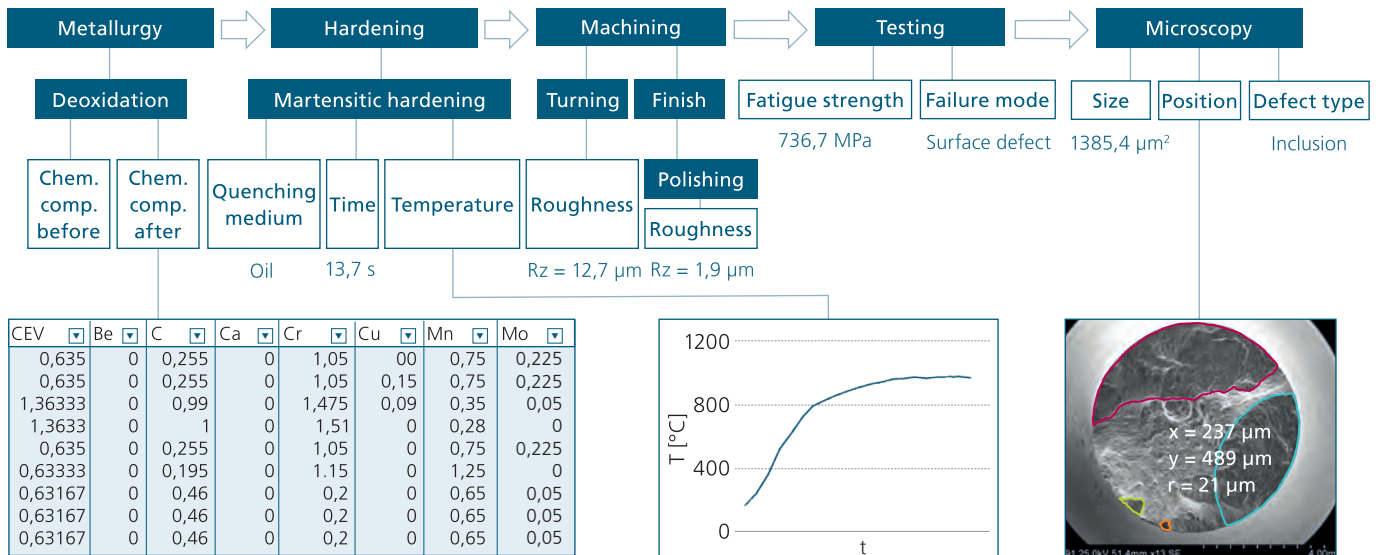
## Ermüdungs-Datensatz für hochfeste Stähle

Wir haben einen umfangreichen Datensatz zum Ermüdungsverhalten von hochfesten Stählen aufgebaut, der ca. 110 Materialien, 1 100 Serien und 22 000 Ermüdungsexperimente umfasst (Abbildung unten links). Hierzu haben wir Daten aus abgeschlossenen Projekten und der Literatur gesammelt und systematisch aufbereitet. Verschiedene Stahlgruppen gemäß der Normen DIN, SAE und JIS konnten dabei in eine hierarchische Stahlklassenstruktur überführt werden. Beispielhafte Stahlklassen sind unlegierte, niedriglegierte oder legierte Bau- und Druckbehälterstähle, Wälzlagerstähle, Edelmetalle und Werkzeugstähle. Grundsätzlich wird zwischen Daten auf Proben- und Serienebene unterschieden. Auf Probenebene werden einzelne Ermüdungsexperimente mit einer entsprechenden Spannungsamplitude und Lastspielzahl erfasst. Daten auf Serienebene sind für die jeweilige Versuchsreihe gültig und stellen meist Sekundärdaten (z. B. ausgewertete Kennwerte) dar, wie beispielsweise die Parameter der Wöhlerlinie, Dauerfestigkeit, Steigung und Abknickpunkt. Diese wurden innerhalb des Datensatzes einheitlich ausgewertet. Zusätzlich sind Eigenschaften wie die chemische Zusammensetzung, Härte, Oberflächenzustand sowie Last- und Geometrieparameter erfasst.



<sup>1</sup> Fraunhofer-internes Projekt MAVO »UrWerk – Unternehmensspezifische Werkstoff(system)-Datenräume zur beschleunigten Produktentwicklung«, Laufzeit 3/2019 bis 8/2022, Fraunhofer IWM, Fraunhofer ITWM, Fraunhofer IAIS

*Datensatz zum Ermüdungsverhalten hochfester Stähle, der eine Vielzahl verschiedener Materialklassen und Einflussgrößen abdeckt (links) und Python-basiertes ML-Tool zur Vorhersage der Ermüdungseigenschaften (rechts).*



Ausschnitt eines ontologiebasierten Wissensgraphen zur Beschreibung der Prozesskette zum UseCase »Ermüdung hochfester Stähle«.

### Wissensgraph zur Erfassung der Prozessroute

Um die Prozesshistorie des Materials zu beschreiben, werden ontologiebasierte Wissensgraphen entwickelt (Abbildung oben). Diese ermöglichen es, die Daten nicht nur tabellarisch zu erfassen, sondern entlang der Prozesskette miteinander in Beziehung zu bringen. Beispielsweise kann so die Entwicklung von Materialparametern bei verschiedenen Prozessschritten ausgewertet werden, wie die Härtewerte beim Durchlaufen der Metallurgie- und Härtungsprozesse oder die Oberflächenrauheit nach verschiedenen Schritten der mechanischen Bearbeitung. Dazu wurde eine Domänenontologie entwickelt, die die relevanten Zusammenhänge entsprechend logisch abbildet. Ein Mapping der Daten auf die Ontologiekonzepte, bevor die so erstellte Datenstruktur in eine Graphdatenbank hochgeladen wird, ermöglicht anschließend gezielte Datenabfragen entlang der Prozesskette.

### ML-basierte Auswertung der Ermüdungseigenschaften

Um eine datengetriebene Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit zu ermöglichen, haben wir im Projekt ein ML-basiertes Tool entwickelt (Abbildung Seite 42). Dieses kann in der Produktentwicklungsphase die Materialcharakterisierungsexperimente ergänzen oder teilweise ersetzen, sodass Kosten eingespart werden können. Das Software-Tool basiert auf einem Python Notebook und analysiert den zuvor beschriebenen Datensatz auf Basis einer Random Forest Regression, bei dem eine Vielzahl von Entscheidungsbäumen ausgewertet werden, die die Inputparameter je nach Relevanz gruppieren. Mithilfe des Tools können auch entsprechende Teilmengen des Datensatzes für die Analyse gefiltert werden. Das ML-Modell wird an den selektierten Daten trainiert und die Vorhersagegüte mittels Kreuzvalidierung auf Testdaten überprüft. Anschließend ist es möglich, Materialeigenschaften wie die Ermüdungsfestigkeit, die Steigung der Wöhlerlinie und den Abknickpunkt basierend auf Parametern wie der chemischen Zusammensetzung, Härte, Rauheit und Belastungsart vorherzusagen.

Auf Wissensgraphen basierte, semantisch strukturierte Materialdatenräume ermöglichen eine interoperable Anbindung von Datenanalysetools, um die Entwicklung von Werkstoffeigenschaften während der Prozessroute nachzuverfolgen. Mit ML-Methoden können Eigenschaften wie die Ermüdungsfestigkeit basierend unter anderem auf chemischer Zusammensetzung, Oberflächenzustand und Belastungsart vorhergesagt werden und somit bereits in einem frühen Stadium für die Produktentwicklung genutzt werden.

# CO<sub>2</sub>-bindende Materialien: Technisch und ökologisch nachhaltig bewertet

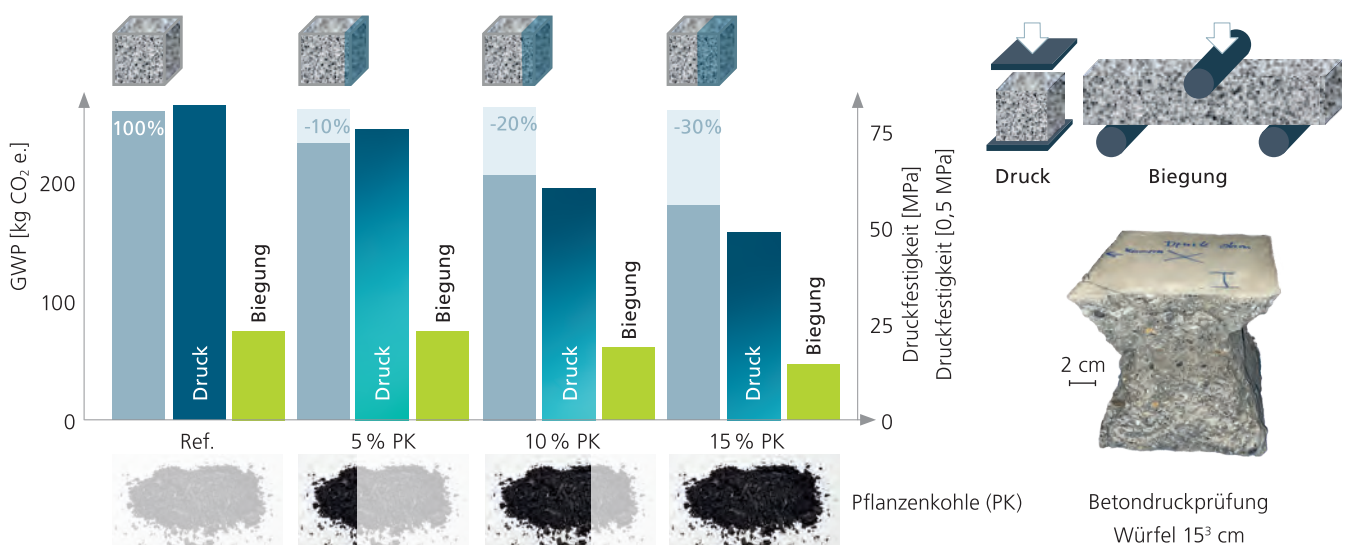
Frank Huberth, Florian Dittmann, Dr. Monika Gall

Als zentrales Zukunftsthema stellt der Klimawandel zusammen mit der Ressourceneffizienz eine wesentliche Herausforderung für die Material- und Werkstoffforschung dar. Am Fraunhofer IWM wird deshalb die Bewertungskompetenz um Aspekte der Nachhaltigkeit und neuer Anwendungs- und Werkstoffbereiche erweitert. Beton und der Anwendungsbereich Bau sind dafür beispielhaft. Diese Thematik ist Gegenstand des umfassenden Projekts »Einsatz von kohlenstoffbasierten Materialien im Schienenverkehr als Mittel zum Klimaschutz«, in dem Atmosphären-CO<sub>2</sub>-bindende Materialien für die Infrastruktur des Schienenverkehrs betrachtet werden.

## CO<sub>2</sub>-Bindungspotenzial der Materialien

Materialien und Werkstoffe bieten großes Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und werden zukünftig neben der technischen Eignung auch bezüglich Klimawirkung bewertet und ausgewählt. Ein Maß dafür ist das Treibhauspotenzial (engl.: »Global Warming Potential«, GWP), bemessen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e). Zur Einhaltung der Klimaziele sind zusätzlich zur langfristigen Emissionsreduktion, kurzfristig realisierbare, dauerhafte CO<sub>2</sub>-Senken erforderlich, die durch

eine CO<sub>2</sub>-speichernde Wirkung ein negatives Treibhauspotenzial aufweisen. Werkstoffe werden durch nachhaltigere, z. B. kohlenstoffbindende, Materialien substituiert. Aufgrund ihres Potenzials für den Klimaschutz und der extremen Menge des jährlich eingesetzten Materials entwickelte sich die Untersuchung der Beimengung von kohlenstoffbindender Pflanzenkohle (PK) in Beton zu einem zentralen Aspekt des Projekts. Die Basis des Vorhabens bildet eine ausführliche Recherche zu Materialien, die CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre binden, und deren Prozessen. Diese Prozesse können unterschiedlicher Art sein; der natürliche Wachstumsprozess von Biomasse ist nach aktuellem Stand der effizienteste. Die Nutzung von Biomasse wie Holz erfolgt in verschiedenen Formen, wie Stammholz, Industrieholz, Waldrestholz oder Abfällen aus der Holzindustrie und Landschaftspflege. Die Holznutzung von Stammholz kann direkt erfolgen, andere Hölzer müssen hingegen mechanisch zerkleinert oder chemisch aufgeschlossen weiterverarbeitet werden. Im Sinne einer Kreislauf- oder Kaskadennutzung ist die direkte stoffliche Nutzung zu bevorzugen. Waldrestholz oder Holzabfälle sollten nicht der thermischen Verwertung zugeführt werden, bei der CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, sondern durch die pyrolytische Umwandlung, unter Ausschluss von Sauerstoff, einer sowohl stofflichen als auch energetischen Kaskadennutzung zugeführt werden. Die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs



Betonbewertung: GWP und Festigkeit unter Druck und Biegung mit und ohne PK (Literaturwerte: konventioneller Referenzbeton Ref. hergestellt nur mit CEM 42,5 und Betonkiessand 0/8 im Vergleich mit Beton mit PK-Beimengungen als Zementersatz in Höhe von 5, 10 und 15 Prozent Masseanteil PK relativ zum Referenzzementanteil) (links); Betonprüfung: Skizze der Druck- und Biegeprüfung, Druck geprüfte Würfelprobe (rechts).

erfolgt in der so erzeugten Pflanzkohle. Diese bringt als Zementersatz und Füllstoff ein negatives, also CO<sub>2</sub>-senkendes, GWP von -1,8 bis -2,4 CO<sub>2</sub>e / kg PK in den Beton ein.

### Infrastruktur Schienenverkehr: Spannbetonschwelle und Pflasterstein

Für verschiedene Bereiche des Schienenverkehrs wurden mit Unterstützung des Projektpartners, der Railistics GmbH, Anwendungen mit großem Substitutionspotenzial identifiziert. Ein Beispiel mit großem Anwendungsvolumen ist die Nutzung von PK-Beton als Material für Spannbetonschwellen, dem markantesten Streckenbauteil des Schienenverkehrs. Literaturrecherchen ergaben, dass eine Substitution des Zements durch bis zu 5 Massenprozent Pflanzkohle die Biegezugfestigkeit des Betons nicht beeinflusst und die Druckfestigkeit sogar steigert (Abbildung Seite 44). Auch bei einer Substitution des Zements mit bis zu 10 Massenprozent Pflanzkohle bleibt die Druckfestigkeit nach Literaturangaben im Vergleich zum Referenzmaterial erhalten. Unter der Annahme einer Substitution des Zements mit bis zu 5 Massenprozent Pflanzkohle

ergeben sich bei Beton der Festigkeitsklasse C45/55 etwa für Schwellen aus Beton nach DIN EN 13230-1 potentiell rund 15 Prozent GWP-Reduktion durch den Kohlenstoff-Senkeneffekt der Pflanzkohle. Bei einer Menge von jährlich 2 Millionen ausgetauschten Spannbetonschwellen im deutschen Schienennetz ergibt sich ein rechnerisches Potenzial von 3 660 Tonnen eingesetzter Pflanzkohle und somit eine GWP-Reduktion von 6 600 Tonnen CO<sub>2</sub>e jährlich. Weniger beanspruchte Komponenten können mit noch höheren PK-Anteilen gefertigt werden und trotzdem hinreichende Festigkeitseigenschaften aufweisen. Für primär auf Druck belastete Betonpflastersteine kann bei 10 Prozent PK-Beimengung eine potenzielle GWP-Reduktion von rund 30 Prozent erreicht werden, bei höheren PK-Anteilen entsprechend mehr. Die Beimengung von Pflanzkohle in Beton stellt ein enormes Potenzial zur Senkung des GWP von Betonbauteilen dar.

Zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften des PK-Betons werden am Fraunhofer IWM Betonwürfelproben mit PK-Beimengungen erfolgreich gefertigt und in einer mechanischen Festigkeitsprüfung mit Referenzbeton verglichen. Damit konnte am Institut für diese Materialien eine neue Kompetenz erfolgreich etabliert werden.



Entwicklung der Eisenbahnschwelle (v. r. n. l.): Traditionelle Holzschwelle, aktuell eingesetzte Spannbetonschwelle und zukünftig mögliche kombinierte Schwelle aus Spannbeton mit Pflanzkohle.

# Entwicklung eines Simulationsverfahrens für akustisches Design von Polymerblends

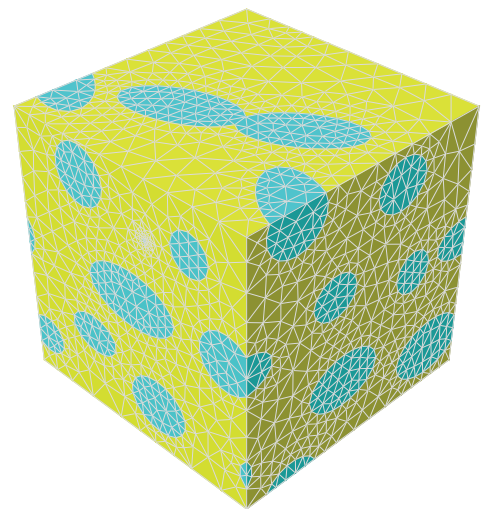
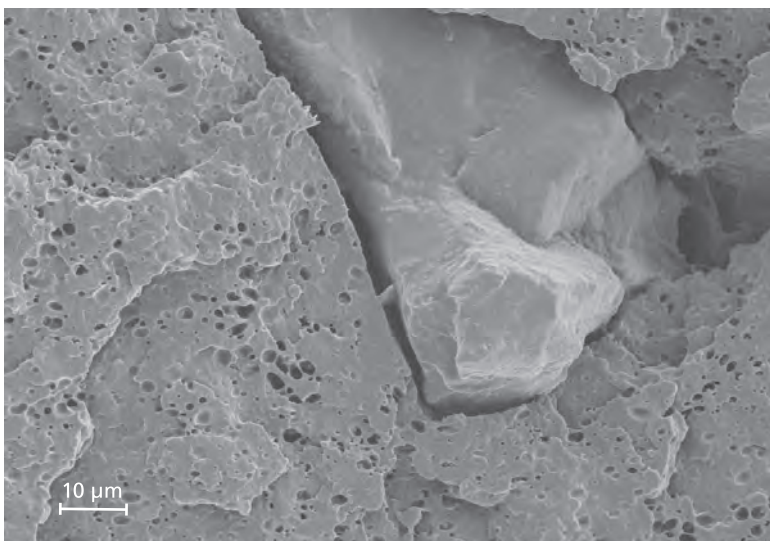
Dr. Carla Beckmann, Dr. Jörg Hohe

Elektrokleingeräte wie Staubsauger, Küchenmixer und Heckschere erleichtern uns im Alltag die Arbeit erheblich. Ihr Einsatz bedeutet jedoch häufig, einen hohen Lärmpegel aushalten zu müssen. Bereits im Leerlauf sind diese Geräte unangenehm laut, da das Gerätegehäuse zumeist aus einem spritzgegossenen Kunststoffbauteil ohne lärmsenkende Wirkung besteht. Die Erfüllung der mechanischen Anforderungen der Geräteschutzhülle bei zugleich geringem Gewicht ist auf den ersten Blick sehr benutzungsfreundlich. Eine akustisch dämpfende Wirkung besitzt ein solches Gehäuse jedoch nicht. Da durch Spritzguss hoch funktionalisierte, optisch ansprechende und ergonomisch geformte Gehäusestrukturen hergestellt werden können, wird zur Senkung des Lärmpegels Potenzial in einer Materialoptimierung gesehen. Der verfolgte Lösungsansatz ist die Entwicklung von Polymerblends bestehend aus einer Polymermatrix und Partikeln mit akustisch dämpfender Wirkung.

## Ressourcenschonende Materialoptimierung durch Modellierung

Für eine ressourcenschonende und zeiteffiziente Entwicklung wurde am Fraunhofer IWM ein Modellierungsverfahren entwickelt, mit dem sich mechanische und akustische Eigenschaften verschiedener Polymerblends vorhersagen lassen. Hierfür werden Finite-Elemente-Modelle mit einer periodischen Struktur bestehend aus kugel- oder auch ellipsoidförmigen Partikeln generiert, die in einer Matrix eingebettet sind. Der Partikelgehalt kann variieren und die Partikelorientierung einheitlich oder zufällig sein (Abbildung unten rechts).

Das nichtlineare, viskoelastische und zeitabhängige Materialverhalten von Matrix und Partikeln wird durch ein hyperelastisches sowie viskoelastisches Stoffgesetz modelliert. Zur Auffindung eines Polymerblends mit akustisch optimierten Eigenschaften bei gleichzeitiger Erfüllung der mechanischen Anforderungen wird eine Parameterstudie durchgeführt. Hierbei wird sowohl das Verhältnis von Partikel- zu Matrixelastizitätsmodul als auch das Verhältnis der Prony-Parameter, durch die die akustisch dämpfenden Eigenschaften beschrieben werden, variiert.



Mikrostruktur eines Polymerblends mit einer Polypropylenmatrix mit Einschluss aus einem artfremden Polymer (links) und Finite-Elemente-Modell (rechts).



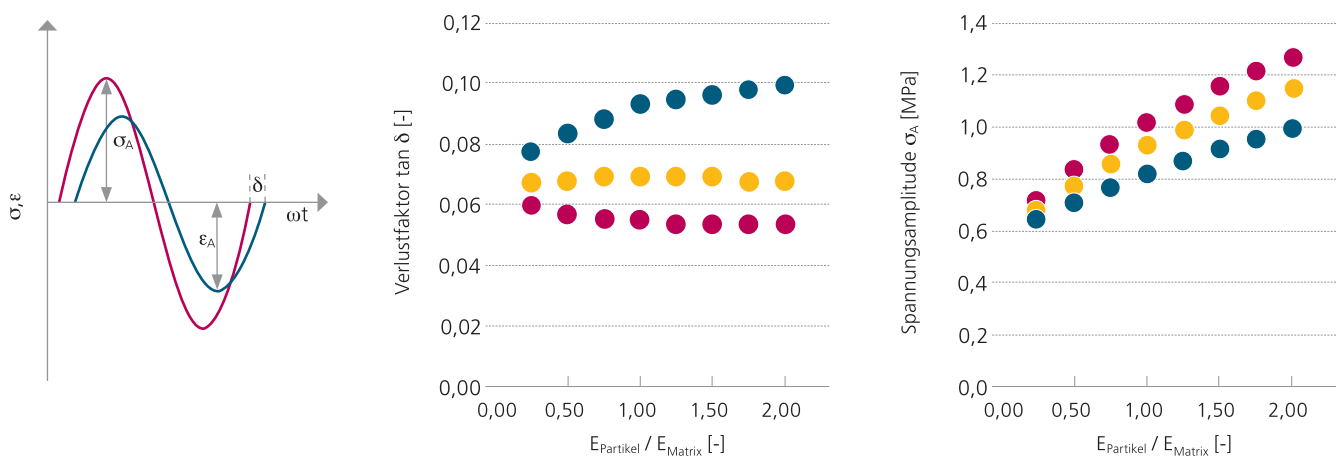
Durch eine numerisch durchgeführte dynamisch-mechanische Analyse (DMA) werden die mechanischen und akustischen Eigenschaften für Polymerblends mit variierendem Partikelgehalt für verschiedene Schwingungsfrequenzen bestimmt. Aus der Phasenverschiebung  $\delta$  zwischen aufgebrachtener Verformung und resultierender Beanspruchung kann der Verlustfaktor  $\tan \delta$  bestimmt werden, der ein Maß für die akustische Dämpfung darstellt. Das mechanische Verhalten des betrachteten Polymerblends wird durch Bestimmung der Spannungsamplitude charakterisiert (Abbildung unten).

### Akustische und mechanische Eigenschaften

Die Ergebnisse für eine Anregungsfrequenz von 50 Hz basieren auf einem Polymerblend mit einem Partikelanteil von 20 Volumenprozent (Abbildung unten rechts). Während für die Matrix Polypropyleneigenschaften angenommen wurden, wurden die Partikeleigenschaften gezielt variiert. Es zeigt sich, dass die Zugabe von Partikeln mit einer gegenüber dem Matrixmaterial stärkeren dämpfenden Wirkung auch das Dämpfungsverhalten des Polymerblends verbessern. Das Ausmaß ist jedoch stark abhängig von dem Verhältnis von Partikel- zu Matrixelastizitätsmodul. Bei Partikeln, die weicher als das Matrixmaterial

sind, ist die dämpfende Wirkung eher gering, da beim betrachteten Partikelanteil die Steifigkeit der Matrix so groß ist, dass das Materialverhalten der Partikel unter Belastung nahezu keine Bedeutung hat. Umgekehrt ist ein Sättigungseffekt in der dämpfenden Wirkung für Polymerblends mit gegenüber dem Matrixmaterial steiferen Partikeln zu beobachten. Dies ist darin begründet, dass die dämpfende Wirkung der Partikel nicht deutlich stärker ist als die für das Matrixmaterial.

Verbesserte akustische Eigenschaften können zu verschlechterten mechanischen Eigenschaften führen (Abbildung unten rechts). So ist beim akustischen Design von Polymerblends zu beachten, dass das Matrixmaterial in seinen mechanischen Eigenschaften oberhalb von den für die Anwendung benötigten Anforderungen liegt. Wie die numerische Materialmodellierung zeigt, ist bei der Wahl des Partikelmaterials darauf zu achten, dass dessen Elastizitätsmodul im Bereich des Matrixelastizitätsmoduls liegt und zudem gegenüber dem Matrixmaterial deutlich verbesserte Dämpfungseigenschaften besitzt. Sind diese Bedingungen erfüllt, können die akustischen Eigenschaften spritzgegossener Polymerbauteile durch Verwendung von akustisch optimierten Polymerblends in einem ganzheitlichen Ansatz verbessert werden.



DMA-Prinzipsskizze (links) und Ergebnisse für Polymerblends mit 20 Volumenprozent Partikel bei einer Frequenz von 50 Hz und einer dämpfenden Wirkung des Partikelmaterials, die größer (blau), gleich (gelb) bzw. kleiner (rot) als die des Matrixmaterials ist (rechts).

# Neue Prüftechniken für die Werkstoffcharakterisierung unter Hochdruckwasserstoffatmosphäre

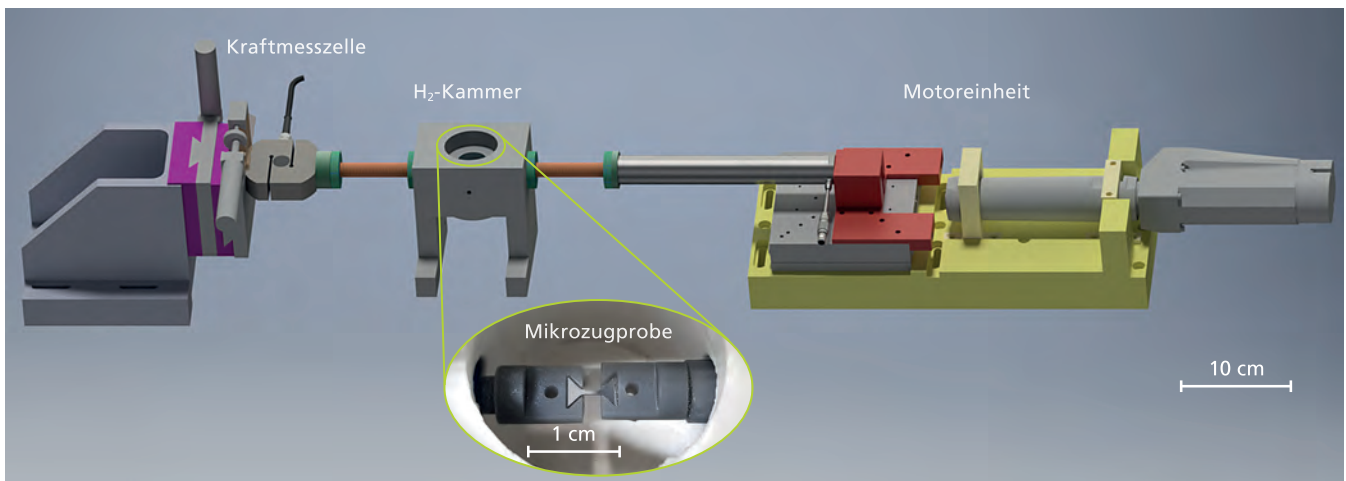
**Dr. Manuel Schmitz-Elbers**

Das Fraunhofer IWM bewertet im Rahmen der Wasserstoff-Leitprojekte des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), »H<sub>2</sub>Mare« und »TransHyDE«, Stahlwerkstoffe, die in Pipelines und Röhrenspeichern der Wasserstoffinfrastruktur zum Einsatz kommen. Dafür werden die eingesetzten Werkstoffe unter Hochdruckwasserstoffatmosphäre (bis 200 bar) in quasistatischen Zugversuchen, Ermüdungsversuchen sowie Risswachstumsversuchen charakterisiert. Ziel der Versuche ist es, die Auswirkungen des Wasserstoffs auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Bauteile zu ermitteln und bewerten zu können.

In enger Kooperation mit dem Projektpartner Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) werden dieselben Untersuchungen an verschiedenen Versuchsaufbauten durchgeführt. Vor dem Hintergrund des immensen Untersuchungsbedarfs von Werkstoffen für die Wasserstoffwirtschaft ist die Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit von Messergebnissen essenziell.

## Mikroprobenprüftechnik zur Bewertung von Schweißnähten

Schweißnähte sind in vielen Bauteilen der Wasserstoffinfrastruktur ein kritisches Konstruktionselement. Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und Schweißgut haben entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit und Langlebigkeit eines Bauteils. Die in den Prüfnormen angegebenen Probengeometrien für Makroproben (mit Probenquerschnitten im Bereich von einem Quadratzentimeter) sind in ihren Abmessungen oftmals zu groß für die Charakterisierung einzelner Schweißnahtzonen. Dadurch stößt die Aussagekraft dieser Untersuchungen hier an ihre Grenzen. Deshalb arbeitet das Fraunhofer IWM an der Weiterentwicklung seiner auf diese Fälle spezialisierten Mikroprobenprüftechnik. Die in der Meso- und Mikromechanik eingesetzten Mikroproben haben typischerweise einen Querschnitt von unter einem Quadratmillimeter. Damit lassen sich die mechanischen Eigenschaften verschiedener Bereiche, beispielsweise von Rundschweißnähten, gezielt unter Wasserstoffeinfluss charakterisieren.

