



# JAHRESBERICHT 2023

Zentrum für Konstruktionswerkstoffe  
Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt  
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde







**Liebe Freunde und Partner des  
Zentrums für Konstruktionswerkstoffe,  
liebe Leserinnen und Leser,**

Ich freue mich, Ihnen mit diesem Jahresbericht in gewohnter Manier einen Rückblick auf das zurückliegende Jahr am Institut für Werkstoffkunde sowie der Materialprüfungsanstalt Darmstadt geben zu können. Das Jahr 2023 war ein ereignisreiches Jahr für uns alle. Die Corona-Pandemie war mit all ihren Unsicherheiten im Privaten und im Beruflichen noch nicht so richtig vorbei und zeigt bis heute Auswirkungen auf die Art der Zusammenarbeit an MPA und IfW. Mobiles Arbeiten ist für viele ein fester Bestandteil des Arbeitslebens geworden. Der Krieg an den Grenzen unseres Nachbarlands dauert an und zeigte dabei in 2023 seine Spuren nicht nur im Hinblick auf dramatisch gestiegene Energiekosten, die unseren Haushalt enorm belasten. So war 2023 ein Jahr mit einer Vielzahl an Veränderungen und Herausforderungen. Wir haben dabei aber erneut gezeigt, dass wir in der Lage sind auf Herausforderungen konstruktiv zu reagieren und die daraus entstehenden Aufgaben zu meistern. Wir mussten uns zu Anfang des Jahres damit auseinandersetzen, erhebliche Einsparungen im Verbrauch von Strom und Wärme durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Maßnahmen relativ zeitnah zu realisieren. Wir waren damit konfrontiert, dass Forschungsmittel generell knapper werden und auch bei unseren Kunden für Prüfaufträge eine Zurückhaltung zu spüren ist. Aber wir haben es geschafft! Wir haben unsere Energieziele eingehalten und einen ausgeglichenen Haushalt erreicht.

Wir haben tolle Forschungsergebnisse erzielt, erfolgreiche Anträge für unsere Zukunftssicherung geschrieben, unsere Infrastruktur für die Forschung und Prüfung weiter ausgebaut und ein gewaltiges Pensum an Prüf-, Mess-, und Kalibrieraufgaben erledigt. Wir haben neue Mitarbeitende eingearbeitet, Promotionen abgeschlossen und dabei das AMC auf der Lichtwiese in Betrieb genommen, das Glas Competence Center weiterentwickelt und unseren Umzug auf die Lichtwiese stark vorangetrieben und vorbereitet. Mit diesem Bericht wollen wir Ihnen einen Einblick in die vielfältigen Aktivitäten an MPA und IfW geben. Mein Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die durch ihren Einsatz und ihr Engagement die Aktivitäten vorangetrieben und viele Erfolge ermöglicht haben.

Ich wünsche Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, gute Unterhaltung mit dem Jahresbericht und danke Ihnen für Ihr Interesse an und Ihre Verbundenheit mit unserem Haus.

Ihr

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

## INHALT

ORGANISATION .....	4
PERSONALENTWICKLUNG Wir begrüßen / Wir verabschieden .....	6
PROMOTIONEN Wir beglückwünschen .....	8
NEUES AUS UNSEREM KOMPETENZBEREICH Kunststoffe und Verbunde .....	10
Mess- und Kalibriertechnik .....	11
Baustoffe .....	12
Oberflächentechnik .....	13
Werkstoffanalytik .....	16
Hochtemperaturwerkstoffe .....	18
Bauteilfestigkeit .....	20
FORSCHUNG Forschungshighlights .....	24
Strategiefelder .....	28
Kurzberichte zu abgeschlossenen Forschungsprojekten 2023 .....	35
Aktuelle Forschungsprojekte 2023 .....	46
ÜBERBLICK AUS DEM BEREICH LEHRE .....	50
VERANSTALTUNGEN, HIGHLIGHTS & AKTIVITÄTEN 2023 .....	52
VOTRÄGE & PUBLIKATIONEN 2023 .....	60

**Herausgeber**  
Zentrum für Konstruktionswerkstoffe  
Staatliche Materialprüfungs-  
anstalt Darmstadt (MPA)  
Fachgebiet und Institut für  
Werkstoffkunde (IfW)

Grafenstraße 2  
64283 Darmstadt  
Deutschland

Telefon: +49 6151 16-24 300  
Telefax: +49 6151 16-24 301

info@mpa-ifw.tu-darmstadt.de  
www.mpa-ifw.tu-darmstadt.de

### Autoren

*Pia-Sophie Becks, Petra Bender, Timo Brune, Jörg Ellermeier, Olesya Gosheva,  
Hansgeorg Haupt, Holger Hoche, Peter Hof, Felix Kölzow, Anna Kraemer, Marcus Klein,  
Michael Krämer, Christian Kontermann, Simon Marx (TUDa Racing Team e.V.),  
Matthias Oechsner, Rüdiger Reitz, Elke Stelzl-Schmincke, Matthias Seel, Michael Schwienheer,  
Romana Schwing, Alena Tschernich (TUDa Racing Team e.V.), Ludwig Veith*

### Fotografien und Abbildungen

*Sven Gaa, Peter Hof, Nina Mohr, Rüdiger Reitz, Nickl & Partner Architekten (München),  
Stefan Linn, Constanze Schneider (CONVINCING.media)*

### Grafik und Layout

*Nina Mohr*

# ORGANISATIONSTEAM

## LEITUNG MPA-IFW

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

 +49 6151 16-24900

 matthias.oechsner@tu-darmstadt.de

## STV. LEITUNG MPA

Dr.-Ing. Peter Hof

 +49 6151 16-25142

 peter.hof@tu-darmstadt.de

## STV. LEITUNG IFW

Dr.-Ing. Petra Bender

 +49 6151 16-24902

 petra.bender@tu-darmstadt.de

## CONTROLLING UND VERWALTUNG

Dr.-Ing. Petra Bender

 +49 6151 16-24902

 petra.bender@tu-darmstadt.de

## ASSISTENZ LEITUNG UND VERWALTUNG

Nina Mohr, B.A.

 +49 6151 16-24900

 nina.mohr@tu-darmstadt.de

## KOMPETENZBEREICHSL EITER Baustoffe

Dr.-Ing. Peter Hof

 +49 6151 16-25142

 peter.hof@tu-darmstadt.de

## KOMPETENZBEREICHSL EITER Kunststoffe und Verbunde

Dipl.-Ing. (FH) Ludwig Veith

 +49 6151 16-25107

 ludwig.veith@tu-darmstadt.de

## KOMPETENZBEREICHSL EITER Werkstoffanalytik

Dr.-Ing. Holger Hoche

 +49 6151 16-25074

 holger\_claus.hoche@tu-darmstadt.de

## KOMPETENZBEREICHSL EITER Mess- und Kalibriertechnik

Dr.-Ing. Jörg Ellermeier

 +49 6151 16-24340

 joerg.ellermeier@tu-darmstadt.de

## KOMPETENZBEREICHSL EITER Bauteilfestigkeit

Dr.-Ing. Marcus Klein

 +49 6151 16-25313

 marcus.klein@tu-darmstadt.de

## KOMPETENZBEREICHSL EITER Oberflächentechnik

Dr.-Ing. Rüdiger Reitz

 +49 6151 16-25070

 ruediger.reitz@tu-darmstadt.de

## KOMPETENZBEREICHSL EITER Hochtemperaturwerkstoffe

Dr.-Ing. Christian Kontermann

 +49 6151 16-24345

 christian.kontermann@tu-darmstadt.de

## ZERTIFIZIERUNGSSTELLE

Dr.-Ing. Petra Bender


 +49 6151 16-24902

 z-stelle@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

## INSPEKTIONSSTELLE

Uwe Frank

 +49 6151 16-24580

 i-stelle@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

# PERSONALENTWICKLUNG

## Wir verabschieden

ALLES GUTE UND HERZLICHEN DANK UNSEREN  
AUSGESCHIEDENEN KOLLEGINNEN UND KOLLEGEN

31.01.2023	–	Marcus Hingst (MW)
31.01.2023	–	Dr.-Ing. Fabian Kraemer (S)
28.02.2023	–	Dr.-Ing. Tongsheng Mao (H)
31.03.2023	–	Visheet Vidyottam Arya, M.Sc. (O)
31.03.2023	–	Dipl.-Ing. (FH) Theresa Stegmann (K)
30.06.2023	–	Dr.-Ing. Belash Bozorgian (W)
30.06.2023	–	Dipl.-Ing. (FH) Stefan W. Fuhrmann (W)
31.07.2023	–	Fabian Conrad, M.Sc. (H)
31.08.2023	–	Dirk Jobski, M.Sc. (H)
30.09.2023	–	Dipl.-Ing. (FH) Bertram Rapp (W)
31.12.2023	–	Florian Garnadt, M.Sc. (H)

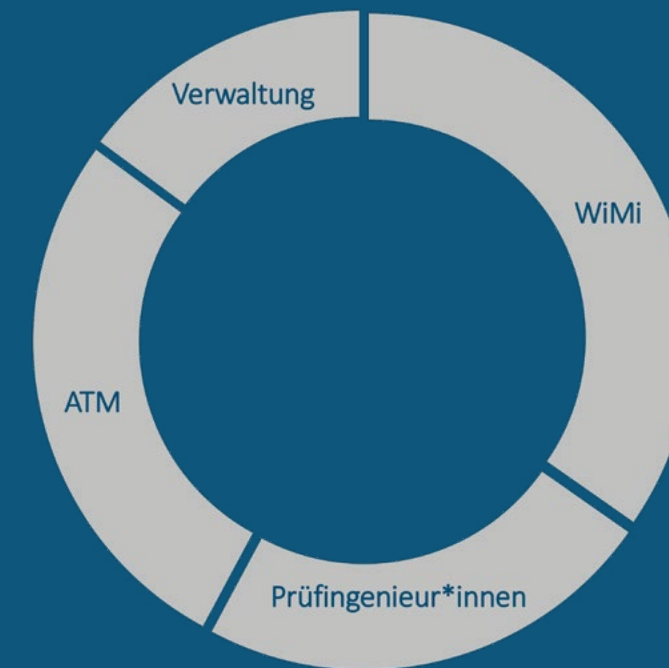
## Wir begrüßen

EIN HERZLICHES WILLKOMMEN DEN  
NEUEN KOLLEGINNEN UND KOLLEGEN

01.04.2023	–	Felix Kirmaier, M.Sc. (H)
29.08.2023	–	Luca Leuthäuser (Werkstoffprüfer-Azubi)
01.09.2023	–	Matthias Lenz, M.Eng. (W)
01.10.2023	–	Amon Jeremias Ditzinger, M.Sc. (H)
01.10.2023	–	Senmiao Zhang, M.Sc. (F)
01.11.2023	–	Stephan Christian Abel, M.Sc. (W)
15.11.2023	–	Anatoly Zaiat, M.Sc. (H)
01.12.2023	–	Aziz Ershadi Aghdam, B.Sc. (V/EW)

# DAS ZENTRUM IN ZAHLEN

**126** MITARBEITER\*INNEN (87/34 + 5 AUSZUBILDENENDE)\*



\*(MPA/IfW)  
Stand: 31.12.2023

**42** WISSENSCHAFTLICHE MITARBEITENDE (21/21)

**28** PRÜFINGENIEUR\*INNEN (26/2)

**33** TECHNISCHE ANGESTELLTE (24/9)

**18** VERWALTUNG / HAUSTECHNIK (16/2)

**5** AUSZUBILDENDE (5 WERKSTOFFPRÜFER\*INNEN)

# PROMOTIONEN 2023

Wir beglückwünschen

## **Anna-Katharina Kraemer**

Kompetenzbereich Bauteilfestigkeit

Dissertation:

Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen aus Stahl.

*Tag der mündlichen Prüfung: 25.04.2023*

*Mitberichterstatter:*

*Prof. Dr.-Ing. C. Mittelstedt - TU Darmstadt, Fachgebiet Leichtbau und Strukturmechanik*

## **Michael Brilz**

Kompetenzbereich Werkstoffanalytik

Dissertation:

Zur Bruchmechanik der wasserstoffassistierten Rissbildung in hochfesten Stählen.

*Tag der mündlichen Prüfung: 16.11.2023*

*Mitberichterstatter:*

*Prof. Dr. Ralph Hellmig - EJOT SE & Co. KG, Bad Berleburg*

## **Alexander Erbe**

Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe

Dissertation:

Ein Konzept zur on-line Implementierung von analogen Messwerten innerhalb struktur-mechanischer FEM Simulationen.

*Tag der mündlichen Prüfung: 22.11.2023*

*Mitberichterstatter:*

*Prof. Dr.-Ing. T. Melz - TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik*

## **Florian Garnadt**

Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe

Dissertation:

Beschreibung der effektiven zyklischen Beanspruchungssituation im Nahfeld einer Rissspitze für elastisch-plastisches Materialverhalten.

*Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2023*

*Mitberichterstatter:*

*Prof. Dr.-Ing. M. Vormwald - TU Darmstadt, Fachgebiet Werkstoffmechanik*



# NEUES AUS UNSEREN KOMPETENZBEREICHEN



## Kunststoffe und Verbunde

Dipl.-Ing. (FH)  
LUDWIG VEITH

+49 6151 16 - 25 107  
ludwig.veith@tu-  
darmstadt.de

Der Kompetenzbereich Kunststoffe und Verbunde ist in der Prüfdienstleistung im Bereich mechanisch-technologischer sowie chemischer, physikalischer und elektrischer Charakterisierung von Kunststoffen und Produkten aus Kunststoffen tätig. Darüber hinaus beschäftigt sich der Kompetenzbereich mit Forschungsvorhaben aus dem Strategiefeld „Additive Fertigung“ sowie aus dem Bereich der „Hochspannungs-Isolierstoffe“ und betreut Studienarbeiten wie Bachelor- und Masterarbeiten aus den zuvor genannten Themenbereichen.

Im Bereich der Dienstleistung konnte das Kundengeschäft für drucklose Rohrsysteme zur Abwasserbehandlung und für Kabelschutz im Erdbereich erweitert und neue Kunden vertraglich an unser Haus gebunden werden.

Für die allgemeinen Kunststoffprüfungen wurde im vergangenen Jahr ein neues Schmelzindex-Prüfgerät mit erweiterter Funktion für Multi-Load Messungen und Volumendurchsatz angeschafft. Die Rohrsystemprüfung wurde mit einer neuen Zeitstand-Innendruckanlage erweitert, welche datenbankbasierend Messdaten erfasst und digital verarbeitet.

Wie bereits in den zurückliegenden Jahren erfolgten auch im Jahre 2023 umfangreiche Untersuchungen an Isolierstoffen der Elektrotechnik in Wechselwirkung mit neuartigen Isoliertgasen zur Substitution von klimaschädlichen Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Die Arbeiten erfolgten durch Weiterführung eines ursprünglich vom BMWi/BMWK geförderten Vorhabens bei direkter Beauftragung durch die Siemens AG.

Auch die Forschungsarbeiten im durch das Hessische Ministerium für Digitale Strategie und Entwicklung im Förderprogramm Distr@I geförderte Forschungsvorhaben ‚RIFOKADD‘ (Ressourcen-effiziente Innovative Formwerkzeuge für die Kunststoffverarbeitung durch Additive

Fertigung und Digitalisierung) wurden weitergeführt. Neben Untersuchungen zum Einfluss der Additiven Fertigung auf Werkstoffzustand und Eigenschaften von Kunststoff-Formenstählen wurden insbesondere auch normative Aspekte in Bezug auf Qualitätssicherungsverfahren betrachtet.

Die Normung Additiver Fertigungsverfahren erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Werkstoffe (z. B. Metalle, Kunststoffe, Baustoffe, Keramiken), Prozesse (z. B. selektives Laserschmelzen PBF-LB/M) und teilweise hoch-regulierter Anwendungen (z. B. Druckgeräte, Luftfahrt, Medizintechnik) und berührt damit viele traditionelle Arbeitsgebiete von MPA-IfW. Zusätzlich werden, wie auch bei RIFOKADD, Aspekte der Qualitätssicherung und Digitalisierung adressiert, wodurch die realisierten Normungsprojekte oftmals sehr umfangreich und vielschichtig sind. Zuständig sind auf nationaler Ebene der DIN-Normenausschuss NA 145-04, auf europäischer Ebene das Technische Komitee CEN/TC 438 und international das Technische Komitee ISO/TC 261 der Internationalen Organisation für Normung (ISO) in Kooperation mit ASTM, einer amerikanischen Normungsorganisation. Seit November 2023 wird aus den Reihen des Kompetenzbereichs Kunststoffe und Verbunde der Leiter des gesamten DIN-Fachbereichs ‚Additive Fertigung‘ (DIN NA 145-04 FBR) gestellt. Hierdurch können die Erfahrungen von MPA-IfW, insbesondere aber auch die Expertise aus dem Additive Manufacturing Center (AMC), nicht nur auf fachlicher, sondern auch auf strategisch-politischer Ebene in die Normungsarbeit eingebracht werden.

## Mess- und Kalibriertechnik

Die Nachfrage nach unseren Kalibrierleistungen hat auch 2023 wieder leicht zugenommen. Damit wir den Wünschen unserer Kunden ideal entsprechen und einen all umfassenden Service, verbunden mit Wettbewerbsvorteilen bei der Kalibrierung von Werkstoffprüfmaschinen und Kraft- und Drehmomentmessgeräten sowie bei Sonderprüfmaschinen anbieten können, benötigen wir äußerst kompetente und motivierte Mitarbeiter. Wir freuen uns, dass wir für unseren Kompetenzbereich zwei sehr kompetente neue Mitarbeiter gewinnen konnten, so dass wir personell weiter sehr gut aufgestellt sind. Hinsichtlich unserer Kraft- und Drehmomentbezugsnormal-Messeinrichtungen und Gerätetechnik achten wir auf stetige Modernisierung, Entwicklung und Erweiterung. So können wir aufgrund unserer sehr guten personellen und gerätetechnischen Ausstattung den hohen Bedarf an Kalibrierleistungen stets erfüllen.

Unser Portfolio hat sich erweitert. Wir haben auf Kundenwunsch die Kalibrierung der Traversengeschwindigkeit nach ASTM E 2658-15 mit aufgenommen.

### Zukunft der Mess- und Kalibriertechnik

In den nationalen und internationalen Fachausschüssen (DIN, ISO, DKD, VMPA) standen Verbesserungen und Erweiterungen von Kalibriertätigkeiten im Fokus der Arbeiten. Zur Überprüfung der Qualität von Schwingprüfmaschinen wird bei DIN und

ISO an einer Norm zur dynamischen Kalibrierung gearbeitet. Vorab wurde im DKD-Fachausschuss eine Richtlinie zu dem Thema erarbeitet. Bisher erfolgt die Kalibrierung der Schwingprüfmaschinen ausschließlich statisch. Bei der Kalibrierung von statischen Prüfmaschinen (Zugversuch) wird an der PTB in Braunschweig sowie bei ISO und DKD der Unterschied zwischen der bisherigen stufenweisen Kalibrierung gegenüber einer Kalibrierung mit kontinuierlicher Krafterhöhung untersucht. Im VMPA-Arbeitskreis „Prüfmaschinen und Prüfgeräte“ wurde eine neue VMPA-Richtlinie für Mehrgrößenprüfstände erarbeitet. Damit wurde eine wesentliche Grundlage geschaffen, damit auch Prüfstände, bei denen mehrere Größen überwacht werden müssen (wie z. B. Reifenprüfstände), bei denen aber keine Norm verfügbar ist, kalibriert werden können. Außerdem wird in den Fachausschüssen an dem maschinenlesbaren Kalibrierschein gearbeitet.

### Reakkreditierungsaudit

Der Kompetenzbereich Mess- und Kalibriertechnik wurde in 2023 reakkreditiert. Es wurden sämtliche von uns angebotenen Kalibrierleistungen, sowohl für die Kalibrierungen im Kalibrierlaboratorium als auch für die Kalibrierungen vor Ort, einer intensiven Begutachtung durch DAkkS-Gutachter:innen unterzogen. Das Reakkreditierungsaudit wurde erfolgreich durchgeführt.

### Weiterbildungsangebote aus dem Kompetenzbereich Mess- und Kalibriertechnik (W)

Am 7. Dezember 2023 wurde, passend zu den Aktivitäten in den Fachausschüssen in Darmstadt, ein Werkstofftechnisches Kolloquium mit dem Thema „Zukunft der Mess- und Kalibriertechnik“ veranstaltet. In dem Werkstofftechnischen Kolloquium wurden die aktuellen Themen aus den nationalen und internationalen Fachausschüssen (DKD, DIN, ISO, VMPA) von kompetenten Fachleuten für Leiter und Mitarbeitende von Laboratorien, Kalibrierdiensten, Hersteller von Prüf- und Messeinrichtungen, Zertifizierern sowie QM-Beauftragte und Auditoren vorgetragen. Die wichtigen Zukunftsthemen wie der digitale Kalibrierschein, KI, dynamische und kontinuierliche Kalibrierung, kleine Kräfte und große Drehmomente (Windkraftanlagen) wurden adressiert. Der Austausch mit den Experten sowie den Kolleginnen und Kollegen vor und nach den Vorträgen war dabei ein wesentlicher Bestandteil der Veranstaltungen. Die Veranstaltung wurde mit über 50 Teilnehmenden sehr gut angenommen.

**MPA-IfW Härteseminar in Darmstadt: November 2024 (geplant)**

DR.-ING.  
JÖRG ELLERMEIER

+49 6151 16 - 24 340  
joerg.ellermeier@tu-  
darmstadt.de



Abb. 1: Herstellung von Betonrohren im Schleuderverfahren

## Baustoffe

DR.-ING.  
PETER HOF

+49 6151 16 - 25 142  
peter.hof@tu-  
darmstadt.de

Der Kompetenzbereich Baustoffe ist vorrangig in der Produktqualifizierung verschiedenster Produkte aus dem Bereich der mineralischen Baustoffe sowie Glas als konstruktiver Werkstoff tätig. Neben der Prüfung sind Inspektion und Zertifizierung von Produkten und Prozessen wesentlicher Bestandteil der Qualitätsüberwachung. Im Bereich der Mehrscheiben-Isoliergläser wurden die Prüf- und Überwachungstätigkeiten um einen weiteren Themenbereich erweitert. Für die Untersuchungen im Rahmen der Mehrscheiben-Isoliergläser wurde ein neuer Gaschromatograph angeschafft. Dadurch können diese Prüfungen jetzt mit modernster Ausrüstung und weiter in hoher Qualität durchgeführt werden.

Durch grundlegende Änderungen im Zusammenspiel zwischen europäischem Bauproduktrecht und nationalen Baurechtsanforderungen werden zunehmend Anforderungen aus einer baurechtlich geforderten Zertifizierung in eine freiwillige Zertifizierung oder eine freiwillige Prüfung durch Dritte Stellen verlagert. Dies geschieht einerseits durch von unserer Seite vermehrt angebotene Zertifizierungsprogramme, aber auch durch neu eingeführte Gütezeichen, zum Bsp. durch RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.. In diesem Jahr wurde der erste Entwurf einer neuen Bauproduktenverordnung vorgelegt, der nun in den europäischen Gremien verhandelt wird. Es ist davon auszugehen, dass es durchaus einige Änderungen, die unsere Tätigkeiten betreffen, geben wird.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Statik und Konstruktion des Fachbereichs Bauingenieurwesens der TU Darmstadt wird aktuell ein durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft e. V. (DFG) gefördertes Forschungsprojekt zum Thema Additive Fertigung von Glas bearbeitet. Diese Forschung befindet sich, im Gegensatz zu Metallen und Kunststoffen, noch im Anfangsstadium und bietet völlig neue Möglichkeiten für individuelles Design.

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens ist es, durch die Analyse der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen grundlegende Erkenntnisse über den integrierten Fügeprozess des Schmelzschichtens von Glas auf Flachglas für einen homogenen und reproduzierbaren Fügebereich zu gewinnen. Dabei sollen Prozessparameter für eine definierte Verbindung zwischen einer Glasplatte und aufgetragenen Glaslagen sowie deren mechanische Eigenschaften herausgearbeitet werden. Dazu wurde ein Laboraufbau zur additiven Herstellung von Glasstrukturen entworfen und umgesetzt. Ein weiteres Ziel ist die Identifizierung möglicher struktureller Anwendungen für neuartige Glasverbindungen auf Flachglas. Dieser Projektantrag wird mit unseren Partnern im Glass Competence Center (GCC) bearbeitet.

Kontinuierliche interdisziplinäre Forschung ist der Motor zur Entwicklung neuer Anwendungsbereiche von Glas. Die personelle und strukturelle Verflechtung des GCC mit unserem Hause wurde weiter intensiviert und systematisiert. Durch regelmäßigen fachlichen Austausch im Bereich der Forschung und Prüfung werden die gemeinsamen Ziele konsequent verfolgt. Die Versuchstechnik beider Institutionen wird im Rahmen der Zusammenarbeit wechselseitig genutzt. Dies erweitert für beide Partner das Portfolio im Sinne unserer Kunden.

Aufbauend auf einem in 2021 abgeschlossenen Forschungsprojekt zu den Qualitäten der geschnittenen Glaskanten wurde dieses Jahr über die zuständigen Normungsgremien eine Initiative gestartet, die dort gewonnen Erkenntnisse in die Normung auf europäischer Ebene einfließen zu lassen. Weitere Fragen zu dem Thema Qualitäten der Glaskanten bei gesäumten, geschliffenen und polierten sowie mittlerweile auch gelaserten Kanten werden in größeren und kleineren meist bilateralen Projekten untersucht. Hierbei werden die für die mechanische Festigkeit wesentlichen Prozessparameter der verschiedenen Verarbeitungsvorgänge erforscht.

## Oberflächentechnik

### Materialverträglichkeit im Kontext erneuerbarer Energien

Bereits in den vergangenen Jahren haben wir unsere Forschungsaktivitäten bewusst auf wissenschaftliche Fragestellungen zur Materialverträglichkeit für einen nachhaltigen Einsatz konzentriert. Nachhaltigkeit verstehen wir dabei stets als Einklang aus ökologischen und wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aspekten. Auch im Jahr 2023 konnten wir diesen Anspruch unter anderem mit Forschungsprojekten in den Bereichen „Wasserstoffwirtschaft“, „alternative Antriebe“ und „Additives Fertigen“ erfolgreich ausweiten. Die jeweilige Forschungsfrage knüpft stets am praktischen Nutzen der betrachteten Werkstoffsysteme an: Ausgehend von einem meist komplexen Anwendungsszenario identifizieren wir zunächst schädigungsrelevante Beanspruchungskenngrößen und entwickeln daraus geeignete Prüfverfahren, welche die Applikation eines definierten Beanspruchungskollektivs zulassen. Die Erarbeitung von industriell nutzbaren Prüfmethoden und Richtlinien runden diesen Prozess ab. Wir beschränken uns nicht nur auf ein rein empirisches Vorgehen. Unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erforschen vor allem die zugrundeliegenden Degradationsprozesse. Grundlagenforschung ist dabei kein Selbstzweck: Aus einem Mechanismen-basierten Verständnis zur Werkstoffinteraktion lassen sich wiederum optimierte Lösungen für den Feldeinsatz ableiten.

### Innovative Entwicklungen aus unseren Kompetenzfeldern

Ein Forschungsschwerpunkt im **Kompetenzfeld Korrosion** liegt in der Entwicklung elektrochemisch-instrumentierter Prüfverfahren. Maßgebliche Fortschritte konnten wir durch die Einbindung lokaler Methoden, beispielsweise zur Charakterisierung von

Schweißverbindungen (siehe Beitrag zum Projekt „RührKorro“, S. 38), erzielen. Darüber hinaus gelang die konstruktive Auslegung und Fertigung einer Messeinrichtung für Medien mit niedriger elektrischer Leitfähigkeit (Beispiele: Kraftstoffe, Kühlmittel, Thermoisolationsfluide). Technologische Herausforderungen, wie eine präzise Positionierung der Elektroden und erhöhte Anforderungen an die Sensitivität, konnten erfolgreich gelöst werden. Das entwickelte Equipment ist bereits im Einsatz für eigene Vorstudien und finden zudem Einzug in jüngste Forschungsinitiativen. Mit Blick auf den Stellenwert des **Wasserstoffs** im energiepolitischen Transformationsprozess adressiert ein weiterer Schwerpunkt Fragestellungen der Werkstoffinteraktion mit Wasserstoff, beispielsweise durch Fertigung und im Betrieb. Grundlegende Prüfverfahren konnten wir in folgenden Anwendungsfeldern erarbeiten:

- Elektrochemische in-Situ Beladung als Basis für die Charakterisierung des Absorptions- beziehungsweise Permeationsverhaltens infolge Wasserstoffinteraktion. Im laufenden Vorhaben „InhiBeizNorm“ verbinden wir die in einem Beizprozess entstandene und über Wasserstoffpermeation bestimmte absorbierte Wasserstoffmenge mit der mechanischen Werkstoffdegradation an sogenannten C-Ring-Proben unter dem Einfluss verschiedener handelsüblicher Beizinhibitoren. Das Permeationsverhalten ist dabei an die Messsensitivität geknüpft. Im Vorhaben konnte dies durch die Entwicklung einer elektrochemisch-instrumentierten Messmethode mit der benötigten Auflösung realisiert werden. Weitere Informationen finden Sie auf Seite 31.

DR.-ING.  
RÜDIGER REITZ

+49 6151 16 - 25 070  
ruediger.reitz@tu-  
darmstadt.de



- Ein innovativer Ansatz gelang durch die Inbetriebnahme des Druckwasserstofflabors als Ergebnis des im Rahmen von EU-React geförderten Projekts „H2HT-Lab“. Motiviert durch den perspektivisch zunehmenden Einsatz von Wasserstoff in Gasturbinen der Energiewirtschaft, untersuchen wir im Verbundprojekt „HyPower“ den Einfluss einer Materialeexposition mit Druckwasserstoff und bei überlagerter mechanischer Beanspruchung am Beispiel sogenannter Hohlproben. Weiterführende Informationen hierzu sind dem Beitrag des Strategiefelds Wasserstoff zu entnehmen (Details H2HT-Lab, Seite 32).

