



JAHRESBERICHT 2022

Zentrum für Konstruktionswerkstoffe
Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde



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

es ist wieder soweit. Mit 2022 ist ein ereignisreiches Jahr zu Ende gegangen, über dessen Entwicklungen an MPA und IfW wir Sie in diesem Jahresbericht informieren wollen.

Insbesondere in der ersten Jahreshälfte wurde das Arbeiten noch stark durch die Corona-Pandemie geprägt. Mobiles Arbeiten war – wo immer möglich – der Standard. Ein direkter persönlicher Austausch fand kaum statt. Die Lehre wurde bereits im Sommersemester wieder weitestgehend in Präsenz angeboten, in der täglichen Arbeit außerhalb der Lehre war jedoch noch der „Corona-Modus“ angesagt.

In der zweiten Jahreshälfte wurde der Krisenmodus um die Pandemie jedoch von einem Krisenmodus um die Energieversorgung abgelöst. Die Ereignisse in der Ukraine und die dadurch entstandenen Konsequenzen bezüglich der Energieversorgung stellen die gesamte TU vor große wirtschaftliche Herausforderungen. Als eine der größten Forschungseinrichtungen an der TU ist es nicht überraschend, dass wir als MPA und IfW auch einen hohen Anteil am Energiebedarf haben. Es ist für uns selbstverständlich, dass wir uns aufgrund dieser Situation ganz besonders dieser Herausforderung stellen und unseren Beitrag zum Energiesparen an der TU leisten wollen – auch wenn wir an der einen oder anderen Stelle unsere „Komfortzone“ verlassen müssen. Durch eine detaillierte Analyse unseres Energiebedarfs und ein überaus konstruktives Herangehen Aller konnten wir Einsparpotenziale identifizieren und einen Plan entwickeln, wie wir unserer besonderen Verantwortung gerecht werden können, ohne signifikante Einschnitte unserer Leistungsfähigkeit hinnehmen zu müssen.

Erfreulicherweise konnten wir trotz dieser schwierigen Bedingungen das

Jahr 2022 ohne nennenswerte Einbrüche in der Akquise von Drittmitteln in der Forschung oder im Bereich des Prüfens, Überwachens oder Zertifizierens abschließen.

Sofern es doch zu Verzögerungen bei der Bearbeitung unserer Aufgaben gekommen sein sollte, sind wir bei unseren Kunden – seien es die Fördergeber oder auch unsere Partner in der Industrie – im Allgemeinen auf Verständnis und Unterstützung gestoßen. Dies ist nicht selbstverständlich und dafür mein herzlicher Dank.

Inhaltlich konnten wir tolle und spannende Themen bearbeiten und dabei nicht nur interessante Projektergebnisse erzielen, sondern auch weiter unsere strategischen Forschungsfelder ausbauen. Im Bereich der Digitalisierung konnten wir durch die Implementierung einer performanten IT-Infrastruktur unsere Rechen- und Speicherkapazitäten nicht nur deutlich erweitern, sondern auch sicherer und robuster gestalten. Unter anderem durch die enge Kooperation mit dem Fachbereich Informatik konnten wir uns auch methodisch deutlich weiterentwickeln. Im Bereich der Additiven Fertigung ging es mit dem Neubau des Additive Manufacturing Centers (AMC) in die heiße Phase der Fertigstellung. In diesem Bereich haben wir nicht nur zukunftsweisende Infrastrukturen geschaffen, sondern wissenschaftlich insbesondere die Prozess-Struktur - Eigenschaftsbeziehung von Werkstoffen weiter erforscht und dabei neue Erkenntnisse gewonnen.

Last, but not least, sind wir hinsichtlich des Verständnisses der Wechselwirkungen von Werkstoffen und Bauteilen mit Wasserstoff einen großen Schritt weitergekommen. In diesem Bereich konnten wir – durch die Akquise eines EU-Förderprojekts – den Aufbau eines neuen Labors zur Untersuchung des Verhaltens von



Hochtemperaturwerkstoffen in einer Wasserstoffatmosphäre ermöglichen, wodurch uns zukünftig eine einzigartige Forschungsinfrastruktur zur Verfügung steht, nachhaltige Lösungen im Bereich der Mobilität und der Energieversorgung zuverlässig zu bewerten.

Im vorliegenden Heft wollen wir Ihnen in gewohnter Weise Einblicke in unsere vielfältigen Aktivitäten aber auch in unsere Fortschritte bei unserem Neubau auf der Lichtwiese sowie in unser Institutsleben geben.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von MPA und IfW an dieser Stelle mein ganz herzlicher Dank für das tolle Engagement, das Sie trotz der oben genannten Einschränkungen in Ihrer täglichen Arbeit erbracht haben. Unsere Erfolge sind Ihrem Einsatz und Ihrer Leistung zu verdanken.

Ich wünsche Ihnen gute Unterhaltung beim Lesen des Jahresberichts, danke Ihnen für Ihr Interesse an unserem Haus und freue mich auf den persönlichen Kontakt mit Ihnen, zu dem es hoffentlich in 2023 z.B. im Rahmen des Sommerfests oder des MPA-IfW Kolloquiums kommen wird.

Ihr

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

INHALT

ORGANISATION	4
PERSONALENTWICKLUNG	
Wir begrüßen / Wir verabschieden	6
PROMOTIONEN	
Wir beglückwünschen	8
NEUES AUS UNSEREM KOMPETENZBEREICH	
Baustoffe	10
Mess- und Kalibriertechnik	11
Kunststoffe und Verbunde	12
Werkstoffanalytik	14
Hochtemperaturwerkstoffe	16
Bauteilfestigkeit	18
Oberflächentechnik	20
FORSCHUNG	
Forschungshighlights	24
Strategiefelder	28
Kurzberichte zu abgeschlossenen Forschungsprojekten 2022	33
Aktuelle Forschungsprojekte 2022	52
ÜBERBLICK AUS DEM BEREICH	
LEHRE	56
VERANSTALTUNGEN UND HIGHLIGHTS 2022	58
VOTRÄGE & PUBLIKATIONEN 2022	64

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

Petra Bender, Timo Brune, Jörg Ellermeier, Hansgeorg Haupt, Ben Heider, Hansgeorg Haupt, Holger Hoche, Peter Hof, Felix Kölzow, Fabian Kraemer, Marcus Klein, Michael Krämer, Christian Kontermann, Matthias Oechsner, Rüdiger Reitz, Elke Stelzl-Schmincke, Matthias Seel, Michael Schwienheer, Ludwig Veith

Fotografien und Abbildungen

Sven Gaa, Peter Hof, Nina Mohr, Julia Weber, Rüdiger Reitz, Anna Kraemer, Nickl & Partner Architekten (München)

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

14.02.2022	–	Philip G. M. Rünagel (H-IT)
28.02.2022	–	Peter Löbig (K)
27.03.2022	–	Dr.-Ing. Andreas Kempf (S)
31.03.2022	–	Dr.-Ing. Ben Heider (O)
31.03.2022	–	Emmerich Eckert (O)
31.05.2022	–	Friedel Rhein (MW)
31.05.2022	–	Reiner Vetter (K)
30.06.2022	–	Werner Klaffke (H)
30.06.2022	–	Sven Gaa (K)
31.07.2022	–	Erdem Dag (S)
30.09.2022	–	Alexander Erbe, M.Sc. (H)
31.10.2022	–	Dr.-Ing. Anne Martin (O)
31.10.2022	–	Gunter Schild (HV)
31.12.2022	–	Dr.-Ing. Max Benedikt Geilen (S)
31.12.2022	–	Dr.-Ing. Marcel Adam (H)
31.12.2022	–	Jens Musekamp, M.Sc. (F)
31.12.2022	–	Thomas Niwinski, M.Sc. (S)

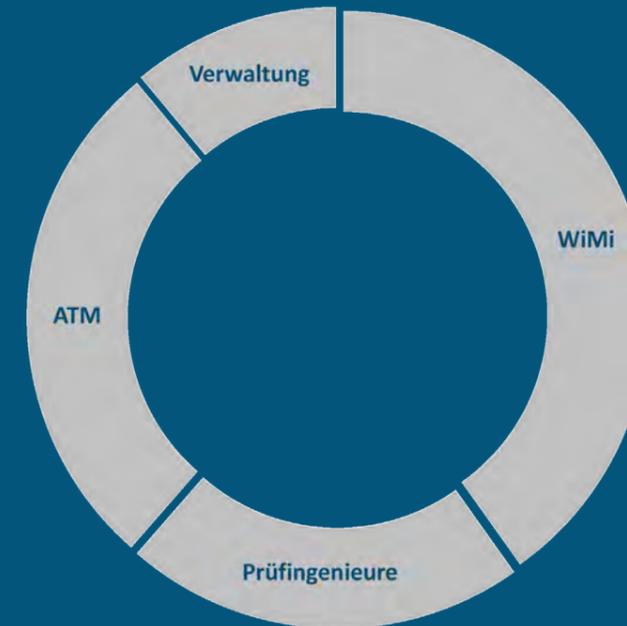
Wir begrüßen

EIN HERZLICHES WILLKOMMEN DEN
NEUEN KOLLEGINNEN UND KOLLEGEN

01.01.2022	–	Sandra M. Megahed, M.Sc. (H)
18.01.2022	–	Selina Laura Kredel (MW)
01.03.2022	–	Dennis Denisov (O)
01.03.2022	–	Caroline Karina Chandra, M.Sc. (O)
01.06.2022	–	Ghassan Mamary (MW)
01.06.2022	–	Tizian Zeckey, M.Sc. (O)
15.08.2022	–	Jan Spieß (MW)
29.08.2022	–	Saber Ansari (Werkstoffprüfer-Azubi)
15.09.2022	–	Pia Sophie Becks, M.Sc. (O)

DAS ZENTRUM IN ZAHLEN

132 MITARBEITENDE (90/37)*



*(MPA/IfW)
Stand: 31.12.2022

51 WISSENSCHAFTLICHE MITARBEITENDE (29/22)

27 PRÜFM INGENIEUR*INNEN (24/3)

35 TECHNISCHE ANGESTELLTE (24/11)

14 VERWALTUNG / HAUSTECHNIK (13/1)

5 AUSZUBILDENDE (5 WERKSTOFFPRÜFER*INNEN)



In tiefer Trauer gedenken wir unseren Verstorbenen Kollegen:

Dr.-Ing. Klaus Müller (ehemaliger Leiter KB-K)
Dr.-Ing. Thomas Oppermann (ehemals KB-S)
Gerold Klein (ehemals KB-K)
Willi Schäfer (ehemals KB-S)
Cornelia Grant (ehemals KB-K)

PROMOTIONEN 2022

Wir beglückwünschen

Andreas Kempf

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzbereich Bauteilfestigkeit

Dissertation:

Bewertung der zeit- und temperaturabhängigen Vorspannkraftrelaxation in Schraubenverbindungen.

Tag der mündlichen Prüfung: 15.02.2022

Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. P. Groche - TU Darmstadt, Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen

Christian Heinemann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe

Dissertation:

Beschleunigte prüftechnische Bewertung des Zeitstand- und Zeitdehnverhaltens von Hochtemperaturwerkstoffen.

Tag der mündlichen Prüfung: 03.05.2022

Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. B. Epple - TU Darmstadt, Fachgebiet Energiesysteme und Energietechnik

Ben Heider

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzbereich Oberflächentechnik

Dissertation:

Korrosions- und Verschleißigenschaften auftragsgeschweißter Duplexstahlschichten: Eine Frage des Gefüges.

Tag der mündlichen Prüfung: 31.05.2022

Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen - RWTH Aachen, Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik

Anne Martin

Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Kompetenzbereich Oberflächentechnik

Dissertation:

Entwicklung strukturierter Oberflächen zur Verbesserung der Osseointegration von PEEK.

Tag der mündlichen Prüfung: 14.06.2022

Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. A. Blaeser - TU Darmstadt, Fachgebiet BioMedizinische Drucktechnologie

Max Benedikt Geilen

Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzbereich Bauteilfestigkeit

Dissertation:

Zum Verhalten eigenspannungsbehafteter, biegebeanspruchter Federelemente unter einmaliger und zyklischer Belastung.

Tag der mündlichen Prüfung: 25.10.2022

Mitberichterstatter:

Prof. Dr. sc. T. Mayer - ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, IMES Institut für Mechanische Systeme

Romana Schwing

Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe

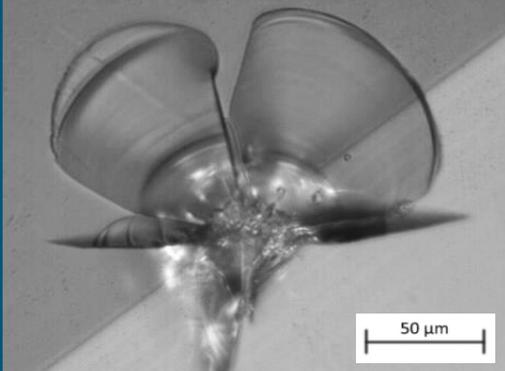
Dissertation:

Beschleunigte Kriechdehnungsentwicklung unter Temperaturwechsel-Beanspruchung.

Tag der mündlichen Prüfung: 26.10.2022

Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. M. Zimmermann - TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen



Rissssystem nach Vickersprüfung (HV1) in die Grenzfläche einer additiv gefertigten Glasprobe (Grenzfläche Glasplatte – Glasraube)

NEUES AUS UNSEREN KOMPETENZBEREICHEN



Baustoffe

DR.-ING.
PETER HOF

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

Der Kompetenzbereich Baustoffe ist nach wie vor in der Produktqualifizierung verschiedenster Produkte aus dem Bereich der mineralischen Baustoffe sowie aus im Bereich Glas als einem konstruktiven Werkstoff tätig. Eine solche Produktqualifizierung kann sowohl durch Prüfungen als auch durch Inspektionen und Zertifizierungen besagter Produkte und Prozesse erfolgen.

Durch grundlegende Änderungen im Zusammenspiel zwischen europäischem Bauproduktrecht und nationalen Baurechtsanforderungen werden zunehmend Produkteigenschaften und 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 für unsere Kunden, aber auch durch neu eingeführte Gütezeichen zum Beispiel durch RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. Sowohl im Bereich von Überwachungen von Gütezeicheninhabern als auch im Bereich eigener Zertifizierungen engagieren wir uns mit unserer Expertise und Erfahrung.

Im Rahmen einer 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. Die Forschung im Bereich der Additiven Fertigung (AF) mit dem Material Glas befindet sich im Gegensatz zu Metallen und Kunststoffen noch im Anfangsstadium. Die AF von Glas 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 aufgebracht Glaslagen und 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 entstand durch die Zusammenarbeit mit den Partnern im Glass Competence Center (GCC), welches in diesem Jahr am Standort Lichtwiese in Darmstadt feierlich eröffnet wurde. Mit neuen Technologien sowie kontinuierlicher interdisziplinärer Forschung soll durch die Zusammenarbeit im GCC das Leistungsvermögen und der Anwendungsbereich von Glas weiter vergrößert werden. Die personelle und strukturelle Verflechtung des GCC mit unserem Hause soll weiter intensiviert und die vorhandenen Kompetenzen sowie die Versuchstechnik des Kompetenzbereichs Baustoffe und des Instituts für Statik und Konstruktion gebündelt werden.

Aufbauend auf einem in 2021 abgeschlossenen Forschungsprojekt zu den Qualitäten der geschnittenen Glaskanten planen wir in Zusammenarbeit mit den am GCC neu geschaffenen Möglichkeiten ein weiteres Forschungsvorhaben zu dem Thema Qualitäten der Glaskanten bei gesäumten, geschliffenen und polierten Kanten. Hierbei sollen die für die mechanische Festigkeit wesentlichen Prozessparameter der Schleif- und Poliervorgänge erforscht und gleichzeitig eine Korrelation mittels einer zerstörungsfreien Prüfung geschaffen werden.

Mess- und Kalibriertechnik

Der zunehmende Bedarf nach unseren Kalibrierleistungen erfordert von uns sowohl die Aufstockung unseres Personals durch kompetente neue Mitarbeiter als auch die stetige Modernisierung, Entwicklung und Erweiterung unserer Messverstärkertechnik und unserer Kraft - Bezugsnorm - Messeinrichtungen (K-BNME). Wir können dadurch 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.

Im April wurde die 20 N Kraft - Bezugsnorm - Messeinrichtung in unseren Akkreditierungsumfang aufgenommen. Damit sind wir jetzt in der Lage auch den Kraftbereich von 0,1 N bis 20 N mit einer Messunsicherheit von $1 \cdot 10^{-4}$ abzudecken. Die Rückführungsmessungen für die Akkreditierung waren etwas aufwendiger, da es weltweit nur eine Vergleichsanlage bei einem nationalen Institut in Japan gibt. Für Kalibrierungen vor Ort wurde unser Portfolio um einen 2 MN-Zugstab erweitert.

Im Zuge des bald anstehenden Umzuges unseres Labors an die Lichtwiese soll unser Anlagenspektrum evtl. um eine neue 50 kN K-BNME erweitert werden. In diesem Kraftbereich besteht eine außerordentlich hohe Nachfrage an Kalibrierungen von Kraftmessgeräten, die mit

der derzeitigen Kombination aus 20 kN-200 kN und 1000 kN K-BNME nicht mehr abgedeckt werden kann. Außerdem soll die Kalibrierung von Längenmess-einrichtungen von Verfahrtschienen an Härteprüfmaschinen in unseren Scope aufgenommen werden.

Neben den DAkkS- und internen Audits wurde ein für uns neues Instrument aus der DIN EN ISO/IEC 17025, das Lieferantenaudit, im Jahr 2022 von zwei Kunden erfolgreich bei uns durchgeführt.