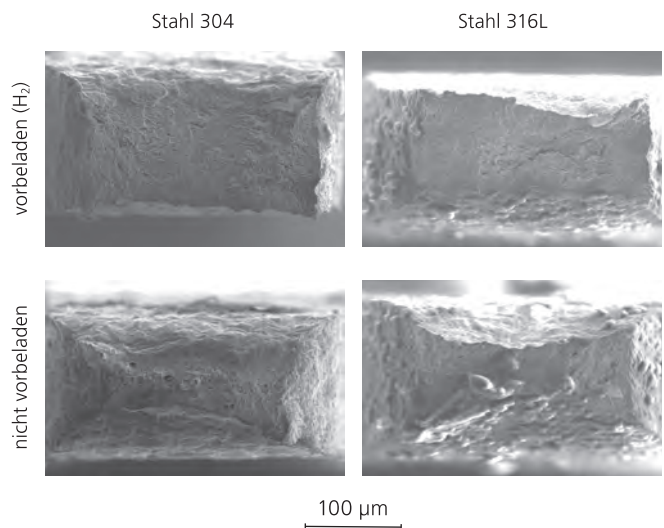
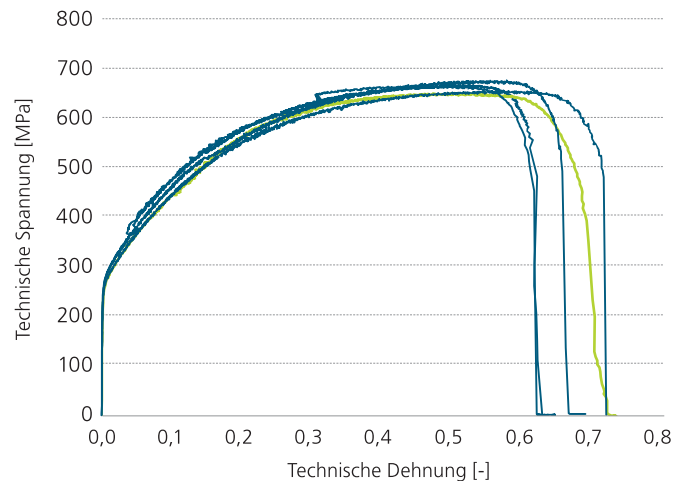


*Schematische Darstellung einer Mikrozugapparatur mit integrierter Hochdruckwasserstoffkammer. Die Infrastruktur zur Beladung der Kammer mit H<sub>2</sub> ist nicht dargestellt. Detailansicht: Probenhalter mit eingelegter Mikrozugprobe.*

Um die Übertragbarkeit von Messergebnissen von Makro- auf Mikroproben zu gewährleisten, wurden erste Versuche an mit Druckwasserstoff vorbeladenen Mikroproben durchgeführt. Exemplarisch wurde dies mit zwei gut charakterisierten austenitischen Stählen (304 und 316L) gezeigt. Bei Raumtemperatur besitzen diese Stähle eine niedrige Wasserstoffdiffusionsrate, sodass vorbeladene Proben zeitnah nach der Beladung in quasistatischen Zugversuchen an Luft untersucht werden können. Im Unterschied zu Literaturergebnissen an Makroproben sehen wir für den Stahl 304 bei den Mikroproben keine drastische Abnahme der Bruchdehnung unter Einfluss von Wasserstoff. Eine Untersuchung der Bruchflächen im Rasterelektronenmikroskop liefert über die deutlich geringere Querschnittsabnahme in den vorbeladenen Proben aber ein klares Indiz für eine Versprödung des Werkstoffs. Das Fraunhofer IWM arbeitet aktuell daran, die beobachteten Unterschiede in der Bruchdehnung zwischen Makro- und Mikroproben aufzuklären. Über die geringere Querschnittsabnahme (Einschnürung) in den vorbeladenen Proben lässt sich eine Wasserstoffversprödung aber bereits zum jetzigen Zeitpunkt auf Mikroprobenebene nachweisen.

Im Rahmen der Wasserstoffleitprojekte wird die Mikroprobenprüftechnik nun einen entscheidenden Schritt vorwärts machen: Statt unter Vorbeladung werden Mikrozugproben künftig direkt in H<sub>2</sub>-Atmosphäre (»in-situ«), bis 100 bar quasistatisch und zyklisch untersucht. Speziell dafür wurde ein H<sub>2</sub>-Mikroautoklav entwickelt und aufgebaut. Aktuell befindet sich dieser in der Testphase. Er wird die Expertise des Fraunhofer IWM zur skalenübergreifenden Charakterisierung von Werkstoffen unter Wasserstoffeinfluss entscheidend erweitern.

Die Mikroprobenprüftechnik leistet einen wichtigen Beitrag zu einer sicheren Wasserstoffinfrastruktur, indem sie neue Möglichkeiten eröffnet, kleine Bauteile wie Sensoren, dünnwandige Komponenten oder lokale Eigenschaften kritischer großer Bauteile effizient zu bewerten.



Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Zugversuchen an unbeladenen und vorbeladenen Mikroproben (Stahl 304) (oben). REM- Bruchflächenaufnahmen von Mikroproben aus den austenitischen Stählen 304 und 316L (unten). Vorbeladene Proben zeigen eine deutlich reduzierte Querschnittsabnahme.



Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft erfordert die Umwidmung von Infrastruktur zum Transport, die Qualifizierung und Bewertung von Komponenten für Langzeitspeicher sowie die Erzeugung von Prozesswärme für die Stahlherstellung, um nur drei Beispiele zu nennen. Hierbei sind Kunden auf zuverlässige Aussagen zur Lebensdauer der eingesetzten Bauteile und Werkstoffe angewiesen.

Der Bedarf an Systemen zur effizienten Energiewandlung und -speicherung rückt Funktionsmaterialien und ihre Zuverlässigkeit immer stärker in den Vordergrund. Unser Antrieb ist es, unsere Kunden bei der Entwicklung von Funktionsmaterialien durch Simulationskompetenz und Analytik zu unterstützen.«

Dr. Christoph Schweizer,  
Geschäftsfeldleiter

# Geschäftsfeld Werkstoffbewertung und Lebensdauerkonzepte

## Zuverlässigkeit in Energiesystemen

### 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.

*Inverse Polfiguren und rekonstruierte Korngrenzen einer IN100 Gusslegierung.*

# Simulationsgestützte Entwicklung und Qualifizierung von neuen Legierungen für die additive Fertigung

Dr. Johannes Preußner, Dr. Valerie Friedmann

Gewichtsreduzierung spielt in der Mobilität eine entscheidende Rolle, um Ressourcenschonung und Klimaschutz voranzutreiben. Hierfür sind hohe mechanische Festigkeiten für leichte und additiv gut herstellbare Werkstoffe nötig, womit ein gewichtsreduziertes Design ermöglicht wird. Für die pulverbettbasierte additive Fertigung (engl.: »Laser Powder Bed Fusion«, LPBF) werden aktuell fast ausschließlich Aluminium-Silizium-Legierungen eingesetzt, deren Festigkeit deutlich geringer gegenüber hochfester Aluminiumknetlegierungen ist. Der direkte Übertrag von hochfesten Aluminiumlegierungen auf die additive Fertigung ist meist nicht möglich, da die Legierungen während der Herstellung zu Rissbildung neigen. Um die Potenziale der Gewichtseinsparung und hoher Festigkeiten auch bei hohen Temperaturen auszuschöpfen, wurde für die Legierungsentwicklung ein virtueller Workflow zum beschleunigten Screening von Legierungselementen entwickelt. Anschließend wurden Ziellegierungen additiv gefertigt und umfassend charakterisiert.

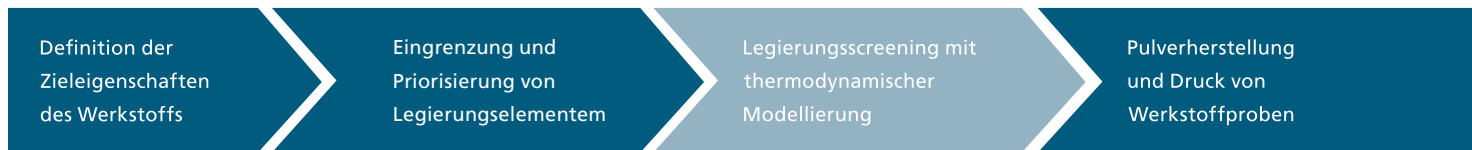
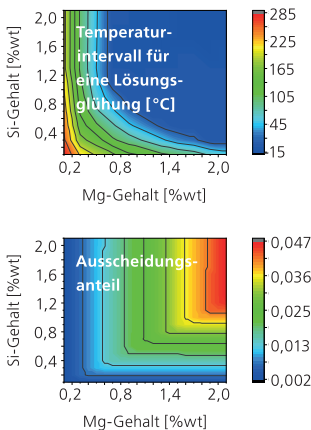
## Virtuelles Screening von Legierungen

Die Herausforderung besteht darin, aus der Vielzahl möglicher Kombinationen von Legierungselementen Entscheidungen zu konkreten chemischen Zusammensetzungen zu treffen, die im Anschluss für Versuche gefertigt werden können. Hierfür wurden automatisierte thermodynamische Simulationen (hier: Thermocalc und Schnittstelle Thermocalc-Python) zur Erstellung von Erstarrungspfaden, Phasendiagrammen und Phasengleichgewichten eingesetzt. Im konkreten Fall wurden für verschiedene Aluminiumlegierungen anhand der chemischen Zusammensetzung Eigenschaften berechnet, die für die Prozessierung und den Einsatz der Legierung relevant sind. Aussagen zu berechneten Erstarrungsintervallen geben Hinweise bezüglich der Neigung zur Heißrissbildung im Fertigungsprozess. Berechnete Temperaturintervalle für eine Lösungsglühbehandlung dienen unter anderem als Maß für die Prozessierbarkeit. Die Löslichkeit der Elemente in den einzelnen Phasen wurde ausgegeben und der Anteil ausscheidungs-härtender Phasen als Funktion der Temperatur analysiert, um eine potenzielle Mischkristall- oder Ausscheidungshärtung

### Lastenheft

1. höhere Zugfestigkeit im Vergleich zu AlSi10Mg
2. Korrosionsbeständigkeit
3. Bruchdehnung > 5%
4. Hochtemperaturfestigkeit
5. ....

- Si ✓
- Mg ✓
- Ni ✓
- Cu ✓
- Sc → ~~Kosten~~
- Fe → ~~Verarbeitung~~
- Co → ~~Ressourcen~~



vorherzusagen. Als Basislegierungen wurden verschiedene neue eutektische Zusammensetzungen untersucht, die eine gute Prozessierbarkeit versprechen. Zudem ergeben sich aufgrund der raschen Abkühlbedingungen im Prozess fein ausgeprägte Gefügemorphologien, die hohe Festigkeiten erwarten lassen. Auf Basis des virtuellen Screenings wurden sechs Legierungen ausgewählt und am Fraunhofer ILT mittels LPBF und LMD (»Laser Metal Deposition«) nach einer Prozessoptimierung porenfrei gefertigt. Ihre Mikrostruktur und Eigenschaften wurden anschließend am Fraunhofer IWM analysiert.

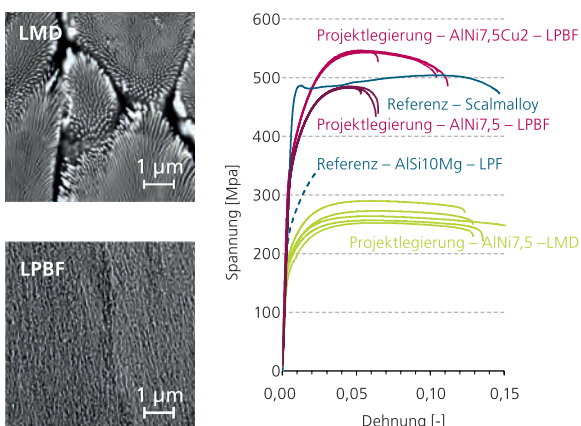
### Mikrostrukturelle Charakterisierung und Werkstoffprüfung

Die Mikrostruktur der additiv hergestellten Proben aus den neuen Legierungen wurden umfassend charakterisiert. Sie zeigen nach additiver Fertigung ein feineutektisches Gefüge. Im LMD-Prozess bilden sich je nach lokalen Erstarrungsbedingungen faserige eutektische Zellen oder Bereiche mit dendritischem Wachstum und netzartigem Eutektikum aus. Im LPBF-Prozess bilden sich aufgrund der noch rascheren

Abkühlbedingungen im Prozess feinere netzartige Strukturen aus, wodurch hohe Festigkeiten erzielt werden. Durch das Einbringen weiterer potenziell ausscheidungsverfestigender Elemente wie Kupfer (Cu) oder Magnesium (Mg) und Silizium (Si) werden noch höhere Festigkeiten erzielt. In mechanischen Versuchen zeigt sich bereits im mittels LPBF prozessierten Zustand eine sehr hohe Zugfestigkeit, auch ohne nachgelagerte Wärmebehandlung. Auch bei erhöhten Temperaturen zeigen die neuen Legierungen vergleichsweise hohe Festigkeiten gegenüber kommerziell verfügbaren additiv gefertigten Aluminiumwerkstoffen.

### Zukunftspotenzial virtueller Screeningprozesse für die Bauteilfertigung

Ein virtueller Screeningprozess wurde aufgebaut, wodurch eine beschleunigte Legierungsentwicklung für additive Fertigungsprozesse ermöglicht wird. Ausgehend von gewünschten Werkstoffeigenschaften können infrage kommende Legierungsvarianten eingegrenzt und priorisiert werden. Für die additive Fertigung von Bauteilen eröffnen sich damit neue Gestaltungsräume für Gewichtseinsparung und Funktionalität.



*Simulationsgestützter Entwicklungsprozess für maßgeschneiderte additiv gefertigte Werkstoffe, mit dem der Bedarf nach einer passenden Legierung für gewünschte Zieleigenschaften gedeckt werden kann.*

Bewertung von Mikrostruktur und Materialeigenschaften

# Lebensdauerbewertung von additiv hergestellten Bauteilen für Hochtemperaturanwendungen

Dr. Michael Schlesinger, Mathis Bellmer

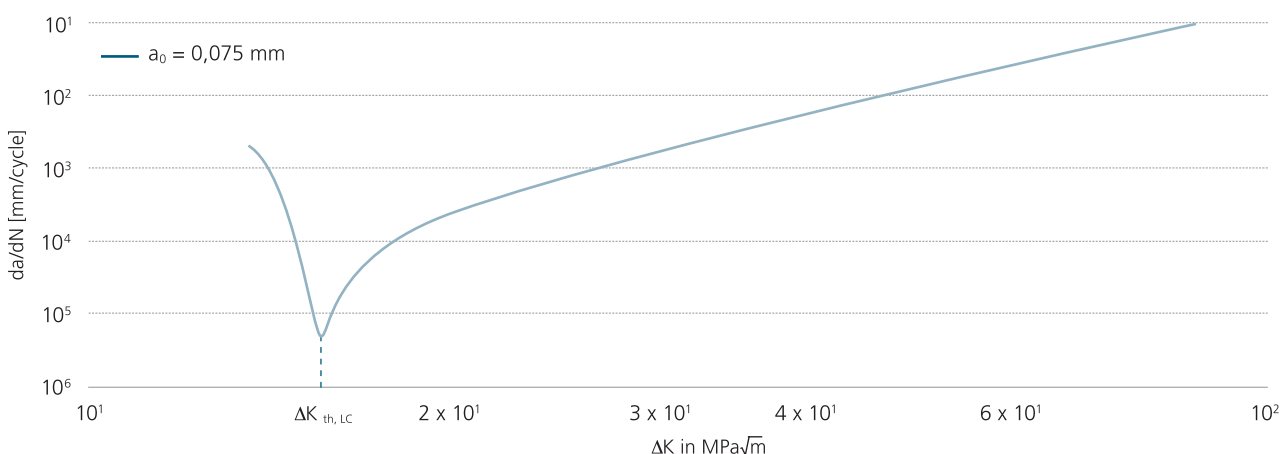
Additive Fertigungsverfahren (engl.: »Additive Manufacturing«, AM) finden zunehmend den Weg in Hochtemperaturanwendungen und kommen dort als Reparaturverfahren immer häufiger zum Einsatz. Sie erlauben eine hohe Funktionsintegration bei reduzierten Fertigungskosten und leisten so echte Beiträge zur Ressourceneffizienz. Allerdings müssen AM-Bauteile mit Blick auf Zuverlässigkeit und Langlebigkeit ebenso berechenbar sein wie konventionell hergestellte Bauteile und die Lebensdauerkonzepte müssen den Besonderheiten additiv erzeugter Werkstoffe Rechnung tragen.