Forschungsschwerpunkt im **Kompetenzfeld Betriebsstoffe** bildet die Materialverträglichkeit in regenerativen Kraftstoffen und Kühlmedien im integrierenden Thermomanagement moderner Antriebe. Dazu sind wir in zahlreichen anwendungsnahen als auch grundlagenorientierten Forschungsvorhaben engagiert. Im Sinne eines optimalen Wissenstransfers entwickeln wir Prüfmethode im Spannungsfeld zwischen dem praktischen Nutzen einerseits und einem Verständnis über die zugrundeliegenden schädigungsrelevanten Einflussgrößen andererseits.

Zukunftsrelevante Anwendungsfelder für **synthetische Kraftstoffe** liegen unter anderem in den Bereichen Schwerlasttransport, Luftfahrt sowie im maritimen Umfeld. Neben Dieseleratzkraftstoffen, wie beispielsweise Oxymethylenether (OME), sind vor allem Methanol und Ammoniak, nicht zuletzt auch aufgrund ihres technologischen, wirtschaftlichen und klimapolitischen Potenzials, Gegenstand unserer Forschungsinitiativen:

- Im abgeschlossenen Verbundvorhaben „NAMOSYN“ konnten wir kompatible Werkstoffe für kraftstoffführende Bauteile im Betrieb mit OME identifizieren und zugleich die Randbedingungen für Qualitätsanforderungen zur Kraftstoffreinheit erarbeiten. Zum Beispiel weisen die untersuchten Stahlwerkstoffe im OME3-5-Blend eine hervorragende Materialverträglichkeit auf. Allerdings können bereits geringste Mengen an Verunreinigungen, wie sie beispielsweise infolge hygroskopischer Wechselwirkung im Feld vorliegen, teils gravierende Korrosionsschäden begünstigen. Weiterführende Informationen hierzu sind unter anderem dem Kurzbericht zum Projektabschluss zu entnehmen.

- Ein Verständnis über die grundlegenden Prozesse der Alkoholatkorrosion auf mikroskaliger Ebene konnten wir im DFG-Vorhaben „AlKoMo II“ erarbeiten. Eine Besonderheit stellt die Entwicklung unseres Mikroreaktors dar: Am Beispiel ethanolhaltiger Ottokraftstoffe gelang dadurch eine präzise Beschreibung der Wechselwirkung relevanter Einflussfaktoren. Hierzu zählen die Medientemperatur, die Expositionszeit, der Werkstoffzustand und die Kraftstoffformulierung. Die Kooperation mit dem Projektpartner erlaubt ferner eine numerische Modellierung von Korrosionsinitiation und der Angriffsmorphologie.
- Jüngste Forschungskonzepte konzentrieren sich auf maritime Anwendungsfelder und die Versorgungsinfrastruktur (Lagerung, Pipelinetransport). Innovative Prüfmöglichkeiten ergeben sich auf Basis einer elektrochemisch-instrumentierten in-Situ Exposition; das Einsatzpotenzial konnte bereits erfolgreich in ersten Vorabstudien validiert werden.

Integrierendes Thermomanagement: Einsatz von **Kühlmitteln** in Brennstoffzellen und batterieelektrischen Hybridantrieben

- Exemplarisch am Beispiel einer Zylinderkopfkühlung untersuchen wir im Vorhaben „Strömungserosion II“ die Interaktion von glykolbasierten Kühlmitteln in Kontakt mit ausgewählten Aluminiumgusslegierungen. Neben der chemischen Wechselwirkung ist das Beanspruchungskollektiv durch eine Überlagerung von strömungsdynamischer, thermischer und elektrochemischer Beanspruchung gekennzeichnet. Entsprechend heterogen ist der Befund: je nach lokalem Strömungsprofil, thermischen Eintrag und Kühlmittelblind stellen sich unterschiedliche Reaktionsmuster ein. Mit dem Projekt einhergehend erfolgte die Entwicklung einer Referenzprobe (Komplexkanal) sowie die Integration in ein innovatives Prüfverfahren (Flow Dynamic Corrosion Test – FDC), was bereits industriellen Einzug durch die Prüfrichtlinie FVV R607 erhalten konnte.
- Im FVV-Vorhaben „Kühlung Brennstoffzelle II“ entwickeln wir eine Prüfeinrichtung, welche die Vielfalt der Beanspruchungskenngrößen realer Brennstoffzellenkühlsysteme auf ihre wesentlichen Einflussfaktoren reduziert und damit eine produktspezifische Materialprüfung ermöglicht. Weiterführende Information hierzu sind dem Projektbericht zu entnehmen

- Gegenstand jüngster Forschungsinitiativen ist die Einbindung von öl-basierten Kühlkonzepten (E-Motor). Hierzu zählt auch eine erweiterte Betrachtung zur Werkstoffbeständigkeit von Komponenten des elektrischen Antriebstrangs. Projektübergreifende Aktivitäten im Bereich der Brennstoffzellennutzung erarbeiten wir gegenwärtig unter anderem mit unserem Kooperationspartner TH Nürnberg.

Neben der Anwendung etablierter Verfahren zur Charakterisierung von Oberflächeneigenschaften und dem Verschleißverhalten entwickelt das **Kompetenzfeld Tribologie** funktionelle Schichtsysteme, beispielsweise zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit oder der Einbindung von Sensoren auf additiv gefertigte Bauteiloberflächen.

- Im Vorhaben „KavErm“ entwickeln wir eine flächige Charakterisierungsmethodik zur Ermittlung von Schichtdefekten am Beispiel funktionaler PVD-Schichten. Die meist stochastisch verteilten Störstellen führen zu einer lokal eingeschränkten Schichtanbindung, welche wiederum mit etablierten Verfahren (wie dem Ritztest) nur bedingt detektiert werden können. Die Güte einer solchen lokalen Schichtprüfung hängt maßgeblich von der Wahl des zu untersuchenden Oberflächenbereichs ab. Der innovative Aspekt des Projekts „KavErm“ besteht in der flächigen Materialbeanspruchung: Experimentell erfolgt die Einwirkung der **Kavitationbeanspruchung** auf Basis eines Ultraschallkoppelschwingers (UKS). Die Sonotroden des UKS wurden zur gezielten Einstellung der Kavitation angepasst. Darüber hinaus wird die Beanspruchung durch Variation der viskosen Eigenschaften des Mediums variiert. Im Sinne einer pränormativen Untersuchungsmethodik erfolgt die Validierung anhand von einfach konturierten, funktionellen PVD-Referenzoberflächen. Dies erlaubt wiederum eine produktspezifische Beschreibung der flächigen Haftungseigenschaften der Beschichtungen.
- Einen innovativen Ansatz zur **Sensorintegration additiv-gefertigter Bauteile** verfolgen wir im DFG-Schwerpunktprogramm SPP 2419 „HyCam“. Das Flammverhalten in einer mit Wasserstoff betriebenen Brennkammer unterscheidet sich eklatant vom Einsatz fossiler Kraftstoffe. Die Brennkammerwand ist im Betrieb mit Wasserstoff einem zunehmendem

Wärmeeintrag und damit einer höheren thermischen Beanspruchung ausgesetzt. Im Verbundvorhaben forscht der Kompetenzbereich Oberflächentechnik – zusammen mit dem Institut für Werkstoffkunde der Universität Kassel sowie den beiden Instituten „Reaktive Strömungen und Messtechnik (RSM)“ und „Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme (STFS)“ des Fachbereichs Maschinenbau der TU Darmstadt – unter anderem an einer additiv gefertigten, in die Brennraumwand integrierbaren Effusionskühlung (Abb. 1).

Ein begleitendes Ziel des SPP ist die grundlegende Charakterisierung des spezifischen Brennverhaltens von Wasserstoff um daraus konstruktive Optimierungsstrategien abzuleiten. Der Forschungsschwerpunkt im Kompetenzbereich Oberflächentechnik liegt dabei in der Optimierung der Integrationsfähigkeit von Temperatursensoren in der Brennkammerwand. Die Sensoren sollen bei der additiven Fertigung schichtweise eingebettet werden. Angelehnt an etablierte Sensoren für Schneidwerkzeuge sollen in einem ersten Schritt die Temperatursensoren mithilfe des PVD-Verfahrens auf ein AM-gefertigtes Bauteil appliziert werden. Eine technologische Herausforderung besteht in der begrenzten Schichtanhaftung aufgrund der mit der additiven Fertigung verbundenen Oberflächenfeingestalt; diese weist eine für den PVD-Prozess eher ungünstig raumkonturierte Oberfläche auf. Zum Berichtszeitpunkt arbeiten wir bereits an einer optimierten PVD-Prozesseinstellung für die benötigte elektrische Isolationsschicht. Im nächsten Schritt erfolgt die Bauteilintegration des Sensors mithilfe des Verfahrens Direct Energy Deposition (DED).

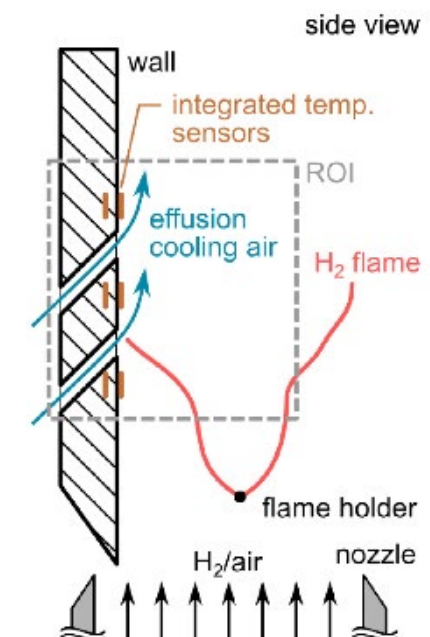


Abb. 1: Prinzipskizze zur Integration von Thermosensoren



## Werkstoffanalytik

DR.-ING.  
HOLGER HOCHÉ

+49 6151 16 - 25 074  
holger\_claus.hoche@tu-  
darmstadt.de

Die Schnittmenge aller Aktivitäten des Kompetenzbereichs Werkstoffanalytik in den Bereichen Forschung, Lehre und Ingenieurdienstleistungen ist es, die heute oft vorwiegend phänomenologischen Erkenntnisse zu einem mechanismenbasierten Verständnis der Beziehung zwischen Fertigungsprozess, Mikrostruktur und Eigenschaft von Werkstoffen und Werkstoffsystemen zu erweitern.

Die breit aufgestellten Forschungsaktivitäten umfassen die Themenbereiche der Oberflächenbehandlung durch Beschichtungen, Überzüge und Thermo-diffusionsverfahren, die Wasserstoffversprödung hochfester Stähle, die Additive Fertigung sowie die zerstörungsfreie Materialcharakterisierung mittels Röntgenstrahlung.

Die aus den Forschungsergebnissen abgeleitete Kenntnis von Wirk- und Schädigungsmechanismen dient der Verbesserung von Bauteilnutzung und -leistungsfähigkeit, der Erhöhung der Lebensdauer und der Verbesserung der Sicherheit.

So hat unser Kollege Michael Brilz im Rahmen seiner Forschungsaktivitäten eine neuartige Methode entwickelt, um die Anfälligkeit hochfester Stähle gegenüber einer Wasserstoffversprödung an einfachen Rundproben mit Hilfe bruchmechanischer Kennwerte zu beschreiben. Der neue bruchmechanische Ansatz berücksichtigt die momentane Risswachstumsgeschwindigkeit, welcher von der H-Diffusion an die Risspitze abhängig ist. Die Methode hat den Vorteil, dass erstmals gleichermaßen Systemgrößen als auch Werkstoffkennwerte mit einer einfachen Prüfstrategie bestimmbar sind. Für seine hervorragenden Forschungsarbeiten hat Michael Brilz am 16.11.2023 seine Disputation mit Auszeichnung bestanden. Auch die Leistungen von Thomas Ulrich wurden anerkannt, indem ihn die Society of Vacuum Coaters (SVC) im Rahmen des Student Sponsorship Programs einlud,

um seine Ergebnisse auf der diesjährigen SVC-Konferenz in Maryland, USA, zu präsentieren. Er hat erfolgreich ein PVD-Schichtsystem auf Basis von TiMgGdN weiterentwickelt, welches erstmals korrosionsanfällige Vergütungsstähle langfristig vor Korrosion und Verschleiß schützt und damit eine vielversprechende Alternative für die aus kanzerogenen Ausgangsstoffen hergestellten Hartchromschichten darstellt. Eine weitere Keynote zu diesem Schichtsystem wurde auf der International Conference on Metallurgical Coatings Thin Films (ICMCTF) durch Holger Hoche dem internationalen Fachpublikum in San Diego, USA, vorgestellt. Im Bereich der zinkbasierten Korrosionsschutzüberzüge konnten wir zwei weitere Forschungsprojekte akquirieren. Ein Projekt befasst sich mit der Neuauflage der DAST-Richtlinie 022 zum sicheren Feuerverzinken von Baustählen, indem die heute vermehrt zum Einsatz kommenden hochfesten Stahlgüten sowie neue, bleifreie Zinkschmelzen berücksichtigt werden. Im Bereich der galvanischen Überzüge werden wir uns ab Januar 2024 mit galvanischen Zn-Ni-Schichten befassen, um mittels bruchmechanischer Ansätze sowohl das fertigungs- als auch das betriebsbedingte Wasserstoffgefährdungspotenzial zu beziffern und daraus entsprechende werkstoff- und systemspezifische Kenngrößen abzuleiten. Neben der Bauteilsicherheit gegenüber einer Wasserstoffversprödung befassen wir uns auch mit der Thematik Wasserstoff als Energieträger in zwei Forschungsprojekten. Gemeinsam mit Projektpartnern arbeiten wir sowohl im Grundlagenbereich (DFG), als auch im Bereich der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) an der Oberflächenmodifizierung austenitischer Bleche für Bipolarplatten mittels Plasmadiffusionsverfahren.

Unsere aktuellen Aktivitäten im Bereich der Additiven Fertigung befassen sich mit dem sicheren Einsatz additiv herge-

stellter Druckgeräte durch verbesserte Qualitätssicherungs- und Konstruktionsmaßnahmen. Gemeinsam mit zwei Projektpartnern haben wir uns die Entwicklung prozessspezifischer Prüfkörpergeometrien, eines qualitativen Prozessmonitorings sowie die Entwicklung produktspezifischer Funktionsintegrationen zum Ziel gesetzt. Durch unsere Mitarbeit in entsprechenden Normungsgremien werden die erzielten Ergebnisse in Normen und Standards einfließen, um die Additive Fertigung auch für sicherheitsrelevante Bauteile wie Druckgeräte zu erschließen. Aktuell bearbeiten wir im Kompetenzbereich neun Forschungsprojekte, die mehrheitlich in Zusammenarbeit mit Industriepartnern durchgeführt werden und sich durch ihre Anwendungsnähe auszeichnen.

Nicht nur unsere Wissenschaftler sind sehr aktiv, sondern auch unser Labor-team: So haben die Kollegen Dieter Mohr und Casper Pusch die Leitung des Arbeitskreises Metallographie Rhein Main übernommen und Anfang November erstmals nach Auslauf der einschneidenden Corona Restriktionen am neuen Additive Manufacturing Center (AMC) der TU Darmstadt eine Sitzung organisiert. Dort haben sich die Fachleute aus der Metallographie im Rahmen vieler interessanter Vorträge ausgetauscht.

Mit der Inbetriebnahme des AMC ist bereits ein Teil unserer Analytik auf die Lichtwiese gezogen, unter anderem der gesamte Bereich der Röntgenanalytik mit unserem Computertomographen. Ein zweiter hochauflösender Computertomograph wurde dort ebenfalls erfolgreich in Betrieb genommen. In der Folge des Umzugs und der erforderlichen Genehmigungsverfahren konnten wir in den ersten sechs Monaten des Jahres 2023 keine Leistungen im Bereich der Röntgenanalytik anbieten. Nach dem Wiederanlauf der Röntgenanalytik zeigte sich schnell der Standortvorteil AMC aufgrund der regen Nachfrage.

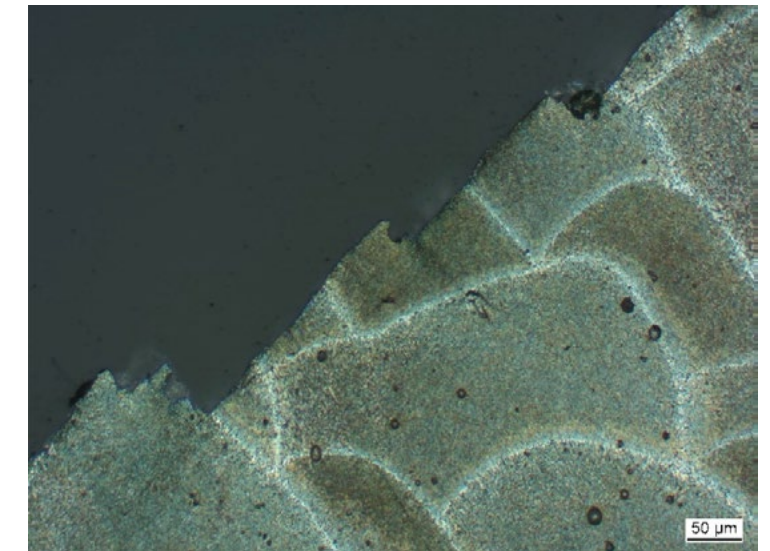
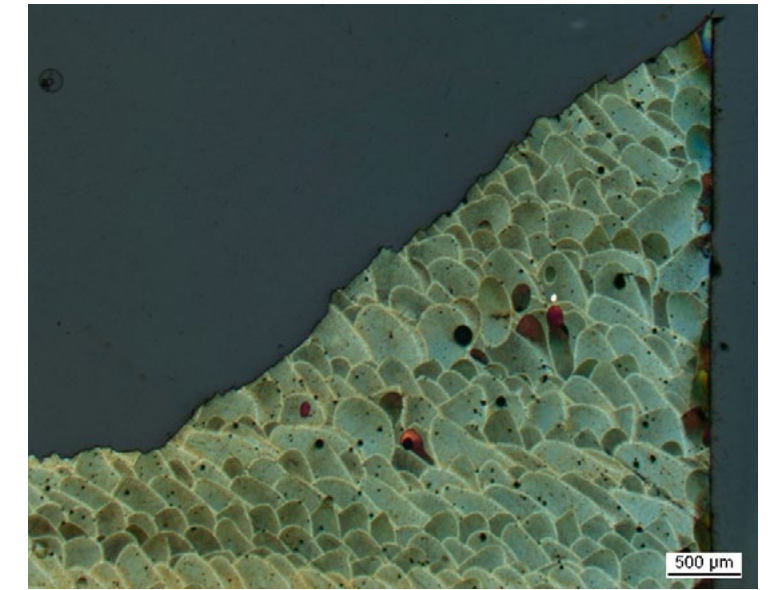


Abb. 1: Lichtmikroskopieaufnahme einer additiv gefertigten und im Axialzugversuch gebrochenen Zugprobe (AlSi10Mg; geätzt mit modifizierter Murakami Lösung)

## Hochtemperaturwerkstoffe

DR.-ING.  
CHRISTIAN  
KONTERMANN

+49 6151 16 - 24 345  
christian.kontermann@  
tu-darmstadt.de

Im letzten Jahresbericht wurde beschrieben, dass es für den Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe (KB-H) im Jahr 2022 um die Gestaltung der Zukunft ging. So wurden in 2022 viele zukunftsrelevante Initiativen begonnen, neue Themen diskutiert sowie auf Basis dessen konkrete Ideen und Projektskizzen entwickelt. Im Jahr 2023 ging es nun darum, diese Initiativen, Ideen und Projektskizzen zum Erfolg zu führen und damit nicht nur die Zukunft zu gestalten, sondern diese für den KB-H und seine Forschungspartner aus Industrie und Wissenschaft Realität werden zu lassen. Vorweg genommen ist dies durch den hohen Einsatz der Abteilung aber auch der Kooperations- und Industriepartner in einem außerordentlichen Umfang gelungen.

Die Grundlage zur Realisierung von diesen zukunftsweisenden Projekten und Kooperationen schaffte die in den Jahren zuvor forcierte interne Verknüpfung der im Haus vorhandenen Kompetenzen auf dem Gebiet Wasserstoff (KB-O) und Hochtemperaturwerkstoffe (KB-H). Mit Hilfe von finanziellen Mitteln aus dem Förderprogramm „REACT-EU“ konnten Hardware beschafft und so Prototypversuchsstände entwickelt werden, mit denen nun der Einfluss einer Wasserstoffexposition auf die Werkstoffantwort unter hohen Temperaturen in großem Umfang und mit breiten Prüf- und Charakterisierungsmöglichkeiten untersucht werden kann. Dies adressiert sowohl wissenschaftlich als auch für die Industrie hochrelevante Fragestellungen bspw. für die Energie- und Kraftwerkstechnik, für den Bereich der Automobiltechnik als auch den Bereich der Flugturbinen. Unter Verwendung dieser neu zusammengeführten Schlüsselkompetenzen sowie der neu geschaffenen Infrastruktur wurden unterschiedlichste Projekte beantragt, inzwischen bewilligt

und gestartet, welche jeweils für sich einen Baustein in der Forschung zum Einfluss einer H<sub>2</sub>-Exposition bei erhöhten Temperaturen darstellen.

Innerhalb des vom BMWK und durch ein Industriekonsortium finanziertes Vorhabens „HyPower“ erfolgt in Kooperation mit den Forschungsstellen MPA Stuttgart, IWM Freiburg und einem großen Industriekonsortium, welches über den vgb e. V. organisiert ist, ein systematischer Vergleich unterschiedlicher Prüfmethoden, welche potenziell für eine Werkstoffcharakterisierung in Frage kommen. Das Spektrum reicht hierbei von Methoden, die auf niedrige Temperaturbereiche begrenzt sind (kathodische Beladung, Autoklavtechnik), über Methoden, die sich ebenfalls für Prüfungen unter hohen Temperaturen eignen (Vorbeladung, Hohlprobenprüftechnik). Weitere Informationen zu dem Projekt "HyPower" finden Sie auf Seite 32.

Die Hohlprobenprüftechnik wird bei einem weiteren vom BMWK teilgeförderten Vorhaben namens „GTE<sub>x</sub>H<sub>2</sub>“ eingesetzt, um den Einfluss verschiedener Abgaszusammensetzungen als Konsequenz einer H<sub>2</sub>-Verbrennung innerhalb von stationären Gasturbinen auf das Werkstoffverhalten zu untersuchen. Innerhalb des Konsortiums sind ein mittelständisches Unternehmen aus Hessen als auch die RWTH-Aachen organisiert. Weitere Informationen finden Sie auf Seite 33.

Als nächster Baustein wird der Hohlprobenprüfstand innerhalb des einmal mehr vom BMWK teilgeförderten Vorhabens „TMF-SN-H<sub>2</sub>“ eingesetzt, um nicht alleine isotherme Beanspruchungsbedingungen sondern auch sog. thermomechanische Ermüdungsversuche (TMF) unter H<sub>2</sub>-Exposition vergleichend durchzuführen. Dies geschieht mit dem Fokus auf künftige Gasmotoren zur Stromerzeugung unter Mitwirkung

eines mittelständischen Unternehmens im Bereich der strukturmechanischen Berechnungen als auch einem OEM aus dem Motorensektor. Das Forschungsprojekt ist auf Seite 33 noch detaillierter darstellt.

Im Kontext von Hochtemperaturanwendungen ist allerdings nicht nur der Einfluss einer H<sub>2</sub>-Exposition als relevant einzuschätzen. Auch u. U. stark erhöhte Feuchtegehalte bei hohen Temperaturen als Konsequenz einer H<sub>2</sub>-Verbrennung können das mechanische Werkstoffverhalten entscheidend beeinflussen. Dieser Aspekt wird im Hinblick auf das zyklische Ermüdungsverhalten bei verschiedenen Hochtemperaturwerkstoffen im Rahmen eines weiteren Projekts des Luftfahrtforschungsprogramms des BMWK systematisch untersucht.

Diese Projekte demonstrieren Beispiele für eine auf die Bedarfe der Industrie zugeschnittene anwendungsorientierte Forschung. Ein darin enthaltener Schlüssel sind potenziell erfolgreiche und zum Teil neue Zusammenstellungen von Forschungspartnern auf der Seite der Industrie sowie auf Seiten der Wissenschaft. Auch vor dem Hintergrund dieses Aspekts wurden in 2023 viele bereits erfolgreiche Kooperationen weiterentwickelt und verstetigt. Beispielsweise tagte zum ersten Mal in einem regelmäßigen Turnus das auf Initiative des KB-H neu gegründete Industrietzwerk „KMU@Hochtemperatur“ mit dem Ziel, eine effizientere und bedarfsorientierte Verbindung von Forschungsthemen zwischen großen Unternehmen, klein- und mittelständischen Unternehmen sowie Industriepartnern zu erreichen. Ebenfalls wurden die Kooperationen mit der Züricher Hochschule für angewandte Wissenschaft über eine gemeinsam begleitete Promotionsstelle verstetigt. Am Beispiel des gezeigten Bildes wird klar, dass auch strategische Partnerschaften, hier mit der TU Graz, dazu genutzt werden können, wissenschaftlich interessante

und für die Industrie relevante Ergebnisse zu produzieren und zu publizieren.

Die genannten Kooperationen und neuen Projekte sowie Projektausrichtungen stellen ohne Frage die Zukunft des Kompetenzbereichs dar, die in 2022 eingeleitet und in 2023 begonnen wurde. Daneben sei noch erwähnt, dass aus dem Kompetenzbereich 28 Veröffentlichungen alleine im Jahr 2023 entstanden sind. Dies ist ein einzigartiges und hervorragendes Ergebnis. Nur eine entsprechende Qualität von der Probenfertigung, über die Prüfung bis hin zur Auswertung und wissenschaftlichen Diskussion der Ergebnisse kann zu einem solch hervorragenden Ergebnis führen.

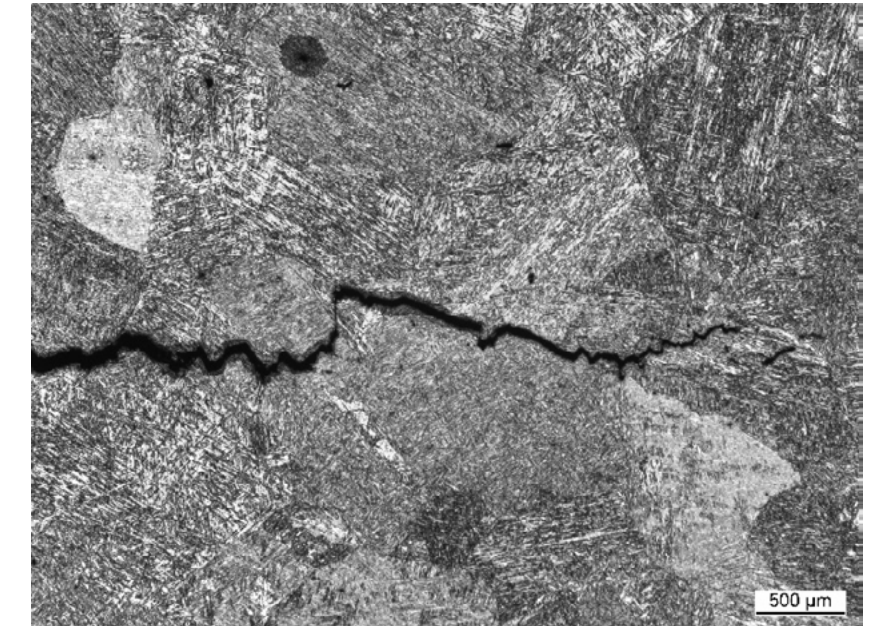


Abb. 1: Sich vorwiegend entlang der Korngrenzen ausgebreiteter Kriechriss an einer MarBN-Guss-Variante (Ergebnisse entstanden im Rahmen der strategischen Partnerschaft zwischen der TU Darmstadt und der TU Graz)



## Bauteilfestigkeit

DR.-ING.  
MARCUS KLEIN

+49 6151 16 - 25 313  
marcus.klein@tu-  
darmstadt.de

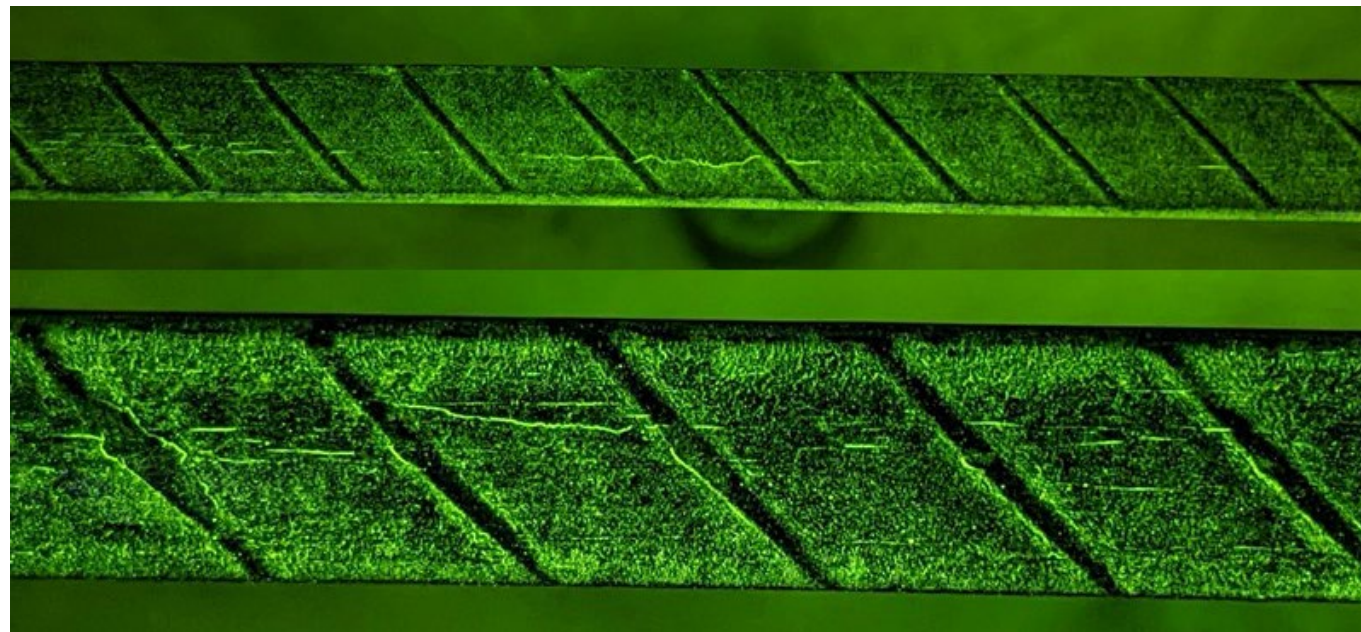
Das Jahr 2023 unterstrich die Relevanz von Energieunabhängigkeit und Klimaneutralität, u. a. mittels werkstoff- und ressourcen-effizienter Bauteilauslegung und den hierfür benötigten Forschungsaktivitäten. Auf Grund verminderter und somit verteuerteter Primärenergielieferungen ist es zwingend erforderlich Einsparpotentiale zu identifizieren und zu nutzen.