Die Digitalisierung unserer Workflows vom Angebot, über die Kalibrierung bis zum Rechnungs- und Zeugnisausgang ist inzwischen abgeschlossen. Drucker und Faxgeräte konnten abgeschaltet werden. Das schont nicht nur die Ressourcen, sondern erhöht auch die Sicherheit der internen Abläufe und bietet den Kunden einen deutlich verbesserten Service.

Aufgrund von Veränderungen an den Microsoft - Programmen sind wir gezwungen, unsere Prüf- und Kalibrierprogramme komplett neu zu programmieren. Für die Härtekalibrierungen und Kalibrierungen von Längenänderungsmessgeräten sowie eine neue Datenbank wurden in 2022 neue Programme auf der Basis von Python entwickelt, die gerade in die Anwendungsphase übergegangen sind. Als nächstes müssen die Programme für die Kalibrierung von Pendeln, Zug-/Druckprüfmaschinen und Spannpressen programmiert werden.

DR.-ING.
JÖRG ELLERMEIER

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

Weiterbildungsangebote aus dem Kompetenzbereich Mess- und Kalibriertechnik (W)

In 2022 konnte das Seminar Härte in Darmstadt wieder als Präsenzveranstaltung stattfinden. Beim Härteseminar mit der Ausstellung der portablen Härteprüfgeräte ist der Austausch mit den Experten sowie den Kolleginnen und Kollegen vor und nach den Vorträgen ein wesentlicher Bestandteil der Veranstaltung, der durch eine digitale Veranstaltung nicht ersetzbar ist. Das Seminar wurde mit über 50 Teilnehmenden sehr gut angenommen.

MPA-IfW Härteseminar in Darmstadt: November 2023



Abb. 1: Whiskerbildung in fluoriertem Isoliergas

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.

Neben der klassischen MPA-Tätigkeit engagiert sich der Kompetenzbereich auch in der Berufsausbildung und ermöglicht seit dem Ausbildungsjahr 2019/2020 die Ausbildung zum Werkstoffprüfer - Fachrichtung Kunststofftechnik.

Die bereits seit einigen Jahren im Rahmen des Energieforschungsprogramms des BMWi bestehenden Forschungsaktivitäten zum Thema Materialverträglichkeit von Werkstoffen (Kunststoffe, Elastomere, Metalle, Schmierstoffe, Adsorbentien) mit neuartigen Isoliergasen wurden im Rahmen von Auftragsforschungsprojekten für die Firmen Siemens AG und Siemens Energy AG weitergeführt. Hintergrund der Arbeiten ist die Substitution von klimaschädlichem Schwefelhexafluorid (SF₆) aus Mittel- und Hochspannungs-Schaltanlagen durch umweltfreundliche alternative Gase. Nach wie vor sind hierbei auch fluorhaltige Verbindungen wie 2,3,3,3-Tetrafluor-2-(Trifluormethyl)-Propannitril ((CF₃)₂CFCN) in der Diskussion, welche zwar günstige elektrische Eigenschaften haben, aber, auch in Mischungen mit natürlichen Gasen, nach wie vor ein gewisses Treibhauspotential aufweisen. Im Rahmen der Forschungsarbeiten mit der Siemens Energy AG konnte gezeigt werden, dass sich das o. g. fluorierte Gas unter

bestimmten Umgebungsbedingungen zersetzt und dass insbesondere in Anwesenheit von Adsorbentien (Zeolithen) und bei langsamer Abkühlung aus der Gasphase sehr große nadelförmige Kristalle (Whisker) abgeschieden werden (Abb. 1). Nadelförmige Kristalle sind in Hochspannungs-Schaltanlagen unerwünscht, weil diese die elektrische Feldstärke durch Spitzenwirkung erhöhen – ähnlich nachteilig wie im Maschinenbau eine Kerbe. Da derzeit eine Novellierung der Verordnung für fluorierte Gase diskutiert wird, sind die Ergebnisse nicht nur von technischer, sondern auch von politischer Relevanz. Ein Einsatz von Gasen mit einem Treibhauspotential größer 10 könnte zukünftig auf Ausnahmefälle beschränkt werden. Diese wären nur dann zu rechtfertigen, wenn alternative Ansätze nicht umsetzbar sind. Die Zersetzung des fluorierten Gases spricht jedoch eher gegen einen Einsatz außerhalb von Sonderanwendungen. Unsere Projektpartner setzen mittlerweile auf natürliche Gase, die keine Fluorverbindungen enthalten.

Für das im Jahr 2021 begonnene und durch das Hessische Ministerium für Digitale Strategie und Entwicklung im Förderprogramm Distr@I geförderte Forschungsvorhaben RiFoKaDD wurden erste wichtige Ergebnisse ermittelt. In diesem Projekt werden ressourceneffiziente innovative Formwerkzeuge für die Kunststoffverarbeitung mittels additiver Fertigungsverfahren untersucht, wobei die Digitalisierungspotentiale der Prozesse besondere Berücksichtigung finden. Hierzu wurden durch unseren Projektpartner PTW (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der TU Darmstadt) erste Muster für Duroplast-Presswerkzeugeinsätze aus dem martensitahärtenden Werkzeugstahl 1.2709 (X3NiCoMoTi18-9-5) im PBF-LB/M-Verfahren

(Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen) gedruckt (Abb. 2). Diese werden von unserem Projektpartner Roland Merz für die Herstellung von Duroplast-Formteilen benötigt. Des Weiteren wurde ein konturnah zu temperierendes Thermo-plast-Werkzeug für eine Fließspirale durch unsere Projektpartner Kegelman Technik GmbH und PEG Plastics Engineering Group GmbH konzipiert und numerisch simuliert.

Aktuell werden Verfahren zur Optimierung der Oberflächengüte evaluiert, da diese bei additiven Fertigungsverfahren für eine gute Entformbarkeit von Kunststoff-Formteilen nicht ausreicht. Ziel hierbei ist, möglichst ohne spanendes Nachbearbeiten eine akzeptable Oberflächenfeingestalt zu gewährleisten. Des Weiteren wird das Verhalten des eingesetzten Werkstoffstahls mechanisch, topoanalytisch und thermophysikalisch charakterisiert und simuliert. Dies erfolgt in enger Kooperation mit den Kompetenzbereichen Hochtemperaturwerkstoffe und insbesondere Oberflächentechnik, mit dem das Projekt seit dem Herbst 2022 gemeinsam bearbeitet wird. Aktuell erfolgen hierzu u. a. Berechnungen zur thermodynamischen Modellierung der Phasenausbildung des Werkzeugstahls mittels der CALPHAD-Methode (Software ThermoCalc), welche ihrerseits wiederum Eingangsdaten für weitere numerische und experimentelle Simulationsverfahren liefern können. Dies schafft – in Verbindung mit dem geplanten Einsatz von Verfahren der künstlichen Intelligenz – die Grundlagen für den Aufbau eines sektor-

übergreifenden digitalen Qualitätssicherungssystems für die additive Fertigung. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen jedoch nicht nur ein besseres wissenschaftliches Verständnis der additiven Fertigungsverfahren, sondern fließen auch in den Aufbau von Expertise für das Additive Manufacturing Center (AMC) sowie in die Normungsarbeit bei DIN und ISO ein. Der Kompetenzbereich Kunststoffe stellt hier zwischenzeitlich den Leiter des DIN NA 145-04-01-03 GAK, einem Gemeinschaftsarbeitsausschuss der DIN-Normenausschüsse Werkstofftechnologie (NWT) und Kunststoffe (FNK) zur additiven Fertigung von Kunststoffen und Elastomeren. Hierdurch wird eine enge Verknüpfung von Wissenschaft und praktischer Anwendung gewährleistet und das insbesondere auch in Bezug auf die Qualitätssicherung für additiv gefertigte Bauteile. Perspektivisch wird in der Normungsarbeit eine Verknüpfung der Aktivitäten zum 3D-Druck im Maschinenbau (ISO) mit elektrotechnischen Anwendungen (IEC) angestrebt. Diesbezüglich wird ein hohes Potential zur Schöpfung von Synergien gesehen, da für elektrotechnische Anwendungen (z.B. Leiterplatten) insbesondere komplexe Multimaterialsysteme aus Kunststoff, Metall und Keramik bereits deutlich weiter verbreitet sind als im klassischen Maschinenbau.



Abb. 2: Additiv gefertigte Duroplast-Werkzeugeinsätze aus 1.2709

Werkstoffanalytik

DR.-ING.
HOLGER HOCHÉ

+49 6151 16 - 25 074
holger_claus.hoche@tu-
darmstadt.de

Das Verständnis der Beziehung zwischen Fertigungsprozess, Mikrostruktur und Eigenschaften von Werkstoffen bzw. Werkstoffsystemen bildet die Grundlage aller Aktivitäten des Kompetenzbereichs Werkstoffanalytik in den Bereichen Forschung, Lehre und Ingenieurdienstleistungen. Die breit aufgestellten Forschungsaktivitäten umfassen die Themenbereiche der Oberflächenbehandlung durch Beschichtung oder Plasmadiffusionsbehandlungen, Wasserstoffversprödung hochfester Stähle, additive Fertigung sowie die zerstörungsfreie Materialcharakterisierung mittels Röntgenstrahlung. Dabei befassen sich die Fragestellungen insbesondere mit der Bauteilsicherheit durch die verbesserte Kenntnis von Wirk- und Schädigungsmechanismen sowie der Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Bauteilen. Alle Forschungsaktivitäten adressieren relevante Zukunftstechnologien mit dem Ziel der Energieeinsparung und des ressourceneffizienten Materialeinsatzes. So steht nun mit der Entwicklung von Physical Vapor Deposition (PVD)-Hartstoffschichten auf Basis von TiMgGdN erstmals ein Dünnschichtsystem zur Verfügung, welches korrosionsanfällige Vergütungsstähle erfolgreich vor Korrosion und Verschleiß schützt. Damit stellt unsere Entwicklung eine vielversprechende Alternative zum Ersatz von Hartchromschichten dar, die bekanntermaßen aufgrund der Chrom(VI)-oxid-Problematik unter die REACH-Verordnung fallen. Neben der erfolgreichen Akquisition eines Anschlussprojekts in 2022 wurde das Engagement unseres wissenschaftlichen Mitarbeiters Thomas Ulrich anerkannt, indem er eine Einladung, verbunden mit einem entsprechenden Stipendium, zur Vorstellung seiner Forschungsergebnisse bei der renommierten Tagung der Society of Vacuum Coaters (SVC) in den USA erhielt. Daneben werden in weiteren Projekten

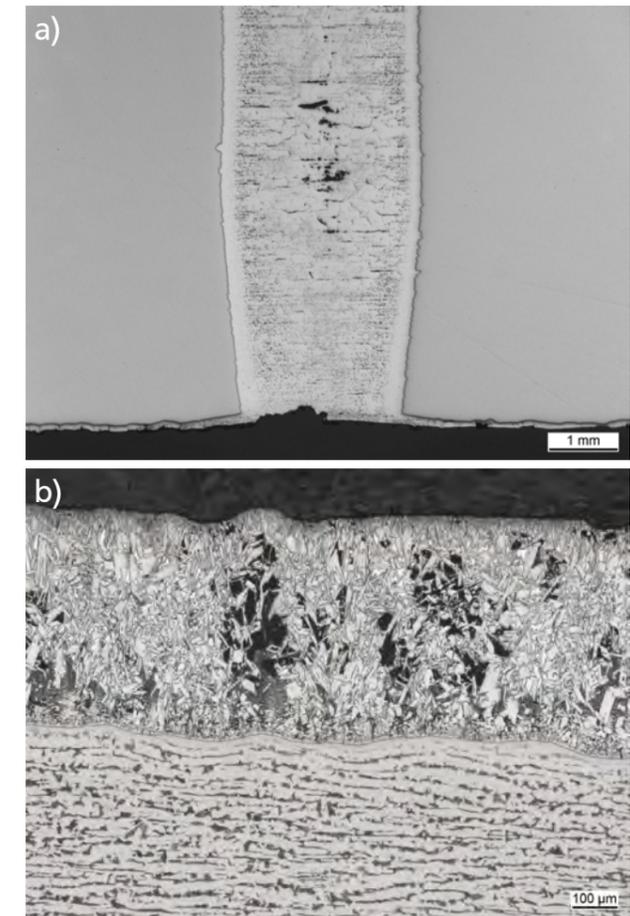
auch konventionelle Korrosionsschutzschichten wie Feuerverzinkungen oder galvanische Überzüge adressiert. Fokus ist die Sicherstellung der Schichthaftung und die Gewährleistung der Bauteilsicherheit durch die Minimierung eines prozessbedingten Wasserstoffeintrags. Während Wasserstoff als Energieträger in aller Munde ist, so stellt dieser für hochfeste Stähle mit Festigkeiten ab ca. 1000 MPa ein signifikantes Gefährdungspotenzial dar. Die wasserstoff-induzierte Schädigung hochfester Stähle ist daher traditionell ein Forschungsschwerpunkt des Kompetenzbereichs Werkstoffanalytik mit aktuell zwei aktiven Forschungsprojekten. Für die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger haben wir in 2022 gemeinsam mit Projektpartnern ein DFG-Grundlagenprojekt gestartet, um den Einfluss von Oberflächenmodifikationen von Stählen mittels Plasmadiffusionsverfahren auf den Korrosions- und Kontaktwiderstand von Bipolarplatten zu verstehen. Verschiedene weitere Projekte sind in Planung bzw. befinden sich in den Begutachtungsprozessen. Insgesamt gestaltet sich die Akquisition von öffentlich geförderten Projekten aber zunehmend anspruchsvoll. Bei bestenfalls gleichbleibenden Haushaltsmitteln nimmt die Anzahl der eingereichten Projektanträge zu, weshalb nur noch exzellente Projekte eine reelle Chance auf eine Förderung haben. Trotz dieser verschärften Randbedingungen haben wir in 2022 unsere Ziele für die Projektbeantragung erreicht. Aktuell sind im Kompetenzbereich Werkstoffanalytik sieben Forschungsprojekte in Bearbeitung. Die Mehrzahl der Projekte werden in Zusammenarbeit mit Industriepartnern durchgeführt und zeichnen sich durch ihre Anwendungsnähe aus. Von dem Wissensaustausch profitieren Forschung und Industrie gleichermaßen. Durch den Wissens-

transfer können wir so unseren Auftraggebern im Bereich der Ingenieurdienstleistungen die neuesten Erkenntnisse zur Verfügung stellen. Gerade auch deshalb genießt der Kompetenzbereich Werkstoffanalytik sowohl regional als überregional und international eine hohe Anerkennung und Sichtbarkeit im industriellen Umfeld.

Dazu trägt auch die Präsenz in Facharbeitskreisen, auf Konferenzen und durch Referententätigkeiten im Rahmen beruflicher Weiterbildungsveranstaltungen bei, die seit 2022 mit dem weitestgehenden Wegfall der Corona-Beschränkungen wieder möglich ist. So konnten wir seit Mai 2022 wieder zum wissenschaftlichen Austausch und zur Vernetzung auf verschiedenen internationalen Fachtagungen unsere Projektergebnisse vorstellen, z. B. bei der International Conference on Residual Stresses (ICRS) oder der International Conference on Plasma and Surface Engineering (PSE).

Das Additive Manufacturing Center (AMC) am Standort Lichtwiese wird ab Anfang 2023 betriebsbereit sein: In den Labortrakt wird die gesamte Röntgenanalytik sowie verschiedene Geräte aus der chemischen Analytik. In diesem Zug konnten wir in einen neuen Computertomographen zur hochauflösenden 3D-Tomographie investieren, der Anfang 2023 geliefert wird.

Vor außerordentliche Herausforderungen hat uns der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine gestellt, dessen Ende und Auswirkungen nach wie vor unvorhersehbar sind: Die Kostenexplosion bei Energie, Verbrauchsmaterialien und Betriebsstoffen sowie mitunter signifikante Lieferverzögerungen erforderten Anpassungen bei der Lagerhaltung und den Dienstleistungspreisen. Gleichzeitig waren Prozesse aufgrund von Energiesparmaßnahmen anzupassen. Dank unseres motivierten und verantwortlichen Teams stellen wir uns diesen uns künftigen Herausforderungen und versprechen auch für 2023 Zuverlässigkeit und Transparenz für unsere Kunden und Projektpartner.



Unlegierter Stahl mit Feuerverzinkung (Ferrit-Perlit); a) ungeätzt Draufsicht auf die Zinkschicht; b) mit alkoholischer Pikrinsäure geätzter Längsschliff

Hochtemperaturwerkstoffe

DR.-ING.
CHRISTIAN
KONTERMANN

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

Nichts weniger als die „Gestaltung der Zukunft“ war das Kernthema und gleichzeitig die Kernherausforderung im Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe im Jahr 2022.