Das Fraunhofer IWM hat Bewertungsmethoden entwickelt, die es ermöglichen, die Auswirkungen sowohl herstellungsbedingter Mikrodefekte als auch betriebsbedingter Ermüdungsrisse, wie sie im Hochtemperatureinsatz auftreten, auf die Lebensdauer zu bewerten.

## Schwellenwert- und Wachstumsverhalten von kurzen Rissen

Die Ermittlung des Schwellenwert- und Risswachstumsverhaltens kurzer Risse ist essenziell für die Bewertung von Mikrodefekten. Das dafür entwickelte Prüfverfahren unter erhöhten Temperaturen und unter Hochvakuum wurde an der Legierung IN718 AM erfolgreich angewendet. Das Verfahren beinhaltet Versuche, in denen durch eine stufenweise Lasterhöhung der risslängenabhängige Schwellenwert und die zyklische R-Kurve bestimmt werden. Die Ergebnisse fließen in ein rechnerisches Bewertungstool ein, das Aussagen zum Verhalten kurzer wie auch langer Risse erlaubt. Insbesondere können Aussagen getroffen werden, ob vorhandene Defekte unter gegebener Belastung wachstumsfähig sind oder welche Defektgrößen maximal zulässig sind, ohne dass es zur Rissausbreitung kommt. Die Abbildung unten zeigt die berechnete Fortschrittsrate eines anfänglich 75 µm langen Risses, der unterhalb des sogenannten Langrisschwellenwertes  $\Delta K_{th,LC}$  belastet ist. Dabei kann festgestellt werden, dass kurze Risse auch bei Spannungsintensitäten unterhalb von  $\Delta K_{th,LC}$  wachstumsfähig sein können. Neben der Bewertung von oberflächennahen Defekten erlauben die Ergebnisse aus Vakuumversuchen Rückschlüsse auf das Verhalten innenliegender Defekte wie Bindefehler. Am Versuchswerkstoff wurde dabei festgestellt, dass die unter Vakuum gemessenen Schwellenwerte niedriger sind als unter Normalatmosphäre. Folglich verhalten sich innenliegende Defekte im Schwellenwertbereich kritischer als oberflächennahe Defekte.

*Berechnetes Rissfortschrittsverhalten eines anfänglich 75 µm langen Risses in IN718 AM unter Vakuum und erhöhter Temperatur.*



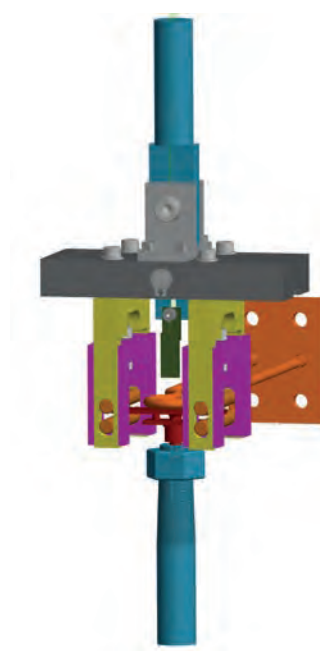


## Bewertung geometrisch komplexer Bauteile unter komponentennahen Belastungen

AM-Bauteile mit ihren häufig komplexen Geometrien und Belastungsbedingungen sowie den genannten fertigungsbedingten Eigenschaften lassen sich basierend auf einachsigen Versuchsdaten wie LCF- und TMF-Versuchen (engl.: »low-cycle fatigue«, LCF; »thermomechanical fatigue«, TMF) nicht zuverlässig bewerten. Komponenten- oder Feldversuche am gesamten Bauteil sind, sofern überhaupt umsetzbar, teuer und aufwendig. Um dennoch bauteilnah und effizient zu prüfen, wurde am Fraunhofer IWM in Zusammenarbeit mit dem Triebwerkshersteller Rolls-Royce ein spezieller Biegeprüfstand entwickelt, in dem sich bauteilähnliche Proben, die lebensdauerkritische geometrische wie auch funktionale Merkmale der Komponente beinhalten, wie beispielsweise eine Bolzenanbindung oder Radienübergänge, unter betriebsnahen Belastungen testen lassen (Abbildung unten).

Das Probendesign wird so gestaltet, dass sich die Proben unter Aufbringung bauteilnaher Belastungen aber unter Nutzung der vorhandenen Laborinfrastruktur untersuchen lassen. Dabei nutzt man die geometrischen Freiheiten, die die AM-Technologie bietet, um die Proben den individuellen Randbedingungen anzupassen. Die Proben lassen sich schnell und kostengünstig herstellen und ihre Werkstoffeigenschaften entsprechen denen des realen Bauteils. Damit ist eine gute Übertragbarkeit gewährleistet.

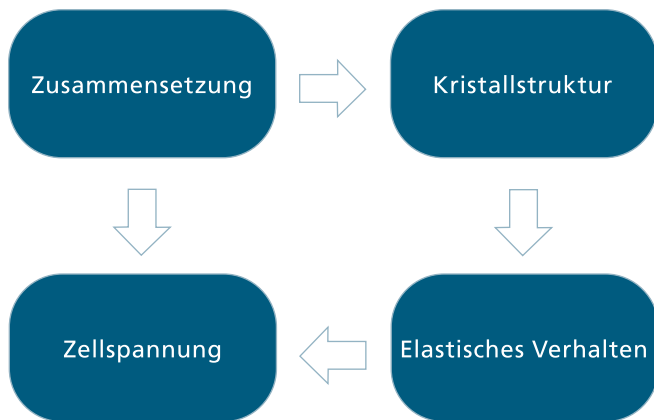
Ein Beispiel für die Anwendung dieses neuartigen Prüfkonzpts stammt aus dem Flugtriebwerksbau. Hier nutzt man die AM-Technologie bei der Herstellung von Brennkammerschindeln, die im Betrieb als Folge von Temperaturänderungen im Flugzyklus komplexen TMF-Belastungen unterliegen. In verschiedenen Testserien wurden Einflüsse wie Last-, Temperatur- und Haltezeitniveau gegenüber Eigenschaften wie Baurichtung, Kühllochgeometrie und -anordnung sowie Oberflächenrauigkeit hinsichtlich der Lebensdauer untersucht. Die experimentellen Ergebnisse flossen in die Weiterentwicklung und Validierung eines rechnerischen Lebensdauermodells, welches sich schließlich für eine zuverlässigere numerische Lebensdauerprognose der realen Komponente nutzen lässt. Die Forschungsarbeiten wurden basierend auf einer Konferenzveröffentlichung mit dem Rolls-Royce Innovation Award 2022 ausgezeichnet.



*Komponentennaher Biegeversuch zur Bewertung von additiv gefertigten Brennkammerschindeln: Bauteilprobe als repräsentativer Ausschnitt der Komponente (links), Versuchsaufbau zur Untersuchung unterschiedlicher Einflussgrößen auf das Lebensdauerverhalten (rechts).*

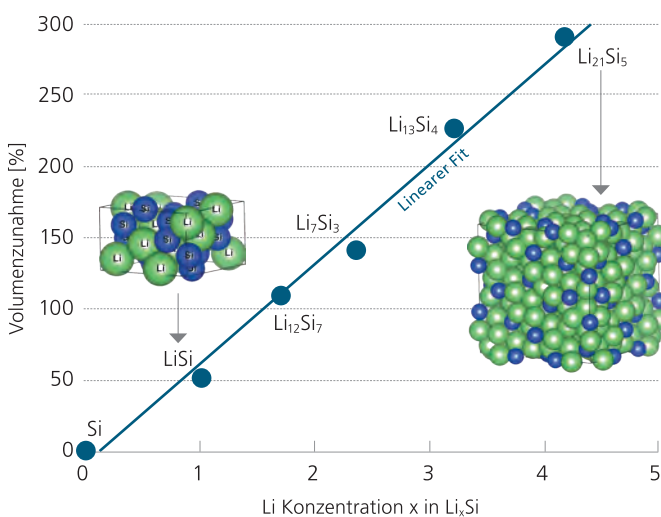
# Batterieoptimierung durch atomistisches Materialverständnis

Dr. Daniel Mutter



Workflow der atomistischen Simulation.

Eine vielversprechende Möglichkeit, eine ressourceneffiziente Steigerung der Speicherkapazität von Lithium-Ionenbatterien (LiBs) zu erreichen, besteht in der Verwendung von Elektrodematerialien, die auf der Legierungsbildung beruhen. Hierbei werden die Li-Ionen während der Beladung der Batterie nicht auf Zwischengitterplätze eingelagert. Stattdessen entstehen, ausgehend von einer Phase M,  $\text{Li}_x\text{M}$ -Verbindungen mit Li-Konzentrationen entsprechend des momentanen Ladezustands. Die Erhöhung der Energiedichte (mehr Li-Ionen pro Volumen) geht dabei mit einer starken Volumenzunahme einher. Das prominenteste Material dieser Kategorie ist Silizium, welches als Aktivmaterial in LiBs bis zu etwa  $\text{Li}_{4,2}\text{Si}$  beladen werden kann und dabei sein Volumen um mehr als 300 Prozent erhöht. Dadurch entstehen während der wiederholten Be- und Entladung mechanische Spannungen in der Mikrostruktur, die Rissbildung und Kontaktverlust zur Folge haben können, was die Lebensdauer der Zelle stark beeinträchtigt. Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projekts »DEFACTO« arbeiten wir an der Schnittstelle von Mechanik und Elektrochemie, um das Materialverhalten von Si-Anoden unter Belastung und Beladung auf atomarer Skala aufzuklären. Das Verständnis der elementaren Prozesse ist essenziell für eine gezielte Anpassung von chemischer Zusammensetzung und Mikrostruktur zur Optimierung der Speicherkapazität bei gleichzeitiger Verringerung von Degradationseffekten.



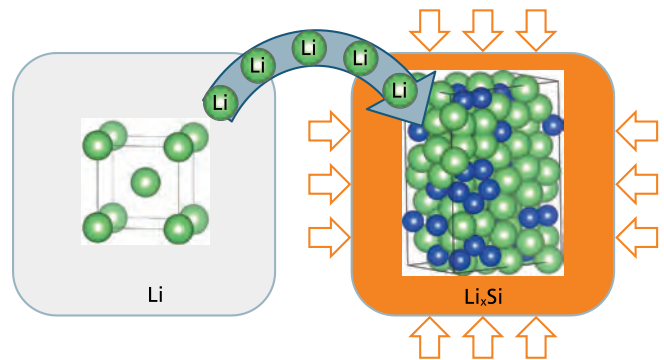
Volumenzunahme von Silizium während der Beladung.

## Atomistische Simulation

Die Abbildung oben zeigt den am Fraunhofer IWM entwickelten Simulationsworkflow. Für Zusammensetzungen  $\text{Li}_x\text{Si}$  mit ansteigendem Li-Gehalt werden zuerst die Grundzustandsstrukturen bestimmt. Dabei kommen Methoden der Dichtefunktionaltheorie zum Einsatz. Es werden verschiedene Phasen durchlaufen, was mit einer linearen Zunahme des relativen Volumens einhergeht (Abbildung unten). Das mechanische Verhalten des Materials wird durch die elastischen Module charakterisiert, die wir im nächsten Schritt für die verschiedenen Li-Si Phasen ermitteln. Dazu wird das System bestimmten Deformationen ausgesetzt und jeweils die mechanische Antwort berechnet. Aus den Energien der Grundzustandsphasen können wir außerdem das Elektrodenpotenzial ableiten.

## Kopplung Mechanik – Elektrochemie

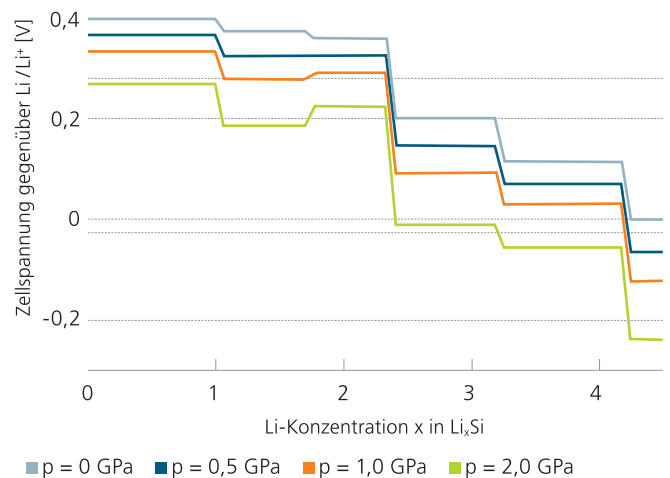
Der Verlauf des Elektrodenpotenzials während der Be- und Entladung ist eine wichtige Eigenschaft eines Aktivmaterials für Batteriezellen. Wird es für eine Kombination aus Anode und Kathode jeweils gegenüber derselben Referenzelektrode angegeben, lässt sich daraus die Zellspannung bestimmen. In unserem Modell fungiert metallisches Lithium als Referenzelektrode. Auf atomarer Ebene entspricht die Zellspannung der elektrochemischen Triebkraft für die Aufnahme und Abgabe von Li-Atomen in die Struktur (Abbildung oben rechts). Aufgrund der Volumenzunahme und räumlichen Begrenzungen sind die Li-Si Phasen mechanischen Belastungen ausgesetzt, die wir als isotropen externen Druck, der auf die Struktur wirkt, modellieren. Mit ansteigendem Druck im Gigapascal-Bereich, was der experimentellen Situation entspricht, bricht die Zellspannung merklich ein (Abbildung unten rechts). Die Ursache liegt in der Verringerung der chemischen Energie um den Betrag, der aufgewendet werden muss, um das Volumen gegen den äußeren Druck zu erhöhen.



Modell des Beladungsprozesses unter äußerem Druck.

## Verwertungspotenzial

Mit den entwickelten Methoden sind wir erstmals dazu in der Lage, die Auswirkungen allgemeiner Deformationen auf das elektrochemische Materialverhalten zu bestimmen und auf atomarer Skala zu verstehen. Der Workflow ist modular erweiterbar, sowie auf beliebige Elektrodenmaterialien und Beladungsszenarien transferierbar. Die Erkenntnisse können zum Beispiel in die Entwicklung von Software zur realistischen Simulation des Gesamtzellverhaltens einfließen, in der chemische, mechanische und thermische Prozesse gekoppelt werden. Darüber hinaus können wir die Entwicklung neuartiger Elektrodenmaterialien und -konzepte unterstützen, die beispielsweise die Minimierung des Druckeinflusses durch Nanostrukturierung zum Ziel haben. Firmen, die auf diesen Feldern aktiv sind, profitieren bei einer Zusammenarbeit von unserer Kompetenz im physikalischen Verständnis und in der Modellierung und Simulation atomarer Prozesse im Batteriebereich, das auch Aspekte wie Kompositions-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, Materialscreening und Ionendiffusion miteinschließt. Dabei kooperieren wir geschäftsfeldübergreifend mit der Gruppe »Multiskalenmodellierung und Tribosimulation« des Fraunhofer IWM.



Verlauf der Zellspannung während der Beladung für verschiedene äußere Drücke (p).