Die Bestrebungen zum vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien – grünem Strom und grünem Wasserstoff – führten zur erhöhten Nachfrage an Zulassungsversuchen beispielsweise für Unterkonstruktionen und Klemm-Montage-Systemen für Photovoltaikanlagen. Unsere Prüfspezialisten und Techniker:innen haben hierzu Konzepte entworfen und umgesetzt, sodass wir den Bedarfen der Regelwerke zur Erlangung von Zulassungen (DIBt und EAD) gerecht werden und unseren Kunden diese Prüfungen umfassend bereitstellen können.

Der Zustand der Brückenbauwerke Deutschlands zählt ebenfalls zu den wichtigen Infrastruktur-Themen unserer Zeit. Seit Ende 2021 ist beispielweise die Rahmendetalbrücke bei Lüdenscheid gesperrt.

Weiträumige Umfahrungen führen zu längeren, teureren und CO<sub>2</sub>-intensiveren Lieferwegen. Das lokale Verkehrschaos ist für die Menschen dort eine große Belastung. Auch die Wirtschaft leidet und der ganzen Region droht eine Abkopplung vom Rest des Landes. Dies ist nur ein Beispiel für aktuell rund 4.000 Fernstraßen-Brückenbauwerke, die in den 1960er und 70er Jahren gebaut wurden und jetzt regelmäßig überprüft und gegebenenfalls saniert werden müssen, bevor ein Neubau zur einzigen Lösung wird. In unseren Prüflaboren werden in diesem Zusammenhang Litzenspannglieder und Spannstähle aus dem jeweiligen Bauwerk untersucht. Zum Untersuchungskatalog zählen mikroskopische Untersuchungen der Oberflächenzustände, Einordnung dieser in Richtreihen, Rissdetektion mittels Magnetpulverprüfung sowie die Ermittlung quasi-statischer Kennwerte gemäß DIN EN ISO 15630-1 bis DIN EN ISO 15630-3. Diese Ergebnisse gehen in die Zustandsbewertung des Brückenbauwerks ein und entscheiden über die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen.

Abb. 1: Rissdetektion an Spannstahl, Sigma-Oval, mittels Magnetpulverprüfung



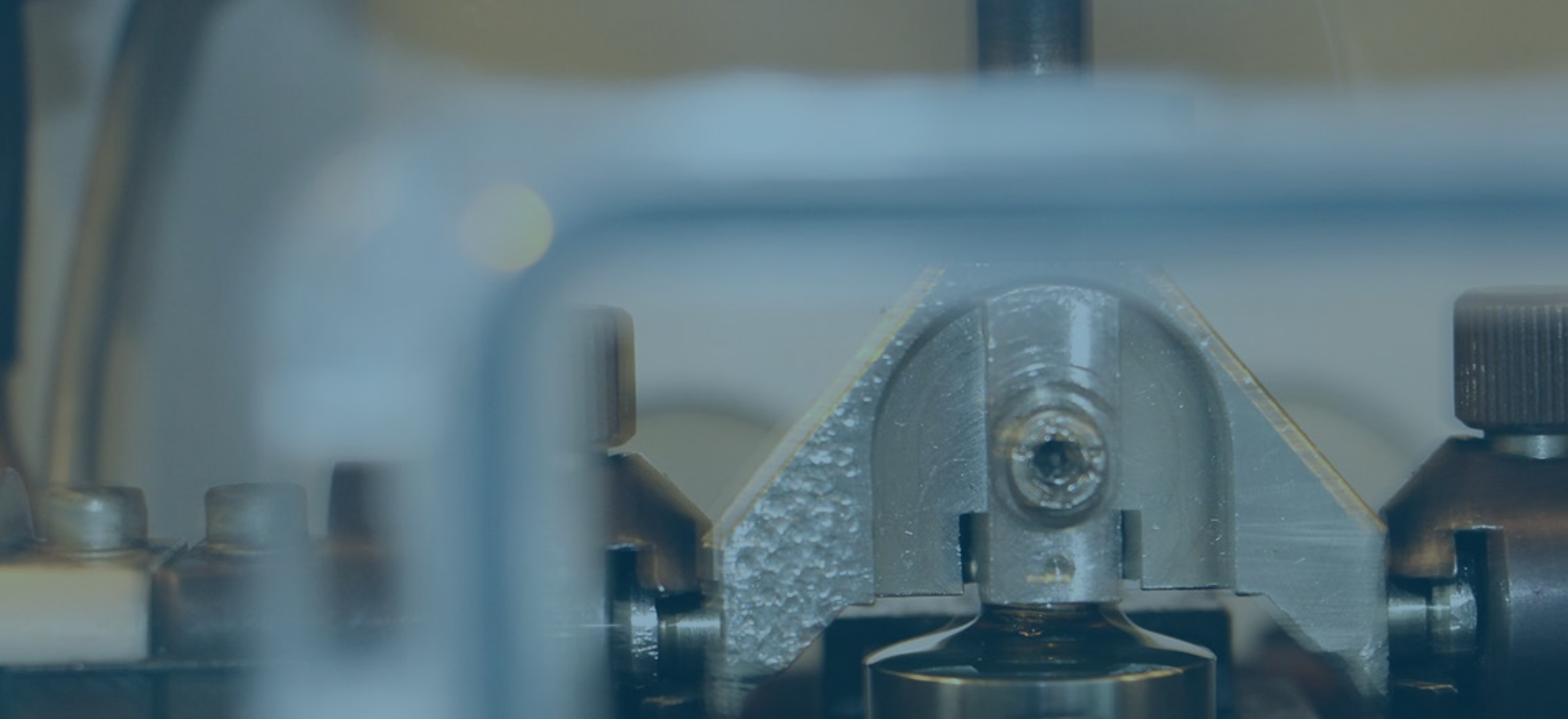
Für Auftragsprüfungen und Forschung stehen dem Kompetenzbereich Bauteilfestigkeit Prüfsysteme mit Nennlasten bis zu 2,5 MN zur Verfügung. Lastspielzahlen bis in den Very-High-Cycle-Bereich werden mit servohydraulischen Prüfsystemen (Prüffrequenzen bis zu 400 Hz), Resonanzpulsatoren und Ultraschallermüdungsprüfsystem (Prüffrequenzen bis zu 20 kHz) durchgeführt. Einflüsse von Oberflächeneigenschaften und -morphologien sowie Qualität von Schweißverbindungen werden mittels Umlaufbiegung und zyklischer Dreipunkt-Biegung ermittelt. Die Bewertung von Losdreh Sicherungen bei Schraubenverbindungen erfolgt im Vibrationsprüfstand. Gewinde- und Kopfreibmomente werden an einem Anziehprüfstand ermittelt. Spezielle Federprüfstände zählen ebenfalls zum Portfolio des Kompetenzbereichs Bauteilfestigkeit. Mehrproben-Prüfstände erlauben die Ermittlung statistisch abgesicherter Wöhlerkurven innerhalb von zwei Wochen bei moderaten Prüffrequenzen. Ergänzt wird das Portfolio durch Prüfmaschinen zur Ermittlung quasi-statischer und zyklischer Bruchmechanikkennwerte. Seit 2021 bearbeiten wir das Projekt „Design- und Fertigungskonzepte für additiv gefertigte Leichtbaustrukturen (addLight)“ gemeinsam mit den Instituten PTW,

pmd und LSM der TU Darmstadt sowie den Industriepartnern AM Metals, BMW, EOS und MATFEM. Unser Forschungsbeitrag liegt in den Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, die mittels Methoden des maschinellen Lernens abgebildet werden, um so die Betriebsfestigkeit additiv hergestellter Bauteile zuverlässig vorhersagen zu können. So tragen wir zu dem Projektziel der industriellen Einsetzbarkeit von metallischen, integrierten Gitterstrukturen sowie leichtbauoptimierter Strukturen in dynamisch belasteten Bauteilen bei. Am Zentrum für Konstruktionswerkstoffe ermitteln wir dazu Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften der gedruckten Werkstoffe. Zu den Einflussgrößen zählen die Bauteilausrichtung im Drucker bei der Herstellung, die Oberflächengüte und Wärmebehandlungen. Zur Charakterisierung der Werkstoffe entwickeln wir elektrische und optische Messverfahren für die Anwendung an den gedruckten Strukturen weiter und entwickeln Materialmodelle, mit denen sich die Ermüdungseigenschaften der Werkstoffe präzise beschreiben lassen. Aktuell wird ein auf diese Weise optimierter Radträger aus einem PKW als Demonstratorbauteil auf dessen quasistatische und zyklische Belastbarkeit geprüft.



Abb. 2: Radträger: FE-Modell zur Validierung des entwickelten konstitutiven Materialmodells (links); aus hochfester Aluminiumlegierung Al2139 im LPFB-Verfahren additiv gefertigt (rechts)





**FORSCHUNG**





## ADDITIVE MANUFACTURING CENTER (AMC)

DR.-ING.  
MICHAEL KRÄMER

+49 6151 16 - 25 319  
michael.kraemer@tu-  
darmstadt.de

Am 16.05.2023 war es endlich so weit! Das „Additive Manufacturing Center“ wurde gemeinsam mit Vertretern aus regionalen Industrieunternehmen und Verbänden als neues Technologietransferzentrum für additive Fertigungsverfahren und digitale Produktionsketten feierlich eröffnet. Als Gäste waren die TU-Präsidentin, Frau Prof.‘in Tanja Brühl sowie Dr. Philipp Nimmermann, der zu dieser Zeit noch als Staatssekretär im hessischen Wirtschaftsministerium tätig war, sowie der Präsident des hessischen Unternehmerverbandes VhU, Wolf Matthias Mang, anwesend und betonten in ihren Beiträgen die Wichtigkeit des Thema Transfer für die lokale Industrie und die Innovationskraft im Standort Hessen. In Führungen durch das neue Technikum konnten sich die eingeladenen Gäste von den technischen Möglichkeiten im AMC und den Ergebnissen des Bauprojekts informieren. Beim Empfang im Foyer fand ein reger Austausch mit Wissenschaftler:innen der beteiligten Institute statt.

Ein weiteres Highlight im Verlauf des ersten AMC-Jahres war der Besuch des damaligen hessischen Wirtschafts-

ministers Tarek Al-Wazir. Im Rahmen seiner Sommertour besuchte er das Technologiezentrum zusammen mit der Landtagsabgeordneten Frau Hildegard Förster-Heldmann und informierte sich insbesondere darüber, wie hessische Unternehmen mit den Forschern am AMC zusammenarbeiten und von der Expertise der TU Darmstadt profitieren können.

Neben diesen internen Veranstaltungen war das AMC im Jahr 2023 gern gesehener Gast und Gastgeber für Veranstaltungen zum Technologietransfer verschiedener Gremien und Verbände. So wurde beispielsweise ein Treffen der Automatisierungsregion Rhein Main Neckar in Kooperation mit der IHK Rhein Main im AMC ausgerichtet. Auf Transfermessen wie dem „INNODAY“, organisiert durch das TU-Gründungsnetzwerk HIGHEST, oder der „TransferXchange“-Veranstaltung des Verbands HessenMetall, wurden vor allem innovative Start-Ups angesprochen und ihnen die Kooperationsangebote des AMC vorgestellt, um deren innovative Produktideen durch unsere Produktionsmöglichkeiten zur realisieren. Den Abschluss dieses umfangreichen Veranstaltungsjahres bildete im November, wie schon seit 2018 im AMC-Kalender Tradition, der gemeinsame Messeauftritt auf der Fachmesse für Produktionstechnologie „Formnext“. In diesem Jahr trat das AMC zusammen mit Kolleg:innen des ISM+D auf einer gesonderten Standfläche gemeinsam mit der Ausstellung BE-AM (Build Environment Additive Manufacturing) auf. An vier Messetagen stand hier vor allem der persönliche Austausch mit Projektpartnern aus den Reihen der Anlagen- und Verfahrensentwickler im Fokus und führte vielfach zur Anregung neuer Produktideen und zu neuen internationalen Kooperationen.

Neben den vielen Highlights und Veranstaltungen war die tägliche Arbeit im ersten Betriebsjahr des AMCs geprägt durch die vielen Einzüge von sowohl Bestands- als auch neu beschafften Versuchs- und Produktionsanlagen sowie Analysegeräten in das Technikum. So wurden bereits zu Beginn des Jahres viele Analysegeräte aus den Laboren in der Grafenstraße an ihre neuen Standorte auf der Lichtwiese gebracht und im Laufe des Jahres wieder in Betrieb genommen. Insbesondere die röntgenographischen Untersuchungsmethoden des Kompetenzbereichs Werkstoffanalytik befinden sich nun vollständig in der neuen Materialanalytik. Daneben fanden auch mechanische Prüfeinrichtungen aus den Kompetenzbereichen Kunststoffe, Hochtemperaturwerkstoffe und Oberflächentechnik neue Stellplätze in den Laborräumen des AMC. Mit dem Einzug einer neu beschafften Drahterodiermaschine sowie einem aus EU-Mitteln finanzierten Auslagerungssofen für Wasserstoffatmosphären wurden, vorausschauend auf den Umzug von MPA-IfW in das entstehende Nachbargebäude CRA, neue Kompetenzen und Verfahren erprobt und vorab in Betrieb genommen.

Sowohl diese täglichen Arbeiten im Technikum, Absprachen zur Arbeitssicherheit, als auch die verschiedenen gemeinsamen Aktivitäten mit anderen Fachbereichen im AMC bedingen natur-

gemäß einen noch engeren Austausch und eine direktere Zusammenarbeit mit den Kolleg:innen aus Maschinenbau und Materialwissenschaften. Daher haben bereits einige Kolleg:innen aus den Kompetenzbereichen F, H, K und O auch Labore und Arbeitsplätze in Büros auf der Lichtwiese bezogen.

In 2024 gilt es nun diese Zusammenarbeit zu festigen und gemeinsame Arbeitsabläufe zu etablieren. Dabei wird die apparative Ausstattung des AMCs und damit verbunden auch dessen fertigungstechnische Kompetenzen, stetig erweitert. Mit Unterstützung durch das hessische Wirtschaftsministerium sollen in einem Anschlussvorhaben zur EFRE-Finanzierung des AMC-Bauprojekts mit dem Arbeitstitel „AMC 2“ weitere ca. 2,5 Mio. € an Fördermitteln zur Anschaffung von Anlagen zur Pulverherstellung, der Verarbeitung mittels Hochgeschwindigkeits-Laserauftragsschweißen (3D-EHLA) und in eine durchgängige, digitale Produktionskette investiert werden.

Für die offene Zusammenarbeit der beteiligten Forscher:innen, insbesondere aber für die unglaubliche Leistungsbereitschaft der Mitarbeiter:innen in den beteiligten Verwaltungsstellen sowie den technischen Angestellten im für das AMC so wichtigen Jahr 2023 möchten wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken.

Ihr Engagement ist maßgeblich für die Motivation das Projekt AMC gemeinsam weiter voranzubringen.





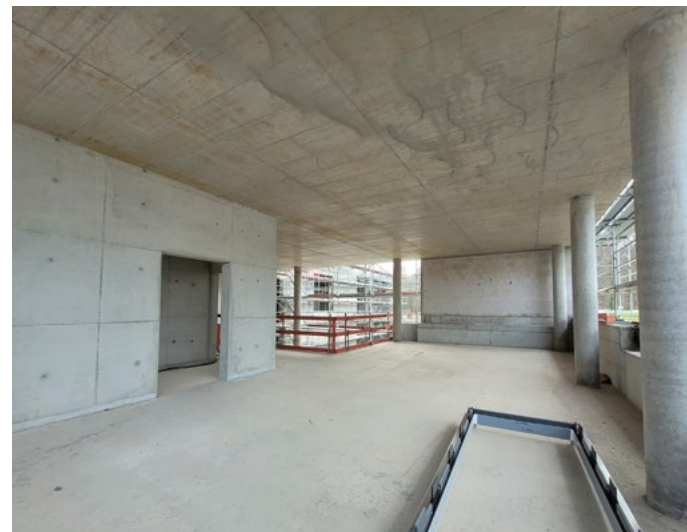
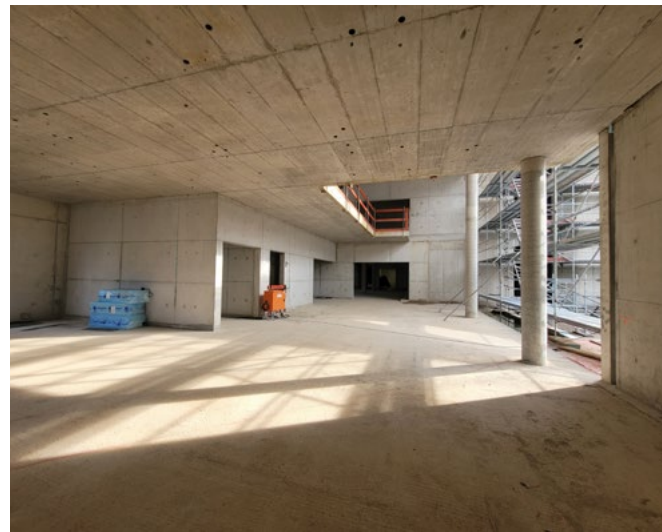


## CENTER FOR RELIABILITY ANALYTICS (CRA)

PROF. DR.-ING.  
MATTHIAS OECHSNER  
  
+49 6151 16 - 24 900  
matthias.oechsner@tu-darmstadt.de

Der Umzug von MPA und IfW aus der Grafenstraße auf die Lichtwiese rückt in immer näher. Das neu geplante Center for Reliability, kurz CRA, ist derzeit in der Ausbauphase. Im Verlauf des Jahres 2023 wurde der Rohbau des Gebäudes erstellt und die Ausführung der technischen Gewerke detailliert geplant. Neben allen Fachplanern und Vertretern der TU Darmstadt als Bauherrin waren hierzu eine Vielzahl an Abstimmungen mit uns, als den zukünftigen Nutzern, erforderlich. Dabei geht es vom "Großen-Ganzen", wie beispielsweise der Wegeführung im Gebäude bin hinunter in Details wie die Lage von Steckdosen. Die ersten Innenausbauwerke haben nun ihre Arbeit aufgenommen. Mit dem neuen Gebäude werden wir die technische Infrastruktur erhalten, die unsere

vielfältigen Aktivitäten in den Bereichen der Entwicklung und Bewertung von Werkstoffen und Bauteilen erfordert. Die Nähe zu weiteren Instituten des Maschinenbaus und der Materialwissenschaften sowie denen der Bau- und Umweltingenieurwissenschaften fördert, ebenso wie offene Arbeitsbereiche im Gebäude das intensive und konstruktive Miteinander. Der Zeitplan für die Baumaßnahme weist eine Fertigstellung zu Beginn des Jahres 2025 aus. Der immer weiter im Detail geplante Umzug wird voraussichtlich im Spätjahr 2024 mit dem Umzug einzelner Anlagen beginnen und sich über das erste Halbjahr 2025 erstrecken. Ziel der detaillierten Planung ist es die Arbeiten an der MPA und am IfW mit möglichst wenig Unterbrechungen fortsetzen zu können.



### Center for Reliability Analytics

Der Forschungsbau CRA wird gemeinsam vom Bund und vom Land Hessen getragen und basiert auf einem Forschungskonzept, das sich zum Ziel setzt, Methoden und Möglichkeiten, die die Digitalisierung bietet, stärker in die Prognose von Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Werkstoffen und Bauteilen zu nutzen und explizit dafür weiter zu entwickeln. Wir haben für dieses Forschungskonzept den Begriff „Reliability Analytics“ gewählt, um die systematische und möglichst umfängliche Analyse von Daten, die entlang des gesamten Produktlebenszyklus eines Bauteils entstehen und erfasst werden, als wesentliches Merkmal dieser Bewertungsmethode heraus zu stellen.

## GLASS COMPETENCE CENTER (GCC)

Das im Jahre 2022 eröffnete Glas Competence Center (GCC) ermöglicht aufgrund der gebündelten Kompetenzen des Instituts für Statik und Konstruktion (ISM+D) und der Materialprüfungsanstalt (MPA) die Bearbeitung vieler Fragestellungen im Zusammenhang mit allen wesentlichen Prozessen der Flachglasverarbeitung. Forschung und Entwicklung gehen auch über die üblichen Dimensionen des Bauglases hinaus. So werden Glasdicken zwischen wenigen Zehntel mm bis hin zu einigen Zentimetern untersucht (Abb. 1). Untersuchungen zur Rissausbreitung in Einscheiben-Sicherheitsglas mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Rissfortschrittsgeschwindigkeit ca. 1500 m/s) sowie flächenhafte Scans mit der Darstellung der Eigenspannungen sollen das Verständnis der Zusammenhänge

von Eigenspannungen und Bruchbildern vertiefen, so dass wir weg von einer zerstörenden Prüfung der Gläser kommen. In einer unter dem Dach des GCC durchgeführten Arbeit, wurden die Bruchstückoberflächen mittels Computertomograph untersucht (Abb. 2). Weitere Aktivitäten befassen sich mit den Fragen des Vakuum-Isolierglases und der Ermittlung der Kantenfestigkeiten von Glas – auch mit neuen Bearbeitungsmethoden, wie der Laserbearbeitung.

Leitung – Prüflabor  
DR.-ING.  
PETER HOF

+49 6151 16 - 25 142  
peter.hof@tu-darmstadt.de

Leitung – Forschung Glas  
DR.-ING.  
MATTHIAS SEEL

+49 6151 16 - 23 015  
seel@ismd.tu-darmstadt.de



Abb.1 (links): Glas unterschiedlicher Dicke (von 0,27mm bis ca. 60 mm)

Abb.2 (rechts): Bruchstücke Einscheiben-Sicherheitsglas, Aufnahme mit dem Computertomographen





## STRATEGIEFELD

### Additive Fertigung

DR.-ING.  
MICHAEL KRÄMER

+49 6151 16 - 25 319  
michael.kraemer@tu-darmstadt.de

Im Strategiefeld „Additive Fertigung“ organisieren sich wissenschaftliche Mitarbeiter:innen aus dem Kompetenzbereichen Bauteilfestigkeit, Hochtemperaturwerkstoffe, Oberflächentechnik sowie Kunststoffe und Verbunde, um gemeinsam aktuelle Fragestellungen und Forschungsthemen bezüglich Materialien und Bauteile aus AM-Prozessen zu diskutieren. Zentrale Aufgabe des Strategiefelds ist dabei der gegenseitige Austausch über aktuelle Projekte, Veröffentlichungen und neue Erkenntnisse. Naturgemäß findet dieser Austausch, eng verbunden mit der Kooperation zu anderen Fachgebieten der TU Darmstadt, im Additive Manufacturing Center statt. Die Forschungsaktivitäten von MPA-IfW auf dem Gebiet der additiven Fertigung waren in 2023 sowohl auf internationalen Fachkonferenzen als auch im direkten Austausch mit Industrievertretern in entsprechenden Arbeitskreisen sehr gefragt. Besonders die gewonnenen Erkenntnisse zur Zuverlässigkeit additiv hergestellter Werkstoffe unter Betriebs-

bedingungen, unter zyklischer Belastung (Projekte „HT-Schwellenwert“, „AddLight“) und bei hohen Temperaturen (LPBF HT-Lebensdauer) sind vielfach vorgestellt und diskutiert worden. Eine wesentliche Erkenntnis all dieser Projekte ist, dass bei der Bewertung von additiv gefertigten Bauteilen die Fertigungsbedingungen des tatsächlichen Werkstücks so nah wie möglich erfasst werden müssen. Zur Generation allgemeingültiger, übertragbarer Design-, und Bewertungsprinzipien fehlt es noch an Grundlagenverständnis in den Zusammenhängen zwischen Erstarungsbedingungen und resultierenden Bauteileigenschaften.

Neu begonnene Forschungsvorhaben waren unter anderem das Projekt „SPACE AM“, in Kooperation mit der RWTH Aachen und dem bayrischen Raumfahrtunternehmen „ISAR Aerospace“. Dabei geht es um die Untersuchung der Hochtemperatüreigenschaften von additiv gefertigten Raketen-Triebwerkskomponenten aus Nickelbasislegierungen sowie der Lebensdauerbewertung dieser in der Raumfahrt eingesetzten Komponenten.

Die Aktivitäten zur vertieften Werkstoff- und Bauteilanalyse von additiv gefertigten Komponenten aus den abgeschlossenen Projekten „QUAFD“ und „QAMEA“ werden im aktuellen Projekt „QUAKOM 3D“ fortgeführt.

Die Aktivitäten auf dem Gebiet der Kunststoffe sind die Funktionalisierung von additiv gefertigten Kunststoffbauteilen durch galvanische Schichten sowie die Entwicklung von „Ressourceneffizienten Innovativen Formwerkzeugen für die Kunststoffverarbeitung durch Additive Fertigung und Digitalisierung – RIFOKADD“. Zukünftig werden die Themen Oberflächenfunktionalisierung und hybride Fertigungsverfahren stärker in den Fokus der Arbeiten kommen.

Der Bereich „Additive Fertigung mit Glas“ wird im federführend durch die Kollegen am Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) im Rahmen des gemeinsam betriebenen Glass Competence Centers (GCC) weiterentwickelt. Hauptaktivität ist hier weiterhin die Entwicklung eines Laboraufbaus zur Bearbeitung des DFG-Vorhabens „Schmelzschichten von Glas auf Flachglas“, in welchem Kollegen:innen aus drei Kompetenzbereichen unseres Hauses eingebunden sind.

Mit dem erfolgreichen Abschluss vieler der oben genannten Forschungsprojekte und der damit verbundenen Einreichungen von Nachfolgeanträgen entstehen in 2024 einige Neuausrichtungen innerhalb des Strategiefelds. Nachfolgeprojekte im Bereich Additive Fertigung zeigen eine stärkere Orientierung, weg von reinen Kennwert-Erhebungen für Werkstoffe aus additiven Verfahren und hin zu einer zielgerichteten Zuverlässigkeitsbewertung additiv gefertigter Komponenten. In bereits bewilligten und gerade in Bearbeitung befindlichen Projektanträgen rücken realitätsnahe Fertigungsbedingungen und Betriebsbelastungen sowie Designfeatures aus der Bauteilgenerierung immer mehr in den Fokus.

Gleichzeitig müssen bereits heute schon zukünftige Trends in der Produktionstechnologie aufgegriffen werden und Vorarbeiten für kommende Produktinnovationen geleistet werden, um diese schneller und effizienter zur Marktreife führen zu können. Unter diesem Gesichtspunkt sollen in zukünftigen Projekten Themenfelder wie elektronische Bauteile, z. B. aus Kupfer, Funktionswerkstoffe und Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen, stärker in den Fokus rücken.