Die Zukunft ist maßgeblich durch den Forschungsbau „Center for Reliability Analytics“ (CRA), unserem neuen Gebäude auf der Lichtwiese, geprägt. Dieser Bau dient jedoch nicht nur dazu, bisherige Infrastruktur umzuziehen. Stattdessen werden in diesem Gebäude neue Infrastruktur sowie Schnittstellen geschaffen und für zukünftige Forschungsaufgaben bereitgestellt, weiterentwickelt und optimiert. Insbesondere wurden zwei ganz maßgebliche Aktivitäten, welche kompetenzbereichsübergreifend konzipiert sind, bereits umgesetzt. Zum einen die notwendige Infrastrukturen zur Digitalisierung des gesamten Prüfzyklus und das sichere Speichern sowie die performante, maschinenlesbare Verfügbarmachung von Forschungsdaten. Zum anderen die Realisierung eines Hochtemperatur - Wasserstofflabors aus REACT-EU Mitteln. Innerhalb des Labors können so schon ab Ende 2022 dringend relevante Fragestellungen bspw. in den Sektoren Energie- und Antriebstechnik zum Einfluss einer Wasserstoffexposition auf die Werkstoffantwort unter hohen Temperaturen aufgegriffen und systematisch bearbeitet werden. Grundlage dafür liefert unter anderem die im Haus vorhandene, jahrzehntelange Expertise auf dem Gebiet der Wasserstoffversprödung bei Raumtemperatur. Beide konkret bereits umgesetzte Infrastruktur-Aktivitäten (Digitalisierung und Wasserstoff) prägen schon heute ganz maßgeblich die Forschungsausrichtung des Kompetenzbereichs Hochtemperaturwerkstoffe. Dies wird nicht zuletzt in aktuellen Vorhaben und Anträgen sowie gestarteten Netzwerkinitiativen sichtbar.

Die Infrastruktur im Bereich der Digitalisierung wird aktuell in einer ganzen Reihe von Vorhaben verwendet - angefangen von der Nutzung der geschaffenen Möglichkeit des High-Troughput-Computings (HTC) bspw. innerhalb des AVIF - Vorhabens „Probabilistik II“ bis hin zum parallelen Training von Meta-Modellen auf Basis von experimentellen und virtuell generierten Datenstützstellen innerhalb des BMWK-Vorhabens „3D-ML-Creep“. Die Kondensation von vielfältigsten, heterogenen Ergebnisdaten, Messgrößen und Modellen innerhalb von fortschrittlichen Datencontainern ist der Schlüssel, um eine Analysefähigkeit überhaupt erst herzustellen und Korrelationen sichtbar und auswertbar zu machen. Eine ganze Reihe von parallelen Aktivitäten haben daher die Konzeptionierung eines Datencontainers vom Typ hdf5 sowie die Analyse und Nutzung der Daten im Rahmen von Modellierungstools zum Thema. Zu nennen wären hier das AVIF-Vorhaben „Gefüge- und Schädigungsentwicklung“, das VGB-Programm zum Thema „Langzeitkennwerte“ sowie dedizierte Software-Projekte für die ECCC und die FVWHT. Als Ergebnis konnte in 2022 die Entwicklung einer ersten Version der FVWHT-WebApp abgeschlossen werden. Diese App stellt künftig ein einheitliches Modellierungswerkzeug für das Hochtemperaturwerkstoffverhalten für die Mitglieder der FVWHT bereit. Grundlage dafür sind Daten aus dem bereits erwähnten hdf5-Container.

Beim Thema Wasserstoff ist der Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe in verschiedenen Netzwerken aktiv, angefangen vom H2-Kompass, über das Forschungsnetzwerk Wasserstoff des BMWK und den Wasserstoffstammtisch der TU Darmstadt bis hin zu den Expertengruppen des vgbe und der

FVWHT. Aus diesen Netzwerken heraus sind gemeinsam mit weiteren Forschungsstellen und der Industrie in verschiedenen Konstellationen vielfältige Aktivitäten und konkrete Gemeinschaftsprojekte entstanden. Das BMWK hat uns bei gleich zwei Vorhaben zur Vollarbeitsstellung aufgerufen. Im Projekt „HyPower“ wird es um einen systematischen Vergleich verschiedener Prüfmethode zur Nachstellung einer Druckwasserstoffexposition gehen, so dass aus dem Vorhaben Empfehlungen für effizientere Versuchspläne abgeleitet werden können. Hier sind gleich sechs Industriepartner sowie der vgbe involviert. Im Vorhaben „GTexH2“ wird die Konsequenz einer Wasserstoffverbrennung auf die Abgasszusammensetzung von stationären Gasturbinen untersucht und der Einfluss dieser neuen Umgebungsbedingungen auf das zu erwartende Werkstoffverhalten bewertet. In beiden Aktivitäten kommt u.a. die im H2HT-Lab neu geschaffene Hohlprobenprüftechnik zum Einsatz. Dass sich neben einer reinen Wasserstoffexposition auch die Abgasszusammensetzung u. U. signifikant ändert, ist ebenso Schwerpunkt des LuFo-Programms „WET-Engine“ an dem das IfW Darmstadt beteiligt sein wird. Innerhalb des Programms wird u. a. der Einfluss von erhöhten Wassergehalten bei hohen Temperaturen auf das zyklische Werkstoffverhalten sowie die resultierende Ermüdungslebensdauer systematisch analysiert.

Die angesprochenen Themen unterstreichen allesamt die strategische Ausrichtung und Weiterentwicklung des KB-H. Unsere Mission ist es weiterhin, mit fortschrittlichen Methoden, stets mit dem Fokus auf der praktischen Anwendbarkeit, einen konkreten Mehrwert für die wissenschaftliche Community sowie den Kreis der Anwenderinnen und Anwender in der Industrie zu generieren und damit den Stand der Technik sukzessive zu erweitern.

Wir freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit mit Euch und Ihnen.



Abb. 1: Screenshot der durch das IfW Darmstadt entwickelten FVWHT-WebApp



Abb. 2: Prototyp des Hohlprobenprüfstands für das neu geschaffene H2HT-Lab

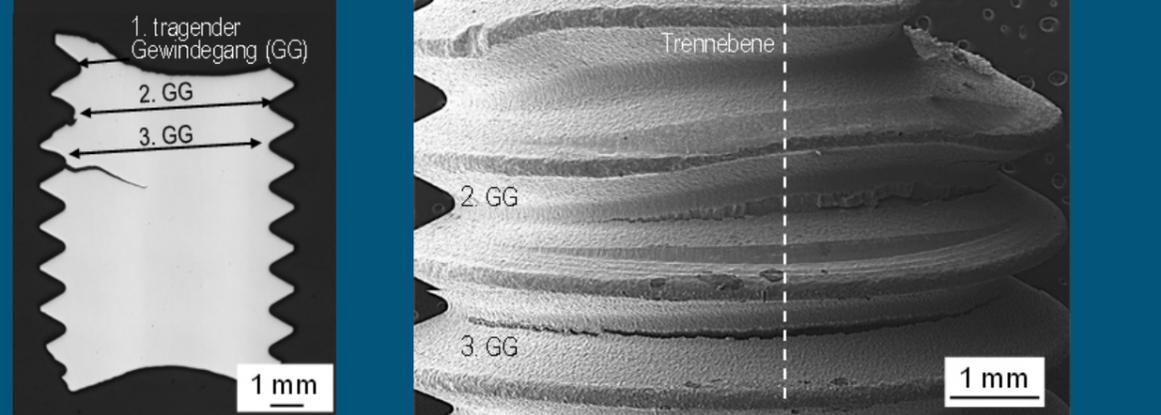


Abb. 1: Metallografisches Schlibbild einer geölten Schraubenverbindung, (links) makroskopische REM-Aufnahme, (rechts) Anrisse in den ersten drei Gewindegängen.

Bauteilfestigkeit

DR.-ING.
MARCUS KLEIN

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

Der Kompetenzbereich Bauteilfestigkeit beschäftigt sich mit dem Betriebsfestigkeitsverhalten metallischer Bauteile. Neben gegossenen, additiv gefertigten, kalt-/warmgeformten und geschweißten Bauteilen werden auch Komponenten bis hin zu Baugruppen des Maschinen-, Anlagen- und Bauwesens, welche durch Feder- und Verbindungselemente miteinander verbunden sind, untersucht. Die Effekte statischer, quasistatischer und zyklischer Beanspruchungen in unterschiedlichen Umgebungen werden experimentell und numerisch untersucht sowie anschließend bewertet.

Für Auftrags-Prüfungen und Forschung stehen Prüfsysteme mit Nennlasten bis zu 2,5 MN zur Verfügung. Lastspielzahlen bis in den Very-High-Cycle-Bereich werden mit servohydraulischen Prüfsystemen (bis zu 400 Hz), Resonanzpulsatoren und Ultraschallermüdungsprüfsystem (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 Losdrehungen bei Schraubenverbindungen erfolgt mittels Vibrationsprüfstand. Gewinde- und Kopfmomente 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.

Von 2019 bis 2022 wurde das Forschungsprojekt „Einfluss von zinkbasierten Korrosionsschutzsystemen auf die Ermüdungsbeanspruchbarkeit von Schraubenverbindungen“ (IGF 20412) in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern bearbeitet und in 2022 abgeschlossen.

Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen wurden

die Ermüdungseigenschaften durch Bestimmung des Anrisszeitpunktes und des Rissfortschritts bis zum Versagen durch Bruch für ausgewählte Beschichtungssysteme bewertet. Unter einstufigen Belastungen wurden an Kerbproben und Schrauben umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Form axialer Schwingversuche durchgeführt. Die zu bewertenden Beschichtungssysteme bildeten galvanische Zink- und Zink-Nickeloberflächen, nicht-elektrolytisch aufgetragene Zinklamellenüberzüge und eine Zn-phosphatiert geölte Beschichtung. Die Referenz bildete eine blank vergütete unbeschichtete Oberfläche. Ein weiteres untersuchtes System stellte die Variante „ δ -Ferrit“ dar, bei der phosphatiert vergütete Bauteile untersucht wurden. Darüber hinaus konnte der für die Höhe der Vorspannkraft entscheidende Einfluss von Schmierstoff für Schraubenverbindung unter zyklischer Belastung bewertet werden. Die Verschiebung des Anrisszeitpunktes zu signifikant höheren Lastspielzahlen sowie der lebensdauerverlängernde Einfluss auf die Rissfortschrittsrate, insbesondere von kriechfähigen Schmierstoffen, konnte abgeleitet werden.

Die grundlegende Beschreibung und Bewertung der lebensdauerkritischen Wirkung von Beschichtungssystemen wurden mittels teilweise neu konzipierter Messtechniken im Rahmen dieses Projektes erarbeitet. Weiterführende Informationen finden Sie im Teil Forschung.

Das Forschungsprojekt „Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode“ (AVIF-Nr. 317; 2020 – 2022) wurde gemeinsam mit dem Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptionik und Maschinenakustik (SAM) der TU Darmstadt bearbeitet. Das selbsttätige Losdrehen ist ein Prozess, der bei Schraubenverbindungen im Betrieb zu einem zunehmenden

Vorspannkraftverlust führt, der bis zu einem vollständigen Lösen der Verbindung führen kann. Besonders kritisch sind Verschiebungen der verspannten Bauteile quer zur Schraubenachse. Erstmals konnte eine Bewertungsmethode entwickelt werden, die sogar für variable Verschiebungsamplituden angewendet werden kann. Die entwickelte Bewertungsmethode fußt auf umfangreichen experimentellen Untersuchungen zum Losdrehverhalten von Modellverbindungen und der numerischen Modellierung der Schraubenverbindungen mittels der Finite Elemente Methode. Es gelang das Losdrehverhalten, das durch eine Vielzahl von Einflussgrößen beeinflusst wird, mit wenigen experimentell ermittelbaren Eingangsparametern zu beschreiben. In einem Workshop wurde die Anwendung der entwickelten Programmroutine demonstriert und geschult. Weiterführende Informationen finden Sie im Teil Forschung. Gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin wurde das Forschungsprojekt „Ermittlung des intrinsischen Schwellenwerts und dessen Validierung als Werkstoffparameter“ bearbeitet. Das Ziel des Projekts bestand darin, eine robuste und zuverlässige Methode zur Ermittlung des intrinsischen Schwellenwerts $\Delta K_{th,eff}$ abzuleiten und eine Bauteilauslegeprozedur auf der Basis der Verwendung von effektiven Rissfortschrittsdaten bzw. des $\Delta K_{th,eff}$ zu entwickeln.

Die hierfür erforderlichen effektiven Rissfortschrittsdaten wurden bei hohen Spannungsverhältnissen ($R \approx 0,8$) ermittelt, wodurch extrinsische Einflussfaktoren wie Risschließeffekte minimiert werden konnten. Dies resultiert in geringer Datenstreuung (Abb. 2) und führt somit zu einer verbesserten Vorhersagezuverlässigkeit. Die Vorhersagen sind wegen des Ausschlusses von Risschließeffekten konservativ. Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse wurden Anwendungsempfehlungen abgeleitet und eine robuste Auswertungsstrategie für die Bestimmung von Schwellenwerten aus Rissausbreitungsdaten entwickelt. Schließlich wurde ein bruchmechanisches Bauteilauslegeverfahren, basierend auf (nahezu) risschließfreien Rissausbreitungsdaten, weiterentwickelt und für den Werkstoff S690QL demonstriert. Experimentelle Verifizierungs- und Validierungsversuche bestätigten, dass das Modell konservative Vorhersagen mit einem tolerablen Fehler liefert und daher für die Bauteilauslegung geeignet ist.

Die numerische Prozesssimulation des Gewindefurchens, inklusive der unmittelbar folgenden Montage, ist aufgrund diverser Einflussfaktoren eine technische Herausforderung. Insbesondere bei dem drei-

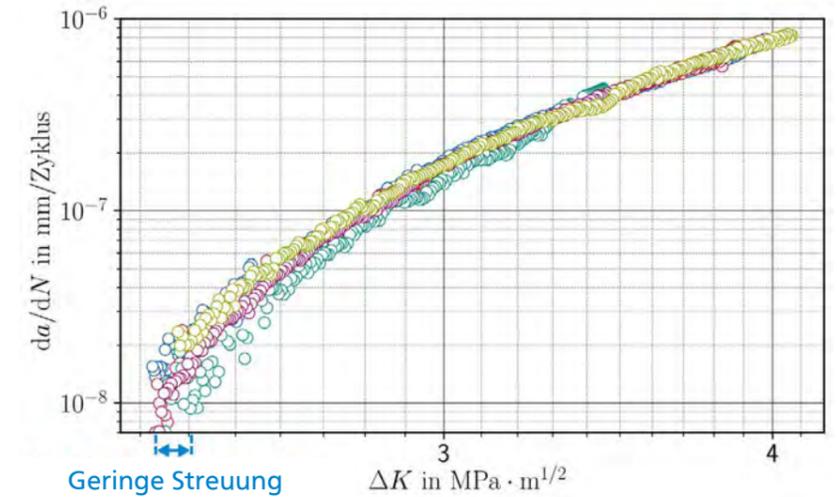
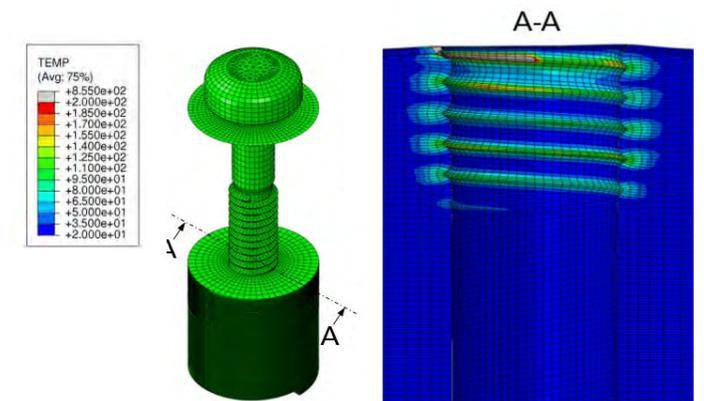
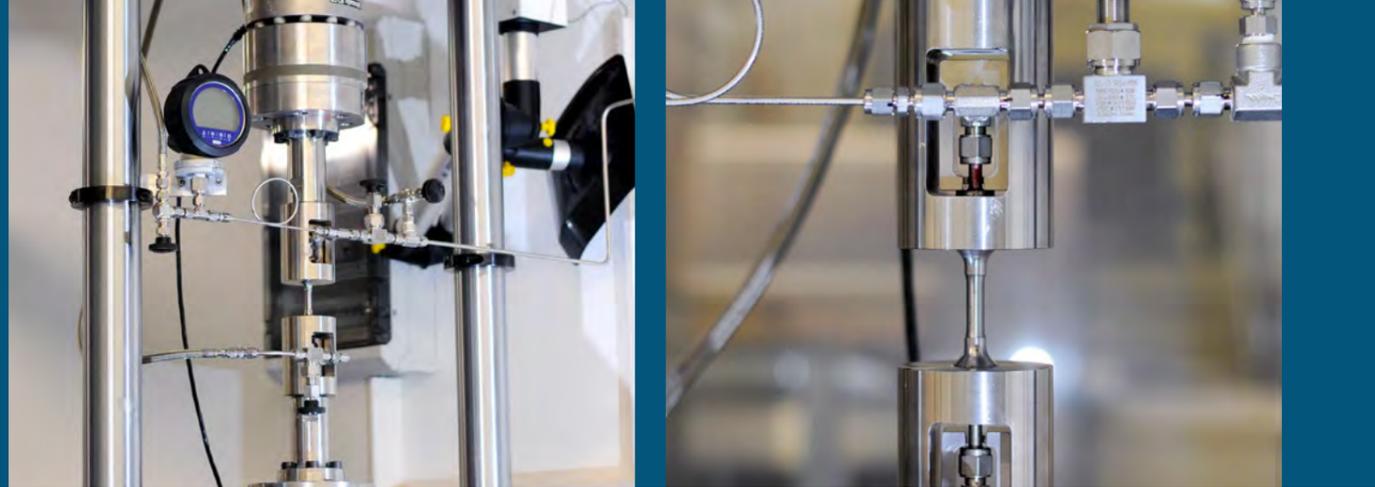


Abb. 2: In Laborluft bei $R = 0,8$ gewonnene Rissfortschrittskurven zeigen eine sehr geringe Streuung im Schwellenwert

dimensionalen Umformprozess besteht eine hohe Anforderung an die Vernetzungsqualität des Mutter- und Schraubengewindes. Die Darstellung lokal großer Umformgrade, kombiniert mit einer werkstoffseitigen Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit, führt unter Realbedingungen zu sehr langen Rechenzeiten, weshalb komplexe Vernetzungsstrategien entwickelt werden müssen. Methoden wie beispielsweise die Massenskalierung und die adaptive Neuvernetzung kommen zum Einsatz. Um die experimentelle und numerische Beschreibung des Gewindefurchprozesses weiter voranzutreiben, wird in dem 2020 gestarteten Forschungsprojekt „Auslegung und Montage gewindeformender Schraubenverbindungen“ in Kooperation mit der TU Dresden eine auf gewindeformende Schraubenverbindungen zugeschnittene Berechnungsmethode entwickelt. Nach heutigem Stand der Forschung fehlt eine etablierte, wissenschaftlich abgesicherte Berechnungsmethode. Konstrukteure sind infolge dessen auf Herstellerangaben und experimentelle Verifikationen angewiesen. Das Ziel des Projektes ist es, eine Berechnungsmethode auf Basis der Richtlinie VDI 2230-1 zu entwickeln, die insbesondere die charakteristischen Merkmale gewindeformender Schrauben berücksichtigt.