# Bewertung der Betriebssicherheit von Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur

**Dr. Carl Fischer, Heiner Oesterlin**

Mit seiner Beteiligung an den Wasserstoff-Leitprojekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), »TransHyDE« und »H<sub>2</sub>Mare«, wirkt das Fraunhofer IWM an der Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie mit. Eine Herausforderung für die industrielle Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ist die Langzeitstabilität der Bauteile und deren Werkstoffe in Kontakt mit Wasserstoff. Das Leitprojekt »TransHyDE« beantwortet offene Fragestellungen um den Aufbau und die Betriebssicherheit von Transportinfrastrukturen, insbesondere von Pipelines. Im Fokus des Leitprojekts »H<sub>2</sub>Mare« steht die Nutzung der Offshore-Windenergie für die Wasserelektrolyse. Dabei spielen unter anderem Röhrenspeicher, in denen das Wasserstoffgas in unmittelbarer Nähe des Elektrolyseurs gespeichert werden kann, eine große Rolle. Sowohl Pipelines als auch Röhrenspeicher sind sicherheitsrelevante Bauteile, deren Auslegung nach rechtlich vorgeschriebenen Normen erfolgen muss. Bei metallischen Werkstoffen kann gasförmiger Wasserstoff an lokalen Spannungsüberhöhungen durch Fehlstellen im Werkstoff, geometrisch bedingten Kerben oder Schweißnähten negative Auswirkungen auf die mechanische Festigkeit haben. Die geltenden Normen bilden jedoch den schädigenden Einfluss nicht oder nur ungenügend ab. Bei der sicheren Auslegung sind daher entsprechende Bewertungsmethoden notwendig, die verlässliche Vorhersagen zur

erwartbaren Lebensdauer ermöglichen und zudem eine nicht zu große Konservativität beinhalten, also sowohl wirtschaftlich als auch sicherheitstechnisch sinnvoll sind. Mit dem Ziel, die Langzeitstabilität und Betriebssicherheit zu erhöhen, arbeitet das Fraunhofer IWM daran, die relevanten Normen zu bewerten und Aussagen abzuleiten, wie die wasserstoffspezifischen Einflussfaktoren in der Anwendung und Weiterentwicklung der Normen für sichere und zuverlässige Wasserstofftechnologien zu berücksichtigen sind.

## Pipelines

Eine bruchmechanische Auslegung wird unter anderem bei Wasserstoffpipelines angewendet. Hier hat sich der amerikanische Standard ASME B31.12 auch in Deutschland und anderen Teilen Europas etabliert. Dieser Ansatz postuliert einen Anfangsriss, der in der Praxis beispielsweise durch Fertigungsfehler insbesondere an Schweißnähten auftreten kann. Durch Druckschwankungen wächst der Riss und kann schlimmstenfalls zu einem Leck in der Pipeline führen. Die Anzahl an ertragbaren Druckschwankungen wird durch das Risswachstum von einer Anfangsrissstiefe bis zu einer kritischen Endrisstiefe  $a_{crit}$  definiert. Eine Parameterstudie der

*Die Erzeugung von grünem Wasserstoff erfolgt mittels Wasserelektrolyse aus regenerativ erzeugtem Strom, z. B. aus Solar- oder Windenergie. Anschließend kann das Wasserstoffgas in Druckbehältern zwischengespeichert werden.*



Einflussfaktoren auf die Anzahl an ertragbaren Druckschwankungen hat ergeben, dass der Einfluss

- des Schwellenwerts der Risszähigkeit unter Wasserstoffeinfluss ( $K_{IH}$ ) und von  $a_{crit}$  sehr gering ist,
- der angenommenen Anfangsrisslänge (kürzer ist besser) spürbar ist,
- des zugrunde gelegten Risswachstumsgesetzes relevant ist und
- der angenommenen Anfangsrisstiefe sehr groß ist.

Diese Erkenntnisse werden in Experimenten im Rahmen des »TransHyDE«-Leitprojekts quantifiziert und bilden die Grundlage für eine wirtschaftlichere Auslegung von Wasserstoffpipelines.

## Röhrenspeicher

Röhrenspeicher dienen lediglich als Zwischenspeicher für den mit Elektrolyse produzierten Wasserstoff. Häufige Ein- und Ausspeicherung führen zu einer Ermüdungsbelastung. Röhrenspeicher werden unter anderem mit dem Regelwerk AD 2000

ausgelegt, welches keinen Anfangsrisss unterstellt. Es wird angenommen, dass durch die Füll- und Entleerungszyklen ein Riss initiiert wird. Die Ermüdungslebensdauer wird hier als Anzahl von Zyklen bis zu einem technischen Anriss von circa 1–2 mm Länge berechnet. Die Abschätzung der Lebensdauer erfolgt auf Basis von Ermüdungsversuchen oder sogenannten Wöhlerkurven. Der Einfluss von Wasserstoff wird in Abhängigkeit der Belastung, Festigkeit des Werkstoffs und Schweißnahtbeschaffenheit über Abschlagsfaktoren berücksichtigt. Somit muss bei einer Auslegung nach dem AD 2000 Regelwerk der Wasserstoffeinfluss auf die Rissinitiierung und die Ermüdungslebensdauer möglichst genau bekannt sein. Wesentliche Einflussfaktoren sind hierbei der Wasserstoffdruck, die Mikrostruktur des Werkstoffs, die Temperatur sowie Belastungsfrequenz und -verhältnis.

In der Gruppe »Lebensdauerkonzepte für Wasserstoffanwendungen« am Fraunhofer IWM werden die bestehenden Methoden experimentell und rechnerisch optimiert, und im Rahmen von Forschungsprojekten für die sichere und zuverlässige Auslegung von Bauteilen unter Druckwasserstoffeinfluss angewendet.

*Transport- und Speicherinfrastruktur bestehend aus Pipelines und Röhrenspeichern für die Wasserstoffwirtschaft.*



# Publikationen

---

## Referierte Zeitschriften

Bachmann, B.-I.; Müller, M.; Britz, D.; Durmaz, A.R.; Ackermann, M.; Shchyglo, O.; Staudt, T.; Mücklich, F.  
[Efficient reconstruction of prior austenite grains in steel from etched light optical micrographs using deep learning and annotations from correlative microscopy](#)  
Frontiers in Materials 9 (2022) Art. 1033505, 18 Seiten

Bayerlein, B.; Hanke, T.; Muth, T.; Riedel, J.; Schilling, M.; Schweizer, C.; Skrotzki, B.; Todor, A.; Moreno Torres, B.; Unger, J.F.; Völker, C.; Olbricht, J.  
[A perspective on digital knowledge representation in materials science and engineering](#)  
Advanced Engineering Materials 24/6 (2022) Art. 2101176, 14 Seiten

Beckmann, C.; Hohe, J.  
[Generation of stochastic cellular structures with anisotropic cell characteristics on the basis of ellipsoid packings](#)  
Advances in Engineering Software 165 (2022) Art. 103089, 9 Seiten

Begand, S.; Spintzyk, S.; Geis-Gerstorfer, J.; Bourauel, C.; Keilig, L.; Lohbauer, U.; Keilig, L.; Worpenberg, C.; Greuling, A.; Adjiski, R.; Jandt, K.D.; Lümke, N.; Stawarczyk, B.; Güllmar, A.; Kailer, A.; Oberle, N.; Stephan, M.  
[Fracture toughness of 3Y-TZP ceramic measured by the Chevron-Notch Beam method: A round-robin study](#)  
Dental Materials 19/7 (2022) 1128–1139

Berreth, K.; Michler, T.  
[Martensite fractions measured by XRD on fracture surfaces of austenitic stainless steels tensile tested in gaseous Helium and Hydrogen](#)  
Metallography, Microstructure, and Analysis 11/6 (2022) 873 – 876

Bierwisch, C.; Butz, A.; Dietemann, B.; Wessel, A.; Najuch, T.; Mohseni-Mofidi, S.  
[PBF-LB/M multiphysics process simulation from powder to mechanical properties](#)  
Procedia CIRP 111 (2022) 37–40

Bohlen, M.; Michiels, R.; Michelbach, M.; Ferchane, S.; Walter, M.; Einfeld, A.; Stienkemeier, F.  
[Excitation dynamics in polyacene molecules on rare-gas clusters](#)  
The Journal of Chemical Physics 156/3 (2022) 034305 1–14

Braun, M.; Fischer, C.; Baumgartner, J.; Hecht, M.; Varfolomeev, I.  
[Fatigue crack initiation and propagation relation of notched specimens with welded joint characteristics](#)  
Metals 12/4 (2022) Art. 615, 24 Seiten

Braun, M.; Neuhäusler, J.; Denk, M.; Renken, F.; Kellner, L.; Schubnell, J.; Jung, M.; Rother, K.; Ehlers, S.  
[Statistical characterization of stress concentrations along butt joint weld seams using deep neural networks](#)  
Applied Sciences 12/12 (2022) Art. 6089, 17 Seiten

Cantergiani, E.; Falkinger, G.; Mitsche, S.; Theissing, M.; Klitschkle, S.; Roters, F.  
[Influence of strain rate sensitivity on cube texture evolution in aluminium alloys](#)  
Metallurgical and Materials Transactions A 53 (2022) 2832–2860

Chalissery, D.; Schönfeld, D.; Walter, M.; Shklyar, I.; Andrae, H.; Schwörer, C.; Amann, T.; Weisheit, L.; Pretsch, T.  
[Highly shrinkable objects as obtained from 4D printing](#)  
Macromolecular Materials and Engineering 307/1 (2022) Art. 2100619, 12 Seiten

Chen, Y.; Schilling, M.; von Hartrott, P.; Nasrabi, H.B.; Skrotzki, B.; Olbricht, J.  
[Ontopanel: A tool for domain experts facilitating visual ontology development and mapping for FAIR data sharing in materials testing](#)  
Integrating Materials and Manufacturing Innovation 11 (2022) 545–556

- Dänekas, C.; Heikebrügge, S.; Schubnell, J.; Schaumann, P.; Briedenstein, B.; Bergmann, B.  
[Influence of deep rolling on surface layer condition and fatigue life of steel welded joints](#)  
 International Journal of Fatigue 162 (2022) Art. 106994, 13 Seiten
- Dietemann, B.; Bierwisch, C.  
[Predicting particle orientation: Is an accurate flow field more important than the actual orientation model?](#)  
 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 310 (2022) Art. 104927, 12 Seiten
- Dietemann, B.; Wahl, L.; Travitzky, N.; Kruggel-Emden, H.; Kraft, T.; Bierwisch, C.  
[Reorientation of suspended ceramic particles in robocasted green filaments during drying](#)  
 Materials 15/6 (2022) Art. 2100, 20 Seiten
- Durmaz, A.R.; Natkowski, E.; Arnaudov, N.; Sonnweber-Ribic, P.; Weihe, S.; Münstermann, S.; Eberl, C.; Gumbsch, P.  
[Micromechanical fatigue experiments for validation of microstructure-sensitive fatigue simulation models](#)  
 International Journal of Fatigue 160 (2022) Art. 106824, 17 Seiten
- Ebling, F.; Klitschke, S.; Wackermann, K.; Preußner, J.  
[The effect of hydrogen on failure of complex phase steel under different multiaxial stress states](#)  
 Metals 12/10 (2022) Art. 1705, 13 Seiten
- Echlin, MLP; Polonsky, A.T.; Lenthe, W.C.; Titus, M.S.; Geurts, R.; Botman, A.; Straw, M.; Gumbsch, P.; Pollock, M.P.  
[Observations of damage, defects, and structuring in femto-second laser ablated surfaces](#)  
 Microscopy and Microanalysis 28/51 (2022) 872–873
- Falk, K.; Reichenbach, T.; Gkagkas, K.; Moseler, M.; Moras, G.  
[Relating dry friction to interdigitation of surface passivation species: a molecular dynamics study on amorphous carbon](#)  
 Materials 15/9 (2022) Art. 3247, 17 Seiten
- Fang, X.; Wen, J.; Cheng, L.; Yu, D.; Zhang, H.; Gumbsch, P.  
[Programmable gear-based mechanical metamaterials](#)  
 Nature Materials 21 (2022) 869–876
- Garabedian, N.T.; Schreiber, P.J.; Brandt, N.; Zschumme, P.; Blatter, I.L.; Dollmann, A.; Haug, C.; Kümmel, D.; Li, Y.; Meyer, F.; Morstein, C.E.; Rau, J.S.; Weber, M.; Schneider, J.; Gumbsch, P.; Selzer, M.; Greiner, C.  
[Generating FAIR research data in experimental tribology](#)  
 Scientific Data 9 (2022) Art. 315, 11 Seiten
- Garcia Trelles, E.; Eckmann, S.; Schweizer, C.  
[Experimental characterization of the short crack growth behavior of a ductile cast iron \(DCI GJS-500\) affected by intergranular embrittlement at temperatures nearby 400 °C](#)  
 International Journal of Fatigue 155 (2022) Art. 106573, 13 Seiten
- Garcia Trelles, E.; Schweizer, C.  
[A methodology for assessing short fatigue crack growth in DCI materials affected by intergranular embrittlement at temperatures nearby 400 °C](#)  
 International Journal of Fatigue 155 (2022) Art. 106592, 12 Seiten
- Gebhardt, J.; Elsässer, C.  
[The electronic structure of Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> at room temperature](#)  
 Physica Status Solidi B 259/8 (2022) Art. 2200124, 9 Seiten
- Gebhardt, J.; Urban, D.F.  
[Influence of impurity atoms on hydrogen diffusion into Ruthenium](#)  
 The Journal of Physical Chemistry C 126/46 (2022) 19895–19903
- Ghassemizadeh, R.; Körner, W.; Urban, D.F.; Elsässer, C.  
[Stability and electronic structure of NV centers at dislocation cores in diamond](#)  
 Physical Review B 106/17 (2022) Art. 174111, 10 Seiten
- Goetz, A.; Durmaz, A.R.; Müller, M.; Thomas, A.; Britz, D.; Kerfriden, P.; Eberl, C.  
[Addressing materials' microstructure diversity using transfer learning](#)  
 npj Computational Materials 8/1 (2022) Art. 27, 13 Seiten
- 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](#)  
 Frontiers in Materials 9 (2022) Art. 837289, 20 Seiten
- Hansen, E.; Kacan, A.; Frohnapfel, B.; Codrignani, A.  
[An EHL extension of the unsteady FBNS algorithm](#)  
 Tribology Letters 70 (2022) Art. 80, 25 Seiten
- Haug, C.; Molodov, D.; Gumbsch, P.; Greiner, C.  
[Tribologically induced crystal rotation kinematics revealed by electron backscatter diffraction](#)  
 Acta Materialia 225 (2022) Art. 117566, 17 Seiten

Heikebrügge, S.; Breidenstein, B.; Bergmann, B.; Dänekas, C.; Schaumann, P.; Schubnell, J.

[Identification of material properties for finite element simulation of the deep rolling process applied to welded joints](#)

Procedia CIRP 115 (2022) 30–35

Hertel, R.; Maftuhin, W.; Walter, M.; Sommer, M.

[Conformer ring flip enhances mechanochromic performance of ansa-donor-acceptor-donor mechanochromic torsional springs](#)

Journal of the American Chemical Society 144/48 (2022) 21897–21907

Hohe, J.; Schober, M.; Weiss, K.P.; Appel, S.

[Verification of Puck's criterion for CFRP laminates under multi-axial loads at ambient and cryogenic temperatures](#)

Composites Science and Technology 228 (2022) Art. 109631, 10 Seiten

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

[Height-averaged Navier-Stokes solver for hydrodynamic lubrication](#)

Tribology Letters 70/2 (2022) Art. 36, 15 Seiten

Hussain, N.; Scherer, T.; Das, C.; Heuer, J.; Debastiani, R.; Gumbsch, P.; Aghassi-Hagmann, J.; Hirtz, M.