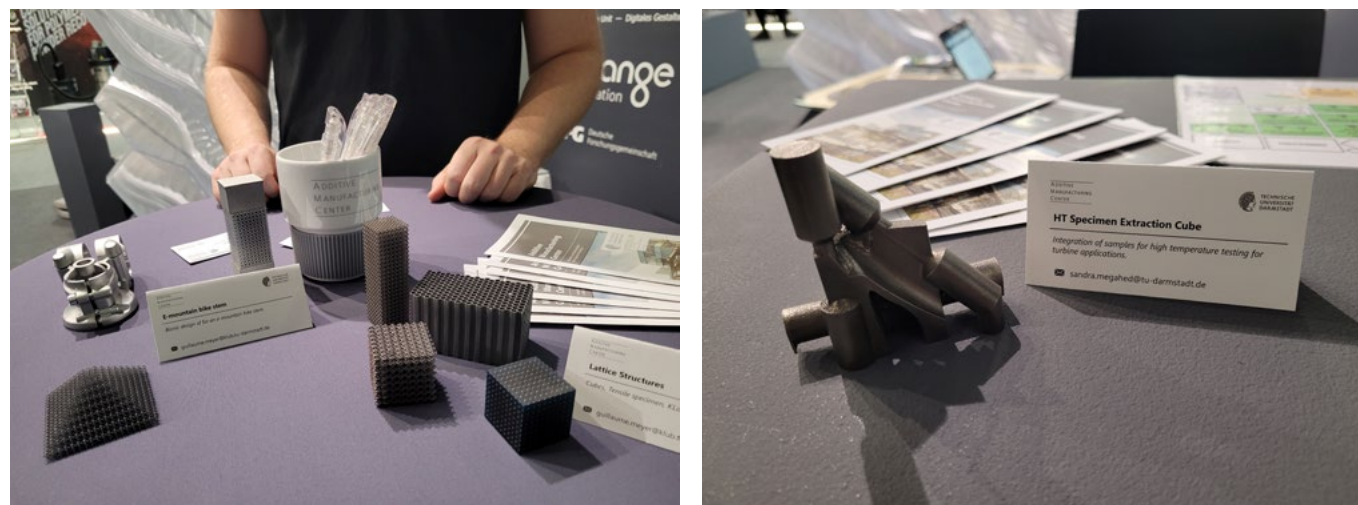
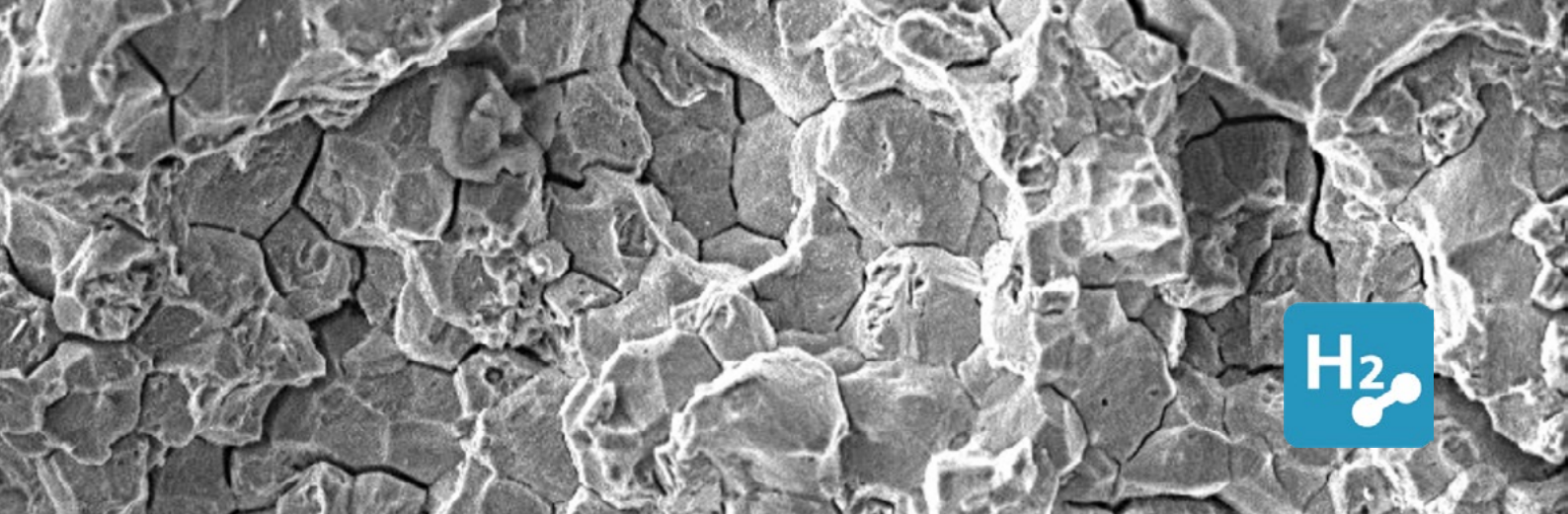


Abb. 1: Ausstellung von Beispielen für die bauteilnahe Prüfung additiv hergestellter Komponenten auf der Fachmesse Formnext: links Gitterstrukturen aus dem Projekt „AddLight“, rechts: „Specimen Extraction Cube“ aus dem Projekt „LPBF HT-Lebensdauer“





## STRATEGIEFELD Wasserstoff

DR.-ING.  
OLESYA GOSHEVA

+49 6151 16 - 25 708  
olesya.gosheva@tu-  
darmstadt.de

Das Strategiefeld Wasserstoff konnte auch im Jahr 2023 innovative Forschungsergebnisse erzielen. Neben der erfolgreichen Durchführung von Projekten zur Erforschung des Werkstoffverhaltens unter dem Einfluss von Wasserstoff stand insbesondere das neu eingerichtete Wasserstofflabor zur Untersuchung von Werkstoffen unter Druckwasserstoffeinwirkung im Fokus. Im Jahr 2023 wurden folgende Projekte zum Einfluss von Wasserstoff auf das Werkstoffverhalten bearbeitet:

- Das Ziel des Projektes „Mischbruchfaktor“ (Korrelation mikrostruktureller, chemischer und bruchmechanischer Einflussfaktoren mit der Werkstoffanfälligkeit gegenüber H-SpRK, IGF-Nr. 21742 N|1) ist die Untersuchung der Korrelation mikrostruktureller, chemischer und bruchmechanischer Einflussfaktoren auf die Werkstoffanfälligkeit gegenüber einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion (H-ind. SpRK). Im Berichtszeitraum wurden insgesamt achtzehn gängige Schraubenwerkstoffe mit bainitischem und martensitischem Gefüge in den Festigkeitsklassen von 10.9 bis 15.9 untersucht. Bei den Werkstoffen handelt es sich auszugweise um die Legierungen 23MnB3, 32CrB4, 34CrNiMo6 und 30MnB4. Die Grundlage der bruchmechanischen Untersuchungen bildet der an der MPA Darmstadt entwickelte Vorspannkraft-Verlust-Test (VVT), bei dem durch die iterative Bestimmung einer Schwellenwertlast an zuvor mit Wasserstoff (H) beladenen Proben gleichmäßig umlaufende Risse entstehen, deren radiale Länge rasterelektronenmikroskopisch vermessen und zur Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte herangezogen werden kann. Die Gleichmäßigkeit der umlaufenden Risse hängt insbe-

sondere von den im Randbereich eingebrachten H-Konzentrationsprofilen ab, deren Form im Rahmen der Vorab-Wasserstoffbeladung durch die Variation der Säureart und -konzentration (Beeinflussung des H-Angebots) sowie durch die Variation der H-Beladungsdauer (Beeinflussung der H-Eindringtiefe) eingestellt wird. Das H-Konzentrationsprofil sowie die zugehörige Schwellenwertlast bilden einen definierten Ausgangszustand der H-ind. Schädigung, welche mit der resultierenden Bruchfläche und der radialen Länge des umlaufenden Risses korreliert. Zur Quantifizierung des anfänglichen H-Konzentrationsprofils werden H-Analysen mittels Trägergasheißeisgasextraktion durchgeführt. Weiterhin wird eine systematische, metallografische Analyse der Gefügestände durchgeführt, sodass die im VVT bestimmten bruchmechanischen Kennwerte sowohl mit den absorbierten H-Konzentrationen als auch mit den mikrostrukturellen und chemischen Werkstoffeigenschaften korreliert werden können. Vorläufige Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Schwellenwertspannungsintensität, die zur H-ind. Rissbildung aufgebracht werden muss, mit steigender Größe ehemaliger Austenitkörner abnimmt und somit die Anfälligkeit zunimmt.

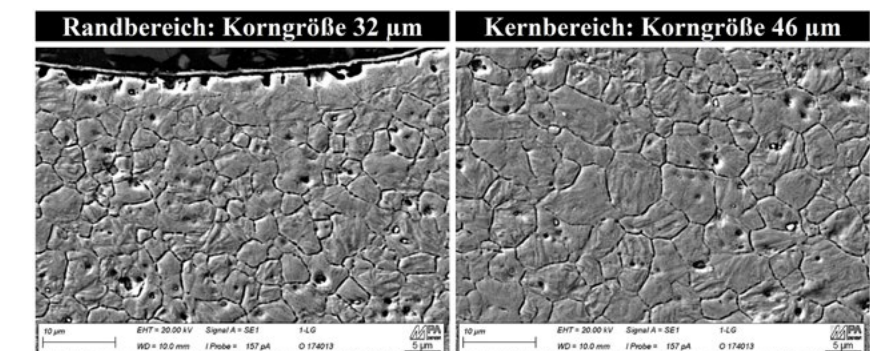
- Im Projekt „Kalo-H-Korr“ (Einfluss des Kaltumformprozesses hochfester Schrauben auf die lokale Anfälligkeit gegenüber einer wasserstoffinduzierten (H) Spannungsrisskorrosion, IGF-Nr. 22465 N|1) wird für hochfeste Schrauben das Ziel verfolgt den Einfluss des Kaltumformprozesses auf die lokale Größenverteilung ehemaliger Austenitkörner in Abhängigkeit von der chemischen

Zusammensetzung aufzuzeigen und diese mit der Werkstoffanfälligkeit gegenüber H-SpRK zu korrelieren. Aus der Rekristallisation ist bekannt, dass die Korngröße zuvor massiv umgeformter Teile mit steigendem Umformgrad abnimmt. Massive Umformungen finden bei der Schraubenfertigung sowohl beim Drahtziehen als auch beim Kopfstauchen und beim Gewinderollen statt, wobei die Verteilung der Umformgrade über den Schraubenquerschnitt unterschiedlich ist. Bei der Austenitisierung der so entstandenen Schraubenrohlinge entstehen in Abhängigkeit vom lokalen Umformgrad unterschiedliche Korngrößen, wie sie beispielhaft für einen Gewindegrund im Vergleich zum Kernmaterial in Abb. 1 gezeigt sind. Das fein ausgebildete Korn im Randbereich des Kerbgunds kann sich wiederum auf die Anfälligkeit der Schrauben gegenüber einer H-SpRK auswirken. Zur Quantifizierung dieser Anfälligkeit in Abhängigkeit vom Kaltumformprozess wird der im Projekt „Mischbruchfaktor“ beschriebene VVT in Verbindung mit metallografischen Korngrößenuntersuchungen und Simulationen des lokalen Umformgrads verwendet. Die Probenentnahme erfolgt entlang der gesamten Prozesskette der Schraubenfertigung (1. Draht, 2. Pressrohling, 3. Vergütete Schraube, 4. Vergütete Schraube mit einem schlussgerollten Gewinde), sodass der Einfluss aller Prozessschritte auf die lokale Korngrößenverteilung und die resultierende Anfälligkeit gegenüber H-SpRK aufgezeigt werden kann. Mit den Untersuchungsergebnissen soll ein mögliches Optimierungspotential des Kaltumformprozesses hinsichtlich der Reduktion der lokalen Werkstoffanfälligkeit gegenüber H-SpRK aufgezeigt werden.

- Das Ziel des Projektes GalvaQuant (Quantifizierung des Wasserstoffgefährdungspotenzials galvanisch beschichteter Schrauben) ist der Aufbau einer experimentell validierten, digitalen Wissensbasis über den Einfluss von Prozessparametern auf das Beschichtungsergebnis von hochfesten Stählen unter Einbeziehung bruchmechanischer Ansätze, die sowohl das fertigungs- als auch das betriebsbedingte Wasserstoffgefährdungspotenzial für gekerbte Bauteile mit zinkbasierten Beschichtungen beziffern. Durch geeignete Vergleichsuntersuchungen unbeschich-

teter und beschichteter Schrauben mithilfe des VVT (Beschreibung im Abschnitt „Mischbruchfaktor“) soll eine Datenbank zum Einfluss von Prozessparametern unterschiedlicher Beschichtungsverfahren (galvanische Verzinkung, Zinklamellenbeschichtung, Feuerverzinkung) auf die fertigungs- und betriebsbedingte Anfälligkeit gegenüber H-SpRK erstellt werden. Der VVT eignet sich hervorragend für eine vielseitige Bewertung der H-ind. Sprödbuch-anfälligkeit von Bauteilen, da der definierte Ausgangszustand der Rissinitiation mit verschiedenen Methoden (z. B. H-Analytik, lichtmikroskopische und rasterelektronenmikroskopische Gefügeuntersuchungen sowie Vermessungen der Schichtdicken, Vermessung der Bauteil- und Kerbgeometrien, Bestimmung der Schwellenwertlast der Rissinitiation) quantifiziert werden und mithilfe der resultierenden Bruchfläche und des charakteristischen Kraft-Zeit-Verlaufs hinsichtlich bruchmechanischer Kennwerte ausgewertet werden kann. Mit der dadurch aufgebauten Datenbasis sollen insbesondere mögliche Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern der galvanischen Beschichtung und der resultierenden Sprödbuchanfälligkeit aufgezeigt und so mit eine Grundlage für die Verbesserung des Beschichtungsprozesses entwickelt werden.

Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung eines metallographischen Schliffs (Korngrenzätzung) hinsichtlich der Größe ehemaliger Austenitkörner im Randbereich des Gewindegrunds sowie in etwa 500 µm Randabstand vom Gewindegrund („Kernbereich“). Die Körner im Randbereich sind deutlich feiner ausgebildet



- Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes „InhiBeizNorm“ (Datengrundlage für die Erarbeitung eines Normentwurfs DIN 50940 Teil 2, Kennzeichen 03TN0041A) werden standardisierbare Prüfmethode zur Bewertung der Wirksamkeit von Beizinhibitoren erarbeitet. Diese Inhibitoren dienen dazu, die Anfälligkeit für fertigungsbedingte Wasserstoffversprödung bei hochfesten Bauteilen im Zuge galvanischer Beschichtungsprozesse zu minimieren. Anhand von drei ausgewählten, praxisrelevanten Beizinhibitoren wird zunächst auf Basis gängiger Prüfmethode für einen Beizprozess, der hinsichtlich Inhibitorkonzentration und



Alterung der Beizlösung kontrolliert wird, untersucht. Zum Einsatz kommt die elektrochemische Permeationsmessung an gebeizten Membranproben (Abb. 2). Eine Besonderheit des entwickelten Verfahrens stellt die Applikation einer Palladiumbeschichtung (Dicke in der Größenordnung weniger hundert Nanometer) dar. Diese erhöht austrittsseitig die Desorptionskinetik und ermöglicht damit eine verbesserte Auflösung der adsorbierten Wasserstoffmenge insgesamt. Dies führt wiederum dazu, dass ein größerer Anteil des durch den Beizprozess absorbierten Wasserstoffs elektrochemisch zeitaufgelöst erfasst werden kann.

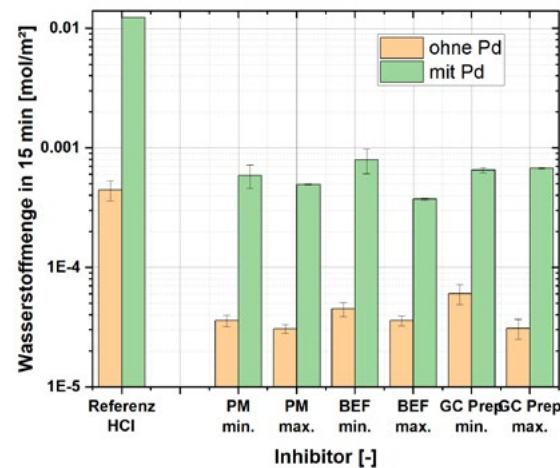


Abb. 2: Einfluss von Beizinhibitoren auf die Wasserstoffbeladung, jeweils mit und ohne Pd

Flankierend erfolgt eine Wasserstoffanalyse auf Basis einer Thermischen Desorptionsanalyse (TDA). Der Einfluss einer überlagerten mechanischen Beanspruchung wird im Rahmen von Verspannprüfungen untersucht – sowohl an konventionellen Zugproben als auch an sogenannten C-Ring-Proben. Erste Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Wirksamkeit der Inhibitoren anhand der gewählten Kenngrößen – Wasserstoffdiffusionskoeffizient, Wasserstoffmenge und Deformationsindex – differenziert bewertet werden kann. Die Projektergebnisse werden als Grundlage für die Empfehlungen zu den einzelnen Untersuchungsmethoden im Hinblick auf das geeignete Probenmaterial und die Versuchsdurchführung in der Norm DIN 50940 Teil 2 einfließen.

• Im März 2023 wurde das Projekt „H2HT-Testing Lab“ (Projektnummer 2008771), finanziert im Rahmen der europäischen REACT-EU Initiative, erfolgreich abgeschlossen. Im Ergebnis wurden vier Prüfstände errichtet, die zur Untersuchung der Anfälligkeit von Werkstoffen, beispielsweise in der Kraftwerkstechnik und Wasserstoffinfrastruktur, gegenüber Wasserstoffversprödung dienen. Zu diesen gehören zwei Auslagerungsprüfstände, die Untersuchungen bei Wasserstoffdrücken bis 100 mbar und Temperaturen bis zu 1.400 °C (Glühofen) sowie

bis zu 300 bar und 400 °C (Druckautoklav) zur Untersuchung von HTHA (High Temperature Hydrogen Attack) ermöglichen. Bereits ab dem Jahr 2024 können erste Prüfaufträge durchgeführt werden. Des Weiteren wurde ein Prüfstand für die mechanischen Untersuchungen an mit Druckwasserstoff gefüllten Hohlproben unter zyklischer und statischer Last errichtet. Die bereits am Institut verwendete Messzelle für die Wasserstoffpermeation<sup>1,2</sup> wurde auf die Möglichkeit zur Druckwasserstoffbeaufschlagung erweitert (Abb. 3 rechts). Im Bild links ist der Verlauf eines Wasserstoffpermeationstransienten bei einem martensitischen Werkstoff unter Druckwasserstoffbeaufschlagung gezeigt.

Es zeigt sich, dass unterschiedliche Druckniveaus in direktem Zusammenhang mit der Höhe des Permeationstransienten stehen. Die spezielle Hohlprobe, die als Beladungszelle fungiert, erlaubt in diesem Prüfstand die Realisierung von Wasserstoffdrücken bis zu 300 bar. Wenn Wasserstoff innerhalb der Hohlprobe elektrochemisch erzeugt wird (z. B. durch kathodische Polarisierung der Probe in einer wässrigen Elektrolytlösung), ermöglicht dies den direkten Vergleich beider Beladungsmethoden. Dieser deutschlandweit einzigartige Prüfstand wird aktuell auch für die Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen aus dem Projekt „HyPower“ genutzt.

• Im Projekt „HyPower“ (Entwicklung von alternativen Prüfmethode zur Bewertung des Werkstoffverhaltens unter Wasserstoffumgebungsbedingungen, 03EE5150B) werden – in Kooperation mit den Instituten Fraunhofer IWM in Freiburg und der Materialprüfungsanstalt (MPA) in Stuttgart – vier Methoden zur Prüfung des Werkstoffverhaltens in Druckwasserstoffumgebung systematisch untersucht. Dabei wird der herkömmliche Autoklaventest (Ermüdungsversuch, langsamer Zugversuch oder bruchmechanische Untersuchungen – da/dN oder  $K_{IC}$ ,  $H_2$ ) mit entsprechenden Untersuchungen an Hohlproben, vorbeladenen Proben sowie Proben unter in-situ kathodischer Wasserstoffbeladung verglichen. Die vergleichende Analyse der Ergebnisse an drei Materialklassen – niedriglegierte Stähle (P355NL1), hochlegierte martensitische Stähle (17-4PH) und Nickelbasislegierungen (Alloy 617) – dient dazu, die Grenzen dieser Prüfungsmethoden aufzuzeigen. Ziel ist es, die Möglichkeiten zur Erweiterung der Prüfkapazitäten für die Werkstoffqualifizierung im Hinblick auf eine sogenannte H2-Readiness zu überprüfen.

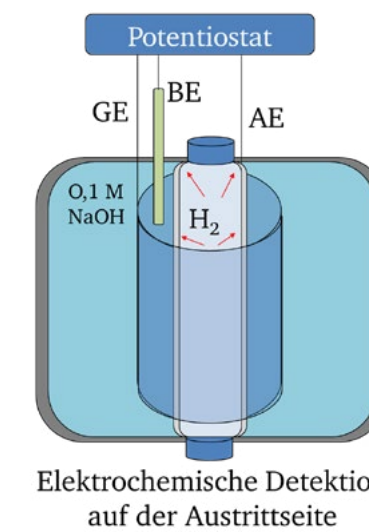
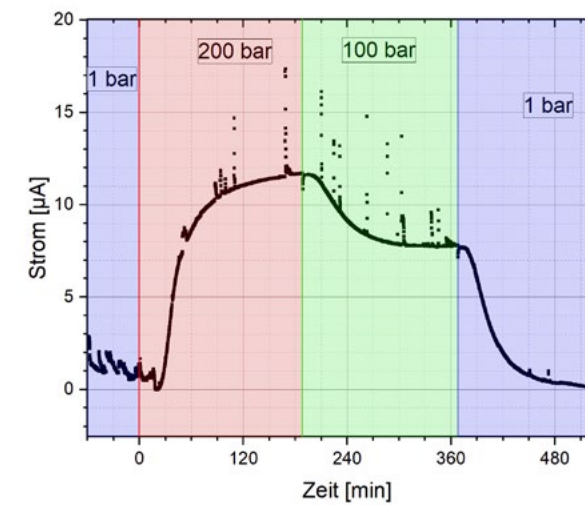


Abb. 3: Links ist ein Permeationstransient bei einem hochfesten martensitischen Werkstoff unter Druckwasserstoffbeaufschlagung dargestellt; rechts - der schematische Aufbau der Permeationsmesszelle; GE – Gegenelektrode (Platinnetz), BE – Bezugslektrode (Silber-Silberchlorid Elektrode), AE – Arbeitselektrode (Probe)

Elektrochemische Detektion auf der Austrittseite

• Im Projekt „GTEH2“ (Werkstoffdaten für Gasturbinen-Abgasbedingungen unter Berücksichtigung einer H<sub>2</sub>-Verbrennung, 03EE5161B) wird der Einfluss geänderter Abgaseigenschaften von Gasturbinenkraftwerken aufgrund der Brennstoffsubstitution durch Wasserstoff auf im Abgastrakt nachgeschaltete Komponenten, insbesondere verbaute Kompensatoren, untersucht. In Kooperation mit einem mittelständischen Unternehmen, der Firma „DEKOMTE“, sowie der RWTH Aachen werden drei Ziele verfolgt: Zunächst werden die zu erwartenden Änderungen der relevanten Abgaseigenschaften unter der Berücksichtigung verschiedener Brennkamertypen, Wasserstoffbeimischungsrate und Betriebsweisen analysiert. Im Anschluss wird der Einfluss der spezifisch und verändert vorliegenden Gaszusammensetzung auf die Werkstoffeigenschaften von nichtgeschweißten und geschweißten Proben untersucht. Hierbei kommt die im Rahmen des zuvor genannten Projekts „H2HT-Lab“ entwickelte Hohlprobenprüftechnik zum Einsatz. Anhand dieser Untersuchungen wird eine Werkstoff- und Designdatenbank aufgebaut, welche eine zertifizierungsgerechte Werkstoffauswahl nach akzeptierten technischen Kriterien erlauben soll. Dieses vom BMWK geförderte Vorhaben verbindet erstmals die im Haus vorhandenen Kompetenzen im Bereich „Wasserstoff“ des Kompetenzbereichs Oberflächenstechnik mit den Kompetenzen im Bereich „Hochtemperaturwerkstoffe“.

• Im Projekt „TMF SN H2“ (Verbesserung von Konzepten zur Bewertung von thermomechanisch belasteten Schweißnähten bei künftig wasserstoffbetriebenen Gasmotoren zur Erhöhung der Last- und Brennstoffflexibilität, 03EE5172C) wird ebenfalls das Werkstoffverhalten von geschweißten Komponenten unter einer Wasserstoffexposition bei hohen Temperaturen untersucht, allerdings mit dem Fokus auf einer thermomechanischen Ermüdungsbeanspruchung. Im Anwendungsmittelpunkt stehen hierbei wasserstoffbefeuerte Gasmotoren. Ein entscheidendes Argument für den Einsatz solcher dezentralen Lösungen zur Energieerzeugung ist, dass die Gasmotoren je nach Bedarf mit sehr kurzen Vorlaufzeiten in wenigen Minuten zu- oder abgeschaltet werden können und das Kraftwerk demzufolge sehr flexibel im Rahmen eines Spitzenlastmanagements eingesetzt werden kann. Für einen erfolgreichen Einsatz dieser Technologie im Rahmen der Energiewende, folgen allerdings drei Kern-Anforderungen: hohe Verfügbarkeit, generelle Brennstoffflexibilität, hohe Lastflexibilität. Ziel dieses Vorhabens ist es daher, potenziell lebensdauerkritische Komponenten von Gasmotoren, und damit geschweißte Verbindungen, hinsichtlich künftiger Beanspruchungsformen systematisch zu untersuchen und den Herstellern bzw. an der Entwicklung beteiligten Firmen abgesicherte Bewertungswerkzeuge zur Verfügung zu stellen, um die Komponenten sicher auslegen und mit hoher Verfügbarkeit betreiben zu können.

<sup>1</sup> M. Brilz, H. Hoche und M. Oechsner, „Hydrogen-assisted cracking (HAC) of high-strength steels as a function of the hydrogen pre-charging time“ Engineering Fracture Mechanics, Bd. 261, 108246, 2022.

<sup>2</sup> O. Gosheva, G. Andersohn und M. Oechsner, J. Kloewer, A. Aghajani, „Impact of microstructure on hydrogen solubility and diffusivity in UNS 07718“ Corrosion 2016, Conference & Expo, Vancouver, BC, Canada. Houston: NACE International, 2016, Paper No. 7267, 14 S.





## KURZBERICHTE ZU ABGESCHLOSSENEN FORSCHUNGSPROJEKTEN 2023

### STRATEGIEFELD

#### Digitalisierung

DR.-ING.  
FELIX KÖLZOW

+49 6151 16 - 25 078  
digitalisierung@tu-darmstadt.de

Die Arbeiten im Bereich des Strategiefeldes Digitalisierung bezogen sich im Jahr 2023 fast vollständig auf das „Center for Reliability Analytics“ (CRA). Die dazugehörigen Arbeiten beziehen sich unter anderem auf die internen Netzwerk- und Serverstrukturen als auch auf die Netzwerkplanung im CRA selbst. Naturgemäß erfolgt dies in enger Abstimmung mit dem Hochschulrechenzentrum.

Die grundsätzliche, strategische Ausrichtung bezüglich einer quelloffenen Infrastruktur und digitaler Souveränität wird fortgesetzt. Dies bezieht sich unter anderem auch auf zukünftige Storage-Lösungen als auch die notwendigen Lösungen für das High-Throughput-Computing mit HTCondor.

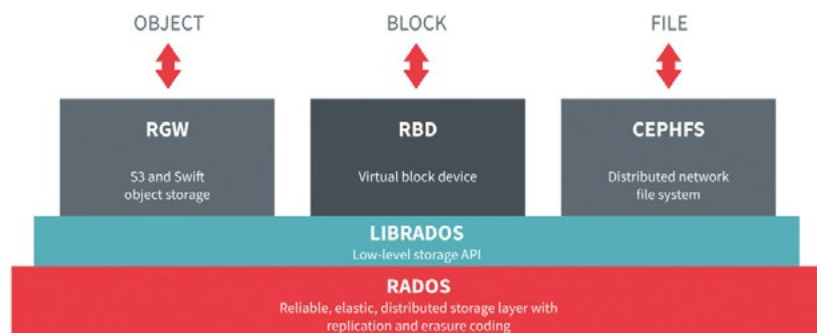
Zukünftige Werkstoffmodelle zeichnen sich unter anderem durch die Möglichkeit einer Zuverlässigkeitsbewertung aus. Die dazu notwendigen Simulationen sind methodisch bedingt in der Regel unabhängig voneinander, welches insbesondere das High-Throughput-Computing charakterisiert. So konnten konstitutive Werkstoffmodelle zur statistischen Bestimmung der Lebensdauer-Kennlinien eingesetzt werden, wobei hierfür im Jahr 2023 etwa 250.000 CPU-Stunden mit der am Fachgebiet eingerichteten Computing-Umgebung aufgewendet wurden.

Neben den zahlreichen wissenschaftlich Mitarbeitenden können auch Bacheloranden, Masteranden und wissen-

schaftliche Hilfskräfte diese Infrastruktur für eine Vielzahl von Projekten nutzen. So sind allein für Bearbeitung von studentischen Arbeiten inzwischen etwa 100.000 CPU-Stunden zu verzeichnen. Viele Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeiten wären ohne die neue IT-Infrastruktur nicht möglich gewesen. Weiterhin wurden im Rahmen von Forschungsvorhaben und Industriekooperationen Auswertungsprogramme entwickelt, die auch von Industrie- und Forschungspartnern genutzt werden.

Um auch in Zukunft auf unterschiedliche Anforderungen reagieren und den Forschungsvorhaben individuelle Lösungen bereitstellen zu können, wurde im Bereich der Computing-Umgebung ein Proof-of-Concept (PoC) „Ceph-Cluster“ in Betrieb genommen. Ceph ist ein verteiltes Speichersystem, welches neben der Möglichkeit einer hohen Skalierbarkeit vor allem auch die Datenkonsistenz und Ausfallsicherheit priorisiert. Innerhalb des PoC liefert Ceph das Dateisystem für das High-Throughput-Computing und das sogenannte Block-Storage für eine Vielzahl von virtuellen Maschinen. Diese können an die verschiedenen Bedürfnisse der Forschungsvorhaben angepasst werden können. Weiterhin wird auch Object-Storage ausgeliefert, um das Forschungsdatenmanagement weiterzuentwickeln. Im Jahr 2024 stehen viele konzeptionelle Arbeiten für die zukünftige Ausrichtung mit Blick auf das CRA an. Hierzu gehört unter anderem eine weitere Automatisierung der Infrastruktur und der Überwachung von Diensten, sowie eine entsprechende IT-Sicherheitsarchitektur. Des Weiteren steht natürlich auch die Informationssicherheit im Fokus, sodass diese Tätigkeiten in einer entsprechenden Zertifizierung der Informationssicherheit münden können.

Abb. 1: Vereinfachter Aufbau eines Ceph-Clusters



Quelle: <https://indico.gsi.de/event/14500/>

### ENTWICKLUNG EINER METHODE ZUR HAFTFESTIGKEITSPRÜFUNG VON VERBINDUNGSELEMENTEN MIT FEUERVERZINKUNGSÜBERZÜGEN (HAFTVERZINKUNG)

Aktuell existieren keine geeigneten genormten Prüfverfahren für eine praxisgerechte und zuverlässige Beurteilung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen und der damit verbundenen Funktionseigenschaften, insbesondere während Montage und Betrieb.

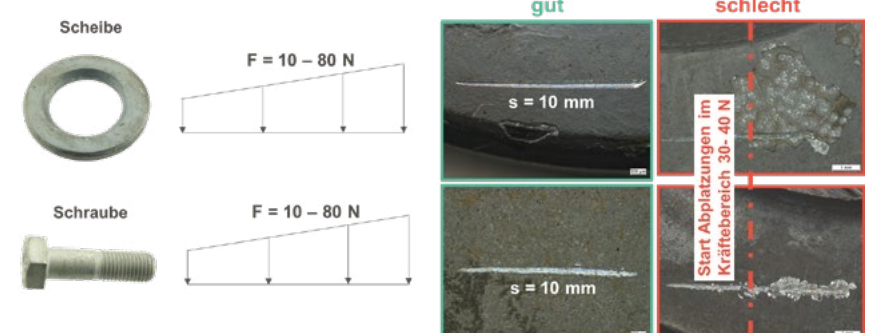
In der betrieblichen Praxis gibt es heute außer einer Sichtkontrolle, mit der optisch bereits schlechte Verzinkungen identifiziert werden können, keine tragfähige Lösung zur Beurteilung der Haftfestigkeit. Daher kommen Schichthaftungsprobleme durch die Beanspruchungen bei Transport, Handhabung oder Montage oft erst beim Schraubenhersteller oder beim Endkunden zum Vorschein. Diese Tatsache ist gerade für Feuerverzinkungsunternehmen und Schraubenherstellern aus technischer und wirtschaftlicher Sicht problematisch, weil diese keine Möglichkeiten für eine normgerechte Prüfung der Qualität ihrer Produkte und somit auch keine geeignete Methode zur Prozessüberwachung und -optimierung haben.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer robusten, einfach handhabbaren und aussagekräftigen Methode zur Prüfung der Haftfestigkeit von Feuerverzinkungsüberzügen auf Verbindungselementen.