Abb. 3: Simulation, Temperaturentwicklung während des Gewindefurchprozesses





Oberflächentechnik

DR.-ING.
RÜDIGER REITZ

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

Unserer gesellschaftlichen Verantwortung bewusst

Die Schaffung eines gesellschaftlichen Mehrwerts durch korrosions- und verschleißbeständige Werkstoffsysteme im Sinne einer nachhaltig - technischen Anwendung ist Grundsatz und Antrieb für all unsere Forschungsaktivitäten im Kompetenzbereich Oberflächentechnik.

Diesen Anspruch fest im Blick, haben wir unsere wissenschaftliche Forschungsstrategie in den Kategorien „Energieversorgung und Wasserstoffwirtschaft“, „alternative Antriebe“ und „additives Fertigen“ konsequent ausgebaut. Konkret setzen wir uns aktuell mit Forschungsfragen zur metall-physikalischen Wechselwirkung in Wasserstoffumgebung, der Korrosionsbeständigkeit und Werkstoffintegrität von Schweißverbindungen, der Materialverträglichkeit in klimaneutralen Kraftstoffen und Thermomanagementsystemen zur integrierten Kühlung von Brennstoffzelle und Elektroantrieb auseinander. Neben der Erschaffung einer grundlegenden Wissensbasis im jeweiligen Beanspruchungsszenario gelang die Erarbeitung von Prüfmethode und Leitlinien zur Qualifizierung anforderungsgerechter Werkstoffe im jeweiligen Einsatzgebiet.

Perspektivisch für die nächsten Jahre entwickeln wir darüber hinaus PVD-Schichten, beispielsweise zur Applikation auf biomedizinischen Produkten oder als integrierte Sensoren additiv gefertigter Bauteile und knüpfen damit an eine über viele Jahre aufgebaute Expertise an.

Innovatives Forschen in unseren Kompetenzfeldern

Forschungsschwerpunkte im **Kompetenzfeld Korrosion** sind derzeit die Entwicklung von elektrochemisch-instrumentierten Methoden zur Bestimmung der Wasserstoffadsorption und Quantifizierung des *Permeationsverhaltens* infolge Wasserstoffeintrag, beispielsweise

resultierend aus einer vorangehenden elektrochemischen Korrosion (fertigungsbedingt oder im Betrieb).

- In den beiden Forschungsvorhaben „**PrüfWas**“ und „**InhiBeizNorm**“ werden Methoden zur Bewertung der Festigkeitseigenschaften hochfester Stahlwerkstoffe in Abhängigkeit des vorliegenden Wasserstoffangebots beziehungsweise der Wasserstoffbelastung entwickelt und in etablierte, industriell anerkannte Laststeigerungsverfahren (zum Beispiel Step-Load-Test – SLT) normgerecht überführt.
- Mit dem EU-React Vorhaben „**H₂HT-Lab**“ haben wir unsere Prüfmöglichkeit auf den Bereich Druckwasserstoff für *Hochtemperaturanwendungen* erheblich ausbauen können. Die Entwicklung einer servohydraulischen Prüfeinrichtung, die eine in-Situ-Beaufschlagung mit Druckwasserstoff und erhöhten Temperaturen realisiert, erfolgt in enger Kooperation mit dem Kompetenzbereich Hochtemperaturwerkstoffe. Nach Fertigstellung der Prüfeinrichtung wird eine grundlegende Bewertung der Materialverträglichkeit sowie der metall-physikalischen Integrität für Hochtemperaturanwendungen in Druckwasserstoffumgebung möglich sein.

Im **Kompetenzfeld Betriebsstoffe** setzen wir uns ausschließlich mit Fragen nach medienverträglichen Werkstoffsystemen für eine nachhaltige, klimaneutrale Mobilität auseinander. Das Portfolio unserer Forschungsaktivitäten umfasst dabei die Materialbeständigkeit von kraftstoffführenden Komponenten (unter anderem Tanks und (Pipeline-) Distribution, Gemischbildung, Rail und Einspritzung) und die Kühlmittelverträglichkeit in Thermomanagementsystemen für hybride Antriebe mit dem Verbrennungsmotor, der Brennstoffzelle und batteriebetriebene Elektro-

antriebe. Letzter Aspekt ist Gegenstand innovativer Forschungsanträge, eingebettet in Industriekooperationen und der Betreuung einer externen Doktorarbeit eines namhaften Automobilherstellers.

In laufenden Forschungsvorhaben adressieren wir konkret die nachfolgend skizzierten, anwendungsrelevanten Fragestellungen. Stets im Fokus der Betrachtung ist der wissenschaftliche Anspruch zur Untersuchung der zugrunde liegenden Schädigungsmechanismen und der daraus abzuleitenden Entwicklung optimierter Prüfmethode im Sinne eines industriellen Ergebnistransfers.

Bereits seit einigen Jahren untersuchen wir Korrosionsphänomene, die spezifisch und ausschließlich in Wechselwirkung mit erneuerbaren Kraftstoffen auftreten können. Neben der elektrochemischen Korrosion ist dies vor allem auch die sogenannte *Alkoholatkorrosion*, welche auf die chemische Interaktion von bestimmten Werkstoffklassen (beispielsweise Aluminium) mit Alkoholen als biogene Blendkomponente zu fossilen Kraftstoffen zurückzuführen ist. Ablauf und Ausprägung der Schädigung hängen dabei von einigen Parametern ab: Maßgeblich sind vor allem die Temperatur, die Dauer der Exposition, die Werkstoffzusammensetzung und die konkrete Kraftstoffformulierung. Beispielsweise kann ein gewisser Wasseranteil reaktionshemmend wirken, während korrosionsstimulierende Ionen die Metallauflösung begünstigen. Die jeweiligen Wechselwirkungsgrößen sind zwar phänomenologisch beschrieben. Bislang weitgehend unerforscht sind jedoch die der Korrosionsinitiierung zugrunde liegenden Vorgänge auf mikroskaliger Ebene. An dieser Stelle knüpft das aktuell bei uns laufende Forschungsvorhaben „**AlKoMo II**“ an. Gegenstand dieses von der DFG geförderten Projekts ist es, die komplexe Reaktionsstruktur bei der Alkoholatkorrosion bezüglich der Haupteinfluss- und Wechselwirkungsgrößen zu diskretisieren und daraus ein zunächst statistisch-basiertes Degradationsmodell abzuleiten. Die dafür benötigten Eingangsgrößen erfordern eine sensible Erfassung der Schädigungsparameter. Eine Voraussetzung dafür war die Entwicklung eines Mikroreaktors. In aktuellen Versuchsreihen gelang es, auf Basis eines DoE-Ansatzes die wesentlichen Interaktionsgrößen zu erfassen und quantitativ im Rahmen einer Varianzanalyse einzuordnen.

Neben der grundlegenden Erforschung kraftstoffspezifischer Korrosionsvorgänge untersuchen wir auch ganz anwendungsorientiert die Materialverträglichkeit in synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels). Auf

Grundlage unserer Expertise in der Entwicklung von Prüfmethode zur Beschreibung von elektrochemischen Vorgängen bei Kraftstoffexposition (zum Beispiel Prüfblatt VDA230-207), konnten wir am Beispiel von Oxymethylenether (OME, Dieselsatzkraftstoff) und Dimethylcarbonat/Methylformiat (DMC/MeFo, Blendkomponente für Ottokraftstoffe) für ausgewählte Werkstoffsysteme die Materialverträglichkeit umfassend untersuchen. Die Ergebnisse sind aufgrund des anwendungsorientierten Charakters der Arbeitspakete unmittelbar auf den Feldeinsatz übertragbar. Weiterführende Informationen finden Sie im Teil Forschung.

Neben der Korrosion betrachten wir im **Kompetenzfeld Tribologie** auch Aspekte zu den Verschleißseigenschaften und leiten daraus Maßnahmen für die Applikation funktioneller Schichtsysteme zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit ab.

Beispiel aus einem aktuellen Forschungsvorhaben: Zur Optimierung der Widerstandsfähigkeit von Werkstoffoberflächen gegen Kavitationserosion werden Bauteile häufig mit einer Beschichtung versehen. Dabei ist die Haftung der Beschichtung essentiell im Sinne einer möglichst hohen Beanspruchbarkeit. Haftungsverlust von Beschichtungen tritt häufig an stochastisch verteilten Störstellen von Beschichtungen auf, welche wiederum ihren Ursprung bereits bei der Substratpräparation haben können. Im Rahmen des Projektes „**KavErm**“ wird der selektive Einfluss einer Beanspruchung infolge Kavitationseinwirkung auf die Haftungseigenschaften funktioneller PVD-Beschichtungen vollumfänglich untersucht. Die Materialbeanspruchung wird dabei experimentell durch Kavitationseinwirkung mittels eines Ultraschallkoppelschwingers (UKS) erzeugt. Die ultraschallerzeugenden Sonotroden des UKS werden zur gezielten Einstellung der Kavitation (unter anderem Intensität, Ereignishäufigkeit, Blasengröße) ebenfalls angepasst – insbesondere auch deshalb, um die Untersuchung an einfach konturierten und damit referenzierbaren funktionellen Oberflächen für mögliche pränormative Forschung zu erlauben. Anhand der Ergebnisse ist eine umfassende und produktspezifische Beschreibung der flächigen Haftungseigenschaften der Beschichtungen sowie eine Bewertung der Eignung des Ultraschallkoppelschwingers als anforderungsgerechte Prüfmethode möglich. Insbesondere branchenspezifische KMU wie Beschichter, Bauteillieferanten und Anlagenbauer profitieren von dem Erkenntnisgewinn durch zielgerichtete Produktadaptation in erheblichem Maße. Durch die Einwirkung der Kavitationserosion entstand überwiegend ein erwarteter sukzessiver Abtrag von der

Oberfläche ausgehend. Lokal kam es zu kleinen Ausbrüchen. Diese ersten Schäden bleiben dabei innerhalb der funktions-tragenden a-C-H Decklage. An strukturellen Schwachstellen der Beschichtung sind größere Schichtfragmente ausgebrochen. Die Schicht hat sich dabei zwischen dem Haftvermittler und der funktionstragenden Decklage abgelöst. Ursache sind strukturelle Schwachstellen der Beschichtung. Diese entstehen an kleinen Erhabenheiten der Bauteiloberfläche. Das können anhaftende Partikel sein oder auch Karbidzeilen, welche nach dem Polieren ebenfalls lokal etwas erhaben sind. Das Verfahren eignet sich, um Haftungseigenschaften von Beschichtungen flächig zu bewerten.

Wir denken langfristig – Konkrete Forschungsziele für das Jahr 2023

...und darüber hinaus!

Die gesetzten Forschungsschwerpunkte wollen wir langfristig ausbauen und im Institut kompetenzbereichsübergreifend etablieren. Entsprechend engagieren wir uns in Projekten und Konsortien in Bereichen der Wasserstoffanwendung, erneuerbaren Kraftstoffstoffen, der Werkstoffverträglichkeit in alternativen Antriebssystemen und der Weiterentwicklung von hochintegrierten elektrochemischen Messverfahren (in-Situ Instrumentierung, elektrochemisches Rauschen, lokal-elektrochemische Verfahren und Wasserstoffpermeation).

Konkrete thematische Akzente setzen wir mit unseren beantragten Vorhaben, unter anderem zu den Forschungsthemen

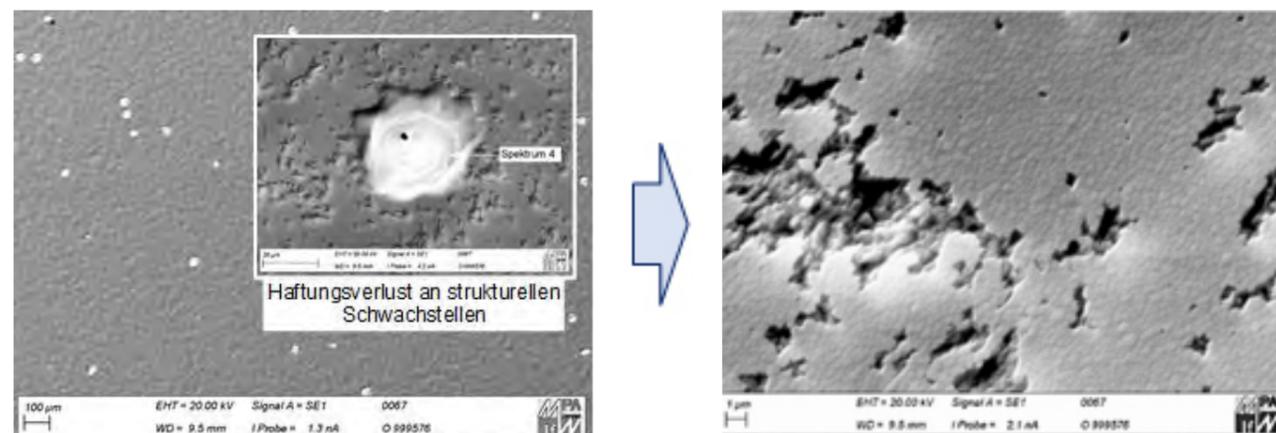
- Materialverträglichkeit von regenerativen Kraftstoffen in der *Pipelineförderung*
- *Ermüdungsfestigkeit* und elektrochemisch - instrumentiertes Monitoring von *Korrosionsinitiation* beziehungsweise *Rissfortschritt* in synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels)
- Werkstoffverträglichkeit und Medienalterung von *Thermoisoliationsfluiden* für den Einsatz in Kühlaggregate-systemen, Elektroantrieben und Brennstoffzellen

- Prüfanlagenentwicklung zur Untersuchung der Bewertung der Materialverträglichkeit und Wechselwirkungseffekten in integrierenden *Thermomanagementsystemen* und Komponenten des *elektrifizierten Antriebsstrangs*.
- Elektrochemisch - instrumentierte Charakterisierung der *Wasserstoffadsorption* und Permeation in Fertigung und im Betrieb
- *Druckwasserstoff* in der Hochtemperaturanwendung und metallphysikalische Interaktion
- Applikation von hochintegrierten Sensoren auf *additiv gefertigten Bauteilen mittels PVD* und 3D-Druck (Laser Metal Deposition)
- *Schweißbarkeit* von höchstfesten Aluminiumlegierungen im Hochvakuum und selektive Charakterisierung der Korrosionsverträglichkeit von Schweißnaht und Wärmeeinflusszone.
- *PVD-Verfahrensoptimierung* von Abscheidung von Titanschichten auf PEEK-Bauteilen für die *biomedizinische* Anwendung

Auch sorgen wir stets für einen nachhaltigen akademischen und industriell-nutzbaren Ergebnistransfer. Neben zahlreichen Veröffentlichungen in einschlägigen Fachjournals, auf internationalen Konferenzen und in den jeweiligen projektbegleitenden Ausschüssen beteiligen wir uns bei namhaften Forschungsnetzwerken der jeweiligen Branche.

Darüber hinaus geben wir in Lehrveranstaltungen und betreuten studentischen Arbeiten unsere neuesten Forschungserkenntnisse an nachfolgende Generationen weiter – stets im Bewusstsein über unserer all unseren Vorhaben übergeordneten gesellschaftlichen Verantwortung.

Abb. 1: DLC Beschichtung (a-C:H mit 30% Wasserstoffanteil) nach Einwirkung einer Kavitationserosion



FORSCHUNG



AMC Neubau auf der Lichtwiese Darmstadt

PROF. DR.-ING.
MATTHIAS OECHSNER

+49 6151 16 - 24 900
matthias.oechsner@tu-
darmstadt.de

UNSERE NEUBAUTEN AUF DER LICHTWIESE: AMC UND CRA

Das "Additive Manufacturing Center" (AMC) als auch der Neubau des „Centers for Reliability Analytics“ (CRA) haben sich im vergangenen Jahr deutlich sichtbar weiterentwickelt. Während beim AMC das Gebäude zum Jahresende nahezu fertig gestellt werden konnte und sich die Arbeiten im Wesentlichen auf die Außenanlage verlagerten, konnten für das CRA die vorbereiteten Arbeiten soweit vorangebracht werden, dass die Genehmigungen für den Bau erteilt und die Ausubarbeiten im Oktober 2022 begonnen werden konnten.