[Correlated study of material interaction between capillary printed eutectic gallium alloys and gold electrodes](#)

Small 18/42 (2022) Art. 2202987, 11 Seiten

Khodayeki, S.; Maftuhin, W.; Walter, M.

[Force dependent barriers from analytic potentials within elastic environments](#)

ChemPhysChem 23/19 (2022) Art. e20220023, 8 Seiten

Koplin, C.; Oehler, H.; Praß, O.; Schlüter, B.; Alig, I.; Jaeger, R.

[Wear and the transition from static to mixed lubricated friction of sorption or spreading dominated metal-thermoplastic contacts](#)

Lubricants 10/5 (2022) Art. 93, 21 Seiten

Koplin, C.; Weißer, D.F.; Fromm, A.; Deckert, M.H.

[Stiction and friction of nano- and microtextured liquid silicon rubber surface formed by injection molding](#)

Applied Mechanics 3/4 (2022) 1270–1287

Körner, W.; Ghassemizadeh, R.; Urban, D.F.; Elsässer, C.

[Influence of \(N,H\)-terminated surfaces on stability, hyperfine structure, and zero-field splitting of NV centers in diamond](#)

Physical Review B 105/8 (2022) Art. 085305, 10 Seiten

Koss, P.A.; Durmaz, A.R.; Blug, A.; Laskin, G.; Pawar, O.S.; Thiemann, K.; Bertz, A.; Straub, T.; Elsässer, C.

[Optically pumped magnetometer measuring fatigue-induced damage in steel](#)

Applied Sciences 12/3 (2022) Art. 1329, 11 Seiten

Li, J.; Lin, N.; Du, C.; Ge, Y.; Amann, T.; Feng, H.; Yuan, C.; Li, K.

[Tribological behavior of cellulose nanocrystal as an eco-friendly additive in lithium-based greases](#)

Carbohydrate Polymers 290 (2022) Art. 119478, 9 Seiten

Lichti, T.; Lechner, A.; Andrä, H.; Müller, R.; Wenz, F.; Eberl, C.; Schwarz, A.; Hübner, C.

[Optimal design of shape changing mechanical metamaterials at finite strains](#)

International Journal of Solids and Structures 252 (2022) Art. 111769, 17 Seiten

Lubich, S.; Fischer, C.; Schilli, S.; Seifert, T.

[Microstructure-sensitive finite-element analysis of crack-tip opening displacement and crack closure for microstructural short fatigue cracks](#)

International Journal of Fatigue 162 (2022) Art. 106911, 16 Seiten

Michler, T.; Ebling, F.; Oesterlin, H.; Fischer, C.; Wackermann, K.  
[Comparison of tensile properties of X60 pipeline steel tested in high pressure gaseous hydrogen using tubular and conventional specimen](#)

International Journal of Hydrogen Energy 47/81 (2022) 34676–34688

Moattari, M.; Shokrieh, M.M.; Moshayedi, H.

[Interaction of crack-tip constraint and welding residual stresses on the fracture behavior of Ni-based alloy](#)

Theoretical and Applied Fracture Mechanics 121 (2022) Art. 103464, 15 Seiten

Mohseni-Mofidi, S.; Drescher, E.; Kruggel-Emden, H.; Teschner, M.; Bierwisch, C.

[Particle-based numerical simulation study of solid particle erosion of ductile materials leading to an erosion model, including the particle shape effect](#)

Materials 15/1 (2022) Art. 286, 22 Seiten

Mohseni-Mofidi, S.; Pastewka, L.; Teschner, M.; Bierwisch, C.  
[Magnetic-assisted soft abrasive flow machining studied with smoothed particle hydrodynamics](#)

Applied Mathematical Modelling 101 (2022) 38–54



- Mondal, K.; Megha; Banerjee, A.; Fortunelli, A.; Walter, M.; Moseler, M.  
[Ab initio modeling of the ZnO-Cu\(111\) interface](#)  
 The Journal of Physical Chemistry C 126/1 (2022) 764–771
- Morand, L.; Link, N.; Iraki, T.; Dornheim, J.; Helm, D.  
[Efficient exploration of microstructure-property spaces via active learning](#)  
 Frontiers in Materials, Computational Materials Science 8 (2022) Art. 824441, 12 Seiten
- Morstein, C.E.; Klemenz, A.; Dienwiebel, M.; Moseler, M.  
[Humidity-dependent lubrication of highly loaded contacts by graphite and a structural transition to turbostratic carbon](#)  
 Nature Communications 13/1 (2022) Art. 5958, 16 Seiten
- Oeser, S.; Preußner, J.; Rödler, J.; Pirch, N.; Weisheit, A.  
[Laser metal deposition of a near-eutectic Al-Ni alloy](#)  
 Advanced Engineering Materials 24/12 (2022) Art. 2200696, 10 Seiten
- Radaelli, F.; Amann, C.; Aydin, A.; Varfolomeev, I.; Gumbsch, P.; Kadau, K.  
[A probabilistic model for forging flaw crack nucleation processes for heavy duty gas turbine rotor operations](#)  
 Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 144/12 (2022) Art. 121026, 9 Seiten
- Radaelli, F.; Amann, C.; Aydin, A.; Varfolomeev, I.; Gumbsch, P.; Kadau, K.  
[A probabilistic model for forging flaw crack nucleation processes](#)  
 Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 143/10 (2021) Art. 101012, 8 Seiten
- Rau, J.S.; Balachandran, S.; Schneider, R.; Gumbsch, P.; Gault, B.; Greiner, C.  
[High diffusivity pathways govern massively enhanced oxidation during tribological sliding](#)  
 Acta Materialia 221 (2021) Art. 117353, 9 Seiten
- Reichenbach, R.; Eberl, C.; Lindenmeier, J.  
[Dynamics of attribute-specific customer requirements in innovation processes: a panel analysis considering Kano's theory](#)  
 International Journal of Innovation Management IJIM 26/2 (2022), Art. 2250014, 23 Seiten
- Reichenbach, R.; Eberl, C.; Lindenmeier, J.  
[Online platforms for research data: A requirements and cost analysis](#)  
 Science and Public Policy 49/4 (2022) 598 – 608
- Reichenbach, R.; Jutz, G.; Eberl, C.; Lindenmeier, J.  
[Regression approaches for Kano classification: an empirical analysis of the classification of quality attributes according to Kano](#)  
 Total Quality Management & Business Excellence 33/7–8 (2022) 884–906
- Reichenbacher, A.; Fischer, C.; Schweizer, C.; Seifert, T.  
[A finite element study on the influence of the hardening behavior on plasticity-induced fatigue crack closure](#)  
 International Journal of Fatigue 158 (2022) Art. 106768, 11 Seiten
- Rez, P.; Boland, T.; Elsässer, C.; Singh, A.  
[Localized phonon densities of states at grain boundaries in silicon](#)  
 Microscopy and Microanalysis 28/3 (2022) 672–679
- Roth, A.; Ganzenmüller, G.; Gutmann, F.; Jakula, P.; Hild, F.; Pfaff, A.; Yin, K.; Eberl, C.; Hiermaier, S.  
[2D numerical simulation of auxetic metamaterials based on force and deformation consistency](#)  
 Materials 15/13 (2022) Art. 4490, 18 Seiten
- Rudorffer, W.; Wächter, M.; Esderts, A.; Dittmann, F.; Varfolomeev, I.  
[Fatigue assessment of weld seams considering elastic-plastic material behavior using the local strain approach](#)  
 Welding in the World 66/4 (2022) 721–730
- Sarmast, A.; Schubnell, J.; Majid, F.  
[Finite element simulation of multi-layer repair welding and experimental investigation of the residual stress fields in steel welded components](#)  
 Welding in the World 66/6 (2022) 1275–1290
- Schackert, S.; Schweizer, C.  
[Investigation of damage mechanisms and short fatigue crack growth during thermomechanical fatigue loading of the nickel-based superalloy Inconel 100](#)  
 Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 46/6 (2022) 2261–2276
- Schlüter, B.; Schröder, C.; Zhang, W.; Mühlhaupt, R.; Degenhardt, U.; Sediák, R.; Dusza, J.; Batázi, C.; Kailer, A.  
[Influence of graphene type and content on friction and wear of silicon carbide/graphene nanocomposites in aqueous environment](#)  
 Materials 15/21 (2022) Art. 7755, 18 Seiten

Schubnell, J.; Dahmen, M.; Luke, M.

[Strength improvement of laser beam welded joints in cold worked high-manganese-steel by means of deep rolling](#)

Procedia CIRP 11 (2022) 457–461

Schubnell, J.; Farajian, M.

[Fatigue improvement of aluminium welds by means of deep rolling and diamond burnishing](#)

Welding in the World 66 (2022) 699–708

Schütte, M.; Ehrich, J.; Linsler, D.; Hanke, S.

[Effects of microstructure modification by Friction Surfacing on wear behaviour of Al alloys with different Si contents](#)

Materials 15/5 (2022) Art. 1641, 17 Seiten

Schwarz, A.; Lichti, T.; Wenz, F.; Scheuring, B.M.; Hübner, C.; Eberl, C.; Elsner, P.

[Development of a scalable fabrication concept for sustainable, programmable shape-morphing metamaterials](#)

Advanced Engineering Materials 24/11 (2022) Art. 2200386, 10 Seiten

Singh, S.P.; Rijal, A.; Straub, T.; Han, J.-K.; Kennerknecht, T.; Eberl, C.; Kawasaki, M.; Kumar, P.

[Effect of high-pressure torsion on high cycle fatigue of commercially pure Cu: some insights from formation of surface micro-cracks](#)

Materials Characterization 190 (2022) Art. 112059, 8 Seiten

Straub, T.; Fell, J.; Zabler, S.; Gustmann, T.; Korn, H.; Fischer, S.C.L.

[Characterization of filigree additively manufactured NiTi structures using micro tomography and micromechanical testing for metamaterial material models](#)

Materials 16/2 (2022) Art. 676, 14 Seiten

Sun, Q.; Dolle, C.; Kurpiers, C.; Schwaiger, R.; Gumbsch, P.; Egler, Y.M.

[In situ micro-pyrolysis of 3D nano-printed electron beam sensitive metamaterials](#)

Microscopy and Microanalysis 27/2 (2021) 83–84

Tao, C.; Mutter, D.; Urban, D. F.; Elsässer, C.

[Electrostatic treatment of charged interfaces in classical atomistic simulations](#)

Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering MSMSE 30/5 (2022) Art. 055004, 19 Seiten

Vogel, S.; Brenner, A.; Schlüter, B.; Blug, B.; Kirsch, F.; van Roo, T.

[Laser structuring and DLC coating of elastomers for high performance applications](#)

Materials 15/9 (2022) Art. 3271, 13 Seiten

Wang, X.; Mayrhofer, L.; Keunecke, M.; Estrade, S.; Lopez-Conesa, L.; Moseler, M.; Waag, A.; Schaefer, L.; Shi, W.; Meng, X.; Chu, J.; Fan, Z.; Shen, H.

[Low-energy hydrogen ions enable efficient room-temperature and rapid plasma hydrogenation of TiO<sub>2</sub> nanorods with controllable disordered shell for enhanced photoelectrochemical activity](#)

Small 18/46 (2022) Art. 2204136, 13 Seiten

Wenz, F.; Schönfeld, D.; Fischer, S.C.L.; Pretsch, T.; Eberl, C.

[Controlling malleability of metamaterials through programmable memory](#)

Advanced Engineering Materials (2022) Art. 2201022, 10 Seiten

Xu, H.; Kuczynska, M.; Schafet, N.; Welschinger, F.; Hohe, J.

[FE-based damage modeling approach for short fiber reinforced thermoplastics under quasi-static load coupling anisotropic viscoplasticity and matrix degradation](#)

Journal of Composite Materials 56/20 (2022) 3113–3125

## Unreferierte Zeitschriften

Butz, A.; Norouzi, E.; Morand, L.; Weber, M.; Helm, D.; Schlay, B.; Bauer, F.; Pfeffer, K.; Klotz, U.E.; Eisenbart, M.

[Optimierte Messung des Relaxationsverhaltens von Kupfer- und Kupferlegierungen mittels Canti lever-Versuchen und Machine Learning gestützter Parameteridentifikation als Basis für die Simulation des Relaxationsverhalten von Kupferbauteilen](#)

Metall 75/11–12 (2021) 378–381

Diemert, J.; Hohe, J.; Rohlfing, J.; Troge, J.

[Bitte Ruhe – Projekt: PolymerAkustik: Ganzheitliche Lösungsansätze für leise Kunststoffbauteile](#)

Kunststoffe 9 (2022) 120–122

Diemert, J.; Hohe, J.; Rohlfing, J.; Troge, J.

[Quiet please – “PolymerAkustik” project: holistic solutions for low-noise plastic components](#)

Kunststoffe international 7 (2022) 94–96

Eberl, C.

[Smart x Struktur = Programmierbare Materialien](#)

Merlin – Das Magazin von smart 3 (2022) 10–11

Eisenbart, M.; Friedmann, V.; Preußner, J.; Bauer, F.; Warres, C.; Lutz, T.; Klotz, U.E.

[Entwicklung und Charakterisierung von ausscheidungshärtenden Legierungen im System Cu-Ni-Al](#)

Metall 75/11–12 (2021) 328–331

Grimm-Strele, H.; Kabel, M.; Andrä, H.; Schweiger, T.; Lienhard, J.

[Materialkarten für FVK-Werkstoffe auf Basis von realen und virtuellen Messungen](#)

NAFEMS Online-Magazin 61/1 (2022) 44–54

Huschka, M.; Hoschke, K.; Duglosch, M.; Patil, S.; Schweizer, C.; Friedmann, V.; Garcia Trelles, E.; Preußner, J.; Klotz, U.; Tiberto, D.

[Digitization of the process chain for additively manufactured aluminum lightweight components – Data fabric for lightweight design with AM](#)

Wt Werkstatttechnik online 112/6 (2022) 372–377

Wessel, A.; Willmann, T.; Butz, A.; Bischoff, M.

[Blechumformprozesse genauer simulieren](#)

Stahl und Eisen 142/1–2 (2022) 44–47

Zapara, M.; Augenstein, E.; Guk, S.; Hoffmann, F.; Jennings, R.; Prah, U.

[Praxisorientierte Schadensvorhersage bei mehrstufiger Kaltmassivumformung von Stählen mit nichtmetallischen Einschlüssen](#)

massivUMFORMUNG Dez. 2022 (2022) 44–49

## Bücher und Buchbeiträge

Elsässer, C.; Michler, T.; Gumbsch, P.

[Unfallsicherheit und Lebensdauer – Materialien](#)

Wasserstofftechnologien; Neugebauer, R. (Ed.); Springer Vieweg, Wiesbaden (2022) 351–366

Quay, R.; Gumbsch, P.

[Möglichkeiten der Sensorik in einer neuen Welt](#)

Quantentechnologien; Neugebauer, R. (Hrsg.); Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2022) 45–47

Quay, R.; Gumbsch, P.

[Sensitive opportunities in a new world](#)

Quantum Technologies; Neugebauer, R. (Hrsg.); Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2022) 41–42

## Tagungsbände

Augenstein, E.; Hoffmann, F.; Guk, S.; Zapara, M.; Kirschner, M.; Prah, U.

[Beitrag zum Schädigungsverhalten von nichtmetallischen Einschlüssen in Kaltstauachstähen anhand experimenteller und numerischer Untersuchungen](#)

in Tagungsband MEFORM 2022 – Alles auf Draht!; Technische Universität Bergakademie Freiberg; Qucosa, Open Access Publikationsserver (2022) 47–51

Bähr, P.; Sommer, S.; Unruh, E.; Hein, D.; Meschut, G.