Als Grundlage der zu entwickelnden Methode wurde gemeinsam mit dem Gemeinschaftsausschuss Verzinken e. V., dem Deutschen Schraubenverband e. V. sowie den im Forschungsprojekt organisierten Unternehmen ein Lastenheft erarbeitet. Dabei wurden neben grundsätzlichen Anforderungen wie z. B. Robustheit, Handhabbarkeit, Anwendbarkeit, Aussagekraft und Wiederholbarkeit auch die industriellen Praxiserfahrungen bezüglich des Auftretens von Fehlern, Reklamationen und Ursachenforschung berücksichtigt.

Es wurde ein Praxis-Screening existierender Methoden zur Haftfestigkeitsprüfung von Beschichtungen und Zinküberzügen durchgeführt. Dies erfolgte unter Berücksichtigung des Lastenhefts sowie konstruktiver und wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Gemäß VDI 2225-3 wurden mit der Methode des Paarvergleichs entsprechende Gewichtungsfaktoren abgeleitet. Dabei zeigte sich der Ritztest, bei dem mit steigender Kraft ein Hartmetallstift über die Oberfläche gezogen wird, am vielversprechendsten. Die Anwendung des Prüfprinzips zeigte, dass anhand des makroskopischen Befundes Abplatzung / keine Abplatzung eine einfache Zuordnung zur Schichthaftung getroffen werden kann, welche anhand umfassender Untersuchungen an metallographischen Schlif-

fen validiert wurde. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Ritztests zur Anwendung an Feuerverzinkungsüberzügen wurde als Eindringkörper ein Flowdrill-Fließbohrer an einen vorhandenen Ritztester adaptiert. Für die verschiedenen Bauteile (Mutter, Schraube, Scheibe) wurden sowohl die Prüfkraftbereiche identifiziert als auch Einflüsse auf das Prüfergebnis, in Form einer Schrägstellung der zu prüfenden Oberfläche, untersucht. Bei allen geprüften Proben war anhand des makroskopischen Befundes eine eindeutige Unterscheidung zwischen gut und schlecht haftenden Zinküberzügen möglich. Mit dem weiterentwickelten und validierten Prüfkonzept sowie unter Berücksichtigung des Lastenhefts wurde ein Prototyp für eine mechanische Prüfeinrichtung konzipiert.



### Werkstoffanalytik

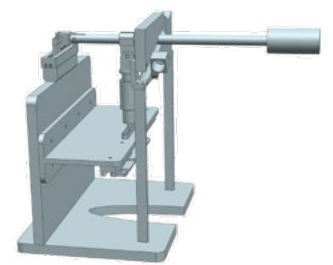


Abb. 1: Modell der im Projekt entwickelten Prüfapparatur

Abb. 2: Prüfprinzip mittels modifiziertem Ritztest. Bei schlecht haftenden Zinküberzügen kommt es zu Abplatzungen neben der Ritzspur



### ERHÖHUNG DER SICHERHEIT BEIM EINSATZ HOCHFESTER STÄHLE GEGENÜBER WASSERSTOFF (H)-VERSPRÖDUNG DURCH EIN VERBESSERTES VERSTÄNDNIS DES H-ABSORPTIONS- UND -EINLAGERUNGSVERHALTENS (SICHERHAET)

Die Voraussetzung für die Durchführung mechanischer Prüfmethode zur Bewertung der Anfälligkeit hochfester Schrauben gegenüber einer Wasserstoffversprödung ist eine reproduzierbare Beladung der Werkstoffe bzw. Proben mit Wasserstoff. Bezüglich der Beladung existieren aber weder Normen noch Richtlinien. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die komplexen Mechanismen des H-Aufnahme- und Effusionsverhaltens, insbesondere unter Einwirkung einer gleichzeitigen mechanischen Beanspruchung sowie unter Berücksichtigung von Beladungsbedingungen, Werkstoff, Oberflächen- und Vergütungszustand noch weitgehend unbekannt sind.

Um diese Lücke zu schließen, wurden im Rahmen dieses Projektes systematische Untersuchungen durchgeführt, mit denen ein tieferes Verständnis des Wasserstoffabsorptions- und Einlagerungsverhaltens und der resultierenden Auswirkungen auf die Bauteilsicherheit hochfester Stähle unter Berücksichtigung von Werkstoff und Vergütungszustand sowie unter gleichzeitiger Einwirkung mechanischer Beanspruchungen erarbeitet wurde. Dieses erlaubt dem Anwender, die Prüfstrategien zur Bewertung der Werkstoffanfälligkeit und des Wasserstoffgefährdungspotenzials zu optimieren und die Sicherheit der Produkte zu erhöhen. Zu den in diesem Projekt untersuchten Einflussgrößen auf das Wasserstoffabsorptionsverhalten zählen:

- Art und die Konzentration der Säure
- Art und Konzentration eines Promotors der Wasserstoffaufnahme
- Einfluss einer kathodischen Polarisation
- Einfluss der Umgebungstemperatur sowie einer Umspülung der Probenoberfläche zur Vermeidung einer isolierenden Gasschicht, welche weitere Redoxreaktionen zur

Bildung von atomarem Wasserstoff hemmen würde

- Einfluss des Werkstoffs und der Festigkeitsklasse

Die Bewertung der Einflussgrößen erfolgte insbesondere mittels Wasserstoffanalytik durch Trägergasheißgasextraktion, wobei verschiedene zweckgebundene Vorgehensweisen, wie z. B. in Abhängigkeit von der Probendicke und der Wasserstoffbeladungsdauer zur Bestimmung der Wasserstoffkonzentrationsprofile, durchgeführt wurden.

In Abhängigkeit vom H-Absorptions- und Einlagerungsverhalten sind verschiedene Schädigungsmechanismen bzw. Schädigungshergänge zu erwarten. Zur Optimierung der Prüfstrategie hinsichtlich der Berücksichtigung des Absorptionsverhaltens und der daraus resultierenden Wasserstoffkonzentrationsprofile wurde im Rahmen dieses Projektes ein Modell entwickelt, welches den Schädigungshergang in die Stadien der wasserstoffassistierten Rissinitiierung und des wasserstoffassistierten Risswachstums unterteilt. So ermöglicht es eine bruchmechanische Bewertung der Probenanfälligkeit gegenüber einer Wasserstoffversprödung, welche die Bestimmung des Wasserstoffdiffusionskoeffizienten, der Schwellenwertspannungsintensität und der Bruchzähigkeit enthält. Die Kombination aus den Bewertungsparametern zur Quantifizierung des Wasserstoffabsorptionsverhaltens und denjenigen zur Beschreibung der Bruchmechanik der Wasserstoffversprödung bietet dem Anwender eine optimale Prüfstrategie zur Bewertung der Werkstoffanfälligkeit und des Wasserstoffgefährdungspotenzials, wodurch er in die Lage versetzt wird, die Sicherheit seiner Produkte erhöhen zu können.

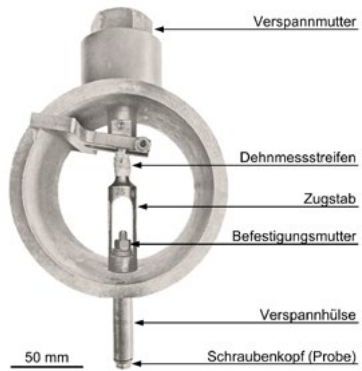
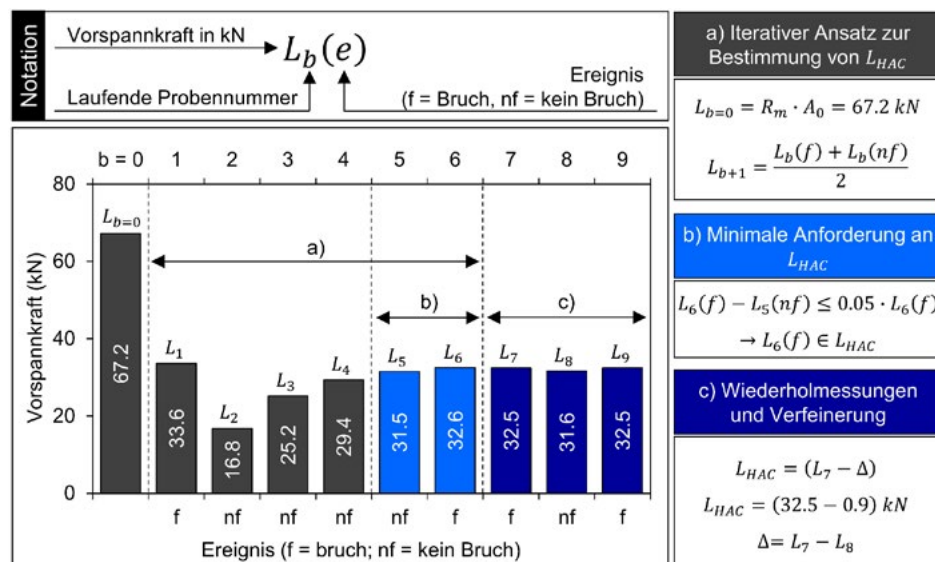


Abb. 1: Verspannstation zur Spannung der vorab mit Wasserstoff beladenen Probe bei einer konstanten Auslenkung

Abb. 2: Iterativer Ansatz zur Bestimmung einer minimalen Vorspannkraft zur wasserstoffassistierten Rissbildung  $L_{HAC}$



### BEWERTUNG DER MATERIALVERTRÄGLICHKEIT UND MEDIENALTERUNG IN BRENNSTOFFZELLEN-KÜHLSYSTEMEN (KÜHLUNG BRENNSTOFFZELLE II)

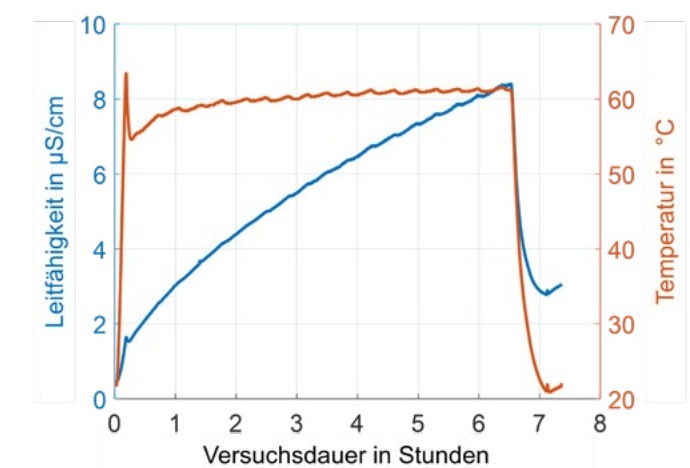
Kühlsysteme sind ein wichtiger Bestandteil, um elektrische Anlagen und Maschinen vor einer Überhitzung zu schützen und einen Betrieb in einem günstigen Wirkungsgradbereich sicherzustellen. Brennstoffzellensysteme sind aufgrund ihrer empfindlichen Polymerelektrolytmembranen besonders anfällig für lokale Überhitzung, weshalb ein störungsfreier Betrieb des Kühlsystems von großer Bedeutung ist. Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass das Kühlmittel in der Brennstoffzelle mit elektrisch funktionellen Komponenten der Gasseite (elektrochemische Reaktionsflächen) in Kontakt kommt. Daher werden besonders niedrige Grenzwerte für die elektrolytische Leitfähigkeit gefordert. Konventionelle Kühlsysteme für Verbrennungsmotoren verwenden Zusätze wie Inhibitoren im Kühlmittel, um das System vor Korrosion zu schützen. Diese Zusätze erhöhen jedoch eklatant die elektrische Leitfähigkeit des Kühlmittels – und machen sie daher für den Einsatz in Brennstoffzellen ungeeignet. Für neu entwickelte Kühlmittellösungen stellt sich der industrielle Bedarf, diese hinsichtlich ihrer Eignung im Brennstoffzellensystem prüfen zu können.

Das Projekt „Kühlung Brennstoffzelle II“ verfolgt das Ziel, die Wechselwirkung zwischen Werkstoffen und Kühlmitteln im Beanspruchungskollektiv einer Brennstoffzellenkühlung systematisch zu charakterisieren und die zugrundeliegenden Degradationseffekte zu identifizieren. Im Fokus steht dabei die Kühlung der Bipolarplatte einer Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle für den mobilen Einsatz. Im ersten Schritt wurde eine Kühlmittelumlaufanlage entwickelt, welche die komplexen Beanspruchungsbedingungen realer Brennstoffzellensysteme auf ihre wesentlichen Beanspruchungskenngrößen reduziert und zugleich einen praxistgerechten Ergebnistransfer ermöglicht. Hierzu zählt auch die Ableitung einer Prüfrichtlinienempfehlung. Kernstück dieser Anlage ist der bereits im Vorprojekt „Kühlung Brennstoffzelle“ entwickelte Brennstoffzellenemulator, für den im laufenden Vorhaben eine Referenz-Bipolarplatte als produktspezifische Versuchsgeometrie zur Schaffung einer vorwettbewerblichen Vergleichsbasis entwickelt wurde.

Die Entwicklung der Prüfeinrichtung wird durch das Institut für Strömungslehre und Aerodynamik (SLA, TU Darmstadt) unterstützt, welche die lokalen strömungsdynamischen und thermischen Beanspruchungen in den Kühlkanälen

der Platte auf Basis numerischer Methoden charakterisiert. Das Ziel ist es, ein Verständnis über die herrschenden Beanspruchungen zu erhalten und damit den phänomenologischen Befunden im Experiment mit den wirkenden Beanspruchungen verknüpfen zu können (Abb. 1). Im Vergleich mit Kühlsystem-Prüfeinrichtungen für den Verbrennungsmotor (vgl. FVV R530-2005, MHTA) zeichnet sich die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Anlage durch eine Vergrößerung der beheizten Probenoberfläche (ca. 100 cm<sup>2</sup>) und eine Reduzierung des Fluidvolumens (< 1 Liter) aus. Darüber hinaus ermöglicht der Prüfstand die In-situ-Messung niedrigster elektrischer Leitfähigkeiten (< 1 µS/cm). Der Prüfstand soll für Experimente eingesetzt werden, die die Kühlmittelalterung und die Werkstoffverträglichkeit in den Kanälen der Bipolarplatte untersuchen. Kühlmittelseitig ist insbesondere die Quantifizierung des Anstiegs der elektrischen Leitfähigkeit sowie die Veränderung des pH-Wertes von Bedeutung, während auf der Werkstoffseite die korrosiven Beanspruchungen im Sinne einer elektrochemischen Metallauflösung sowie Erosion und Kavitation in Abhängigkeit von der Strömungs- und thermischen Beanspruchung charakterisiert werden sollen. Abb. 2 skizziert beispielhaft den Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit infolge thermisch-induzierter Kühlmittelalterung bei einer Medientemperatur von 60 °C über eine Versuchsdauer von sieben Stunden.

Mit Abschluss des Projektes besteht das Potenzial, eine Prüfplattform zu erhalten, mit der kritische Beanspruchungszustände für Werkstoffe und Kühlmittel im Brennstoffzellensystem identifiziert werden können. Außerdem soll sie die Grundlage für die Entwicklung von Empfehlungen für Prüfrichtlinien bilden, mit denen sich Kombinationen von Werkstoffen und Kühlmitteln hinsichtlich ihrer Eignung im Brennstoffzellensystem überprüfen lassen.



<sup>1</sup> Entwicklung eines Brennstoffzellen-Stack-Emulators zur Untersuchung und Bewertung von Komponenten, Werkstoffen und Flüssigkeiten für den Einsatz in Kühlsystemen von Brennstoffzellen (Kühlung Brennstoffzelle), FVV-Eigenmittelvorhaben, M1296

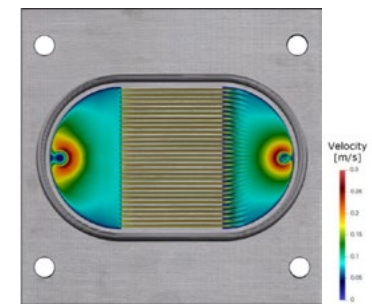


Abb. 1: Strömungsprofil in den Kühlkanal einer Bipolarplatte am Beispiel der entwickelten Referenzplatte. Erkennbar sind die heterogenen Strömungsgeschwindigkeiten am Zu- und Ablauf sowie über die Kanallänge. Hieraus ergibt sich – unter anderem – ein lokal unterschiedliches Erosionspotenzial. Thermische Einflüsse sind nicht berücksichtigt

Abb. 2: Elektrische Leitfähigkeit bei thermischer Beanspruchung mit einer Medientemperatur von 60 °C am Beispiel eines nicht-inhibierten Wasser-Monoethylglykol-Kühlmittelblends (Mischungsverhältnis 50 / 50 [% V/V])



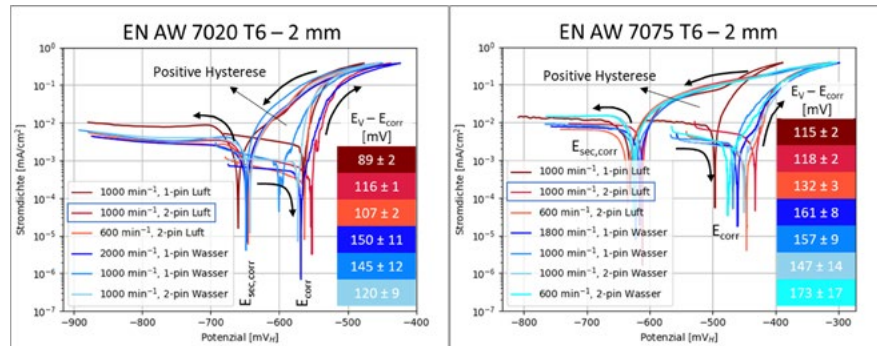
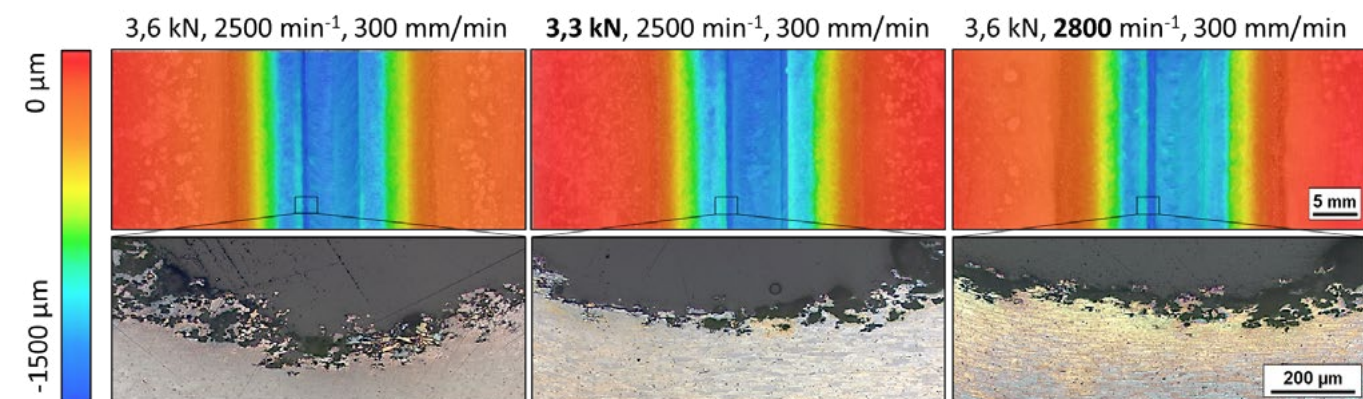


Abb. 1: Stromdichte-Potenzial-Kurve von zyklischen potentiodynamischen Polarisationsversuchen an Schweißverbindungen aus der Legierung EN AW-7075 in ihren T6- bzw. T651-Wärmebehandlungszuständen

Gegenstand des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung des Korrosionsverhaltens von rührreibgeschweißten Aluminiumkonstruktionen in wässriger Umgebung. Dabei wurden die Möglichkeiten zur prozessintegrierten Optimierung des Korrosionsverhaltens hochfester Aluminiumlegierungen der 7000er-Serie durch spezifische schweißtechnische Randbedingungen erstmals systematisch am Beispiel der beiden hochfesten, ausscheidungshärtbaren Aluminiumknetlegierungen EN AW-7020 und EN AW-7075 erforscht. Dabei werden die beiden Wärmebehandlungszustände T6 und T651 unterschieden. Beim Rührreißschweißen kommt es zum Eintrag von Wärme in das zu verschweißende Werkstück, wenngleich die thermische Belastung im Vergleich zu anderen Schweißmethoden eher gering ist. Hinzu kommt eine gewisse mechanische Beanspruchung durch den Rührprozess selbst. Der Wärmeintrag erfolgt verfahrensbedingt lokal unterschiedlich über das Werkstück; die Wärmedissipation im Bereich der Wärmeeinflusszone erhöht die thermische Heterogenität zusätzlich, wiederum mit Einfluss auf die lokale Ausprägung des Gefüges. Die erarbeiteten Lösungsansätze dieses Vorhabens umfassen die (i) Reduktion der Wärmebringung, (ii) Verbesserung der Wärmeableitung und (iii) Kombination beider Ansätze. Um zunächst die rührreißschweißtechnische Verarbeitung der genannten Aluminiumknetlegierungen einzugrenzen, wurde ein Prozessfenster eingegrenzt. Hierbei war es möglich, durch eine geeignete Kombination von Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit entweder einen „kalten“ Prozess (im Verhältnis 1:1)

oder einen „warmen“ Prozess (im Verhältnis 3:1) anzuwenden und dabei die Blechdicken von 2 mm (T6) und 4 mm (T651) reproduzierbar zu verschweißen. Auf Basis von Immersionsversuchen nach DIN EN ISO 11846:2008-08 wurde die Beständigkeit gegenüber interkristalliner Korrosion umfassend untersucht. Das Verfahren ermöglicht es, korrosionstechnisch kritische Zonen für eine große Probenvielfalt simultan und in vergleichsweise kurzer Zeit (teils < 3 Stunden) durch die Verwendung entsprechender Versuchsmedien (wässrige Lösung, versetzt mit 1 Vol.-% HCl und 3,5 Gew.-% NaCl) zu lokalisieren (Abb. 1). Beispielsweise lässt sich hier bei den geschweißten Proben mit Parametern aus der Industrie erkennen, dass die Korrosionsangriffe hauptsächlich im Bereich der Schweißnaht auftreten. Der tiefste Korrosionsangriff befindet sich im Übergangsbereich zwischen der Rührzone und der Wärmeeinflusszone auf der Gegenlaufseite, wo eine Korrosionsangriffstiefe von ca. 1500 µm gemessen wurde. Zur weiteren Charakterisierung wurden zyklische potentiodynamische elektrochemische Korrosionsuntersuchungen in Medien mit geringer Korrosivität (0,1 Gew.-% NaCl-Lösung, wässrig) durchgeführt (Abb. 2). Im Vergleich zu einfachen Immersionsversuchen besteht der Vorteil bei der Anwendung dieser Methodik darin, dass zusätzliche Informationen zur Korrosionskinetik und zur Anfälligkeit gegenüber Lochkorrosion gewonnen werden können. Eine Differenzierung des Korrosionsverhaltens bezüglich verschiedener Schweißparameter ist ebenfalls möglich. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden für beide untersuchten Legierungssysteme optimale schweißtechnische Prozessrandbedingungen ermittelt, um die höchste Korrosionsbeständigkeit zu erreichen (Abb. 2). Wenngleich die erzielte Korrosionsbeständigkeit der Schweißnaht nicht das angestrebte Niveau des Grundwerkstoffs erreicht, verdeutlichen die Ergebnisse eindrucksvoll, dass das Korrosionsverhalten beeinflussbar und damit schweißprozesstechnisch optimierbar ist.

Abb. 2: Metallographische Schliffe nach Immersionsversuch von rührreibgeschweißten EN AW-7075 T6 gemäß Industrieparametern



Forschungsgegenstand des im Verbundvorhaben NAMOSYN dem Forschungscluster FC1 zugeordneten Projektteils (AP1.6.2) ist die Untersuchung der Materialverträglichkeit metallischer Werkstoffe in kraftstoffführenden Bauteilen. Ein Schwerpunkt bildet dabei die Exposition in Oxymethylenether (OME) als regeneratives, synthetisch hergestelltes Kraftstoffsurrogat im dieselmotorischen Betrieb. Wissenschaftliche Zielsetzung ist die Bewertung des Kraftstoffalterungsverhaltens, die Werkstoffverträglichkeit bei Kraftstoffexposition ohne als auch mit überlagerter mechanischer Beanspruchung sowie die Entwicklung einer anwendungsgerechten Prüfmethode. Abschließendes Ziel ist Ausgangsbasis für die Ableitung einer branchenübergreifend akzeptierten Prüfrichtlinie.

#### Einschätzung des korrosiven Beanspruchungspotenzials von OME

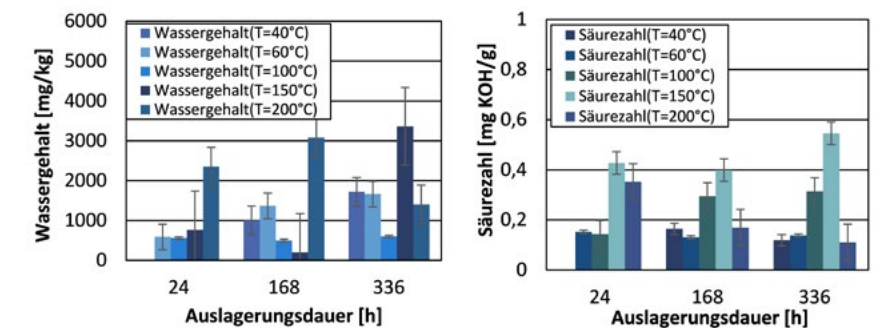
Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche und in engem Austausch mit den industriellen Forschungspartnern des NAMOSYN-Vorhabens wurden feldrelevante Kraftstoffformulierungen identifiziert und vor dem Hintergrund der potenziellen Korrosivität und Alterungsstabilität bewertet. Als Basis-Kraftstoff wurde vom Projektmitglied Fa. ASG Analytik-Service GmbH ein OME3-5-Blend bereitgestellt. Zur Erhöhung der Oxidationsstabilität (Alterung) wurde dieser herstellerseitig mit Butylhydroxytoluol (Konzentration 200 mg/kg<sup>2</sup>) additiviert. Mit Blick auf die elektrochemische Korrosionsanfälligkeit metallischer Werkstoffe sind vor allem der Anteil an Wasser, Anionen, Alterungsprodukte sowie die Azidität entscheidend. Eine nasschemische Analyse des Ausgangszustands dokumentiert einen Wasseranteil<sup>1</sup> von 146 mg/kg; der Anteil an Formaldehyd (Alterungsprodukt infolge Oxidation) beträgt 233 mg/kg. Als Indikator für die Azidität wurde eine Säurezahl von 0,171 mg KOH/g ermittelt. Ein Eintrag von korrosionsstimulierenden Ionen, wie beispielsweise Chlorid oder Sulfat, liegt nicht vor.

#### Entwicklung und Validierung geeigneter Prüfverfahren

Das Prüfblatt VDA-230-207 stellt ein bislang etabliertes Prüfverfahren zur Bewertung der Materialverträglichkeit metallischer Werkstoffe in konventionellen und biogenen Kraftstoffen dar. Dabei werden Werkstoffproben bei erhöhten Temperaturen für bis zu 26 Wochen im Kraftstoff in druckdichten Reaktoren exponiert. Neben einer visuellen Befundung der Probenoberfläche erfolgt versuchsbegleitend eine gravimetrische

Analyse. Mit Blick auf eine potenzielle Anschlussfähigkeit des Prüfblatts auch für OME-haltige Kraftstoffe, wurden im Rahmen von NAMOSYN die Prüfbedingungen hinsichtlich Kraftstoffformulierung, thermisch-induzierter Medienalterung und Expositionszeit angepasst. Ziel ist eine hohe Ergebnisvalidität bei möglichst kurzer Versuchsdauer zu erhalten. Dazu wurde OME3-5 für 336 Stunden bei verschiedenen Temperaturen bis zu 200 °C ausgelagert. Bereits ab 100 °C zeigt sich nach der Immersion eine gelbliche Verfärbung, welche mit der Bildung von Formaldehyd – einem Oxidationsprodukt des OME – assoziiert ist. Einhergehend damit kommt es zu einem Anstieg der Säurezahl und des Wasseranteils, als abgespaltenes Reaktionsprodukt bei der Oxidation des OME3-5 zu Formaldehyd (Abb. 1). Bei einer Temperatur von 60 °C sind die beobachteten Effekte deutlich geringfügiger, so dass die Materialverträglichkeitsuntersuchungen zur Minimierung eines überlagerten Einflusses infolge der Kraftstoffalterung auf 60 °C begrenzt werden.

Abb. 1: Wasseranteil<sup>1</sup> (links) und Säurezahl (rechts) des Kraftstoffblends OME3-5 nach thermischer Auslagerung.