AMC

Trotz vieler Widrigkeiten bezüglich der Verfügbarkeit von Material als auch von Fachkräften auf der Baustelle konnte der Bau des Additive Manufacturing Centers in 2022 nahezu fertig gestellt werden. Die ursprüngliche Planung war gewesen, den Bau zum Jahresende bezugsfertig zu haben, um in 2023 den Betrieb im Gebäude aufzunehmen. Auch wenn das Gebäude zum Jahresende noch nicht voll funktionsfähig war, sind erste Geräte eingezogen und warten derzeit auf die Inbetriebnahme. Die finale Fertigstellung des Gebäudes ist zum Ende März 2023 geplant. Zu dem Zeitpunkt sollen dann auch die Geräte und Anlagen rund um die Additive Fertigung in das Gebäude transferiert sein. Parallel zu den Aktivitäten auf der Baustelle wurde ein Schulungskatalog entwickelt, der das vielfältige Angebot entlang der gesamten Prozesskette einer digital gestützten Produktentstehung enthält. Der Schulungskatalog wurde u. a. auf Basis von Umfragen und Diskussionen mit potenziellen Kunden aus Wirtschaft und Verbänden erstellt, um den Bedarfen nach maßgeschneiderten Angeboten in der Fort- und Weiterbildung bestmöglich gerecht zu werden und so den Technologietransfer aus der Wissenschaft in die Wirtschaft nachhaltig zu unterstützen. Die Schulungsangebote reichen dabei von den Grundlagen der

Konstruktion und der Bauteilgestaltung additiv gefertigter Produkte über deren Fertigung bis in den Bereich der Bauteilprüfung, der Qualitätssicherung und der nachhaltigen Bewertung der Produkte entlang des gesamten Lebenszyklus. Neben der Wirkung nach außen, die das AMC für die TU Darmstadt im Bereich der Additiven Fertigung schafft (siehe hierzu auch den detaillierten Bericht zum AMC auf Seite 28 und den Bericht zum Messeauftritt auf der Formnext 2022 - Seite 65), ist für uns auch die Wirkung nach innen, d. h. in die Universität hinein, von großer Bedeutung. Durch das AMC werden eben nicht nur Anlagen entlang der additiven Prozesskette in einem modernen Gebäude gebündelt sowie Schulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen konzipiert und angeboten, das AMC bietet auch eine Plattform, auf der gemeinsame Forschungsideen synergistisch entwickelt und umgesetzt werden. So konnten in 2022 mehr als zehn Forschungsanträge im Verbund beteiligter Fachgebiete und Arbeitsgruppen erarbeitet und eingereicht werden und bereits die Arbeit an sechs Vorhaben gemeinsam begonnen werden. Schon vor der Eröffnung des Zentrums zeigt sich so eine sehr erfolgreiche Zusammenarbeit der beteiligten Partner. Nähere Informationen zum AMC finden Sie auf den nachfolgenden Seiten.

Additive Manufacturing Center

Das AMC hat sich zum Ziel gesetzt, eine Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu bilden und so insbesondere regionalen Unternehmen einen Zugang zum technologischen Potential der TU Darmstadt in den Technologiefeldern Additive Fertigung und Digitalisierung zu ermöglichen.

CRA

Durch das CRA wird der seit vielen Jahren diskutierte Umzug von MPA und IfW aus der Grafenstraße in ein modernes Gebäude auf der Lichtwiese endlich Realität. Das CRA bietet dabei nicht nur die technische Infrastruktur, die für eine Weiterentwicklung und strategische Ausrichtung unserer vielfältigen Aktivitäten in den Bereichen der Entwicklung und Bewertung von Werkstoffen und Bauteilen notwendig ist, das CRA wird zudem auch vermehrt Synergien zwischen unseren Kompetenzbereichen und zwischen uns und den Fachgebieten und Arbeitsgruppen auf der Lichtwiese ermöglichen. Darüber hinaus wird das CRA auch einen maßgeblichen Beitrag zur Erreichung der energetischen Einsparziele für die gesamte Universität leisten und den Wärme- als auch Strombedarf von MPA und IfW nachhaltig reduzieren.

Die Arbeiten am Center for Reliability Analytics liegen dabei planmäßig hinter den Arbeiten zum AMC zurück. Während das AMC in 2023 in Betrieb gehen soll, ist die Fertigstellung und Inbetriebnahme des CRA in 2025 geplant. Dann soll auch der Umzug von MPA und IfW aus der Stadtmitte in das neue Gebäude erfolgen. Wie bereits erwähnt, konnten in 2022 die Planungsarbeiten so weit vorangetrieben werden, dass

eine Baugenehmigung eingeholt und mit den Erdarbeiten begonnen werden konnten. Die Vorbereitungen zum Ein- und Umzug laufen dabei parallel bereits auf Hochtouren, um einen möglichst reibungsfreien Umzug sicherzustellen und um die Arbeiten an der MPA und am IfW ohne unnötige Unterbrechungen fortsetzen zu können. Die detaillierte Planung der neuen Laborräume und Versuchshallen konnte in 2022 abgeschlossen werden, so dass die Bedarfe nach Anschlüssen und Medienversorgung für die einzelnen Maschinen und Anlagen feststehen und von den Fachplanern übernommen werden konnten. Darüber hinaus konnten die Bedarfe nach Modernisierung und Ertüchtigung einzelner Anlagen erfasst und deren Umsetzung auf den Weg gebracht werden. Der in 2021 bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingereichte Beschaffungsantrag für Großgeräte (Computertomograph und Rasterelektronenmikroskop mit einer Ionenfeinstrahlanlage) wurde bewilligt. Der Computertomograph wurde bereits geliefert und wartet darauf, in wenigen Wochen im Gebäudeteil des AMC in Betrieb zu gehen.

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 umfangreiche Analyse von Daten, die entlang des gesamten Produktlebenszyklus eines Bauteils entstehen und erfasst werden, als wesentliches Merkmal dieser Bewertungsmethode heraus zu stellen.



Nickl & Partner Architekten, München

DR.-ING.
MICHAEL KRÄMER

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

ADDITIVE MANUFACTURING CENTER - AMC

Das „Additive Manufacturing Center“ wächst und gedeiht. Im Jahr 2022 konnten wichtige Meilensteine für die Einrichtung des neuen Technologie-Transferzentrums für Additive Fertigung und Digitale Prozessketten erreicht werden.

Mit dem Ziel, einen zentralen Ansprechpartner für Unternehmen und Verbände bei Fragestellungen zu diesen beiden Themengebieten zu etablieren, engagieren sich Fachgebiete, aus Maschinenbau, Materialwissenschaften sowie Bau- und Umweltingenieurwesen in diesem EU - geförderten TU-Gemeinschaftsprojekt. So sollen innovative regionale Unternehmen beginnend 2023 in direkter Kooperation mit den am AMC beteiligten Forschergruppen alle Schritte einer digitalen Produktionskette, vom initialen Design bis zur Qualitätssicherung, im Technikums-Maßstab erproben. Getragen wird dieses ambitionierte Projekt durch das Hessische Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen, sowie die Wirtschafts- und Infrastrukturbank Hessen. Das Projektbudget des AMC umfasst insgesamt rund 18 Mio. EUR, welche zu 50 % aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert wird.

Das Themenfeld umfasst dabei ein großes Spektrum in Bezug auf Werkstoffklassen (Kunststoff, Metall, Mineralische Werkstoffe, Funktionsmaterialien) als auch Verfahren (SLM, SLS, Lithographie, FDM, ...) und beinhaltet auch Analyse- und Prüfeinrichtungen zur Werkstoff und Bauteilprüfung, wie Micro - Computertomograph und Nanohärtemessung. Immer mehr kristallisiert sich dabei ein Fokus auf pulverbasierte Fertigungsverfahren heraus.

Diese Spezialisierung und das Zusammenwachsen der Arbeitsgruppen zur Additiven Fertigung aus den Fachgebieten im AMC spiegelt sich auch in der immer größer werdenden

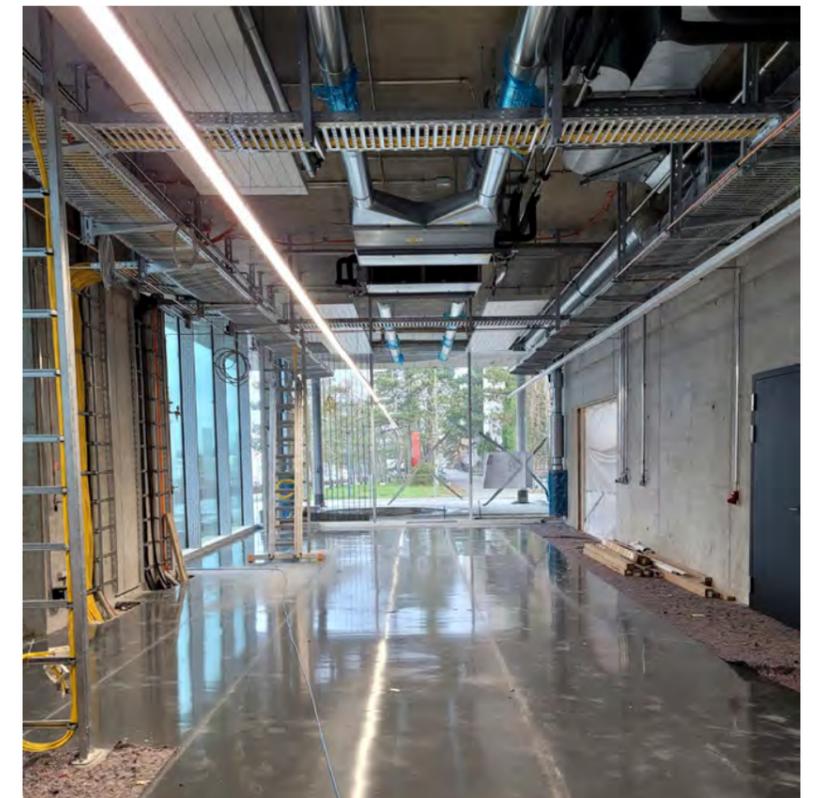
Zahl von Forschungs- und Entwicklungsprojekten aus dem Umfeld des AMC wieder. So konnte bereits vor dem Startschuss durch Großgeräteinitiativen der TU Darmstadt und der DFG die Finanzierung von zwei neuen LPBF-Anlagen (Laser Powder Bed Fusion) mit zukunftsweisenden Technologien gesichert werden. Zunehmend werden auch Drittmittelprojekte in Kooperation mehrerer Fachgebiete der TU Darmstadt beantragt und durchgeführt. Beispiele hierfür:

- addLight (BMW – TTP LB) – Zuverlässigkeit von Gitterstrukturen und topologieoptimierten Geometrien (MPA-IfW, PTW, KLuB, pmd)
- QAMEA (LOEWE3) – Elementaranalyse im Pulverzyklus (MPA-IfW, PTW)
- RiFoKaDD (DISTRAL) – LPBF im Formenbau (MPA-IfW, PTW)
- QuamM (FIF) - Produktionsweg für Dauermagnete durch Additive Fertigungsverfahren (PTW, Funktionale Materialien)
- ML-S-LeAF (BMW – TTP LB) – Entwicklung von Machine Learning-Algorithmen auf Basis virtueller Schalldaten für den Leichtbau zur Qualitätssicherung in der Additiven Fertigung (PTW, SAM)
- DFG/CAPES (Bra) – Kooperation zu Digitalen Zwillingen in der AM (PTW, DiK)

Diese in 2021 und 2022 gestarteten Projekte liefern inzwischen sowohl Produkt- und Prozessinnovationen, die in Transferprojekten und Schulungen an interessierte Mitarbeitende in der Industrie vermittelt werden können. Nach Ende der Pandemiebedingungen konnten in 2022 diese Inhalte auch auf in wissenschaftlichen Kongressen und Fachmessen wie der „MSE 2022“ und „Formnext 2022“ oder dem „Hessischen Innovationskongress“ präsentiert werden.

Hier traten die Institute des AMC unter „gemeinsamer Flagge“ auf und steigerten den Bekanntheitsgrad der Aktivitäten der TU Darmstadt auf dem Gebiet der Additiven Fertigung.

Das mit der Einrichtung des Zentrums verbundene Bauvorhaben schritt gleichfalls erfolgreich voran. Nachdem im Mai 2021 mit den Erdbauarbeiten begonnen wurde, konnte bis zum Jahresende 2022 das Gebäude fast vollständig fertiggestellt werden. Aufgrund von Materialknappheit und Energiekrise verschob sich die Fertigstellung einiger Gewerke um wenige Wochen, so dass der Bezug und die Eröffnung des Zentrums nun ins Frühjahr 2023 fällt. Im Verlauf des Jahres konnten sich jedoch bereits einige Mitarbeitende von MPA-IfW davon überzeugen, dass in dem entstehenden Gebäude Raum und exzellente Bedingungen für alle Arbeitsbereiche entlang der digitalen Produktionskette, von der computergestützten Konstruktion über Rohstoff - Aufbereitung und den Bauprozess bis zur Nachbereitung und Qualitätssicherung, entsteht. Zusätzlich entstehen Räume für gemeinschaftliche Workshops und kurzzeitige Zusammenarbeiten von Projektgruppen, sowie Büros für WissenschaftlerInnen und TechnikerInnen, die mit den Anlagen arbeiten.



Labore und Büros des AMC-Gebäudes stehen für den Bezug mit Anlagen und Personal bereit



STRATEGIEFELD

Additive Fertigung

DR.-ING.
MICHAEL KRÄMER

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

Im Strategiefeld Additive Fertigung befassen sich Mitarbeitende aus nahezu allen Kompetenzbereichen mit Fragen der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von additiv gefertigten Bauteilen und der Qualifizierung neuer Prozessrouten für mögliche zukünftige Anwendungen. Dabei werden sowohl Glas, als auch Kunststoffe und Metalle betrachtet. Der Herstellungsprozess sowie die verwendeten Ausgangsstoffe spielen für die Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile und somit auch für deren Lebensdauer eine wesentliche Rolle. Aufgrund der nahezu durchgängigen Digitalisierung der einzelnen Schritte in der additiven Prozesskette können die direkten Zusammenhänge zwischen Fertigungsparametern und Werkstoffverhalten schneller erforscht und eindeutiger beschrieben werden, als dies in traditionellen Fertigungsrouten über langwierige empirische Untersuchungen möglich ist. Schwerpunkt der Forschungen an MPA-IfW ist es, die Verknüpfungen von Prozessparametern und Eigenschaften durch Berechnungsmodelle und Best-Practices zu ermöglichen. Dennoch sind gerade, was die Auslegung und die Zuverlässigkeit additiver Bauteile im industriellen Einsatz angeht, noch viele Fragen offen, für welche das Zentrum für Konstruktionswerkstoffe aufgrund seiner historisch-gewachsenen Kompetenz weiterhin ein gefragter Ansprechpartner ist.

Aktuelles Thema auf dem Gebiet der metallischen Werkstoffe ist die bauteilnahe Materialqualifizierung von additiv hergestellten Komponenten. Im Projekt „addLight“ arbeitet das Institut zusammen mit drei weiteren Fachgebieten der TU Darmstadt an der Integration von additiven Leichtbauweisen, wie Topologieoptimierung und Gitterstrukturen, in zyklisch belastete Bauteile im Automobilbau. Im Hochtemperatur-Einsatz-

bereich (z. B. stationäre Gasturbine, Flugzeugtriebwerk) wird innerhalb des Forschungsvorhabens „LPBF-Hochtemperaturlebensdauer – Entwicklung von Konzepten zur Ermittlung von Kennwerten zur Bewertung von additiv gefertigten Komponenten für den Hochtemperatureinsatz“ ein spezielles Prüfkonzept für die Absicherung des Langzeitverhaltens z. B. additiv gefertigter Turbinenbauteile entwickelt. Des Weiteren wurde das Forschungsprojekt „SPACE AM – Simulation und Fertigung eines leistungs-optimierten Triebwerkdemonstrators mittels perfektionierter Additiver Fertigung“, unter anderem in Kooperation mit der RWTH Aachen und dem bayrischen Raumfahrtunternehmen „ISAR Aerospace“ begonnen. 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 – Qualifizierung der additiven Fertigung für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte“ und „QAMEA – Qualitätsbewertung metallischer AM-Pulver durch Elementaranalyse“ sollen im geplanten Projekt „QUAKOM 3D – Sicherer Einsatz additiv hergestellter Druckgeräte durch verbesserte Qualitätssicherungs- und Konstruktionsmaßnahmen“ fortgeführt werden.

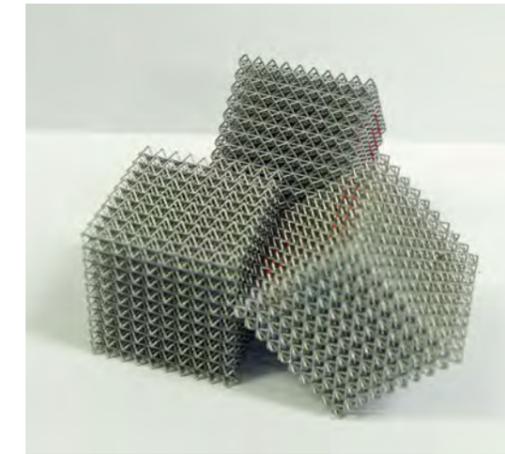
Die Aktivitäten auf dem Gebiet der Kunststoffe sind die Funktionalisierung von additiv gefertigten Kunststoffbauteilen durch galvanische Schichten sowie die Entwicklung von „RIFOKADD – Ressourceneffizienten Innovativen Formwerkzeugen für die Kunststoffverarbeitung durch Additive Fertigung und

Digitalisierung“. Zukünftig werden die Themen Oberflächenfunktionalisierung und hybride Fertigungsverfahren stärker in den Fokus der Arbeiten kommen.