Advanced modelling technique for multi-material joints in car body components considering crack initiation due to notch effects

in Proc. of 6<sup>th</sup> International Conference on Steels in Cars and Trucks – SCT 2022 (2022) 8 Seiten

Beyer-Faiss, S.; Korth, Y.; Amann, T.; Schubert, T.; Plebst, S.

[Novel nanocomposite with ionic liquid and graphene for electroconductive radial plain bearings](#)

in Proc. of 23<sup>rd</sup> International Colloquium Tribology: Industrial and Automotive Lubrication 2022 Vol. 23/1; Fatemi, A.; Pauschitz, A.; Topolovec-Miklozic, K. (Eds.); expert verlag, Deutschland (2022) 33–35

Dietemann, B.; Najuch, T.; Wessel, A.; Butz, A.; Bierwisch, C.

[Simulating the Laser Powder Bed Fusion process from powder application to mechanical part properties – Simulation des Laser-Pulverbett-Schmelzprozesses vom Pulverauftrag bis zu mechanischen Eigenschaften](#)

in Proc. of the 18<sup>th</sup> Rapid.Tech 3D Conference; Kynast, M.; Witt, G.; Eichmann, M. (Hrsg.); Carl Hanser Verlag, München (2022) 82–89

Ebling, F.; Wackermann, K.

[Gaseous hydrogen charging and fatigue testing on IN718](#)

in Proc. of Pressure Vessels & Piping Conference ASME 2022, Vol. 4B: Materials and Fabrication; American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2022) Art. PVP2022-84184, 5 Seiten

Ellmer, F.; Varfolomeev, I.; Luke, M.; Rennert, R.

[Der Einfluss von Überlasten auf die Ermüdungsfestigkeit metallischer Bauteile](#)

in Tagungsband DVM Tagung Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise; Esderts, A.; Bacher-Höchst, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2022) 45–56

Hemmes, K.; Ellmer, F.; Farajian, M.; Varfolomeev, I.; Luke, M.

[On the evaluation of overload effects on the fatigue strength of metallic materials](#)

Procedia Structural Integrity 38; Fatigue Design 2021, 9<sup>th</sup> Edition of the International Conference on Fatigue Design; Lefebvre, F.; Souquet, P. (Ed.); Elsevier B.V., Amsterdam, NL (2022) 401–410

- Jaeger, R.; Koplín, C.; Schlüter, B.  
[Lubricated polymer-steel-systems: Influence of the surface and Interfacial energies of frictional partners on their tribological performance](#)  
 International Conference on Gears 2022 – 4<sup>th</sup> International Conference on High Performance Plastic Gears 2022 – 4<sup>th</sup> International Conference on Gear Production 2022; VDI-Berichte 2389; Verein Deutscher Ingenieure; VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2022) 13 Seiten
- Kertsch, L.; Helm, D.; Zapara, M.  
[Prediction of microstructure evolution in hot forging and heat treatment using a mean-field material model](#)  
 in Proc. of Forming Technology Network of Bulk Metal Forming – ForTech Bulk 2022; Liewald, M. (Hrsg.); University of Stuttgart, Stuttgart (2022) 69–74
- Klitschke, S.; Ebling, F.; Discher, D.; Preußner, J.; Wackermann, K.  
[Effect of hydrogen on the formability and fracture behaviour of high strength multiphase steels under multiaxial loading](#)  
 in Proc. of 6<sup>th</sup> International Conference on Steels in Cars and Trucks – SCT 2022 (2022) 7 Seiten
- Lenz, C.; Ziesche, S.; Reinhardt, K.; Körner, S.; Schletz, A.; Bach, H.L.; Schmidt, I.; Simon-Naiasek, M.  
[Development and characterization of a monolithic ceramic pre-package for SiC-semiconductor devices based on LTCC technology](#)  
 in Proc. of 9<sup>th</sup> Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC) 2022; Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE (2022) 62–66
- Linsler, D.; Gäbert, C.; Reinicke, S.; Rangova, T.; Schlüter, F.; Dienwiebel, M.  
[Reversible viscosity tuning using UV light](#)  
 in Proc. of 23<sup>rd</sup> International Colloquium Tribology: Industrial and Automotive Lubrication 2022 Vol. 23/Iss. 1; Fatemi, A.; Pauschitz, A.; Topolovec-Miklozic, K. (Hrsg.); expert verlag, Deutschland (2022) 65-66
- Luke, M.; Straub, T.; Varfolomeev, I.; Kleemann, A.; Kleemann, S.; Richter, T.; Beinersdorf, H.; Yadegari, P.; Beier, H.T.; Vormwald, M.  
[Methoden zur Berechnung der Schwingfestigkeit von Bauteilen aus höchstfesten Stählen](#)  
 in Tagungsband DVM Tagung Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise; Esderts, A.; Bacher-Höchst, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2022) 57–73
- Maier, G.; Sommer, H.; Widera, M.; Neumann, F.; Somsen, C.  
[Influence of a P92 typical post weld heat treatment on the long-term properties of Alloy 617 at 600°C power plant operation](#)  
 in Proc. of 46<sup>th</sup> MPA-Seminar 2021, Additive Manufacturing, Hydrogen, Energy, Integrity and Reliability; MPA Universität Stuttgart, Stuttgart (2021) 438–447
- Matt, P.; Jenerowicz, M.; Schweiger, T.; Heisch, F.; Lienhard, J.; Boljen, M.  
[Investigation of e-scooter drivers colliding with kerbs – a parametric numerical study](#)  
 Conference proceedings International Research Council on the Biomechanics of Injury, IRCOBI 2022; International Research Council on the Biomechanics of Injury IRCOBI, Zürich, Schweiz (2022) 379–392
- Michler, T.; Wackermann, K.; Ebling, F.; Oesterlin, H.  
[Comparison of tensile test results in high pressure gaseous hydrogen using conventional and tubular specimens](#)  
 ASME 2021 Pressure Vessels & Piping Conference 2021 Vol. 4: Materials and Fabrication; American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2021) Art. PVP2021–61138, 6 Seiten
- Mohseni-Mofidi, S.; Drescher, E.; Kruggel-Emden, H.; Bierwisch C.;  
[Numerical study of solid particle erosion using smoothed particle hydrodynamics](#)  
 in Proc. of the 16<sup>th</sup> International SPHERIC Workshop; Giuseppe Bilotta (Hrsg.); Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Catania, Italien (2022) 84–90
- Radaelli, F.; Amann, C.; Aydin, A. Varfolomeev, I.; Gumbsch, P.; Kadau, K.  
[A probabilistic model for forging flaw crack nucleation processes for heavy duty gas turbine rotor operations](#)  
 in Proc. of ASME Turbo Expo2022: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 8B; American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2022) Art. GT2022–82303, 11 Seiten
- Rudorffer, W.; Wächter, M.; Esderts, A.; Dittmann, F.; Varfolomeev, I.; Moser, S.; Vormwald, M.; Neuhäusler, J.; Rother, K.; Braun, M.  
[Nichtlinearer Nachweis für Schweißnähte – ein Vorschlag zur Erweiterung der FKM-Richtlinie nichtlinear](#)  
 in Tagungsband DVM Tagung Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise; Esderts, A.; Bacher-Höchst, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2022) 83–92

- Schlesinger, M.; Schackert, S.; Sikorski, I.; Mathiak, G.  
[Efficient test method for determining the thermomechanical fatigue lifetime of additively manufactured combustion chamber tiles under component-related conditions](#)  
 in Proc. of ASME Turbo Expo2022: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 8A; American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2022) Art. GT2022–77983, 10 Seiten
- Schlüter, B.; Jaeger, R.  
 Determination of friction and wear of elastomers under different friction and environmental conditions  
 in Tagungsband Deutschen Kautschuk-Tagung und International Rubber Conference DKT IRC 2021; Deutsche Kautschuk-Gesellschaft e.V. DKG, Frankfurt (2022) 7 Seiten
- Schubnell, J.; Jung, M.; Sarmast, A.; Cari, E.  
[Definition and impact of overlap on the surface state after deep rolling of aluminum and steel alloys](#)  
 in Proc. of 14<sup>th</sup> International Conference on Shot Peening ICSP; Guagliano, M. (Ed.); www.shottpeener.com (2022) Art. 2022069, 6 Seiten
- Schubnell, J.; Preußner, J.; Farajian, M.  
 Decreasing and increasing the value of the compressive residual stresses induced by high frequency mechanical impact treatment during cyclic loading  
 in Proc. of 11<sup>th</sup> International Conference on Residual Stresses–ICRS11; Société Française de Métallurgie et de Matériaux SF2M, Paris, France (2022) 8 Seiten
- Schubnell, J.; Sarmast, A.; Altenhöner, F.; Sheikhi, S.; Braun, M.; Ehlers, S.  
 Residual stress analysis of butt welds made of additive and traditionally manufactured 316L stainless steel plates  
 in Proc. of 11<sup>th</sup> International Conference on Residual Stresses – ICRS11; Société Française de Métallurgie et de Matériaux SF2M, Paris, France (2022) 8 Seiten
- Thiemann, K.; Blug, A.; Koss, P.; Durmaz, A.; Laskin, G.; [Bertz, A.; Kühnemann, F.; Straub, T.](#)  
[Using optically pumped magnetometers to identify initial damage in bulk material during fatigue testing](#)  
 in Proc. of SPIE Vol.12133, Quantum Technologies 2022; Damati, E.; Ducci, S.; Treps, N.; Whitlock, S. (Eds.); Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Bellingham, WA, USA (2022) Art. 21330F, 7 Seiten
- Tlatlik, J.  
[Berücksichtigung der Werkstoffheterogenität von Schweißgut bei der Master Curve Auswertung bei verschiedenen Beanspruchungsraten](#)  
 54. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit »Bruchmechanische Werkstoff- und Bauteilbewertung: Beanspruchungsanalyse, Prüfmethode und Anwendungen«. DVM-Bericht 254; Vormwald, M. (Hrsg.); Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. DVM, Berlin (2022) 23–32
- Tlatlik, J.  
[Verification of the Master Curve concept \(ASTME1921\) for the weld of a German RPV steel at various loading rates](#)  
 in Proc. of 26<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – SMiRT26; International Assn for Structural Mechanics in Reactor Technology (IASMiRT) (Ed.) Curran Associates, Inc., Red Hook, NY, USA (2022), 10 Seiten
- Tlatlik, J.; Mayer, U.  
[Impact of elevated loading rates on the shape of the Master Curve \(ASTM E1921\) for a German RPV steel](#)  
 in Proc. of ASME 2022 Pressure Vessels & Piping Conference – PVP2022, Vol. 1: Codes and Standards; American Society of Mechanical Engineers ASME, New York, NY, USA (2022) Art. PVP2022–83867, 10 Seiten
- Viktoria, O.; Schuster, L.; Sommer, S.; Hein, D.; Meschut, G.  
 Development of a crash behaviour prediction method for resistance spot welded 3-steel sheet joints  
 in Proc. of 6<sup>th</sup> International Conference on Steels in Cars and Trucks – SCT 2022 (2022) 8 Seiten
- Willmann, T.; Bischoff, M.; Wessel, A.; Butz, A.  
[Verbesserte Blechumformsimulation durch 3D-Werkstoffmodelle und erweiterte Schalenformulierungen Pressen, Systeme, Prozesse der Zukunft – Effizienz + Digitalisierung](#)  
 Tagungsband 40. EFB-Kolloquium Blechverarbeitung 2022; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. EFB, Hannover (2022) 151–161

## Dissertationen

- Zalikha Murni Abdul Hamid  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Analysis of fatigue damage in unidirectional carbon fibre reinforced polymer material
- Bastien Dietemann  
Technische Universität Berlin  
Extrusion-based ceramic additive manufacturing with robocasting: numerical study of printability and particle orientation
- Elena Garcia Trelles  
Universidad de Oviedo, Spanien  
Assessment of thermomechanical fatigue lifetime and short crack growth of ductile cast irons (DCI) affected by intergranular embrittlement at intermediate temperatures
- Christian Haug\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tribologisch induzierte Verformungsmechanismen und Reibung in Abhängigkeit von der Kristallorientierung in Kupfer
- Silke Klitschke  
Universität Stuttgart  
Adiabatische Erwärmung von Stahlstoffblechwerkstoffen unter komplexen crashartigen Belastungen
- Shoya Mohseni Mofidi  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Development and application of smoothed particle hydrodynamics for studying surface erosion due to solid particle impacts
- Lukas Morand  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Einsatz maschineller Lernverfahren zur Lösung von Materialdesignfragestellungen: Materialmodellierung, Datengenerierung und Anwendung
- Rebecca Reichenbach  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Evaluation von Geschäftsmodellen mit Hilfe der Kano-Methode
- Thomas Reichenbach  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Atomistic insights into dry friction and shear-induced nonequilibrium phase transitions in silicon and carbon materials

Georg Rödler\*  
Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule RWTH Aachen  
Entwicklung des selektiven Laserstrahlschmelzens für Al-Ni-Legierungen – Development of laser powder bed fusion for Al-Ni-alloys

Cong Tao  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Atomistic modeling of grain boundaries in SrTiO<sub>3</sub> and their effects on oxygen vacancies

Paul S. Zielonka\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Entwicklung und Charakterisierung von Siliziumnitrid-/Siliziumkarbidkompositen für den Einsatz in tribologisch hochbeanspruchten Gleitsystemen

Patrick Ziemke\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Chirale elastische Metamaterialien: Grundlegende Mechanismen und deren Nutzung zur Strukturoptimierung

## Studentische Arbeiten (Bachelor, Master, Diplom)

Robin Backes  
Hochschule Offenburg  
Material Data Fusion für die Versagensmodellierung von Aluminiumgussbauteile in der Crashesimulation unter Berücksichtigung von Defektverteilungen (M)

Manuel Batora\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Untersuchung lokaler Störeffekte in Gitterstrukturen mit Hilfe neuronaler Netze (M)

Patrik Beh  
Hochschule Furtwangen  
Entwicklung eines wasserbasierten Schmierstoffs für Gleitlager am biologischen Vorbild der Synovia (B)

Julia Bermuth\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Characterization of dislocation line length distribution related to Lomer reactions in dislocation networks (M)

Leonhard Böck\*  
Hochschule Offenburg  
Optimierung der tribologischen Eigenschaften von Gleitlagern und Gleitringdichtungen zur Minimierung von reibungsbedingten Energieverlusten (M)