#### Materialverträglichkeit in Oxygenaten

Ziel des Arbeitspakets war es, die grundsätzliche Kompatibilität eines möglichst breiten Spektrums an anwendungsrelevanten Werkstoffen kraftstoffführender Komponenten im automobilen Einsatz zu untersuchen. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden 28 verschiedene Werkstofflegierungen (unter anderem Aluminium, Edelstähle, Kupferbasiswerkstoffe) und Beschichtungen identifiziert, welche umfassend im Teilbericht II dargestellt sind. Die Auslagerung fand sowohl im OME3-5 Kraftstoff statt als auch in ausgewählten OME-Diesel-Blends. Die Ergebnisse dokumentieren eine grundsätzlich hohe Verträglichkeit aller untersuchten Materialien sowohl im reinen OME-Kraftstoff als auch im 20-volumenprozentigen Mischungsverhältnis mit handelsüblichem Dieseldieselkraftstoff. Reale Kraftstoffe im Feldeinsatz sind jedoch aufgrund hygroskopischer Eigen-

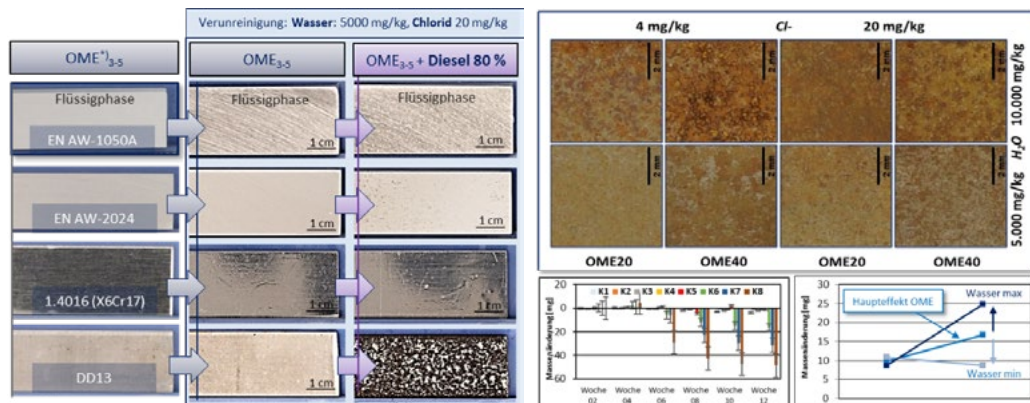
<sup>1</sup> Coulometrische Karl-Fischer Titration gemäß DIN EN ISO 12937:2002 | <sup>2</sup> ASG 1855 Voltmetrie



schaften oftmals mit Verunreinigungen wie Wasser und Salze dotiert. Zur Bewertung der Sensitivität gegenüber einem Eintrag an Verunreinigungen wurde der Wasseranteil und die Konzentration an Chloridionen variiert (Abb. 2). Bereits geringste Mengen an Salzen können an ausgewählten Aluminiumlegierungen und Stahlwerkstoffen zu einem erkennbaren Korrosionsangriff führen. Dabei handelt es sich meist um lokal begrenzte Phänomene (Lochkorrosion, interkristalline Korrosion), die wiederum durch selektive Phasenauflösung zu einer Schwächung der Werkstoffintegrität insgesamt führen.

Aufgrund seiner mechanischen Integrität, der chemischen Beständigkeit im OME-Kraftstoff sowie den damit verbundenen, als korrosionsinert anzusehenden Eigenschaften, wurde Polyamid als Basismaterial für die elektrochemische Messzelle verwendet. Die Ergebnisse aus zuvor exemplarisch durchgeführten 4-Punkt-Biegeversuchen dokumentieren einen lokalen Angriff an ausgewählten ferritischen und austenitischen Stählen. In der lastsimultanen Auslagerung einer servohydraulischen Anlage können nun Laststufen – beispielsweise zur

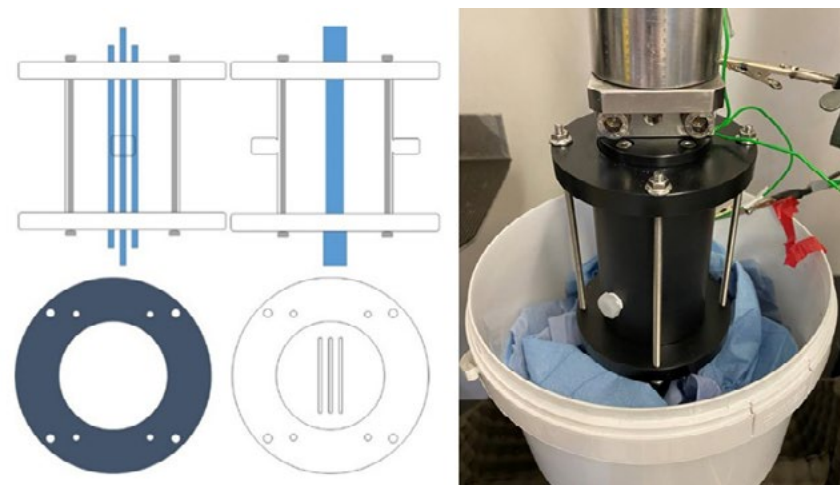
Abb. 2: Metallographische Schliffe nach Immersionsversuchen von EN AW-7075. Sofern nicht anders angegeben findet das Lösungsglühen bei 480 °C für 5 min, Abschreckung in Wasser und Auslagerung bei 120 °C für 24 h statt



In einem weiteren Schritt sollen die im lastfreien Immersionsversuch erzielten Ergebnisse als Basis für die Schaffung einer Prüfmethodeempfehlung zur Bewertung der Anfälligkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion erweitert werden. Im Rahmen des Projekts gelang die konstruktive Entwicklung einer servohydraulischen Prüfeinrichtung, welche zugleich auch eine elektro-chemisch instrumentierte in-Situ Exposition ermöglicht (Abb. 3). Letztere wird durch eine Applikation einer sogenannten 3-Elektroden-Anordnung realisiert. Die mechanische Beanspruchung kann sowohl weggeregelt als auch kraftgeregelt erfolgen. Die Laststufen selbst können statisch (constant load), schrittweise (step-load) oder im kontinuierlichen Laststeigerungsversuch (slow-strain) eingestellt werden.

Vorschädigung der Passivschicht, Rissinitiierung beziehungsweise Gitteraufweitung bei gekerbten Proben – gezielt eingestellt werden. Kommt es infolge Werkstoff-Kraftstoff-Interaktion zu einem Korrosionsangriff, lässt sich das Ereignis sowohl zeitlich diskret aufgelöst als auch hinsichtlich der Intensität (Korrosionsstromdichten) durch ein elektrochemisches Monitoring „überwachen“. Zudem ermöglicht die 3-Elektroden-Anordnung auch die Aufprägung eines elektrischen Potentials, beispielsweise um Korrosionsvorgänge zu raffern (anodisch) oder zu inhibieren (kathodische Polarisation). Auch Untersuchungen einer möglichen wasserstoff-induzierten Spannungsrisskorrosion (kathodische SprK), wie sie beispielsweise für bestimmte Werkstoffzustände hochfester Stähle zu beobachten ist, kann durch Anlegen eines Fremdpotentials und die damit verbundene Wasserstofffreisetzung erfolgen.

Abb. 3: Prinzipskizze zur Probenpositionierung (links) und Prüfaufbau im Testbetrieb und elektrochemische Instrumentierung (rechts)

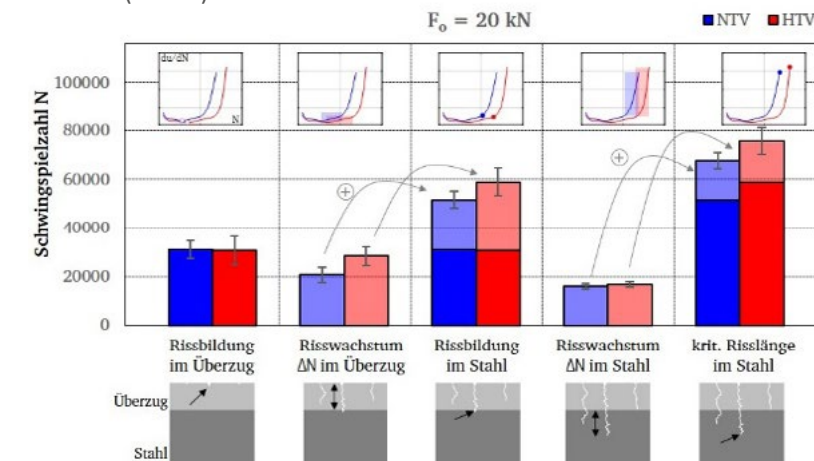


## BEWERTUNG VON MIKROSTRUKTUR-EFFEKTEN DER FEUERVERZINKUNG AUF DIE ERMÜDUNGSFESTIGKEIT FEUERVERZINKTER STAHL- UND VERBUNDBRÜCKEN

Die Feuerverzinkung ist als Korrosionsschutz für Stahl- und Stahlverbundbrücken bestens geeignet und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zu deren Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. Dies belegen jüngste technisch- und wirtschaftswissenschaftliche Studien<sup>1,2</sup>. Kommt eine Feuerverzinkung mit Zinküberzügen von mind. 250 µm zum Einsatz, so ist eine Korrosionsschutzdauer von 100 Jahren erreichbar. In<sup>1</sup> wurden jedoch keine Kerbfälle, die insbesondere bei der Betrachtung des Quersystems im Brückenbau maßgebend werden, vollständig erforscht. Aktuell werden zudem viele Überführungsbauwerke, bei denen zur Sicherung einer großen Durchfahrthöhe für den Verkehr eine möglichst geringe Bauhöhe gefordert wird, als Stahl- und Verbundbrücken mit hochtragfähigen Stahlhohlkästen kleiner bis mittlerer Bauhöhe konzipiert<sup>3</sup>. Mit Hilfe der Feuerverzinkung, die in einem einzigen Verzinkungsvorgang und damit quasi ohne Zusatzaufwand einen lebenslangen Korrosionsschutz im Außen- und im Innenbereich eines Stahlhohlkastens liefert, verbunden mit einer feuerverzinkungsgerechten Konstruktion (mit durchlässigen Querschotten oder Querrahmen, effizienten Montagestößen für längere Brückenbauwerke) und verbesserten, lebensdauererweiternden Kerbdetails, kann ein wesentlicher Entwicklungsschritt für diese wirtschaftliche, nachhaltige Brückenbauweise erzielt werden. Ziel war es daher, Berechnungsnachweise, Konstruktions- und Ausführungsempfehlungen bereitzustellen sowie offene Fragestellungen zum Einfluss von Mikrostruktureffekten feuerverzinkter Stahlbauteile zu beantworten. Neben der Grundcharakterisierung der feuerverzinkten Probekörper wurden sowohl zyklische Versuche zu den relevanten Kerbfällen durchgeführt als auch eine detaillierte Betrachtung der Rissbildung und Rissentwicklung im Zinküberzug mittels elektrischer Widerstandsmessung und analytischer Berechnungen. Die Untersuchungen an feuerverzinkten Probekörpern hielten die unverzinkten Referenzkerbfälle der neuen prEN 1993-1-9<sup>4</sup> allesamt ein. Eine Abminderung der untersuchten Kerbfälle aufgrund der Feuerverzinkung ist demnach nicht erforderlich.

Die vorhandene Lebensdauerreduzierung kann durch die Messung des elektrischen Widerstands differenziert werden. Obwohl die ertragbaren Schwingungszahlen bis zum Bruch zwischen den NTV- und HTV-Proben abweichen, sind die Zeitpunkte der Rissbildung im Überzug annähernd gleich. Im Mittel liegen sie bei etwa 40 % der Lebensdauer im Zeitfestigkeitsbereich. Der Hauptunterschied zwischen den zwei Feuerverzinkungsvarianten ist der schnellere Risswachstum im Überzug einer Normaltemperaturverzinkung. Die erste Phase der Ermüdung ist durch den Zinküberzug verkürzt (Abb. 1).

Abb. 1: Rissbildung und Dauer der Rissbildung im Überzug der NTV- und HTV-Proben im Balkendiagramm<sup>5</sup>



Der anhand des Referenzbauwerks konstruierte Hohlkastenträger (Abb. 2) wurde für einen Großteil-Verzinkungsversuch hergestellt. Mithilfe des Verzinkungsversuchs sollte überprüft werden, ob unzulässige Verformungen des Trägers oder Risse im Material auftreten, die eine Einschränkung der feuerverzinkungsgerechten Konstruktion bedeuten könnten. Die Ergebnisse des Großteil-Verzinkungsversuchs zeigten keine unzulässigen Verformungen oder Risse im Material. Bei Einhaltung der beschriebenen Konstruktionshinweise ist davon auszugehen, dass kein erhöhter Aufwand der Qualitätssicherung notwendig ist.

Abb. 2: Versuchsträger während des Herausziehens aus dem Zinkkessel



<sup>1</sup> D. Ungermann, D. Rademacher, M. Oechsner, et al.: FOSTA P835 - Feuerverzinken im Stahl und Verbundbrückenbau – IGF-Nr. 351 ZBG. FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf. Ausgabe 2014.

<sup>2</sup> U. Kuhlmann, T. Ummerhofer, T. Zinke, et al.: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken – Bericht zum Forschungsprojekt FE 089.0291/2013. Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für Neue Wissenschaft, Bremen.

<sup>3</sup> M. Collette: Neue Entwicklungen bei Brücken mit Hohlkästen. BAST-Fachgespräch Stahlbrückenbau, Bergisch Gladbach, 2017.

<sup>4</sup> prEN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung. Ausgabe 2023.

<sup>5</sup> A.-K. Kraemer: Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen aus Stahl. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2023.

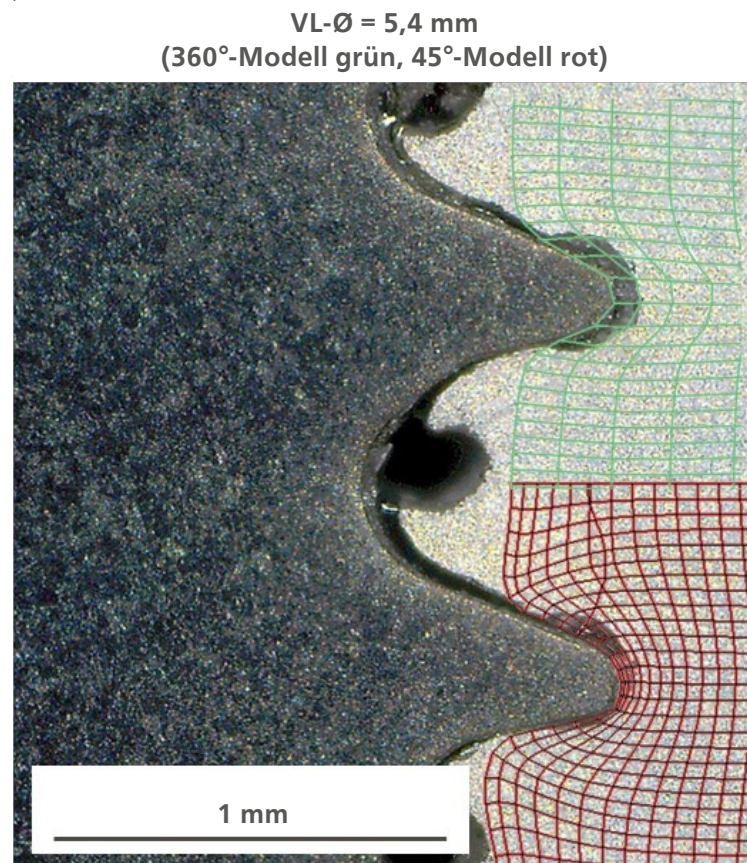


Das Auslegungs- und Montageverhalten gewindeformender Schraubenverbindungen wurde mittels experimenteller und numerischer Methoden untersucht. Das Forschungsziel bestand in der Adaption der Berechnungsschritte für gewindefurchende Schraubenverbindungen auf Basis der Richtlinie VDI 2230-1. Die Bewertung erfolgte anhand unterschiedlicher Typenvertreter mit einheitlichem Zn-Lamellenbeschichtungssystem, welche sich in ihrer Flankengeometrie und ihren Kernquerschnitten unterscheiden. Die Mutterkörper wurden aus dem Werkstoff EN AW 6082 T6 gefertigt und es wurden Vorlochdurchmesser gewählt, die große (80%) und kleine Flankenüberdeckungen (50 %) erzeugen. Die geometrische Charakterisierung des gefurchten Gewindes erfolgte durch metallografische Schlitze und CT-Untersuchungen. Über die Ermittlung von Kräften und Momenten wurde das Montageverhalten bestimmt, sowie Temperaturen beim Umformen analysiert. Im Rahmen der numerischen Simulation wurden ein dreidimensionales 360°- sowie ein 45°-Modell erstellt und eine Parameterstudie zur Entwicklung einer Vernetzungsstrategie durchgeführt. Die Montagesimulation wurde unmittelbar der Umformprozesssimulation nachgeschaltet. Zudem wurde ein Vorgehen zur Erstellung eines 2D-axialsymmetrischen Modells unter Berücksichtigung realer

Gewindegeometrien erarbeitet und im Rahmen einer Vergleichsstudie der Einfluss der Gewindegeometrie (nicht metrisch und ISO-metrisch) auf die lokale Beanspruchung überprüft.

Die tribologischen Besonderheiten beim Gewindefurchen konnten auf Basis der Vorgehensweise nach DIN EN ISO 16047 quantifiziert werden. Es wurde ein elastisches Rückfedermoment bestimmt und mit einem Korrekturfaktor gewichtet. Die quasi-statische Festigkeit wurde experimentell im Auszugversuch bewertet und ergab eine konservative Abschätzung für die Varianten mit Nenndurchmessern  $d = 6, 8, 10$  mm für metrische und nicht-metrische Gewindegeometrien. Ergebnisse der numerischen Simulation zeigten, dass ein 45°-Modell hinsichtlich der Simulationsperformance einem 360°-Modell überlegen ist. Die Umformprozesssimulationen in Abaqus explicit ergaben reduzierte Traganteile im Vergleich zum Experiment (Abb. 1). Im Bereich des Vorspannkraftaufbaus zeigte sich eine Abhängigkeit zwischen der Steifigkeit und Reibungszahl der Kopfaufgabe auf den Drehmoment- bzw. Vorspannkraftverlauf. Für ein vertieftes Verständnis der Vorgänge im Kontakt wurde das Schraubengewinde in unterschiedliche Bereiche eingeteilt, wodurch eine isolierte Bewertung von Drehmomenten, resultierend aus Normal- und Schubspannungen, erfolgte. Ergebnisse der Simulationen zeigten, dass die Variante mit nicht-metrischem Gewinde durch kleinere Axialspannungen, insbesondere im ersten tragenden Gewindegang, gekennzeichnet ist und eine gleichmäßigere Beanspruchung im Gewinde vorliegt. Der Berechnungsgang nach der Richtlinie VDI 2230-1 wurde für gewindeformende Schrauben adaptiert, indem die Rechenschritte R3 bis R7, R11 und R13 modifiziert wurden.

Abb. 1: Vergleich der Ausformung im Experiment, 360°- und 45°-Modell



## VERBESSERTE GENAUIGKEIT VON LEBENSDAUERBEWERTUNGSMETHODEN FÜR GASTURBINENMATERIALIEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG RELEVANTER MEHRACHSIGER ERMÜDUNGSBEANSPRUCHUNGEN

Gasturbinen stellen heute und in Zukunft eine Schlüsseltechnologie für die Stromerzeugung in Deutschland dar. Der Energiemarkt fordert erheblich mehr Flexibilität mit variierenden Auslastungsgraden und zahlreichen schnellen An- und Abfahrvorgängen. Die resultierenden hohen thermischen Transienten sowie die regellosen Betriebsweisen führen zu neuen Design- und Service-Anforderungen, beispielsweise bei der Bewertung und Gestaltung großer Gasturbinengehäuse. Gleichzeitig kommt der Frage der Verfügbarkeit und damit der Zuverlässigkeit des technischen Gesamtsystems sowie der Komponenten unter diesen Beanspruchungsbedingungen eine immer zentraler werdende Bedeutung zu. Innerhalb des Vorhabens „IMPLANT“ war es daher das Ziel, den Einfluss praxisrelevanter mehrachsiger Beanspruchungssituationen auf die Anrisslebensdauer von typischen in Gasturbinenkomponenten verbauten Werkstoffen experimentell zu quantifizieren sowie theoretisch zu beschreiben.

Zur experimentellen Nachstellung einer mehrachsigen Beanspruchung wurden an zwei Werkstoffen, einem 1%Cr-Gussstahl sowie der Nickelbasislegierung Allvac718Plus, verschiedene Versuchs-

serien an biaxial belasteten Kreuzproben durchgeführt. Jeder Versuch wurde zuvor mit Hilfe der Anwendung der Finiten Elemente Methode ausgelegt. Damit konnten, u. a. für verschiedene Achsverhältnisvariationen, identische Vergleichsspannungen nach von Mises eingestellt werden, so dass die Versuchsergebnisse hinsichtlich dieser Größe verglichen werden konnten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anwendung der Vergleichsspannungshypothese nach von Mises überwiegend zu konservativen Lebensdauern hinsichtlich der Anrisslastwechselzahl führt. Alternative Konzepte mit impliziter Berücksichtigung bspw. des Verhältnisses der Hauptdehnungskomponenten zueinander, ermöglichen eine konsistente und verbesserte Lebensdauerbeschreibung genauso wie höherwertige konstitutive Modelle.

Auf Basis der erstmals systematisch und in großem Umfang generierten Ergebnisbasis innerhalb des Vorhabens wurden interne Berechnungsprozeduren zur Auslegung und Bewertung von realen Bauteilkomponenten bei den Industriepartnern Rolls-Royce Deutschland und Siemens Energy überprüft, verbessert und abgesichert.

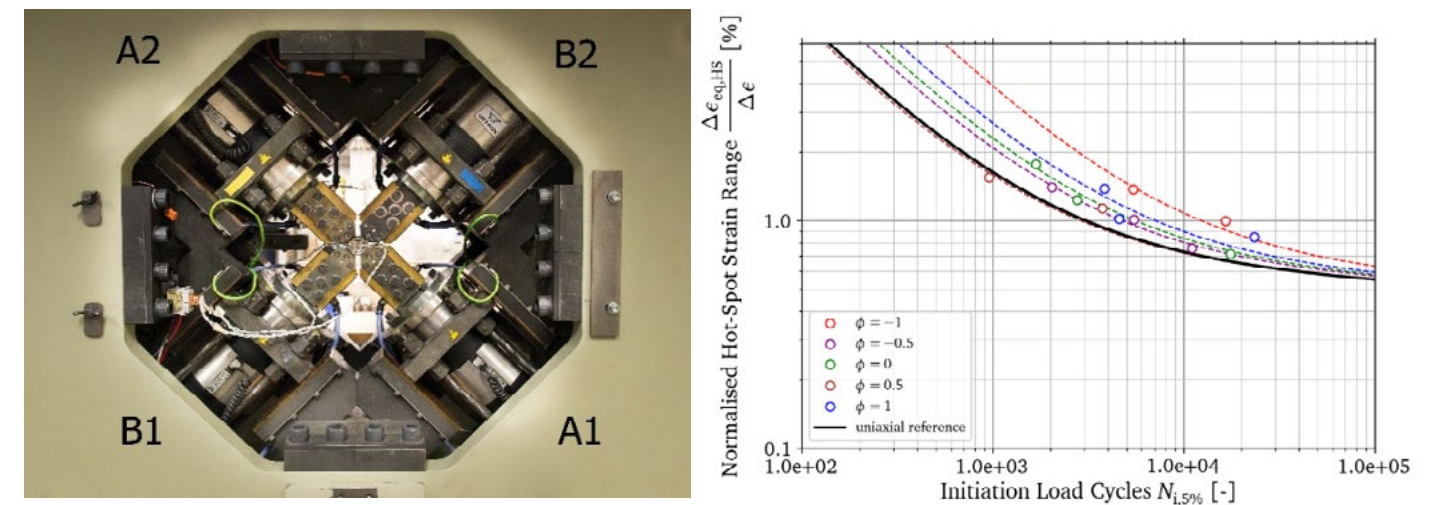


Abb. 1: Verwendete biaxiale Prüfeinrichtung mit Angabe der Last-Achsen A & B (links)  
Beispielhaftes Ergebnis der normierten Vergleichsdehnung am Anrissort (HS) über der Lastwechselzahl für verschiedene Achsverhältnisse (rechts)



UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS VON GROBKORN AUF DIE ERMÜDUNGSEIGENSCHAFTEN AUSTENITISCHER KRAFTWERKSSTÄHLE

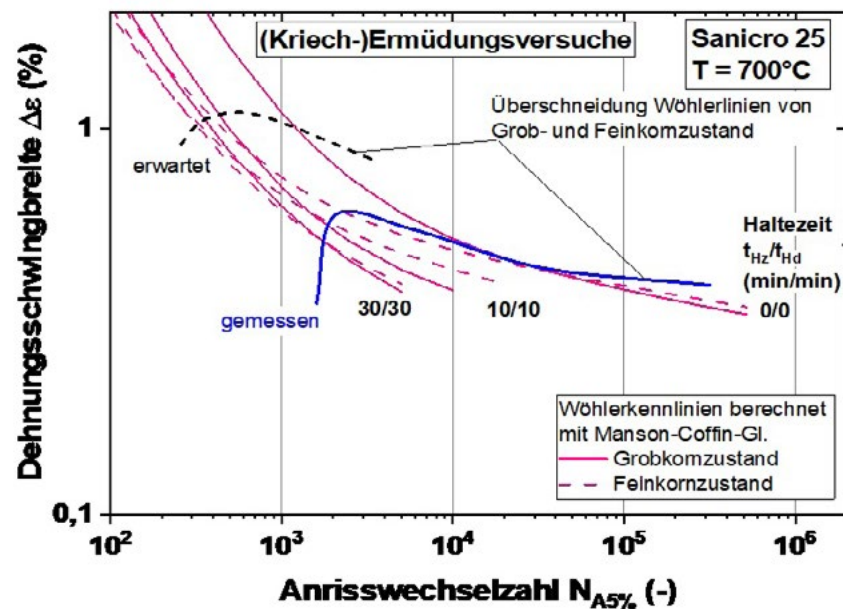
Im Fokus dieses Forschungsvorhabens stand die systematische Untersuchung des Einflusses von grober Kornstruktur austenitischer Werkstoffe auf das Ermüdungsverhalten von Bauteilen, die beispielsweise in Dampfkraftwerken und thermischen Anlagen, die zunehmend zyklisch betrieben werden müssen, eingesetzt werden. Für diese Anlagen werden in der Regel grobkörnige Werkstoffzustände austenitischer Stähle eingesetzt, die hinsichtlich ihrer langzeitigen Zeitstandeigenschaften Vorteile bieten. Bei zyklischer Hochtemperaturbeanspruchung können jedoch grobkörnige Werkstoffe die Bauteillebensdauer negativ beeinflussen. Hieraus ergeben sich Unsicherheiten, da vorhandene Berechnungsunterlagen für die derzeit eingesetzten grobkörnigen Werkstoffzustände nicht den Einfluss unterschiedlicher Korngrößen berücksichtigen und der Einfluss der Korngröße auf die Lebensdauer von Bauteilen aus austenitischen Werkstoffen derzeit nicht quantifizierbar ist.

Forschungsbedarf bestand somit in der Erstellung einer Datenbasis zur sicheren Bewertung der Kornstruktur hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens anwendungsrelevanter austenitischer Stähle. Anhand dieser Datenbasis sollten kritische Korngrößen abgeleitet und ein Vorschlag für verbesserte Regelwerke und Liefervorschriften erstellt werden, die den Einfluss der Korngröße auf die Ermüdungslebensdauer berücksichtigen.

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde zunächst ein Verfahren zur gezielten Einstellung einer gewünschten Korngröße entwickelt, das auf einer starken Kaltverformung mit anschließender Rekristallisationsglühung basiert. Aus den erstellten Kornzuständen der Korngröße 3 bis 9 (nach ASTM E 102) wurden nach Vorversuchen die geeigneten Kornzustände „grob“ und „fein“ für die umfangreichen Ermüdungsversuche identifiziert. An diesen beiden Kornzuständen wurden vor allem Ermüdungsversuche sowie Kriechermüdungsversuche mit betriebsrelevanten langen Haltezeiten im typischen Temperaturanwendungsbereich durchgeführt. Erwartungsgemäß zeigten sich im Kurzzeitbereich mit hohen mechanischen Beanspruchungen deutliche kornstrukturabhängige Unterschiede, die auf das unterschiedliche Festigkeitsverhalten zurückzuführen sind. Entgegen den Erwartungen werden diese Unterschiede auch bei langzeitigen zyklischen Beanspruchungen mit betriebsrelevanten niedrigen Dehnungsschwingbreiten beobachtet, bei dem vermehrt die Duktilitätseigenschaften und kornstrukturabhängige Schädigungsmechanismen für die (Kriech-)Ermüdungslebensdauer bestimmend werden. Die Ursache der unerwarteten geringen Absenkung der Kriechermüdungslebensdauer bei Grobkornzustand kann mit einer Wechselwirkung von zyklischer Verfestigung und Relaxation in den Haltezeitphasen bei unterschiedlichen Kornstrukturen begründet werden.

Somit konnte im Vorhaben zwar der Einfluss der Korngröße auf die Kriechermüdungslebensdauer von Bauteilen aus den untersuchten austenitischen Werkstoffen quantifiziert werden. Die ursprünglich erwartete Reduzierung der Beanspruchungszyklen bis zum Anriss durch grobes Korn ist jedoch erst in Beanspruchungsbereichen zu erwarten, die nicht mehr betriebsrelevant sind.

Abb. 1: Beispielhafte Ergebnisse von Ermüdungs- und Kriechermüdungsversuchen am austenitischen Werkstoff Sanicro 25 bei 700°C am feinen und am grobem Kornzustand



ANWENDUNG UND VERGLEICH VON MODELLEN ZUR LEBENSDAUERANALYSE VON HOCHTEMPERATURBAUTEILEN UNTER KRIECHERMÜDUNG AUF BASIS FORTSCHRITTLICHER PROBABILISTISCHER METHODEN

Zur Quantifizierung der Schädigungsentwicklung und damit der Lebensdauer von Komponenten unter Hochtemperaturbeanspruchung sind eine Vielzahl von verschiedenen Modellen und Ansätzen entwickelt worden. Einige dieser Methoden sind vergleichsweise einfach in der Anwendung bei der Betrachtung von standardisierten, zyklischen Beanspruchungen. Auch die Bewertung der Strukturintegrität kann anhand von Sicherheitsmargen erfolgen. Andererseits können im Falle von komplexen Beanspruchungszyklen weiterentwickelte Schädigungsmodelle, wie Ansätze aus der Schädigungsmechanik, in der Praxis zum Einsatz kommen. In diesem Falle können die Sicherheitsmargen für die Schädigungsentwicklung allerdings nicht ohne Weiteres verwendet werden, da bei schädigungsmechanischen Modellen die Bewertung zumeist nicht anhand von Lebensdauerkurven erfolgt.