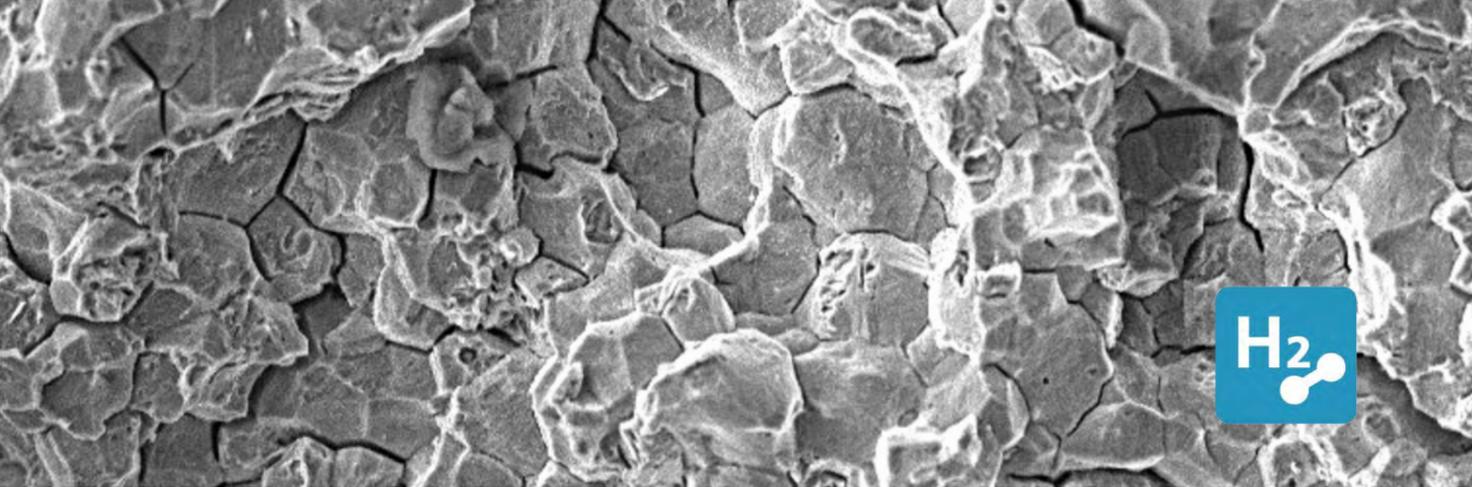
Im Bereich des Werkstoffes Glas wird ein Laboraufbau in Kooperation mit dem Institut für Statik und Konstruktion zur additiven Herstellung von Glasstrukturen auf Flachglas entworfen und umgesetzt. In dieses Projekt sind Kolleginnen und Kollegen aus drei Kompetenzbereichen unseres Hauses eingebunden. Dieser Laboraufbau wird zur Bearbeitung des DFG-Vorhabens „Schmelzschichten von Glas auf Flachglas“ eingesetzt.

Um das Forschungsprofil von MPA-IfW im Bereich der Additiven Fertigung abzustimmen und weiterhin erfolgreich in der Beantragung zukünftiger Forschungsprojekte zu sein, stimmen sich die Mitglieder des Strategiefelds in regelmäßigen Sitzungen ab, informieren über Entwicklungen in Gremien und Fachausschüssen und pflegen eine gemeinsame Literatursammlung zur Erstellung von Anträgen.

Die interdisziplinäre Aufstellung des Teams im Strategiefeld „Additive Fertigung“, die zunehmend intensive Vernetzung mit anderen Fachgebieten der TU Darmstadt durch die Kooperation zwischen AMC und externen Partnern sowie die umfangreiche interne Unterstützung durch Personal, Laboren und die Werkstätten des Hauses ermöglichen es, Lösungen für diese komplexen Themen zu erarbeiten und so das Profil des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe zu schärfen.



Gitterstrukturen sind ein vielversprechendes Konzept für additiv hergestellte Leichtbauteile. Im Projekt addlight werden an solchen Würfelproben deren Belastbarkeit untersucht.



STRATEGIEFELD Wasserstoff

DR.-ING.
Olesya Gosheva

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

Aus dem Jahr 2022 sind im Strategiefeld Wasserstoff, neben der fortlaufenden erfolgreichen Bearbeitung von Projekten bezüglich des Werkstoffverhaltens unter Wasserstoffeintrag, die Errichtung einer Laboreinrichtung zur Werkstoffuntersuchung unter Druckwasserstoffbeaufschlagung sowie der Ausbau der internen Zusammenarbeit hervorzuheben. Unsere Aktivitäten im Einzelnen:

- Im Projekt „**PrüfWas** – Optimierung des Prüfverfahrens zum umweltbedingten wasserstoffinduzierten Sprödbruchverhalten von hochfesten Schraubenwerkstoffen mit Beschichtungssystemen auf Zinkbasis“ werden systematische grundlegende Untersuchungen der einzelnen Prüfparameter, wie zum Beispiel die Beanspruchungszeit oder Höhe des Wasserstoffangebotes als Einflussgrößen auf Mechanismen der umwelt- bzw. betriebsbedingten Wasserstoffversprödung, durchgeführt. Neben reduziertem Versuchsaufwand wird auch eine Erhöhung der statistischen Sicherheit und somit der Aussagekraft der Versuchsergebnisse angestrebt. Bei Interesse können die Projektbefunde im Teil „Forschung“ eingesehen werden.
- Im Projekt „**MischBruchFaktor** – Einfluss der Mikrostruktur von hochfesten Stahlwerkstoffen (32CrB4, 23MnB3, 34CrNiMo4) auf die H-Versprödungsanfälligkeit“ steht die Korrelation zwischen Mikrostruktur und Wasserstoffversprödungsanfälligkeit im Mittelpunkt. Eine systematische Untersuchung der werkstoffspezifischen Unterschiede und deren Wirkung bei der Ausprägung der wasserstoffinduzierten Schädigung wird durchgeführt. Die angestrebten

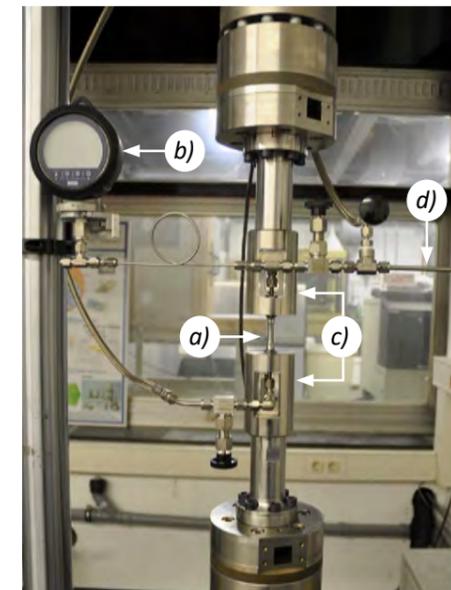
Projektergebnisse werden zum grundlegenden Verständnis über die Schädigungsmechanismen und die Ableitung möglicher werkstofftechnischer Abhilfemaßnahmen beitragen.

- Ist es möglich, durch Anpassungen im Fertigungsprozess die gesamte Anfälligkeit von hochfesten Schrauben gegenüber Wasserstoffversprödung zu minimieren? Diese Frage wird im Projekt „**Kalo-H-Korr** - Einfluss des Kaltumformprozesses hochfester Schrauben auf die lokale Anfälligkeit gegenüber einer wasserstoffinduzierten (H) Spannungsrisskorrosion“ adressiert. Als Haupteinflussgrößen werden dabei der Kaltumformungsgrad und die Kerbformzahl in Betracht gezogen.
- Im aktuell begonnenen Projekt „**InhiBeizNorm** – Datengrundlage für die Erarbeitung eines Normentwurfs DIN 50940 Teil 2“ werden die Standard-Prüfungen für die Bewertung von Inhibitorenwirkung zur Vermeidung von fertigungsbedingter Wasserstoffversprödungsanfälligkeit hochfester Bauteile bei einem galvanischen Beschichtungsprozess systematisch untersucht. Es werden unterschiedliche praxisrelevante Beizinhibitoren auf werkstoffspezifische Eignung für einen kontrollierten Beizprozess überprüft. Im Laufe des Projektes werden betriebspezifische Einflussgrößen auf das resultierende Wasserstoffgefährdungspotential identifiziert und quantifiziert. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden unmittelbar bei dem Norm-Entwurf DIN 50940 Teil 2 ihre Verwendung finden.

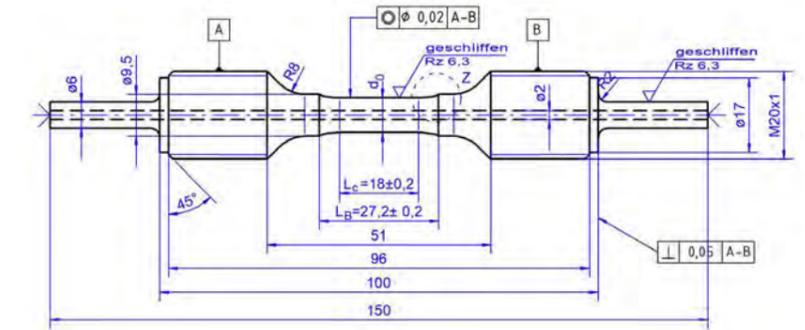
Aufgrund der aktuellen wirtschaftspolitischen Situation hat Wasserstoff als möglicher technologieübergreifender Energieträger gesamtgesellschaftlich drastisch an Bedeutung gewonnen. Dementsprechend sind die Aspekte der Werkstoffintegrität unter Wasserstoffeinwirkung, unter anderem unter Druckwasserstoffatmosphären, in den Vordergrund gerückt.

Im Rahmen des Projektes H2HT-Testing Lab, das im Rahmen einer europäischen Initiative REACT-EU finanziert wurde, werden im Institut vier Prüfstände für die Untersuchung des Werkstoffverhaltens unter Druckwasserstoffbeaufschlagung eingerichtet. Konkret handelt es sich um zwei Auslagerungsprüfstände, die

Werkstoffuntersuchungen bei bis zu 100 mbar H₂ und 1.400 °C (Glühofen) und bei bis zu 300 bar H₂ und 400 °C (Druckautoklav) ermöglichen. Des Weiteren wurde ein Prüfstand für die mechanischen Untersuchungen an mit Druckwasserstoff gefüllten Hohlproben unter zyklischer und statischer Last errichtet, Bild 1. Die bereits am Institut verwendete Messzelle für die Wasserstoffpermeation^{1,2} wird auf die Druckwasserstoffbeaufschlagung erweitert. Somit wird am Institut die notwendige Infrastruktur geschaffen, mit der neu entstandene, Bedarfe seitens Industrie hinsichtlich der werkstofftechnischen Untersuchungen gedeckt werden können.



- a) Hohlprobe gefüllt mit Wasserstoffgas
b) Drucküberwachungssensor mit Aufzeichnungsfunktion
c) Swagelok-Verschraubung
d) Stickstoff-Leitung zum Spülen der Probe





KURZBERICHTE ZU ABGESCHLOSSENEN FORSCHUNGSPROJEKTEN 2022

STRATEGIEFELD Digitalisierung

DR.-ING. FELIX KÖLZOW

+49 6151 16 - 25 117 digitalisierung@tu-darmstadt.de

Im Kalenderjahr 2022 wurde die Strategie aus den Vorjahren 2020 und 2021 fortgesetzt. Dies beinhaltet im wesentlichen den Aufbau einer auf quelloffener Software basierten Speicherungs- und Berechnungsinfrastruktur. Das Ziel ist es, unter anderem eine möglichst große Flexibilität in Nutzung dieser Infrastruktur als auch eine gewisse Herstellerunabhängigkeit bei der Hardware sowie beim Software-support zu erreichen.

Die Speicherung der Daten erfolgt weiterhin über das quelloffene verteilte Netzwerk - Speichersystem (Red Hat Gluster Storage). Die Arbeiten am Red Hat Gluster Storage können als abgeschlossen betrachtet werden. Dieses System stellt unter anderem einen Speicherbereich für Forschungsdaten zur Verfügung. Im Hinblick auf das Forschungsdatenmanagement haben weitere Abstimmungen mit den Konsortien NFDI4Ing und NFDI-MatWerk stattgefunden. Einige konkrete Anwendungsfälle sollen in 2023 gemeinsam untersucht werden.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit dem teil-quelloffenen, parallelen Dateisystem BeeGFS wurden ausgewählte Hardwareressourcen zusammengelegt und ergänzt. Somit steht seit Anfang des Jahres 2022 ein weitestgehend homogener Cluster für die performante Speicherung von Simulationsdaten zur Verfügung.

Für die Verwaltung einer Vielzahl an Berechnungen wird weiterhin der quelloffene Workload-Manager HTCondor verwendet. Gegen Ende des Jahres erfolgte ein Update von HTCondor auf die aktuellste Version, sodass nun auch Berechnungen auf Grafikkarten entsprechend verwaltet werden können.

Der Zugriff auf wissenschaftliche Software, CAE- und FEM - Programme erfolgt weiterhin über sogenannte Visualisierungsknoten unter Nutzung des Virtual-Network-Computings (VNC). Aufgrund verschiedener Anforderungen stehen auch verschiedene Visualisierungsknoten mit unterschiedlichen Betriebssystemen, zumeist rpm-basiert, zur Verfügung. Die Einrichtung des Virtual-Network-Computings geschieht nun für neue Visualisierungsknoten vollständig automatisiert. Der Zugriff durch den Benutzer selbst erfolgt ausschließlich über eine Zwei - Faktor - Authentifizierung (TOTP).

Grundlegende Planungen bezüglich der Netzwerkinfrastruktur im Hinblick auf das AMC und das CRA haben begonnen und stehen naturgemäß in enger Abstimmung mit dem Hochschulrechenzentrum (HRZ).

QUALITÄTSMESSUNG METALLISCHER AM-PULVER DURCH ELEMENTARANALYSE (QAMEA)

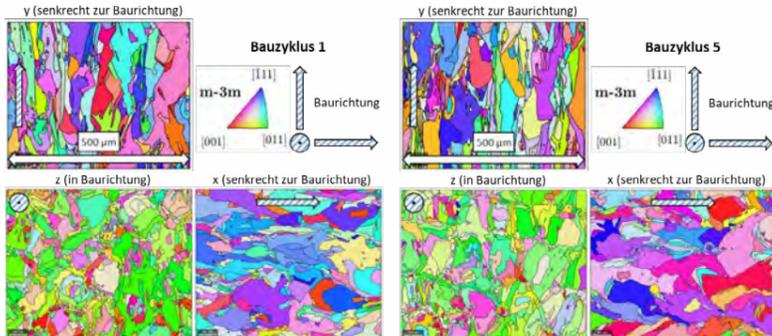
Werkstoffanalytik

Additive Manufacturing (AM) ist aktuell eine der am stärksten wachsenden Technologien in der industriellen Produktion. Dabei hat das Laser-Powder-Bed-Fusion-Verfahren (LPBF) den größten Marktanteil im Bereich der Fertigung metallischer Bauteile. Dabei wird meist aber nur ein geringer Anteil des sich im Bauraum befindlichen Pulvers für das Bauteil prozessiert. Der weitaus größte Teil des Pulvers könnte nach entsprechender Qualifizierung wiederverwendet werden. Für Unternehmen spielt dies eine enorme wirtschaftliche Rolle, da das Pulver als Ausgangsmaterial einen großen Teil der Kosten verursacht. Es besteht daher Bedarf nach einem System für die kosteneffiziente und bedienerfreundliche Analyse der chemischen Zusammensetzung von Werkstoffpulvern für den Bereich der Additiven Fertigung.

Ziel des Projektes QAMEA ist, den Einfluss der Pulverrezyklierung beim Pulverbettbasierten Schmelzen mit Laserstrahl (PBF-LB/M) auf die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Dabei soll ein QAMEA-Workflow entstehen, der für die Qualitätssicherung beim PBF-LB/M genutzt werden kann.

Im Projekt wurden fünf Herstellungszyklen unter Rezyklierung des Pulvermaterials mit dem Material 316L auf einer PBF LB/M Anlage durchgeführt. Dabei wurden Pulverproben entnommen, um die Veränderung der chemischen Zusammensetzung zu untersuchen. Darüber hinaus wurden Proben für die chemische und mechanische Prüfung additiv hergestellt und untersucht. Die chemischen Untersuchungen des Pulvers, aber auch die der additiv gefertigten Proben, zeigen eine signifikante Steigerung des Sauerstoffgehaltes mit zunehmender Rezyklierung. Alle anderen untersuchten chemischen Elemente Stickstoff, Wasserstoff, Kohlenstoff und Schwefel als auch

die chemische Zusammensetzung der Legierungsbestandteile zeigen keine signifikanten Veränderungen bei Wiederverwendung des Pulvermaterials. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften im quasi-statischen Zugversuch, Kerbschlagbiegeversuch sowie mittels Härtemessungen zeigen keine Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Rezyklierung des Pulvermaterials. Zukünftige Forschungen in diesem Bereich könnten den Einfluss der Prozessparameter auf die chemische Zusammensetzung des Pulvers unter Rezyklierung untersuchen. Grenzen für die Rezyklierung sowie Grenzwerte für die Veränderung der chemischen Zusammensetzung bis zu einer messbaren Veränderung der mechanischen Eigenschaften könnten durch eine erhöhte Rezyklierung mit mehr Bauzyklen erarbeitet werden.