- Sarp Dündar\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Development of the laser textured dimples post-processing on 100Cr6 Steel (B)
- Ashwini Elangovan  
Technische Universität Chemnitz  
Digitalization of material science data using semantic web technologies with knowledge graphs for high temperature metals (M)
- Pierre Ertault de la Bretonnière  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Untersuchung zur Anwendbarkeit von Festigkeitsnachweiskonzepten unter Druckwasserstoffatmosphäre (M)
- Tomás Freitas  
Technische Universität Darmstadt  
Qualification of tensile tests in internal and external gaseous hydrogen on conventional and tubular austenitic stainless-steel specimens (M)
- Alexis Gierczak\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Design and characterization of a tensile device for tomographic observation of stress corrosion at elevated temperatures (M)
- Manoj Shrikant Hegde  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Design and virtual validation of polypropylene mono-material lightweight battery enclosure for a mid-size electric vehicle (M)
- Ombeline Juteau\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Designing a metamaterial mimicking the mechanics of cartilage (M)
- Nveen Kumar Kanna  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Precipitation strengthening of aluminium alloys induced by cyclic plasticity (M)
- Hafiz Muhammad Adnan Naseer Khan  
Leibnitz Universität Hannover  
Development of a method for automated optimization of material parameter for fiber reinforced thermoplastic for the-crash simulation with FEM, on the bases of virtual experiments (M)
- Anna Joelle Klesen  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Untersuchungen von tribochemischen Vorgängen an einem Axialrillenkugellager (B)
- Christian Krämer  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Lokale Erfassung von Rissausgangsorten an Schweißverbindungen durch optische Dehnungsfeldmessung und Finite Elemente Simulation (M)
- Marion Kugler\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Oberflächen unterschiedlicher Endbearbeitungen unter tribologischer Belastung (M)
- Wenqui Li\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Influence of composition and friction and wear behaviour of (TiZr) C:H/a-C:H nanocomposite thin films in oscillating sliding contact (M)
- Antonia Müller  
Hochschule Offenburg  
Experimentelle Untersuchung der Lebensdauererlängerung von Rührreißschweißverbindungen nach dem Festwalzen (M)
- Marcel Münch  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tribologische und optische Eigenschaften von fluorierten Wachsen (M)
- Antonia Zoe Neidhardt  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Mechanismen der Graphitschmierung unter Wälzreibung (B)
- Omkar Satish Pawar  
Hochschule Coburg  
Material's fatigue characterization using quantum sensors (M)
- Paul Prestel  
Hochschule Mannheim  
Entwicklung und Konstruktion einer Atmosphärenbeaufschlagung für einen Hochtemperatur Gleitlagerprüfstand (B)
- Dominik Rapp  
Hochschule Offenburg  
Analyse von Ventilwerkstoffen hinsichtlich der Impact-Verschleißigenschaften unter erhöhter thermischer Belastung (B)
- Axel Reichenbacher  
Hochschule Offenburg  
Numerische Untersuchung von Hohlproben unter Wasserstoffeinfluss (M)

Dennis Revin  
Hochschule Offenburg  
Optimierung von Probengeometrien für die Validierung von Versagensmodellen für die Crashesimulation hochfester Stahlblechwerkstoffe (M)

Johannes Seitz  
Universität Duisburg-Essen  
Entwicklung von Algorithmen zur Analyse experimentell erhobener tribologischer Daten zur Verlängerung der Standzeit von Windkraftanlagen (M)

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

Meghal Shah  
TU Bergakademie Freiberg  
Estimation of parameters of the puck failure criterion for fiber-reinforced plastics with reliability analysis (M)

Vraj Soni\*  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Laser surface modification of titanium alloy Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V for tribological applications (B)

Dominic Stastny  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Investigation of friction modifier adsorption using a QCM (M)

Severin Sylla  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Development and testing of a non-reactive force field for carbon surfaces under tribological load (M)

Eduard Wolf  
Hochschule Offenburg  
Entstehung von Glaze-Layern bei CO-basierten Gleitlagerwerkstoffen unter hohen thermischen Belastungen (M)

Mojtabar Zar  
Ruhr-Universität Bochum  
FE simulation and surrogate modeling of SLS glass bending process using the Finite Element method and Gaussian process regression (M)

## Preise und Ehrungen

Alumni-Preis 2022 der Universität Freiburg, Fakultät Mathematik und Physik an Daniel Pfalzgraf für seine Masterarbeit »Deriving macroscopic diffusivity from a microscopic master equation approach« 01.07.2022, Freiburg

Förderpreis 2022 der Gesellschaft für Tribologie e. V. an Jennifer Eickworth für ihre Dissertation »Untersuchung tribochemischer Adsorptionsprozesse von Schmierstoffadditiven und ihrer synergetischen Wechselwirkungen« 27.09.2022, Göttingen

Poster Award »Sustainable development« des WTC – World of Tribology Congress 2022 an Franziska Stief für das Poster »Simulating lubricants' shear thinning considering additives« 15.07.2022, Lyon, Frankreich

Poster Award 2022 funded by MDPI International Conference: New frontiers in materials design for laser additive manufacturing 2022 an Claas Bierwisch für das Poster »Universal process windows for polymer laser powder bed fusion (PBF-LB/P)« 24.05.2022, Montabaur

Innovationspreis 2022 von Rolls-Royce Deutschland an Sophie Schackert und Michael Schlesinger für »Effizientes Prüfverfahren zur Bestimmung der thermomechanischen Ermüdungslebensdauer von additiv gefertigten Brennkammerschindeln unter komponentennahen Belastungen, 20.09.2022«, Cottbus-Senftenberg

Wissenschaftspreis des Stifterverbandes »Forschen im Verbund« Stifterverband und Fraunhofer-Gesellschaft e. V. an Michael Moseler und Matthias Scherge für »Die virtuelle Materialsonde für Reibspalte als Werkzeug zur Auslegung von diamantbeschichteten Gleitringdichtungen« 19.05.2022, Hamburg



# Abschlussberichte öffentlich geförderter Projekte

Rechnerische Methoden zur Bewertung des Schwellenwert- und Ausbreitungsverhaltens physikalisch kurzer Risse bei hohen Temperaturen am Beispiel einer additiv und konventionell gefertigten Nickellegierung

Abschlussbericht (2022)

Bellmer, M.; Schlesinger, M.; Brune, T.; Krämer, M.; Kontermann, C.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 20287

Projektlaufzeit: 01.01.2020 bis 31.03.2022

Industrietaugliche Spritzgießprozesse zur Replikation bioinspirierter Werkzeugoberflächen zur Erzeugung 3D-reibwertoptimierter Funktionskomponenten – Snake-Skin

Abschlussbericht (2022)

Fromm, A.; Koplin, C.; Deckert, M.; Weißer, D.

Fördermittelgeber: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg

Projektlaufzeit: 01.09.2018 bis 31.12.2021

Verbundprojekt KI-unterstützte Tomographie-Auswertung in Faserverbundbauteilen – KITA

Abschlussbericht (2022)

Grygier, J.; Huschle, M.; Scherrer, C.; Vogelbacher, C.; Fränkle, J.; Jatzlau, P.; Saurwein, C.; Schober, M.; Stöhr, G.; Hohe, J.

Fördermittelgeber: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg

Förderkennzeichen: AZ 36-3400.7/95

Projektlaufzeit: 01.10.2020 bis 31.12.2021

AluTrace – Virtuelles Design additiv gefertigter Aluminium-Leichtbaukomponenten durch die Vernetzung und Analyse rückverfolgbarer Daten in einem dezentralen Datenraum

Abschlussbericht (2022)

Huschka, M.; Dlugosch, M.; Friedmann, V.; Garcia Trelles, E.; Hoschke, K.; Klotz, U.; Preußner, J.; Schweizer, C.; Tiberto, D.

Fördermittelgeber: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg

Förderkennzeichen: 34-4224.044/21

Projektlaufzeit: 23.01.2020 bis 31.12.2021

Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Schmierstoff-Kunststoff-Wechselwirkungen und mechanischen sowie tribologischen Eigenschaften zur verbesserten Materialauswahl

Abschlussbericht (2022)

Koplin, C.; Oehler, H.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 20375 N | FVA-Nr. 8451

Projektlaufzeit: 01.10.2018 bis 30.09.2021

Verbundvorhaben TriboKon – Tribologische Konditionierung zum Verschleiß- und Korrosionsschutz mit Hilfe von biobasierenden Kühlschmierstoffen

Teilvorhaben 4: Nachweis der tribologischen Funktionsfähigkeit

Abschlussbericht (2022)

Linsler, D.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft BMEL

Förderkennzeichen: 22023918

Projektlaufzeit: 01.04.2019 bis 31.12.2021

Prozessentwicklung zur Erzeugung großflächiger hochorientierter Diamantscheiben als Werkstoff für Wärmespreizer und Schneidanwendungen – HODIA

Abschlussbericht (2022)

Meyer, F.; Fehrenbach, T.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

Förderkennzeichen: ZF4786101WO9

Projektlaufzeit: 01.04.2020 bis 31.03.2022

Ressourceneffiziente cobaltfreie Werkzeuge – Green-Tools

Abschlussbericht (2022)

Meyer, F.; Preußner, J.; Schmitz-Elbers, M.; Keunecke, M.;

Stein, C.; Vornberger, A.; Pötschke, J.; Fries, E.; Koch, P.;

Baron, S.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF

Förderkennzeichen: BMBF-0102/2021

Projektlaufzeit: 01.02.2021 bis 31.12.2021

Verbundprojekt VGB-Berechnungsverfahren – Berechnungsverfahren für kritische Kraftwerksbauteile beim flexiblen Betrieb von konventionellen Kraftwerken

Teilvorhaben: Berechnungsverfahren zur Lebensdauer von Bauteilen unter Berücksichtigung von Spannungsumlagerung und Kriechermüdung

Abschlussbericht (2022)

Oesterlin, H.; Maier, G.; Riedel, H.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

Förderkennzeichen: 03ET7078A

Projektlaufzeit: 01.01.2018 bis 31.12.2022

Zwanzig20 – HYPOS – Verbundvorhaben: H2-UGS Begleitforschung zur Eignung von Salzkavernen – Untergrundgas-speichern zur geologischen Speicherung von Wasserstoff aus fluktuierenden, regenerativen Quellen

Leitfaden Planung, Genehmigung und Betrieb von Wasserstoffkavernenspeichern

Abschlussbericht (2022)

Rockmann, R.; Keßler, B.; Kleinickel, C.; Henel, M.;

Maghaminik, A.; Marrune, C.; Krause, H.; Schweizer, F.;

Fabig, T.; Bombach, P.; Nowack, G.; Kirch, M.; Amro, M.;

Schwab, L.; Vogt, C.; Zill, F.; Görke, U.-J.; Abdel Haq, C.;

Faber, T.; Miersch, D.; Rehmer, K.-P.; Seckel, C.; Fröde, C.;

Pfeifer, K.; Zelter L.; Zemke, J.; Wanzenberg, E.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF

Förderkennzeichen: 03ZZ0721C

Projektlaufzeit: 01.09.2018 bis 28.02.2022

Ökonomische Entgasungs-Wärmebehandlung für galvanisch beschichtete Bauteile

Abschlussbericht (2022)

Schweizer, F.; Kölle, S.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 20816 N

Projektlaufzeit: 01.11.2019 bis 30.09.2022

Überlasten – Entwicklung eines validierten Konzepts zur Bewertung der Schwingfestigkeit nach Überlasten im Rahmen

der FKM-Richtlinien formulierten Festigkeitsnachweise

Abschlussbericht: FKM-Vorhaben-Bericht Nr. 613; Heft 345 (2022)

Varfolomeev, I.; Hemmesi, K.; Luke, M.; Ellmer, F.

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

Förderkennzeichen: IGF-Vorhaben 20086 N

Projektlaufzeit: 01.11.2018 bis 31.01.2022

## Vorlesungen

### Wintersemester 2021/22

#### Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Theory and Modeling of Materials: Electronic structure theory of condensed matter I

Prof. Dr. Christian Elsässer

Kontinuumsmechanik II

Dr. Dirk Helm

Wissenschaftliches Programmieren

Dr. Michael Walter

#### Hochschule Offenburg

Konstruktionselemente

Dr. Raimund Jaeger

Numerischen Methoden der Biomechanik

Dr. Christof Koplin

Orthopädische Biomechanik

Dr. Jörg Lienhard

#### Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Nanotribologie und -mechanik

Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Seminar zu studentischen Arbeiten am IAM-CMS

Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Tribologie

Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Prof. Dr. Matthias Scherge

Versagensverhalten von Konstruktionswerkstoffen:

Verformung und Bruch

Prof. Dr. Peter Gumbsch

Dr. Daniel Weygand

Prozesssimulation in der Umformtechnik

Dr. Dirk Helm

#### Universität Siegen

Composites I – Verbundwerkstoffe

Dr. Jörg Hohe

## Sommersemester 2022

### Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Theory and Modeling of Materials: Electronic structure theory of condensed matter II  
Prof. Dr. Christian Elsässer

Computational Physics: Materials Science  
Prof. Dr. Michael Moseler

Werkstoffwissenschaften  
Mario Schleyer

Quantum Transport  
Dr. Michael Walter

Werkstoffwissenschaften  
Franziska Wenz

### Hochschule Offenburg

Werkstofftechnik III Verbundwerkstoffe,  
Mechanik und Festigkeitslehre  
Frank Huberth

Werkstofftechnik IV Keramik  
Frank Huberth  
Dr. Andreas Kailer

Werkstofftechnik IV Kunststoffe  
Frank Huberth

Orthopädische Biomechanik  
Dr. Jörg Lienhard

Werkstofftechnik III und Verarbeitung  
Dr. Jörg Lienhard  
Frank Huberth

Schadenskunde  
Rolf Zeller

### Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

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

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

Nanotribologie und -mechanik  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Physik für Ingenieure  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Dr. Daniel Weygand; Prof. Dr. Alexander Nesterov-Müller;  
Prof. Dr. Peter Gumbsch

Physik für Ingenieure / Übung  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Praktikum »Tribologie«  
Prof. Dr. Martin Dienwiebel

Applied Materials Simulation/ Angewandte  
Werkstoffsimulation  
Prof. Dr. Peter Gumbsch  
PD Dr.-Ing. Katrin Schulz

Atomistische Simulation und Molekulardynamik  
Prof. Dr. Peter Gumbsch  
Dr. Daniel Weygand

Data Science and Scientific Workflows  
Prof. Dr. Peter Gumbsch  
Dr. Daniel Weygand

Werkstoffsimulation und angewandte  
Werkstoffsimulation  
Dr. Dirk Helm  
Dr. Claas Bierwisch  
Dr. Silke Sommer

Angewandte Werkstoffsimulation  
Dr. Silke Sommer

### Universität Siegen

Composites II – Werkstoffverbunde  
Dr. Jörg Hohe

# Impressum

---

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

## **Geschäftsführende Institutsleitung**

Institutsleitung  
Prof. Dr. Peter Gumbsch

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

## **Redaktion**

Thomas Götz (verantw.)  
Anabel Thieme

## **Konzept, Layout, Satz, Druck**

netsyn, Joachim Würger, Freiburg  
Fraunhofer Druckerei

© Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, 2023

## **Bleiben Sie auf dem Laufenden**

Internet: [www.iwf.fraunhofer.de](http://www.iwf.fraunhofer.de)  
LinkedIn: [Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM](#)  
Twitter: [FraunhoferIWM](#)  
YouTube: [Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM](#)

## **Bildnachweise**

© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; Titel  
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg;  
Umschlaginnenseite  
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 3  
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 4–5  
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 6  
© Fraunhofer IWM, Grafik: Gebhard|Uhl Freiburg; 9  
© istock.com/smirkdingo; 11  
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 14–15  
© Fraunhofer, Foto: Piotr Banczerowski; 14 (Mitte unten)  
© Fraunhofer IWM, Foto: Guido Kirsch; 19  
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 20  
© Fraunhofer ISE; 26  
© Fraunhofer, Foto: Piotr Banczerowski; 30–31  
© Institut für Fertigungstechnik keramischer Bauteile (IFKB); 32  
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 40–41  
© Pixabay/H. Hach; 45  
© Fraunhofer ICT; 46 (links)  
© Fraunhofer IWM, Foto: Kai-Uwe Wudtke; 50  
© Fraunhofer ILT; 52 (rechts oben, rechts unten)  
© iStock.com/Vanit Janthra; 58  
© iStock.com/Only5; 59

Alle weiteren Abbildungen

© Fraunhofer IWM

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

### **Die Fraunhofer-Gesellschaft**

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

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

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 76 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 30 000 Mitarbeitende, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,9 Milliarden Euro. Davon fallen 2,5 Milliarden Euro auf den Bereich Vertragsforschung. Rund zwei Drittel davon erwirtschaftet Fraunhofer mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund ein Drittel steuern Bund und Länder als Grundfinanzierung bei, damit die Institute schon heute Problemlösungen entwickeln können, die in einigen Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft entscheidend wichtig werden.

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

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

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