Die Kombination von komplexeren schädigungsmechanischen Modellen mit gleichwertigen probabilistischen Methoden war daher das zentrale Ziel dieses Forschungsvorhabens, um die oben genannten konzeptionellen Schwierigkeiten zu überwinden.

Hierfür wurden zunächst verschiedene Lebensdauerdefinitionen untersucht und die experimentell beobachteten Zyklenzahlen bis zur Rissinitiation miteinander verglichen, wobei Daten von niederzyklischen Ermüdungsversuchen (LCF) von drei verschiedenen hochchromhaltigen Schmelzen berücksichtigt worden sind. Es konnte eine sehr strikte Korrelation zwischen dem Lastabfallkriterium von 5% und einem lebensdauermodell-

spezifischen kritischen Schädigungswert für alle drei Schmelzen festgestellt werden. Dieser Grenzwert kann nun für Lebensdauerprognosen von standardisierten als auch realen Lastprofilen verwendet werden. Somit lassen sich nun auch Anrisskennlinien für verschiedene Beanspruchungs-Zeitverläufe ermitteln.

Die Parameterabschätzung für die Schädigungsentwicklungsgleichung erfolgte durch die Einführung eines Funktionals, welches den Abstand zwischen der gemessenen und der simulierten Schädigungsentwicklung bestimmt. Als Optimierungsalgorithmen kamen primär ableitungsfreie Algorithmen, wie Nelder-Mead, zum Einsatz. Zusätzlich wurde ein block-basierter Bootstrap-Algorithmus entwickelt, welcher durch sogenanntes Resampling von Zyklusblöcken und anschließender Parameterschätzung bis zu 1000 Bootstrap-Parametersätze ermittelt. Diese bilden die epistemische Unsicherheit für die jeweilig untersuchte Modellgleichung ab. Hierdurch kann nun für ein vorgegebenes Beanspruchungsprofil die Anrisswahrscheinlichkeit und damit die Zuverlässigkeit prognostiziert werden. Dies liefert die Grundlage für die Anwendung von Modellen der Schädigungsmechanik für die Zuverlässigkeitsbewertung von Bauteilen und Komponenten. Des Weiteren ermöglicht die Bootstrap-Methodik die Bestimmung von statistischen Maßen zum Modellvergleich.

Schlussendlich liefert das Vorhaben die Basis für empirische Kritik an Schädigungsevolutionsgleichungen und damit die kontinuierliche Verbesserung zukünftiger Lebensdauerprognosen.

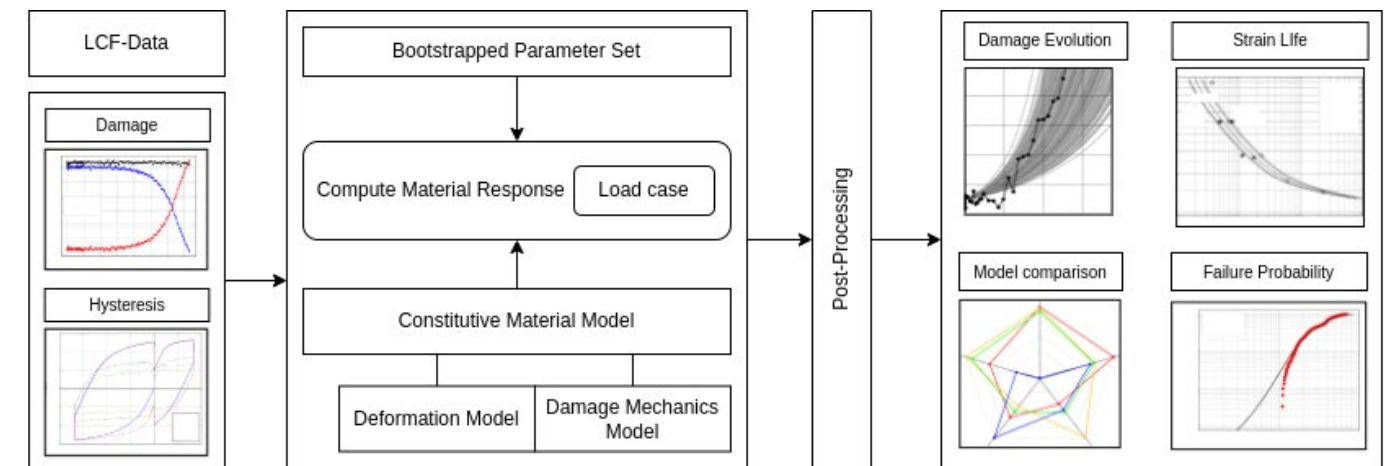


Abb. 1: Übersicht über den im Vorhaben generierten Workflow zur Kombination von komplexeren schädigungsmechanischen Modellen mit probabilistischen Methoden



## AKTUELLE UND IN 2023 ABGESCHLOSSENE FORSCHUNGSPROJEKTE

### OBERFLÄCHEN- TECHNIK

#### In 2023 abgeschlossen:

- Optimierung des Prüfverfahrens zum umweltbedingten wasserstoffinduzierten Sprödbruchverhalten von hochfesten Schraubenwerkstoffen mit Beschichtungssystemen auf Zinkbasis – PrüfWas (IGF)
- Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von rührreibgeschweißten Aluminiumkonstruktionen – RührKorro (IGF)
- Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe – NAMOSYN (BMBF)
- Warum versagen Beschichtungen in korrosiven Kunststoffschmelzen? – Schichtversagen (IGF)
- Grundlagen für die Bemessung Druckwasserstoff exponierter Komponenten unter Berücksichtigung werkstoffspezifischer Schädigungsmechanismen – H2HT (EU React)

#### Laufende Projekte:

- Thermisch-strömungsinduzierte Materialdegradation und Korrosionsschutz in komplexen Kühlkanälen integrierter Thermomanagementsysteme – Strömungserosion II (IGF)
- Bewertung der Materialverträglichkeit und Medienalterung in Brennstoffzellen-Kühlsystemen – Kühlung Brennstoffzelle II (IGF)
- Kritische Schadensmechanismen und deren Verlauf identifiziert und beschrieben via Experiment und Modellierung – AlKoMo II (DFG)
- Bewertung des Ermüdungsverhaltens von PVD-Beschichtungen mittels schwingungs-induzierter Kavitation – Kavitationsermüdung, KavErm (IGF)
- Untersuchung des Wechselwirkungsmechanismus zwischen Werkstoff und Wasserstoff während des Beizvorganges unter Einwirkung von Inhibitoren nach DIN EN ISO 50940 Teil 2 – InhibeizNorm (WIPANO)
- Hydrogen-based fuel combustion using additive manufacturing – HyCam (DFG)
- Development of cost-effective testing methods for assessing material performance in hydrogen containing environments focusing on power plant applications – HyPower (BMWK)

#### Laufende Projekte:

- Fused glass deposition modelling on flat glass: Investigations of process-structure-properties and feasibility of novel glass joints (DFG)

#### In 2023 abgeschlossen:

- Entwicklung einer Methode zur Haftfestigkeitsprüfung von Verbindungselementen mit Feuerverzinkungsüberzügen – HaftVerZinkung (IGF)

#### Laufende Projekte:

- Korrelation mikrostruktureller, chemischer und bruchmechanischer Einflussfaktoren mit der Werkstoffanfälligkeit gegenüber H-SpRK– Mischbruchfaktor (IGF)
- Einfluss des Kaltumformprozesses hochfester Schrauben auf die lokale Anfälligkeit gegenüber einer wasserstoffinduzierten (H) Spannungsrisskorrosion – Kalo-H-Korr (IGF)
- Korrosionsoptimierung ternärer PVD-Hartstoff-Nitridschichten – Kopter (IGF)
- Sicherer Einsatz additiv hergestellter Druckgeräte durch verbesserte Qualitätssicherungs- und Konstruktionsmaßnahmen – QuaKoM-3D (IGF)
- Feuerverzinken von hochfesten Stahlbauteilen mit bleifreien Zinkschmelzen – ZinkHochFit (IGF)
- Quantifizierung des Wasserstoffgefährdungspotenzials galvanisch beschichteter Schrauben – GalvaQuant (IGF)
- Einfluss plasmadiffusionsbasierter Oberflächenmodifikationen auf das Korrosionsverhalten und den Kontaktwiderstand rost- und säurebeständiger Stähle – KoKorost (DFG)
- Gezielte Einstellung von Eigenspannungen während der Kaltmassivumformung III (DFG)
- Plasma-Oberflächenmodifikation zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz von Brennstoffzellen-Komponenten – FC-PLASMOD (IGF)

#### Laufende Projekte:

- Ressourceneffiziente innovative Formwerkzeuge für die Kunststoffbearbeitung durch additive Fertigung und Digitalisierung – RIFOKADD (WIBank)

### BAUSTOFFE

### WERKSTOFFANALYTIK

### KUNSTSTOFFE UND VERBUNDE



In 2023 abgeschlossen:

- *Verbesserte Genauigkeit von Lebensdauerbewertungsmethoden für Gasturbinenmaterialien unter Berücksichtigung relevanter mehrachsiger Ermüdungsbeanspruchungen – IMPLANT (BMWK)*
- *Anwendung und Vergleich von Modellen zur Lebensdaueranalyse von Hochtemperaturbauteilen unter Kriechermüdung auf Basis fortschrittlicher probabilistischer Methoden – Probabilistischer Lebensdauervergleich - Kriechermüdung (AVIF)*
- *Untersuchung zum Einfluss von Grobkorn auf die Ermüdungseigenschaften austenitischer Kraftwerksstähle – Ermüdung austenitischer Kraftwerksstähle (IGF)*
- *Grundlagen für die Bemessung Druckwasserstoff exponierter Komponenten unter Berücksichtigung werkstoffspezifischer Schädigungsmechanismen – H2HT (EU React)*

Laufende Projekte:

- *Auslegung und Betrieb einer Teststrecke im Großkraftwerk Mannheim zur Abbildung zukünftiger Beanspruchungen des flexiblen, hocheffizienten Kraftwerkbetriebs auf verbesserte Werkstoffe – Verbundvorhaben HWT-III (BMWK)*
- *Untersuchungen zum Einfluss der Oxidation und des Kriechens auf das bruchmechanische Verhalten – OXIMO II (BMWK)*
- *Entwicklung von Konzepten zur Ermittlung von Kennwerten zur Bewertung von additiv-gefertigten Komponenten für den Hochtemperatureinsatz – LPBF Hochtemperaturlebensdauer (IGF)*
- *Untersuchung zum Einfluss flexibler Betriebsweisen von Industrieöfen auf die Lebensdauer metallischer Hochtemperaturkomponenten – Flexible Ofenbetriebsweisen (IGF)*
- *Materials Compounds from Composite Materials for Applications in Extreme Conditions – MatCom-ComMat (DFG)*
- *Zirkoniumdioxidbasierte Wärmedämmschichtsysteme für erweiterte Temperaturbereiche – TBC-Limit (DFG/FVV)*
- *Lebensdauerbewertung auf Basis der Gefüge- und Schädigungsentwicklung von 9-12% Cr-Stählen – Gefüge- und Schädigungsentwicklung (AVIF)*
- *Entwicklung einer leichten Superlegierung für große Gasturbinenschaufeln als hocheffiziente Turbinentechnologie zur Unterstützung der Energiewende – LEIMAT (BMWK)*
- *Entwicklung einer Echtzeitbewertung des Hochtemperatur-Deformationsverhaltens von Komponenten thermischer Maschinen und Anlagen mittels Machine-Learning – 3D-ML-CREEP (BMWK)*
- *Bewertung von Fehlergrößen bei Schweißverbindungen in Kraftwerken unter flexibler Fahrweise II – Schweißverbindungen Kriechermüdungsriss II (AVIF)*
- *Validierung des innovativen Werkstoffes A286mod für den Einsatz in zukünftig wasserstoffbefeuerter Gasturbinen – Mat4H2Turbine (BMWK)*
- *Simulation und Fertigung eines leistungsoptimierten Triebwerkdemonstrators mittels perfektionierter Additiver Fertigung – SpaceAM (ZIM)*
- *Verbesserte Restlebensdauerbewertung durch Ermittlung der tatsächlichen Kriechstreubandlage von Kraftwerksbauteilen während des Betriebs – Kriechstreubandlage (IGF)*
- *Entwicklung von kosteneffizienten Prüfmethoden zur Bewertung des Werkstoffverhaltens unter Wasserstoffumgebungsbedingungen mit dem Fokus auf Kraftwerksanwendungen – HyPower (BMWK)*

- *Absicherung, Entwicklung und Anwendung von Bewertungsverfahren des Rissverhaltens unter mehrachsigen bauteilnahen Hochtemperaturbeanspruchungssituationen – ARIMA II (IGF)*
- *Werkstoffdaten für Gasturbinen-Abgasbedingungen unter Berücksichtigung von H<sub>2</sub>-Verbrennung – GTeXH<sub>2</sub> (BMWK)*
- *Verbesserung von Konzepten zur Bewertung von thermomechanisch belasteten Schweißnähten bei künftig wasserstoffbetriebenen Gasmotoren zur Erhöhung der Last- und Brennstoffflexibilität – TMF-SN-H<sub>2</sub> (BMWK)*

In 2023 abgeschlossen:

- *Auslegung und Montage gewindeformender Schraubenverbindungen (IGF)*
- *Experimentelle und numerische Untersuchung zur Berücksichtigung der Stützwirkungseffekte in der Schwingfestigkeit biegebeanspruchter vorgespannter Schraubenverbindungen – Stützwirkungseffekte in Schraubenverbindungen (IGF)*
- *Bewertung von Mikrostruktureffekten der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Stahl- und Verbundbrücken (IGF)*

Laufende Projekte:

- *Design- und Fertigungskonzepte für additiv gefertigte Leichtbaustrukturen – addLight (PTJ/BMWi)*



# LEHRE UND FORTBILDUNG

## Übersicht der Lehrveranstaltungen in 2023



DR.-ING.  
MICHAEL  
SCHWIENHEER

+49 6151 16 - 25 010  
lehrstuhl@mpa-ifw.tu-  
darmstadt.de



**Werkstoffkunde I+II+III**  
**Werkstofftechnologie und -anwendung**  
**Oberflächentechnik I+II**  
**High-Temperature Materials**

---


*Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner*



**Werkstoffkunde für  
Computational  
Engineering**

---


*Dr.-Ing. Marcus Klein*



**Schadenskunde**

---

*Dr.-Ing. Holger Hoche*



**High-Temperature  
Materials II**

---

*Dr.-Ing. Christian Kontermann*



**Leichtbauwerkstoffe  
Verbindungstechnik**

---


*Dr.-Ing. Jörg Ellermeier*



**Praktikum -  
Werkstoffkunde III**  
Koordination durch:

---

*Pia-Sophie Becks, M. Sc.*



**Verbindungstechnik  
(Schraubenverbindung)**

---

*Dr.-Ing. Stefan Beyer  
(DSV e.V.)*

### NEWS AUS DER LEHRE AM INSTITUT FÜR WERKSTOFFKUNDE

Gleich nach der Corona-Pandemie konnten alle am Fachgebiet Werkstoffkunde durchgeführten Lehrveranstaltungen gemäß der aktuellen Prüfungsordnung (2021) des Fachbereichs Maschinenbau in Präsenz angeboten werden. Hier sind im Studienplan für den Bachelor-Bereich die Pflichtfächer „Werkstoffkunde I“ (1. Semester), „Werkstoffkunde II“ (2. Semester) und „Werkstofftechnologie und -anwendung“ (4. Semester) zu nennen, sowie die neue Veranstaltung „Werkstoffkunde III“ (3. Semester), die neben der Vorlesung auch das „Praktikum Werkstoffkunde III“ enthält. Das Praktikum ist in dieser neuen Ausrichtung, die neben der mechanischen Werkstoffprüfung nun auch den Korrosionsversuch enthält, im Wintersemester 2022/23 zum ersten Mal durchgeführt worden. Über 90% der teilnehmenden Studierenden

haben es erfolgreich abgeschlossen. Mit dem Wintersemester 2023/24 wird das „Praktikum Werkstoffkunde III“ als eigene Prüfungsleistung geführt, so dass dem Wunsch der Studierenden nachgekommen werden konnte, die Klausur „Werkstoffkunde III“ auch ohne absolviertes Praktikum schreiben zu können. Die Studierenden können nun ihr Studium flexibler planen, da das Praktikum nur im Wintersemester stattfindet. Im Masterbereich werden weiterhin die Lehrveranstaltungen „Oberflächentechnik I-II“, „Schadenskunde“, „Verbindungstechnik“, „Leichtbauwerkstoffe“ sowie die englischsprachigen Veranstaltungen „High Temperature Materials Behaviour I+II“ angeboten. Die Prüfungsergebnisse im Fachgebiet Werkstoffkunde haben nun fast wieder das Niveau von vor der starken Pandemiebedingten Einschränkungen erreicht.

#### Werkstoffkunde III - Praktikum

Das Werkstoffkunde-Praktikum als Teil des Moduls „Werkstoffkunde III“ wurde im Wintersemester 2023/24 von 160 Studentinnen und Studenten besucht.

Das Praktikum setzt sich, wie auch im Vorjahr, aus vier Versuchen zusammen:

- Zugversuch
- Kerbschlagbiegeversuch/Härtemessung
- Metallographie
- Elektrochemischer Korrosionsversuch

Vor der Durchführung der Versuche werden von den Studierenden Vorbereitungsaufgaben selbstständig bearbeitet. Die Versuche werden in Kleingruppen von fünf Studierenden durchgeführt und von Tutoren und Tutorinnen betreut. Im Zugversuch werden die Spannungs-Dehnungsdiagramme unterschiedlich wärmebehandelter Zugproben, ungekerbt und gekerbt, untersucht und Rückschlüsse auf das Materialverhalten gezogen. Das Materialverhalten wird auch im Kerbschlagbiegeversuch untersucht. Dieser wird ebenfalls an verschiedenen wärmebehandelten Proben durchgeführt. Bei der Härteprüfung lernen die Studierenden Härteverfahren kennen und ermitteln die Eindringfläche manuell. In dem Versuch der Metallographie werden Gefüge begutachtet und diskutiert, welchen Einfluss unterschiedliche Wärmebehandlungen auf das Gefüge haben. Im elektrochemischen Korrosionsversuch wird das Passivierungsverhalten von einer Walznickelprobe in Schwefelsäure untersucht.



## VERANSTALTUNGEN HIGHLIGHTS & AKTIVITÄTEN



### Ausgezeichnetes Engagement auf internationalen Konferenzen

Die Forschung des Instituts für Werkstoffkunde hat in diesem Jahr auf internationalen Konferenzen gleich drei Auszeichnungen erhalten.

Auf der „International Conference on Fracture – ICF15“ in Atlanta hat Dr. Michael Krämer für seine Arbeiten zum Risswachstum unter thermomechanischen Ermüdungsbedingungen den 2. Platz in der Kategorie „Post Doctoral Researcher Poster Presentation“ erhalten.

Außerdem wurde Dr. Christian Kontermann während der „ASME Turbo Expo 2023“ in Boston mit einem „Outstanding Service Award“ geehrt. Mit diesem Award würdigte die Leitung des „Steam Turbine Committee“ seine langjährigen Beiträge zum Tagungsprogramm, sowohl als Autor als auch als Organisator.

Im Rahmen des 21. internationalen ASTM/ESIS Symposiums wurde Frau Sandra Megahed, M. Sc. für ihren Vortrag mit dem Titel „Effect of Microstructure on Creep Properties of IN738LC Witness Samples and Generic Components manufactured with Laser Powder Bed Fusion“ mit dem 1. Platz im Rahmen des „M.R. Mitchell Student Presentation Symposiums“ ausgezeichnet.

Die Arbeit zeigt auf, mit welchen Herausforderungen die Übertragung von Werkstoffkennwerten aus Standard-Versuchen in die Auslegung von additiv gefertigten Bauteilen verbunden ist. Insbesondere bei zeitabhängigem Werkstoffverhalten und sicherheitskritischen Bauteilen sind hier noch viele Fragestellungen offen, die wir mit unserem Partner, der MPA Stuttgart, in anwendungsnahen AIF-IGF Forschungsprojekten in Kooperation mit der FVV e. V. beantworten möchten.

*Dr. Michael Krämer*



v. l. n. r.: Dr. Michael Krämer; Dr. Christian Kontermann; Sandra Megahed, M.Sc.

### 19. WISSENSCHAFTLICHES KOLLOQUIUM

06. - 09. September 2023 | Jugendstilhotel Trifels in Annweiler am Trifels

Um den Kompetenzbereich übergreifenden Austausch zwischen den wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu intensivieren, fand auch dieses Jahr wieder ein dreitägiges Forschungsseminar statt. Dies führte die 18 Teilnehmenden nach Annweiler am Trifels in die Pfalz.

Das Jugendstilhotel Trifels gehört zu den Gästehäusern der TU Darmstadt und bot den optimalen Rahmen für das Seminar. Als Tagungsraum stand uns das „Oval Office“ zur Verfügung, ein ovales Gebäude, welches auf Stelzen mitten in der Natur steht.

Zum Kern des Forschungsseminars zählen die abwechslungsreichen Vorträge über forschungsnahe und ferne Themen. So erfuhren die Teilnehmenden etwas über den Einfluss der Oxidation auf das Kriechverhalten von Nickel-Werkstoffen oder über das Verhalten von PVD-Beschichtungen unter akustischer Kavitation. Auch die aktuelle Elektrifizierung auf den Straßen und die damit einhergehenden Herausforderungen fand Einzug in das Seminar und so wurde über dielektrische Kühlmittel für elektrische Antriebe referiert. Zwischendurch wurden die Vorträge auch philosophisch und befassten sich mit dem Zuwachs an Wissen und was dies über unsere Annahmen aussagt.

Zwischen den Vorträgen wurden wir mit leckeren Speisen verköstigt und nach dem Abendessen konnten wir im Keller des Hotels den Abend mit musikalischen Gesangseinlagen und unterschiedlichen Spielen ausklingen lassen.

Um die Vorträge zu verarbeiten und weiterführende Gespräche zu führen, stand am zweiten Seminartag eine Wanderung auf dem Annweilerer Burgenweg an. Bei strahlendem Sonnenschein und bester Laune wanderten wir über die Burgruinen Scharfenberg und Anebos, bis zur Reichsburg Trifels und genossen den wunderschönen Blick über die Pfalz.

Zum Abschluss des Seminars sprach Professor Oechsner über die Exzellenzstrategien und Forschungsfelder der TU Darmstadt, in denen er als Vizepräsident für Forschung involviert ist. Nach drei Tagen war das Forschungsseminar auch schon wieder vorbei, doch nach dem Seminar ist vor dem Seminar und so steht das nächste Seminar schon vor der Tür und wird uns ins Montafon in Österreich führen.

*Pia-Sophie Becks*







## NEUES AUS DEM Verein der Freunde MPA-IfW e.V.

DR.-ING.  
PETER HOF

+49 6151 16 - 25 142  
peter.hof@tu-  
darmstadt.de

### 10. MPA-IFW KOLLOQUIUM 2023

11. Mai 2023 | Georg-Lichtenberg-Haus

Das diesjährige zehnte MPA-IfW Kolloquium mit dem Titel „Additive Manufacturing“ des Vereins der Freunde des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe MPA-IfW fand am 11.05.2023 im Georg-Lichtenberg-Haus der TU Darmstadt statt. Vor dem Kolloquium fand die obligatorische Mitgliederversammlung dieses Jahr im neu eröffneten AMC (Additive Manufacturing Center) statt. Die Möglichkeit der Besichtigung des AMC in diesem Zuge fand großes Interesse bei allen Teilnehmenden der Mitgliederversammlung.

Durch den Vorsitzenden des Vereins, Herrn Prof. Dr.-Ing. Oechsner, wurden traditionell die Preisträger mit den MPA-IfW-Awards für die besten studentischen Arbeiten und für die beste Promotion aus dem Hause des vergangenen Jahres gekürt. Die Preisträger stellten ihre Arbeit im Rahmen eines Vortrages auf der Veranstaltung vor. Herr Prof. Blaeser begeisterte anschließend die Zuhörer mit einem Vortrag zum Thema „Grundlagen der 3D-Biofabrikation – Können wir Fleisch und Organe zukünftig im Labor drucken?“

Zum Ausklang der Veranstaltung hatten Preisträger und Gäste bei einem kleinen Stehempfang die Gelegenheit, das Gehörte zu diskutieren und weitere interessante Gespräche zu führen.

Die Aufgaben des Vereins sind die Förderung des wissenschaftlichen Arbeitens am Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW), die Ausrichtung von Seminaren und Veranstaltungen zur Fort- und Weiterbildung sowie die Förderung des wissenschaftlichen Gedankenaustauschs. Unterstützen Sie uns gerne bei dieser Arbeit und werden Sie Mitglied des Vereins.

Bei Fragen wenden Sie sich gerne an:

Dr.-Ing. Peter Hof



Drei Generationen Leitung von MPA-IfW  
v. l. n. r.: Prof. Matthias Oechsner; Prof. Karl-Heinz Kloos, Prof.'in Christina Berger

### Beste studentische Arbeit / Beste Promotion 2022:

#### **Beste studentische Arbeit WS 2022/23**

*Bachelorarbeit*

Experimenteller Vergleich der Verschleiß- und Korrosionseigenschaften von PVD-TiMgGdN-Schichten unter Verwendung der Sputtergase Argon bzw. Krypton für den Ätz- und Beschichtungsprozess

**Alexander Grünebaum, B. Sc.**

#### **Beste studentische Arbeit SS 2022**

*Bachelorarbeit*

Entwicklung einer Vernetzungsstrategie im Rahmen der Finite-Elemente-Analyse für den Prozess „Gewindefurchen“ zur Darstellung großer Umformgrade

**Patrick Reining, B. Sc.**

#### **Beste Promotion 2022**

Beschleunigte Kriechdehnungsentwicklung unter Temperaturwechsel-Belastung

- Eine experimentelle und modelltheoretische Beschreibung

**Dr.-Ing. Romana Schwing**



v. l. n. r.: Alexander Grünebaum, B.Sc.; Patrick Reining, B. Sc.; Prof. Matthias Oechsner;  
Dr.-Ing. Romana Schwing



## MATERIALLAGER

Im Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe (KB-H) wurden vor einiger Zeit sogenannte „interne Verbesserungsprojekte“ ins Leben gerufen. Hierbei fanden sich Mitarbeitende aus dem Kompetenzbereich in Gruppen zusammen, um für unterschiedliche Fragestellungen, für die sich im Laufe der Zeit in dem Bereich Verbesserungspotenziale gezeigt haben, Lösungen zu erarbeiten. Eine solche Fragestellung betraf auch eine zukunftsfeste Gestaltung des Materiallagers. Bisher erfolgte die Materiallagerung des KB-H durch mit altem Prüfmaterial gefüllte Gitterboxen, verbunden mit einem hohen Dokumentationsaufwand in Form von gesammelten Papierausdrucken in Ordnern. Ziel des Verbesserungsprojekts war es nun, sowohl auf Seiten des Materiallagers selbst, als auch im Hinblick auf eine anzustrebende digitalisierte Materiallagerumgebung Verbesserungspotenzial umzusetzen. Hierzu wurde zunächst ein Konzept entwickelt, wie das neue Materiallager gestaltet und wie die Dokumentation der Materialien zukünftig stattfinden sollte.

Es fanden regelmäßige Treffen der beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter statt und es wurden, nach Festlegung des Konzepts, zwei wissenschaftliche Hilfskräfte (Elias Achtnich und Tobias Durst) angestellt, welche die Umsetzung des digitalen „Warehouse Management Systems“ übernahmen.

Zum Ende des Jahres 2023 konnte das Projekt „Materiallager“ zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht werden. Es wurden vier Schwerlast-Palettenregale angeschafft und im Kellerflur aufgebaut, um die Übersichtlichkeit und Ablageordnung der vorhandenen Werkstoffe zu verbessern. Außerdem wurde der bisherige Bestand massiv reduziert und nicht mehr benötigte Materialien entsorgt. Weiterhin wurde eine Arbeitsstation eingerichtet. Diese enthält ein Industrie-Tablet mit integrierter Kamera und einem QR-Code-Scanner. Zudem ist in der Arbeitsstation ein Etikettendrucker integriert, mit Hilfe dessen Label für jedes Teil erstellt werden können, das im Palettenregal eingelagert werden soll.

Der weitaus größte und zeitintensivste Arbeitsaufwand rührte allerdings aus der Gestaltung der neuen Software zur Dokumentation und zukünftig digitalen Verwaltung aller nötigen Informationen zu den ankommenden Materialien und Bauteilen bis hin zur Nachvollziehbarkeit des Entnahmeorts einer Probe aus einem Bauteil. Mit dem neuen System ist es nun möglich, digital gestützt abzufragen, ob ein bestimmter Werkstoff noch im Lager vorhanden ist und falls ja, in welcher Menge er vorliegt und was die Historie des jeweiligen Stücks ist (aus welchem Teil das vorhandene Teil ursprünglich abstammt).

Die Software besteht aus drei Hauptmodulen. Zum einen wurde eine Suchfunktion, mit welcher die Datenbank nach verschiedenen Suchkriterien durchsucht werden kann, etabliert. Das zweite Modul wurde zum Anlegen von neuen Materialien entwickelt. Hier wird zunächst ein internes Prüfzeichen

vergeben, sämtliche Dokumente, wie Lieferscheine und Fotos des Grundzustands und der Grundform des Werkstoffs gespeichert und ein Lagerort zugewiesen. Im dritten und umfangreichsten Modul wird dann die Möglichkeit gegeben, Werkstoffe aus dem Materiallager zu entnehmen und zum Beispiel einen internen Auftrag für die mechanische Werkstatt zu erstellen. Durch das Hochladen einer entsprechenden Zeichnung kann dann, ebenfalls digital gestützt, der Entnahmeort einer Probe im ursprünglichen Teil hinterlegt und somit stets rückverfolgbar dokumentiert werden.

Das damit von Grund auf überarbeitete Materiallager und digitale Materialmanagement-System wurde Anfang 2024 in Betrieb genommen und leistet einen essentiellen Beitrag, um eine konsistente und lückenlos rückverfolgbare Bauteil- und Materialprüfung zwingend und zukunftsweisend sicherzustellen.