Mittels EBSD erstellte Kornorientierungsmaps des mittels PBF-LB/M hergestellten Werkstoffs 316L in Proben des Bauzyklus 1 (links) und des Bauzyklus 5 (rechts) in unterschiedliche Richtungen x, y und z relativ zur Baurichtung

QUALIFIZIERUNG DER ADDITIVEN FERTIGUNG FÜR DIE HERSTELLUNG VERFAHRENSTECHNISCHER DRUCKGERÄTE

Additive Fertigungsverfahren, insbesondere das Pulverbettbasierte Laser-Strahlschmelzen (PBF-LB/M), ermöglichen die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien, die konventionell bisher nur sehr kosten- und/oder zeitintensiv hergestellt oder teilweise überhaupt nicht realisiert werden können.

Während in zahlreichen Industriezweigen die Einsatztiefe von PBF-LB/M-Verfahren stark zunimmt, bestehen für die Fertigung von Bauteilen für Druckgeräte noch Hemmnisse und Sicherheitsbedenken hinsichtlich des Einsatzes dieser Technologien. Fehlende einheitliche und akzeptierte Standards und Normen zur Erfüllung der Druckgeräterichtlinie für den Bereich der additiven Fertigungsverfahren von Druckgeräten stellen ein gravierendes Hemmnis für die Akzeptanz und schlussendlich den Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Bereich der Druckgeräte dar.

Aufgrund der fehlenden, validierten Materialeigenschaften, die zur Berechnung eines Druckgerätes benötigt werden, reduziert sich die Ausschöpfung der Potenziale des PBF-LB/M Prozesses in derzeitigen Anwendungen maßgeblich. Darüber hinaus erhöhen sich gleichzeitig die Sicherheitsbedenken, die gegen eine Nutzung dieser Fertigungstechnologie bestehen.

Die in dem beantragten Projekt zu erzielenden Ergebnisse bilden die Grundlage für die Etablierung von PBF-LB/M -Verfahren zur Herstellung von Druckgeräten. Dazu sollen für die richtlinienkonforme Fertigung von Druckgeräten entsprechende Handlungsempfehlungen für einen prozesssicheren und wirtschaftlichen Einsatz des PBF-LB/M - Verfahrens zur Herstellung von Druckgeräten erarbeitet werden, die sowohl die Bauteilauslegung als auch die Bauteilprüfung, Risikobeurteilung und Tolerierung der Prozessparameter berücksichtigen.

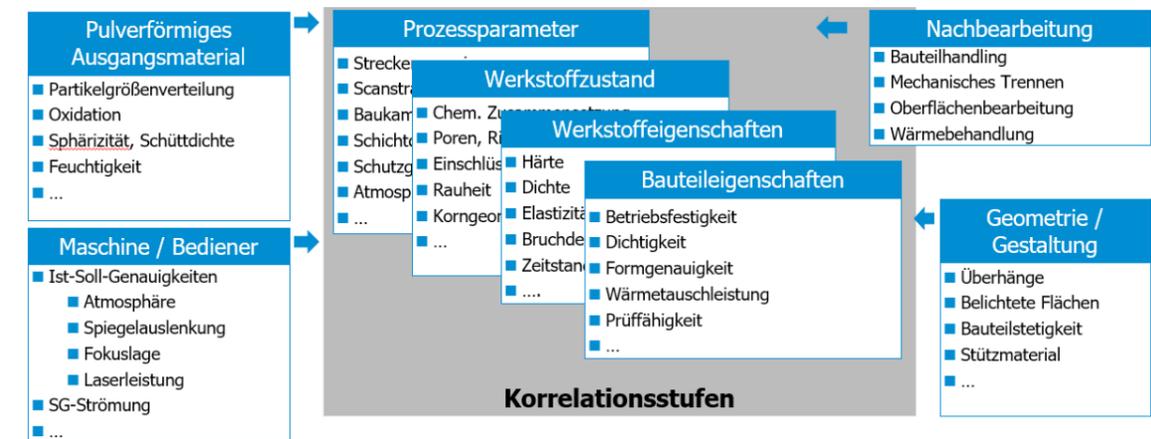
Die Zielsetzung des Projekts ist die Erschließung des Laserstrahlschmelzens als additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von verfahrenstechnischen Druckgeräten und die dementsprechende Erweiterung des Einsatzspektrums dieser Technologie. Eine grundlegende Voraussetzung hierfür ist das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Geometrie, Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften. Im Fokus des Projekts liegt daher die Erarbeitung von Korrelationen zwischen Werkstoffzustand und Werkstoffeigenschaften mit dem Ziel, kennwertbasiert Rückschlüsse auf auslegungsrelevante Kenngrößen zu ziehen.

Ein wesentliches Ergebnis des Projekts ist die Entwicklung des Wandungs- und Orientierungsabhängigen Material (WOrM-) Modells zur Erfassung und Vorhersage des Werkstoffzustands in Abhängigkeit der Wandungsmerkmale. Dieses erlaubt Rückschlüsse von Wandungsmerkmalen (Neigung, Wandstärke und Ausrichtung) auf Werkstoffzustand (Porosität, Rauheit und Kornstruktur) sowie auf Werkstoffeigenschaften (Zugfestigkeit, Dehngrenze, Bruchdehnung, Härte) ermöglichen soll. Das WOrM-Modell umfasst hierbei ein Untersuchungskonzept zur strukturierten Betrachtung der Korrelationen zwischen Geometrie und Werkstoffzustand sowie Werkstoffeigenschaften. Es stellt keine quantifizierte formelbasierte Vorhersage der Werkstoffkennwerte im Rahmen einer konstruktiven Auslegung eines verfahrenstechnischen Druckgeräts dar. Auch wurden integrierbare Funktionen berücksichtigt. Am Beispiel einer Sollbruchstelle durch eine Kerbe wurde gezeigt, dass Geometrien existieren, die den Ort des Versagens sicher vorherbestimmen und gleichzeitig notwendige Festigkeitsnachweise erbringen können. Eine individuelle rechnerische und experimentelle Betrachtung ist

notwendig. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass der Stopp und die Änderung der Ausbreitungsrichtung des Versagens (Rissfortschritt) bei Überbelastung nur in Grenzen funktioniert und weiterer Betrachtung bedarf.

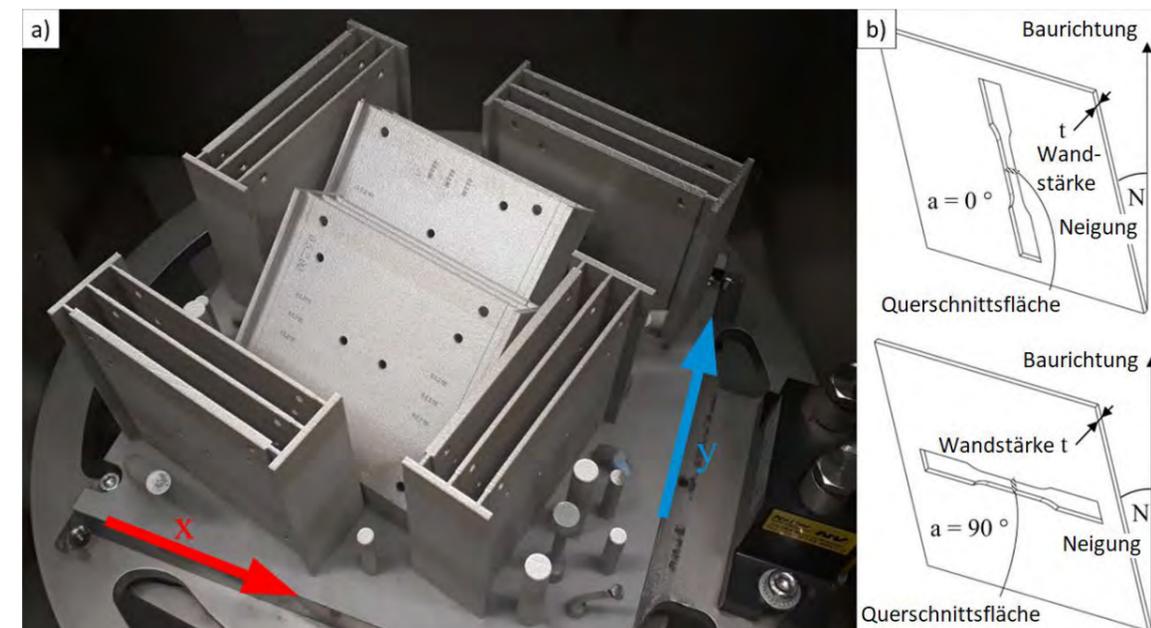
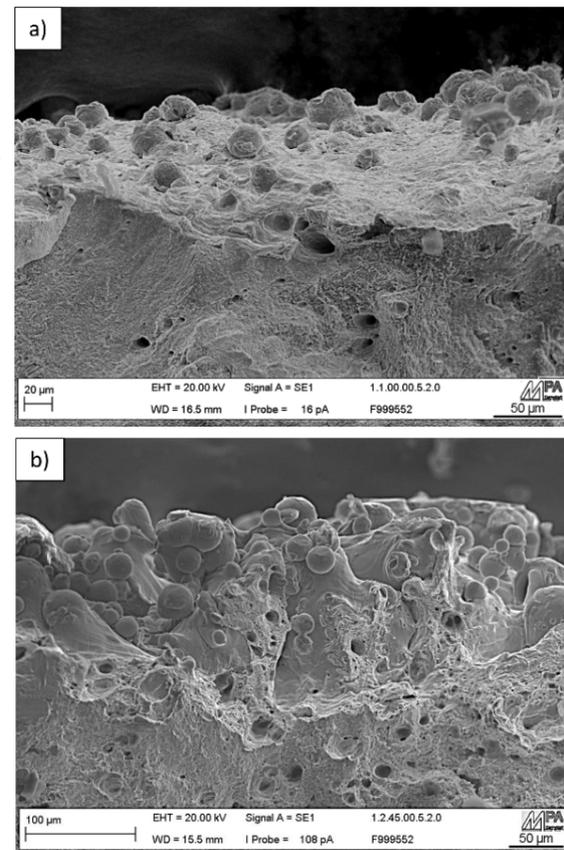
Ein weiteres Projektergebnis ist die Entwicklung eines Universalprüfkörpers für additiv hergestellte Druckgeräte. Dieser beinhaltet geometrische Merkmale und Proben zur Erfassung mechanischer Kennwerte, Abbildungsgenauigkeiten, der allgemeinen Prozessstabilität, der Charakterisierung des Pulverwerkstoffs sowie die Möglichkeit einer Bauteilprüfung.

Anhand der Untersuchungen kann eine Bewertung des Werkstoffzustands und der Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von Wandungsmerkmalen, wie sie für Druckgeräte vorkommen, durchgeführt werden. Desweiteren erlaubt die im Projekt beschriebene Vorgehensweise eine schlanke Qualifizierung eines Fertigungssystems und ermöglicht eine initiale Erhebung einer Datenbasis für die Werkstoff- und Prozessqualifizierung mit geringem Aufwand. Ein Folgeprojekt wurde in 2022 beantragt, welches mittlerweile bewilligt ist. Wir erwarten den Projektstart für das erste Quartal 2023.



Übersicht über das System Laserstrahlschmelzen und den definierten Projektumfang

Beispielhafte REM-Aufnahmen der Oberfläche von additiv gefertigten Zugproben mit einem Neigungswinkel von (a) 0° und (b) 45° im Bereich der Downskin Fläche



(a) Fertigungsanordnung der Proben auf der Bauplattform mit Pulverauftrag aus der x-Richtung (roter Pfeil) und Argon-Prozessgasfluss aus der y-Richtung (blauer Pfeil); (b) schematischer Überblick über die in dieser Untersuchung verwendeten Probenparameter Neigungswinkel (N), Ausrichtung (a), Wandstärke (t) und Querschnittsfläche, dargestellt durch den äquivalenten Durchmesser (D).

WEITERENTWICKLUNG UND ERTÜCHTIGUNG TiMgSEN-BASIERTER PVD-SCHICHTEN ZUR VERBESSERUNG DES KORROSIONS- UND VERSCHLEIßSCHUTZES UN- UND NIEDRIGLEGIERTER STÄHLE

Funktionelle Beschichtungen stellen in allen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus eine Schlüsseltechnologie zur Entwicklung nachhaltiger und innovativer Werkstoffkonzepte dar und sind unverzichtbar, um die gesetzlich festgelegten Emissionsziele zu erreichen. Die heutige Marktdominanz galvanischer Überzüge und Lackierungen wird durch immer strengere Auflagen zum Gesundheits- und Umweltschutz zunehmend reduziert. Dies eröffnet alternativen Beschichtungsverfahren, die mit geringerem Betriebsstoffeinsatz und ohne toxische Materialien auskommen, ausgezeichnete Markteintrittschancen. Insbesondere der PVD-Technologie bieten sich sehr gute Chancen für ein breites Anwendungsspektrum, um z. B. Hartchromschichten zu ersetzen. Im Vorgängerprojekt IGF 19124N wurden neuartige PVD-Beschichtungskonzepte auf Basis von TiMgGdN entwickelt, die hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit mit Hartverchromungen wettbewerbsfähig und konventionellen PVD-Schichten überlegen sind.

Das Ziel dieses Projekts ist die Weiterentwicklung und Ertüchtigung von TiMgSEN-basierten PVD-Schichten (SE: Seltene Erden) zur Verbesserung des Korrosions- und Verschleißschutzes un- und niedriglegierter Stähle. Um die TiMgGdN-Schichten hinsichtlich industrieller Standards weiterzuentwickeln, wurde ein neuartiges pulvermetallurgisches (PM) Target in Zusammenarbeit mit Plansee Composite Materials entwickelt. Es wurde gezeigt, dass die Anwendung des PM Targets zu einer Steigerung der Schichthärte und Verschleißbeständigkeit führt. Dabei konnte die bereits im Vorgängerprojekt mittels Mehrkomponententargets erzielte Korrosionsbeständigkeit der TiMgGdN-Schichten beibehalten bzw. übertroffen werden. In umfassenden Parametervariationen wurden entsprechende Prozessfenster identifiziert, um die Schichteigenschaften sicherzustellen. Als ein Haupteinflussfaktor wurde der Reaktivgasfluss identifiziert. Damit lassen sich die Schichteigenschaften, insbesondere hinsichtlich des Verschleiß- und Korrosionswiderstands steuern.

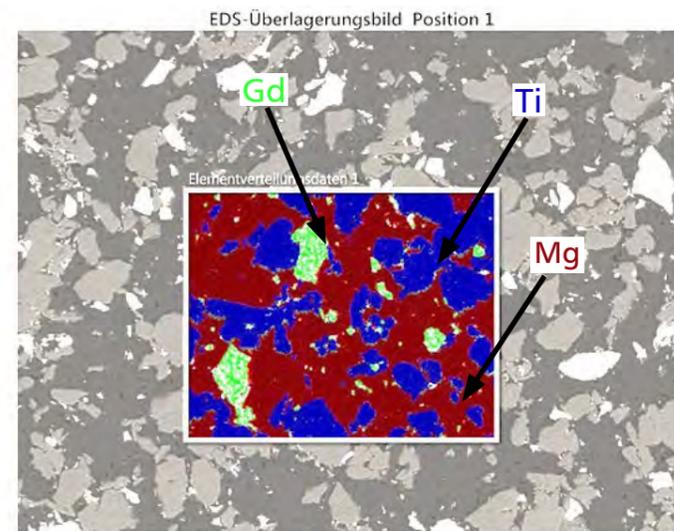
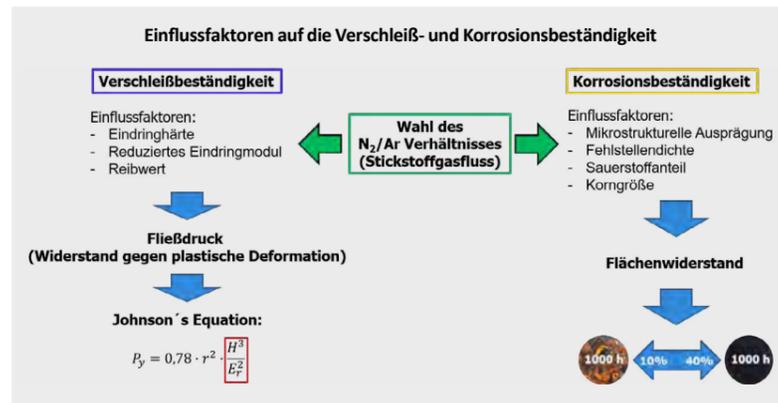
Die Eindringhärte, das reduzierte E-Modul sowie der Reibwert hängen signifikant von der Wahl des Stickstoffgasflusses ab. Ebenso wird die Mikrostruktur, die Fehlstellendichte der Sauerstoffanteil als auch die Korngröße von der Wahl des Stickstoffgasflusses beeinflusst. Um die beiden Eigenschaften Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit miteinander zu kombinieren, hat sich eine Haftvermittlungsschicht als positiv erwiesen. Demzufolge ist eine systematische Einstellung der Schichtmikroarchitektur und der Schichteigenschaften zur Realisierung anwendungsspezifisch optimierter Anforderungsprofile durch die TiMgGdN-Schicht möglich.

Mit dem hier durchgeführten Projekt steht nun erstmalig ein Magnetron gesputtertes PVD-Schichtsystem zu Verfügung, das eine Korrosionsbeständigkeit von über 1000 h im Salzsprühstest aufweist. Weiter konnte durch den Einsatz von TiMgGd/TiMgGdN-Haftvermittlern eine industriennahe und kostengünstige Schichtkombination entwickelt werden die sowohl eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit als auch eine erhöhte Verschleißbeständigkeit aufweist und damit beide Eigenschaften kombiniert. Dadurch kann das Anwendungsspektrum der PVD-Schichten nun signifikant erweitert und die PVD-Beschichtungstechnologie nun auch für korrosive Anwendungen eingesetzt werden.