*Dr. Romana Schwing*

Die Software „Warehouse Management System“ wurde mit einem eigens zusammengestellten Tech-Stack entwickelt. Es wird Postgres, ein Open-Source relationales Datenbanksystem (RDBMS), zum Speichern aller Daten verwendet. Als ORM (object-relational mapping) wird Entity Framework Core verwendet. Dieses stellt eine Abstraktion der Datenbank dar, die den Umgang mit dieser erheblich erleichtert. ASP.NET Core ist das Framework für die Webanwendung. Dieses ist für die Verbindung zwischen Datenbank, Backend und Frontend zuständig. Als Frontend wird Blazor mit serverseitiger Interaktivität verwendet. Blazor ist ein Webframework, das C# und HTML verbindet (cshtml). Für die Benutzeroberfläche kommt AntBlazor zum Einsatz, eine Sammlung von enterprise-level Blazor-Komponenten, die auf AntDesign basieren. Die Kommunikation mit dem Drucker findet über Qz-Tray statt, welches ermöglicht, einen Drucker (CAB MACH2/300) mittels Zebra (ZPL) anzusprechen, um Labels zu drucken. Die App wird als Container auf einem Red Hat Linux mittels Podman deployed und ist somit sehr portabel und isoliert.

v. l. n. r.:  
Romana Schwing,  
Lorenz Wöllmann,  
Elias Achtnich,  
Tobias Durst und  
Florian Garnadt







CONVINCING.media / Constanze Schneider



Abb. 3 (links): Drei-Punkt-Biegeversuch an einer Monocoque-Testplatte  
Abb. 4 (rechts): Durchstoßversuch ("Shear-Test") an einer Monocoque-Testplatte

## TU DARMSTADT RACING TEAM E.V.

Als Formula Student Team der Technischen Universität Darmstadt bauen wir, das TU Darmstadt Racing Team e.V., jedes Jahr aufs Neue einen elektrisch angetriebenen, autonom fahrenden Rennwagen. Mit diesem nehmen wir dann an Motorsport-Events im Rahmen der Formula Student – einem internationalen Design- und Konstruktionswettbewerb für Student:innen - teil. Gebaut wird das Fahrzeug von insgesamt 45 Student:innen, die für den gesamten Entwicklungs- und Fertigungsprozess verantwortlich sind. Mit jeder neuen Saison schreitet die Entwicklung unseres Fahrzeugs immer weiter voran. Dabei spielt im Rennsport insbesondere das Fahrzeuggewicht eine entscheidende Rolle, da die Reduzierung von Massenträgheiten die Performance unseres Rennwagens maßgeblich verbessert. Daher wird auch in der laufenden Saison an dem aktuellen Fahrzeug „rho24“ in allen Bereichen und Baugruppen auf Gewichtsreduktion hingearbeitet. Auch im Fahrwerk soll hierfür eine Optimierung der bisherigen Einzelradaufhängung erfolgen. Diese wurde in den vorangehenden Saisons aus Vollaluminiumstangen gefertigt und mit Stahlgelenkköpfen an das

Monocoque sowie die Radnabepakete montiert. Ziel für diese Saison ist, mit dem Einsatz von Carbon-Querlenkern starke Einsparungen an Gewicht zu erreichen, gleichzeitig jedoch die Zuverlässigkeit der Bauteile nicht zu vernachlässigen. Daher sollen diese aus einer Kombination von kohlenstofffaserverstärkten Rohren und additiv gefertigten Halterungen und Gelenkköpfen vereinsintern gefertigt werden. Die einzelnen Komponenten werden dabei über Klebeverbindungen gefügt. Diese stellen erfahrungsgemäß die kritischste Stelle der gesamten Carbon-Querlenker dar.

Auch additiv gefertigte Bauteile rücken in der Automobilbranche immer weiter in den Vordergrund. Diese weisen durch die optimierte Anpassung der Geometrie besonders großes Potential zur Einsparung von Gewicht sowie Fertigungsaufwand auf. Jedoch können additiv gefertigte Teile im Vergleich zu konventionell gefertigten Bauteilen auch ein unbekanntes und unvorhersehbares Werkstoffverhalten aufweisen. Um solche Unsicherheiten abzuwägen und Risiken zu minimieren, sollen die besagten Bauteile und Klebeverbindungen an einem Prüfstand der MPA auf ihre Belastbarkeit untersucht werden (Abb. 1).

Hierzu haben wir vorab mehrere Versuchsobjekte gefertigt, für welche Carbonstangen auf eine repräsentative Länge zugeschnitten wurden. Anschließend wurden diese in zwei Versionen gefertigt: Zum einen wurden Proben mit Aluminiumeinsätzen verklebt, in welche anschließend normierte Stahlgelenkköpfe eingeschraubt werden. Dies soll gezielt die Belastbarkeit der Klebung überprüfen. Zum anderen wurden einige Rods mit additiv gedruckten Gelenkköpfen verklebt. Anhand des Zugversuchs soll auch hier anschließend die Klebeverbindung getestet werden, der Fokus liegt jedoch an dieser Stelle tendenziell auf der Leistung der additiv gefertigten Gelenkköpfe.

Abb. 1 (links): Zugversuch an einer Carbon-Querlenkerstange ("Rod") mit additiv gefertigten Gelenkkopfhalterungen  
Abb. 2 (rechts): Fahrwerkskonsolen (Mono Brackets) aus Carbon - vor dem Erprobungsversuch, links - nach dem Erprobungsversuch, rechts



Ein weiterer Entwicklungspunkt des Fahrwerks liegt zudem auf den sogenannten „Mono-Brackets“. Diese stellen die Verbindungsstelle zwischen den Querlenkern und dem Monocoque dar. Diese kleinen Bauteile wurden bisher aus Aluminium gefertigt. Im Herbst 2023 wurde ein neuer Ansatz ausgearbeitet und entwickelt, bei welchem diese aus einer Kombination von Harz und Kohlenstofffasern gefertigt werden sollen. Auch die hier hergestellten Bauteile haben aufgrund des unvorhersehbaren Werkstoffverhaltens in Folge dieses Fertigungsverfahrens unbekannte Belastungsgrenzen, welche mit Hilfe eines Zugversuchs ermittelt werden sollen. Diese sollen den vorgegebenen Belastungen, welche aus verschiedenen Fahrsituationen ermittelt wurden, standhalten (Abb. 2).

Darüber hinaus unterliegt das Fahrzeug einigen Vorschriften, welche beim Bau berücksichtigt und später während des Events nachgewiesen werden müssen. Hierzu zählen bestimmte Kennwerte aus Versuchsreihen mit laminierten Monocoque-Testplatten.

Unser Monocoque wird in einer Sandwich-Bauweise aus Carbon und Aluminiumwaben gefertigt. Dabei besteht das Monocoque aus verschiedenen Zonen, welche dem Reglement nach verschiedene Anforderungen erfüllen und Belastungen standhalten müssen. Ziel ist

es diese vorgegebenen Anforderungen gerade zu erfüllen, um bei der geforderten Belastbarkeit ein Optimum an Gewicht zu erreichen. Um diese Konformität unseres Monocoques nachweisen zu können, fertigen wir Testplatten an, welche vorgegebene Abmaße und einen identischen Lagenaufbau, wie die betrachtete Zone in unserem Monocoque haben. Die Testplatten müssen dafür in zwei verschiedenen Versuchen getestet werden. Dabei unterstützt uns die MPA seit Jahren und führt zum einen den geforderten Drei-Punkt-Biegeversuch (Abb. 3) durch, um die Verformung und Energieaufnahme zu ermitteln. Zum anderen wird hier in einem Shear-Test (Abb. 4), in dem ein Stempel durch die Platte gedrückt wird, die Scherfestigkeit bestimmt.

Erreichen die Testplatten in den Versuchen die gewünschten und geforderten Eigenschaften, so wird der dort genutzte Lagenaufbau für die spätere Fertigung des Monocoques verwendet. Werden die Werte nicht erreicht, muss eine Anpassung des Lagenaufbaus und ein erneuter Test folgen. Die Testplatten werden gegen Ende der Saison mit zu den Events genommen und im Rahmen der technischen Inspektion vorgezeigt.

Anhand dessen kann so die Stabilität und Sicherheit unseres Fahrzeugs nachgewiesen werden.

Alena Tschernich, Simon Marx

Unser Team besteht aus Student:innen aus den verschiedensten Fachrichtungen (MINT, Marketing, Design, Medien, Events uvm.). Suchst auch Du neben dem Studium ein Aktivität, bei der Du Dein bisheriges Studiumswissen praktisch umsetzen und ausbauen kannst und ein unvergleichliches Maß an Teamgeist erlebst?

**Dann melde Dich doch bei uns unter: [recruiting@dart-racing.de](mailto:recruiting@dart-racing.de)**



## VORTRAGSVERZEICHNIS 2023

T. Brune – C. Kontermann, M. Oechsner  
**Short Crack Growth Behavior of IN718 under high temperature conditions in consideration of plasticity induced crack closure**  
*15th International Conference on Fracture 2023, Atlanta, 11.-16. Juni 2023*

A. Erbe – M. von Buelow, T.-U. Kern, V. Knauthe, C. Kontermann, M. Oechsner  
**Uniform Elongation Measurements on Creep Specimens by a Novel 3D-Scanning System**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

F. Garnadt – H. Almstedt, M. Huang, C. Kontermann, M. Oechsner  
**Stützwirkung unter Kriech-Ermüdungsbeanspruchung für verschiedene warmfeste Stähle**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, 24. Nov. 2023*

F. Garnadt – C. Kontermann, M. Oechsner  
**Ermittlung der effektiven Beanspruchung im Risspitzennahfeld auf Basis der Gebietsintegralmethode**  
*54. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, Darmstadt, 14.-15. Feb. 2023*

F. Garnadt – C. Kontermann, M. Oechsner  
**Cyclic effective Near-Field Loading based on the Domain Integral Method**  
*15th International Conference on Fracture, Atlanta, 11.-16. Juni 2023*

H. Hoche – M. Oechsner, P. Polcik, T. Ulrich  
**Empowering PVD coatings to control the time dependent chemical and microstructural properties in aqueous electrolytes**  
*ICMCTF 2023, San Diego, 21.-26. Mai 2023*

H. Hoche – M. Oechsner, P. Polcik, T. Ulrich  
**Empowering PVD for corrosion protection: TiMgGdN coatings with game-changing corrosion performance**  
*V2023, Dresden, 18. - 21. Sept. 2023*

H. Hoche – S. Friedrich, M. Oechsner, S. Six, T. Ulrich  
**A novel approach to determine the adhesion of hot dip galvanized coatings**  
*EGGA 2023, Salzburg, 19.-21. Juni 2023*

M. Hofmann – F. Funcke, M. Kolbinger, M. Klein, M. Oechsner, J. Schönherr  
**Anrisslebensdauer vorhersage additiv gefertigter Proben durch Modellierung verformungsbedingter Zustandsgrößen**  
*8. Tagung des DVM-Arbeitskreises Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen, Berlin, 28.-29. Nov. 2023*

F. Kauffmann – J.-M. Haan, Y. Wang  
**Microstructure development after long-term creep testing of 600/620°C turbine materials with Boron**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

K. Kettler – M. Friedrich, M. Khan, C. Kontermann  
**Restspannungswerte von Relaxationsversuchen – Übersicht über bisherige Projekte und Erstellung einer FVWHT-Datenbasis zur Auslegung von Schraubenverbindungen**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, 24. Nov. 2023*

M. M. Khan – C. Kontermann, M. Oechsner  
**On the description of stress relaxation by means of creep models based on standard and non-standard validation experiments**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

C. Kontermann – B. Kagey, T. Michler  
**Development of alternative hydrogen embrittlement testing methods**  
*6th International vgb Workshop "Materials and Quality Assurance", Bergheim, 10.-11. Mai 2023*

C. Kontermann – M. Bianchini, F. Conrad, D. Kulawinski, S. Linn, M. Oechsner  
**Crack Initiation and Relaxation Behavior of a 1Cr-Cast Steel under Multiaxial High Temperature Loading**  
*13th International Fatigue Congress, Hiroshima 6.-10. Nov. 2023*

C. Kontermann – M. Oechsner  
**Wasserstoff und Hochtemperaturwerkstoffe - Industrieanwendungen, Forschungsbedarf**  
*Materials Valley - Wasserstoff für die Mobilität, online, 17. März 2023*

C. Kontermann – H. Almstedt, I. Perrin, J. Siefert  
**Complexities in Creep-Fatigue Lifetime Assessment - Past, Current and Future Needs**  
*ASME 2023 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Boston, 26.-30. Juni 2023*

F. Kölzow – H. Gottschalk, C. Kontermann, M. Oechsner, M. Saadi  
**From Low-Cycle Fatigue Lifetime Data to its Probabilistic Uncertainty Quantification**  
*FEMS EUROMAT 23 - Material Science and Technology in Europe, Frankfurt am Main, 3.-7. Sept. 2023*

F. Kölzow – M. Schwienheer  
**Creep Rupture Data Assessment - new uncertain challenges require new uncertain answers**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

A.-K. Kraemer  
**Bewertung von Mikrostruktureffekten der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahl**  
*GAV Forschungskolloquium 2023, Hannover, 16.-17. Oktober 2023*

M. Krämer – C. Kontermann, F. Müller, M. Oechsner  
**Ein Mechanismen-basierter Ansatz zur Vorhersage der Rissausbreitung in Nickelbasislegierungen unter TMF-Belastung**  
*DVM Workshop: Bauteilverhalten bei thermomechanischer Ermüdung, Berlin, 20.-21. Sept. 2023*

S. Megahed – C. Heinze, C. Kontermann, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Kriechverhalten von LPBF IN738LC: Einfluss der Aufbauorientierung auf Zwillingsbildung**  
*8. Tagung des DVM-Arbeitskreises Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen, Berlin, 28.-29. Nov. 2023*

S. Megahed – M. von Buelow, D. Fellner, S. Guthe, P. Hofmann, V. Knauthe, T. Wirth, C. Kontermann, A. Kuijper,  
**Einfluss der Mikrostruktur auf die Kriecheigenschaften von mittels selektiven Laserstrahlschmelzen hergestellten IN718 und IN738LC**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, 24. Nov. 2023*

S. Megahed – C. Heinze, C. Kontermann, M. Krämer, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Development and Evaluation of Generic Test Pieces for Creep Property Assessment of Laser Powder Bed Fusion Components**  
*ASME 2023 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Boston, 26.-30. Juni 2023*

S. Megahed – C. Heinze, C. Kontermann, M. Krämer, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Witness Samples and Creep Mechanisms in Laser Powder Bed Fusion**  
*ASTM ESIS Fatigue and Fracture Symposium 2023, Washington, 8.-10. Nov. 2023*

S. Megahed – C. Heinze, R. Herzog, M. Krämer, C. Kontermann, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Effect of Microstructure on Creep Properties of IN738LC Witness Samples and Samples extracted from Components manufactured with Laser Powder Bed Fusion**  
*ICAM 2023, Washington, 30. Okt. - 3. Nov. 2023*

S. Megahed – C. Heinze, C. Kontermann, M. Krämer, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Witness Samples and Creep Mechanisms in Laser Powder Bed Fusion**  
*ICAM 2023, Washington, 30. Okt. - 3. Nov. 2023*

S. Megahed – C. Heinze, R. Herzog, K. M. Krämer, C. Kontermann, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Effect of Microstructure on IN718 and IN738LC Creep Properties manufactured with Laser Powder Bed Fusion**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, 24. Nov. 2023*

F. Müller – B. Krenmayr, M. Oechsner, C. Sommitsch, L. Wöllmann  
**Stochastic and systematic deviations of creep experiments in martensitic steels**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

F. Müller – B. Krenmayr, M. Oechsner, C. Sommitsch, L. Wöllmann  
**Kriechverhalten von gekerbten Proben einer MarBN-Guss-Variante**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, 24. Nov. 2023*

F. Müller – B. Krenmayr, M. Oechsner, C. Sommitsch, L. Wöllmann  
**Creep behaviour of notched specimens of MarBN-cast-steel**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

J. A. Schönherr – M. Klein, M. Oechsner  
**Auswertung von Kraft-Weg Daten zur Detektion von Riss schließen im Schwellenwertbereich**  
*55. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, Darmstadt, 14.-15. Feb. 2023*

M. Seel – P. Hof, M. Oechsner, F. Schneider  
**Edge strength of annealed float glass: Identification and optimisation of cutting process parameters**  
*Glass Performance Days, Tampere, 14.-16. Juni 2023*

M. Schwienheer – T.-U. Kern, G. Maler  
**Creep and Creep-Fatigue interaction for rotor material made of MarBN (Howeflex)**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

M. Schwienheer – D. J. Allen, P. Barnard, C. Bullough, E. De Bruycker, R. Krein, A. Gotti, E. Poggio, A. Riva, M. Speicher, M. Spindler  
**ECCS Working Group 3C – Superalloys, Overview on the activities and future perspectives**  
*6th International ECCS Conference, Edinburgh, 22.-24. Mai 2023*

R. Schwing – C. Kontermann, S. Linn, M. Oechsner  
**Creep Under High Temperature Thermal Cycling and Low Mechanical Loadings**  
*IUTAM Symposium Creep in Structures 2023, Magdeburg, 18.-22. Sept. 2023*

A. Udoh – M. Friedrich, C. Kontermann, S. Linn  
**Ermittlung der Restlebensdauer auf der Basis der Gefüge- und Schädigungsentwicklung**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, 24. Nov. 2023*

T. Ulrich – H. Hoche, M. Oechsner, P. Polcik  
**Influence of Gadolinium on the Mechanical and Corrosion Properties of PVD-TiMgN and PVD-TiMgGdN Sputtered by Multicomponent Powder Metallurgical Targets**  
*Society of Vacuum Coaters 2023, Washington D.C., 6.-11. Mai, 2023*

## PUBLIKATIONSVERZEICHNIS 2023

M. Adam – C. Kontermann, M. Oechsner  
**Assessing the Structural Integrity of Plasma-Sprayed Multilayer Thermal Barrier Coatings**  
*Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2023, Vol. 145 (3), Nr. GTP-22-1472 <reviewed>*

T. Brune – M. Krämer, C. Kontermann, M. Oechsner  
**Comparison of cast, wrought and LPBF processed IN718 concerning crack growth threshold and fatigue crack growth behaviour**  
*Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2023, Vol. 145 (1), Nr. GTP-22-1338 <reviewed>*

T. Brune – C. Kontermann, M. Oechsner  
**Short Crack Growth Behavior of IN718 under high temperature conditions in consideration of plasticity induced crack closure**  
*15th International Conference on Fracture 2023, Konferenzbandbeitrag <reviewed>*

A. Blug – A. Bertz, D. Carl, F. Conrad, C. Kontermann, M. Oechsner  
**Application of high-performance DIC for a comprehensive evaluation of biaxial fatigue crack growth experiments**  
*Strain, 2023, Vol. 59 (6), Nr. e12455 <reviewed>*

C. K. Chandra – S. Böhm, M. Hatzky, B. Heider, M. Oechsner, R. Reitz, N. Sommer  
**Influence of friction stir weld parameters on the corrosion susceptibility of EN AW-7075 weld seam and heat affected zone**  
*Advanced Engineering Materials, 2023, Vol. 25 (15), Nr. 2300130 <reviewed>*

A. Erbe – M. von Buelow, T.-U. Kern, V. Knauthe, C. Kontermann, M. Oechsner,  
**Uniform Elongation Measurements on Creep Specimens by a Novel 3D-Scanning System**  
*6th International ECCS Conference, 2023, Konferenzbandbeitrag*

M. Fathidoost – M. Oechsner, Y. Yang, B.-X. Xu  
**Data-driven thermal and percolation analyses of 3D composite structures with interface resistance**  
*Materials & Design, Vol. 227, 2023, Nr. 111746 <reviewed>*

F. Garnadt – H. Almstedt, M. Huang, C. Kontermann, M. Oechsner  
**Stützwirkung unter Kriech-Ermüdungsbeanspruchung für verschiedene warmfeste Stähle**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, 2023, Konferenzbandbeitrag, S. 185-202*

F. Garnadt – C. Kontermann, M. Oechsner  
**Ermittlung der effektiven Beanspruchung im Risspitzennahfeld auf Basis der Gebietsintegralmethode**  
*54. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, 2023, Konferenzbandbeitrag, S. 169-176*

F. Garnadt – C. Kontermann, M. Oechsner  
**Cyclic effective Near-Field Loading based on the Domain Integral Method**  
*15th International Conference on Fracture, 2023, Konferenzbandbeitrag <reviewed>*



- M. B. Geilen – M. Klein, A. Kolyshkin, R. Kühne, M. Oechsner  
**Increase in residual lifetime due to low amplitude cycles and dwell times at room temperature: Observations and suspected mechanisms**  
*International Journal of Fatigue*, 2023, Konferenzbandbeitrag Vol. 168, Nr. 107458  
<reviewed>
- M. Hofmann – F. Funcke, M. Kolbinger, M. Klein, M. Oechsner, J. Schönherr  
**Anrisslebensdauervorhersage additiv gefertigter Proben durch Modellierung verformungsbedingter Zustandsgrößen**  
*8. Tagung des DVM-Arbeitskreises Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. 408, S. 103-116
- F. Kauffmann – J.-M. Haan, Y. Wang  
**Microstructure development after long-term creep testing of 600/620°C turbine materials with Boron**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag  
<reviewed>
- K. Kettler – M. Friedrich, M. Khan, C. Kontermann  
**Restspannungswerte von Relaxationsversuchen – Übersicht über bisherige Projekte und Erstellung einer FVWHT-Datenbasis zur Auslegung von Schraubenverbindungen**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe*, 2023, Konferenzbandbeitrag, S. 63-76
- M. M. Khan – C. Kontermann, M. Oechsner  
**On the description of stress relaxation by means of creep models based on standard and non-standard validation experiments**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. 034  
<reviewed>
- C. Kontermann – M. Bianchini, F. Conrad, A. Erbe, M. Krämer, D. Kulawinski, M. Oechsner  
**Deformation and Damage Behavior of a 1Cr-Cast Steel Under Multiaxial Loading at Elevated Temperatures**  
*Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2023, Vol. 145 (4), Nr. 041017  
<reviewed>
- C. Kontermann – M. von Buelow, A. Erbe, T.-U. Kern, V. Knauth, C. Kontermann, M. Oechsner  
**Uniform Elongation Measurements on Creep Specimens by a Novel 3D-Scanning System**  
*Materials at High Temperatures*, 2023, S. 1-12  
<reviewed>
- A. Klink – M. Bopp, L. Krüger, J. Hussong, S. Jakirlic, M. Oechsner, R. Reitz  
**Computational Modeling of the Flow and Heat Transfer in an Internal Combustion Engine-Relevant Cooling Channel**  
*SAE Technical Paper*, 2023-01-0198, 2023  
<reviewed>
- F. Kölzow – M. Schwienheer  
**Creep Rupture Data Assessment - new uncertain challenges require new uncertain answers**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. 055  
<reviewed>
- A.-K. Kraemer – J. Grote, M. Klein, M. Oechsner, D. Unger  
**Bolted, slip-resistant prestressed connections on hot-dip galvanized bridge components under cyclic loads**  
*Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2023, Vol. 54 (8), S. 970-985  
<reviewed>
- F. Kraemer – M. Klein, M. Oechsner, M. Stähler  
**Influence of lubrication systems on the fatigue strength of bolted joints**  
*Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2023, Vol. 54 (8), S. 932-944  
<reviewed>
- S. Megahed – M. Krämer, C. Heinze, C. Kontermann, A. Udoh, S. Weihe, M. Oechsner  
**Influence of build orientation on the creep behavior of IN738LC manufactured with laser powder bed fusion**  
*Materials Science and Engineering*, 2023, Vol. 878, Nr. 145197  
<reviewed>
- S. Megahed – M. Krämer, C. Kontermann, C. Heinze, A. Udoh, S. Weihe, M. Oechsner  
**Micro-Twinning in IN738LC Manufactured with Laser Powder Bed Fusion**  
*Materials*, 2023, Vol. 16 (17), Nr. 5918,  
<reviewed>
- S. Megahed – K. Krämer, C. Heinze, C. Kontermann, A. Udoh, S. Weihe, M. Oechsner  
**Creep of IN738LC manufactured with laser powder bed fusion: effect of build orientation and twinning**  
*Materials at high temperatures*, Vol. 40, 2023  
<reviewed>
- S. Megahed – C. Heinze, C. Kontermann, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Kriechverhalten von LPBF IN738LC: Einfluss der Aufbauorientierung auf Zwillingsbildung**  
*8. Tagung des DVM-Arbeitskreises Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. 408, S. 87-101
- S. Megahed – M. von Buelow, D. Fellner, S. Guthe, P. Hofmann, V. Knauth, C. Kontermann, A. Kuijper, T. Wirth  
**Einfluss der Mikrostruktur auf die Kriecheigenschaften von mittels selektiven Laserstrahlschmelzenhergestellten IN718 und IN738LC**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe*, 2023, Konferenzbandbeitrag, S. 51-62
- S. Megahed – C. Heinze, C. Kontermann, M. Krämer, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Development and Evaluation of Generic Test Pieces for Creep Property Assessment of Laser Powder Bed Fusion Components**  
*ASME 2023 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. GT2023-102193  
<reviewed>
- S. Megahed – C. Kontermann, M. Krämer, M. Oechsner  
**Creep of LPBF IN738LC: Effect of Build Orientation and Twinning**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. 018  
<reviewed>
- S. Megahed – C. Heinze, R. Herzog, K. M. Krämer, C. Kontermann, M. Oechsner, A. Udoh, S. Weihe  
**Effect of Microstructure on IN718 and IN738LC Creep Properties manufactured with Laser Powder Bed Fusion**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe*, 2023, Konferenzbandbeitrag
- F. Müller – B. Krenmayr, M. Oechsner, C. Sommitsch, L. Wöllmann  
**Kriechverhalten von gekerbten Proben einer MarBN-Guss-Variante**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe*, 2023, Konferenzbandbeitrag
- F. Müller – B. Krenmayr, M. Oechsner, C. Sommitsch, L. Wöllmann  
**Stochastic and systematic deviations of creep experiments in martensitic steels**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag  
<reviewed>
- F. Müller – B. Krenmayr, M. Oechsner, L. Wöllmann, C. Sommitsch  
**Creep behaviour of notched specimens of MarBN-cast-steel**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag  
<reviewed>
- T. J. Niwinski – M. M. Becker, S. Herter, M. Klein, F. Kraemer, M. Oechsner  
**Ultrasonic in situ evaluation of the bolt preload without referencing an unloaded state using a combination of longitudinal and transverse waves**  
*Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2023, Vol. 54 (8), S. 945-956  
<reviewed>
- T. Peters – P. Hof, J. Schneider, M. Schuster, M. Seel  
**Determination of the bending strength of glass via four point bending – correction of factor ke in EN1288-3**  
*Glass Structure and Engineering*, 2023, Vol. 8, S. 353-362  
<reviewed>
- B. Ringel – S. Meiniger, M. Oechsner, G. Schlick, D. Schwarz, M. H. Vu, C. Seidel  
**Investigation on a Predetermined Point of Failure for Stainless Steel 316L Pressure Loaded Components Made by Laser Powder Bed Fusion Through Stress Analysis and Experimental Testing**  
*Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 8, 2023, S. 27-35  
<reviewed>
- S. V. Sajadifar – C. K. Chandra, P. Groche, B. Heider, A. Heidarzadeh, M. Oechsner, T. Niendorf, R. Reitz, T. Suckow, J. Zavašnik  
**Assessment of the impact of process parameters on the final material properties in forming of EN AW 7075 employing a simulated forming process**  
*Journal of Manufacturing Processes*, 2023, Vol. 86, S. 336-353  
<reviewed>
- S. V. Sajadifar – J. Baumgartner, S. Böhm, M. Fehlbier, H. Fröck, M. Graß, O. Kessler, M. Klein, M. Krochmal, A. Maciolek, M. Oechsner, T. Melz, T. Niendorf, M. Röber  
**On the monotonic and cyclic behavior of an Al-Mg-Zn-Cu-Si compositionally complex alloy**  
*Advanced Engineering Materials*, 2023, Vol. 25 (21), Nr. 2300892  
<reviewed>
- J. A. Schönherr – M. Klein, M. Oechsner  
**Auswertung von Kraft-Weg Daten zur Detektion von Risssschließen im Schwellenwertbereich**  
*55. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit*, 2023, Konferenzbandbeitrag, S. 31-38
- M. Schwienheer – T.-U. Kern, G. Maler  
**Creep and Creep-Fatigue interaction for rotor material made of MarBN (Howeflex)**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. 078  
<reviewed>
- M. Schwienheer – D. J. Allen, P. Barnard, C. Bullough, E. De Bruycker, A. Gotti, R. Krein, E. Poggio, A. Riva, M. Speicher, M. Spindler  
**ECCC Working Group 3C – Superalloys, Overview on the activities and future perspectives**  
*6th International ECCC Conference*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Nr. 080  
<reviewed>
- M. Schwienheer – F. Kölzow  
**Creep Rupture Data Assessment - new uncertain challenges require new uncertain answers**  
*Materials at High Temperatures*, 2023,  
<reviewed>
- R. Schwing – S. Linn, C. Kontermann, M. Oechsner  
**Creep Under High Temperature Thermal Cycling and Low Mechanical Loadings**  
*Creep in Structures VI*, Vol. 194, 2023, S. 289-308  
<reviewed>
- M. Seel – P. Hof, M. Oechsner, F. Schneider  
**Edge strength of annealed float glass: Identification and optimisation of cutting process parameters**  
*Glass Performance Days*, 2023, Konferenzbandbeitrag, S. 2-6
- A. Udoh – M. Friedrich, C. Kontermann, S. Linn  
**Ermittlung der Restlebensdauer auf der Basis der Gefüge- und Schädigungsentwicklung**  
*46. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe*, 2023, Konferenzbandbeitrag, S. 92-101
- T. Ulrich – J. Brötz, H. Hoche, P. Kaestner, M. Oechsner, P. Polcik  
**A comparative study between PVD-TiMgN and PVD-TiMgGdN sputtered coatings to evaluate the influence of Gd and its effect on the corrosion properties of the individual coatings**  
*Surface and Coatings Technology*, 2023, Konferenzbandbeitrag, Vol. 474, Nr. 130093  
<reviewed>