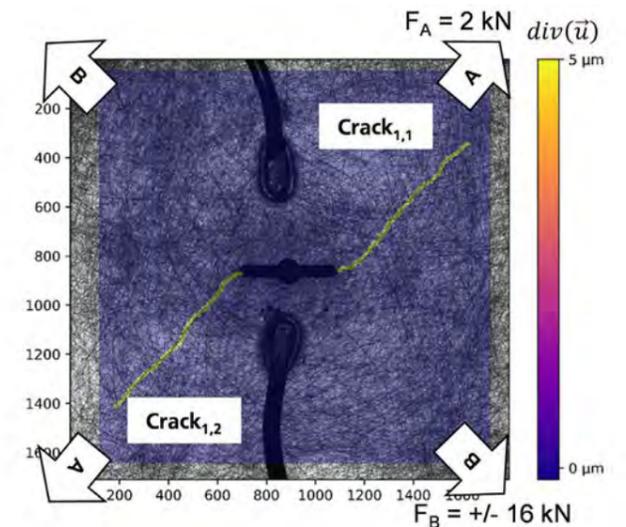
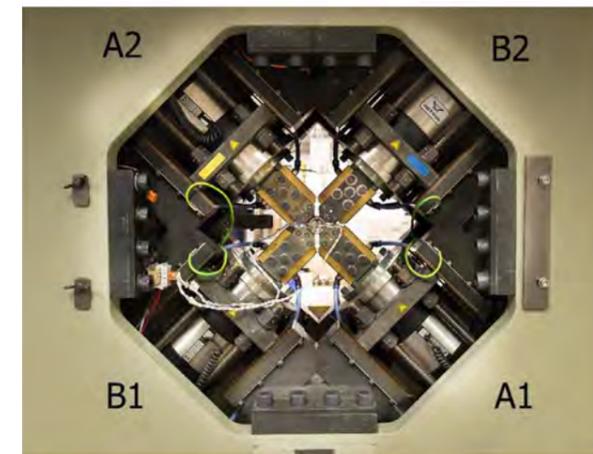
ABSICHERUNG, ENTWICKLUNG UND ANWENDUNG VON BEWERTUNGSVERFAHREN DES RISSVERHALTENS UNTER MEHRACHSIGEN BAUTEILNAHEN BEANSPRUCHUNGSSITUATIONEN

Durch die Ergebnisse aus diesem Forschungsvorhaben kann das Rissfortschrittsverhalten unter mehrachsigen Fernfeldbeanspruchungen durch abgesicherte ingenieurmäßige Konzepte präziser beschrieben werden. Das Vorhaben liefert eine umfassende Datenbasis über das Rissfortschrittsverhalten an Standard Corner-Crack (CC) und vergleichend durchgeführten Kreuzproben unter systematischer Variation der Risspitzenmehrachsigkeit. Die Daten umfassen sowohl Einstufenbelastungen, abstrahierte komponentennahe Belastungen mit eingestreuten Über- und Unterlasten und statisch-zyklisch belastete Kreuzprobenversuche zur Untersuchung der Rissfortschrittsrichtung unter dem Einfluss komplexer mehrachsiger Fernfeldbeanspruchungen. Der Einfluss der Risspitzenmehrachsigkeit auf die plastische Zone vor der Risspitze, die Rissfortschrittsrate und das plastizitätsinduzierte Riss schließen ist systematisch untersucht und die Abbildungsgüte ingenieurmäßiger Ansätze damit überprüft und optimiert. Die optische Bildkorrelation kann aufgrund ihres Messprinzips viele für Risswachstumsprüfungen relevante Messgrößen berührungsfrei erfassen.

Allerdings sind konventionelle Systeme zu langsam, um z.B. den Empfehlungen der ASTM E647 zu entsprechen. Grafikkartenprozessoren (GPU) in Kombination mit schnellen Kameras mit einer Übertragungsrate von mehr als 3 GB/s können hochauflösende Bilder mit Bildraten bis 1,5 kHz aufnehmen und bis zu 74.000 DIC-Messpunkte pro Sekunde auswerten. Das GPU-basierte System wertet diese in Echtzeit aus und misst sowohl die integralen Dehnungen wie ein mechanisches Extensometer mit bis zu 1,5 kHz als auch Dehnungs- und Verschiebungsfelder zur Bestimmung der Rissflankenverschiebungen. Die gemessenen Risstiefen haben eine Reproduzierbarkeit im Bereich von 20 µm und stimmen sehr gut mit gemessenen Werten unter Nutzung einer Wechselstrompotenzialsonde überein. Das in diesem Vorhaben entwickelte System ersetzt also diese beiden Sensoren und bietet darüber hinaus zusätzliche Möglichkeiten, wie etwa eine Betrachtung nichtlinearer Risskonturen, die Auswertung von Sekundärrissen oder den Vergleich komplexer Verformungszustände mit bruchmechanischen Modellen der Finite Element Methode (FEM).



Oberflächenaufnahme des pulvermetallurgischen TiMgGd-Targets sowie EDX-Mapping



Verwendeter planarer Biaxialprüfstand (links), Risse und Rissausbreitungsrichtung detektiert mit dem entwickelten GPU-DIC-System unter kombinierter statischer und zyklischer Belastung (rechts)

RECHNERISCHE METHODE ZUR BEWERTUNG DES SCHWELLENWERT- UND AUSBREITUNGSVERHALTENS PHYSIKALISCH KURZER RISSE BEI HOHEN TEMPERATUREN AM BEISPIEL EINER ADDITIV UND KONVENTIONELL GEFERTIGTEN NICKELLEGIERUNG

Durch die Ergebnisse aus diesem Forschungsvorhaben können lokale Defekte im Dauerfestigkeitsbereich hinsichtlich ihrer Gefahr für die Entstehung wachstumsfähiger Risse bewertet werden. Anhand von zwei herkömmlich (einer geschmiedeten und einer gegossenen) und einer additiv (per LPBF-Prozess) hergestellten Materialvariante der Nickelbasislegierung IN718 bei ihrer



Weiterentwickelter Prüfstand u.a. mit applizierter hochempfindlicher Wechselstrompotenzialsonde zur Charakterisierung des HT-Schwellenwertverhaltens

maximalen Einsatztemperatur von 650 °C konnten Modellierungsansätze, für Anwendungen bei Raumtemperatur, auf Hochtemperaturanwendungen übertragen werden. Insbesondere das experimentell ermittelte Verhalten kurzer Ermüdungsrisse und von Ermüdungsrissen im Übergangsbereich zwischen Kurz- und Langrissbereich bildet die Grundlage zur systematischen Weiterentwicklung der Modelle in diesem Forschungsprojekt. Dabei sind auch unterschiedliche Belastungssituationen, in Form von variierenden Lastverhältnissen, bei der Modellierung berücksichtigt. Der Einfluss der Lage von zu bewertenden Defekten wird über experimentelle Daten aus Versuchen an Luft und im Vakuum mit abgebildet. Die Anwendung der entwickelten Methodik zur Bewertung lokaler Defekte im Dauerfestigkeitsbereich ist über eine python-basierte graphische Benutzeroberfläche möglich. Dabei ist kein tiefgreifendes Verständnis der dahinterliegenden Modellierungsansätze nötig, wodurch die Bedienung auch für kleine und mittelständige Unternehmen (KMU) mit überschaubarem Aufwand möglich ist.

VERBUNDPROJEKT HOWEFLEX: NEUE HOCHLEISTUNGS-ROTORWERKSTOFFE FÜR LASTFLEXIBLE KRAFTWERKE

Deutsche und Europäische Turbinenhersteller sind gefordert, sich auf die unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich Flexibilität im Betrieb und hohen Wirkungsgrad einzustellen.

Hierfür sind neue Stahlwerkstoffe für Anwendungstemperaturen oberhalb 620°C erforderlich, die aber bisher für Großkomponenten wie z.B. Wellen nicht verfügbar bzw. qualifiziert sind. Innerhalb des Forschungsvorhabens HOWEFLEX wurde ein Schmiedestück mit anwendungsnahen Bauteilabmessungen von Dampfturbinenrotoren aus einem neuen Stahl-Werkstoff vom Typ MarBN (Martensite-Boron-Nitrogen) hergestellt. Mit umfassenden Untersuchungen zum statischen und zyklischen Verhalten im gesamten Temperaturbereich bis 650 °C konnte die Grundcharakterisierung des Rotorschmiedestücks aus MarBN-Werkstoff durchgeführt werden. Erstmals wurden sowohl klassische als auch moderne, leistungsfähigere Werkstoffbeschreibungen und -modelle angepasst und optimiert, die für die Bauteilauslegung künftig benötigt werden. Mit der Herstellung und Qualifizierung einer Schweiß-Mischverbindung ist zudem eine weitere wichtige Grundlage für Auslegung, Fertigung und Betrieb zukünftiger Turbinenbauteile aus MarBN-Stahl gelegt worden.



Herstellung des Schmiedestücks aus dem untersuchten MarBN-Stahl bei der Saarschmiede (Blockdurchmesser 1300 mm, Blockgewicht: 35 Tonnen)

ABGESICHERTE BESCHREIBUNG DES HOCHTEMPERATURRISSVERHALTENS INNERHALB DER FKM-RICHTLINIE „BRUCHMECHANISCHER FESTIGKEITSNACHWEIS“

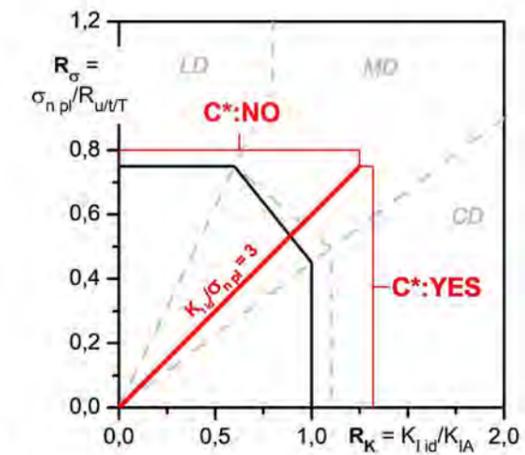
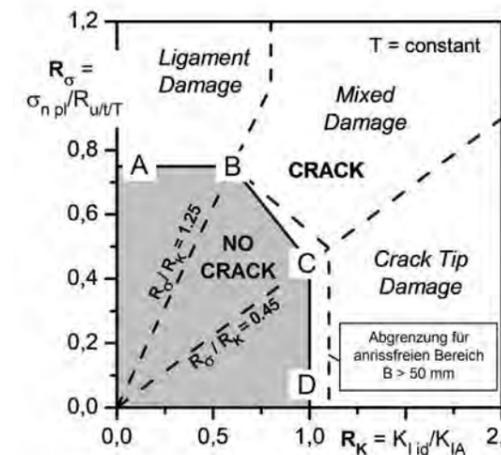
Aufgrund einer vom Markt geforderten immer flexibler werdenden Betriebsweise bestehender und zukünftiger fossil befeuerter Kraftwerke, ändert sich der Fokus der Auslegung und Bewertung unter Umständen fundamental. Aus diesem Grund sind im Rahmen des Bauteildesigns und des Bauteilbetriebs Betrachtungen und Analysen erforderlich, welche einen sicheren Anlagenbetrieb mit entsprechend hoher Verfügbarkeit erzielen können.

Insbesondere die an Fehlstellen bei langzeitbeanspruchten Bauteilen mögliche Einleitung von Rissen und deren Fortschritt bedürfen hierbei einer zuverlässigen quantitativen Beschreibung. Hierzu werden kriechbruchmechanische Methoden angewandt. Abhängig von den Betriebsbedingungen, kann es zur Kriech-, Kriechermüdungs- oder Ermüdungsrissbildung kommen. Die Beschreibung des Rissausbreitungsverhaltens, also der Risswachstumsgeschwindigkeit bzw. Risswachstumsrate ist zur Abschätzung der Restlebensdauer und zur Festlegung von Serviceintervallen notwendig.

In diesem Forschungsvorhaben wurde eine breite Werkstoffdatenbasis an häufig eingesetzten warmfesten Stählen mit 1%Cr, 9-10%Cr und 12%Cr bei anwendungstypischen Temperaturen überprüft und aktualisiert. Diese Datenbasis wurde ebenfalls mittels des Nikbin-Smith-Webster-Modell ausgewertet. Es konnte gezeigt werden, dass die Rissbildung und die Rissausbreitung unter Kriechbeanspruchung mit diesem Modell in hinreichender Genauigkeit

beschrieben werden kann. Ebenfalls wurden verschiedene Einflussfaktoren bei der Bewertung der an CT- und DENT-Proben ermittelten bruchmechanischen Werkstoffkennwerten untersucht. Dabei konnte u.a. der Anwendungsbereich des C*-Parameters bei der Bewertung der Risseinleitung mittels des Zwei-Kriterien-Diagramms festgelegt werden.

Anhand der Nachrechnung kriechbruchmechanischer Versuche an CT- und DENT-Proben konnten die analytischen Ansätze zur Beschreibung der Risseinleitung und -ausbreitung unter Kriech- und Kriechermüdungsbelastung durch den Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen validiert werden. Insbesondere die Akkumulation zur Vorehersage des Rissfortschritts hat sich als eine zeiteffiziente Methode erwiesen. Abschließend wurde die Übertragbarkeit der an CT- und DENT-Proben validierten bruchmechanischen Ansätze auf größere Komponente untersucht, indem rissbehaftete Bauteile unter praxisnaher Kriech- und Kriechermüdungsbeanspruchung mittels dieser Methoden beispielhaft gerechnet wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Belastungshöhe und die Haltezeit für den Anriss und den Rissfortschritt unter Kriechermüdungsbeanspruchung maßgebend sind. Bei hoher Beanspruchung und kürzeren Haltezeiten wird der Schädigungsverlauf überwiegend von der Ermüdung beeinflusst. Bei niedrigerer Beanspruchung und längeren Haltezeiten spielt das Kriechen eine wichtige Rolle.

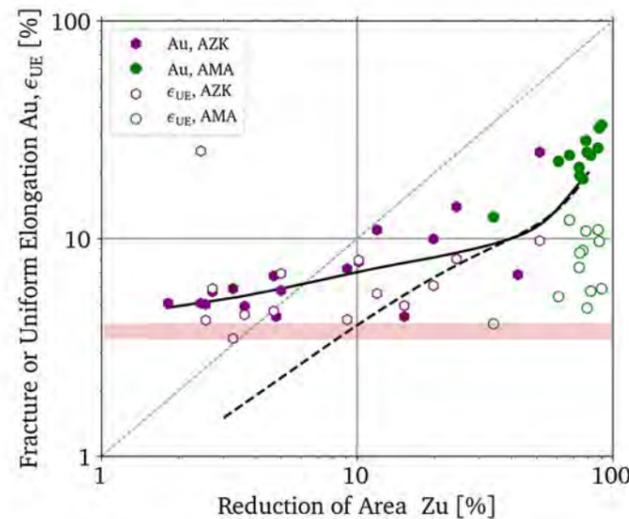
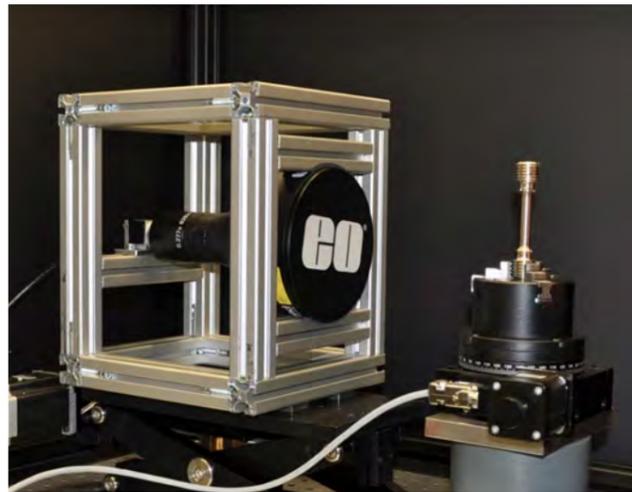


Zwei - Kriterien - Diagramm für Stähle mit Au rd. 7% (links) und Anwendungsgrenze für den Parameter C* (rechts)

ROBUSTE BRUCHKENNWERT-ERMITTLUNG ZUR VERWENDUNG DER KRIECHDUKTILITÄT INNERHALB FORTSCHRITTLICHER LEBENSDAUERBEWERTUNGSKONZEPTE

Bruchverformungskennwerte, wie bspw. die Bruchdehnung, Brucheinschnürung sowie die Gleichmaßdehnung repräsentieren experimentell ermittelbare Größen zur Interpretation des Verformungsvermögens / der Duktilität von Werkstoffen. Um eine hinreichende Duktilität selbst unter einer Hochtemperaturbeanspruchung über einen langen Betriebszeitraum sicherzustellen, ist eine Optimierung der Legierungszusammensetzung sowie der Wärmebehandlung bspw. eingesetzter hochwärmefester Stahllegierungen von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus kann die Duktilität als Eingangsparameter für Konzepte der Lebensdauer und Bruchmechanik dienen, um eine präzisere Beschreibung des vorliegenden Werkstoffs bzw. der vorliegenden Werkstoffschmelze zu ermöglichen.

Jedoch sind für diese Aufgabe drei der zuvor genannten Parameter, die Bruchdehnung und die Brucheinschnürung, nur bedingt geeignet, da der Absolutwert dieser Parameter u.a. von der verwendeten Probenform abhängt. Die Bruchdehnung und die Brucheinschnürung repräsentieren somit experimentell ermittelbare Vergleichsgrößen aber keine Werkstoffparameter. Die Gleichmaßdehnung hingegen beschreibt eine probenformunabhängige Kenngröße und kann als tatsächlicher Werkstoffparameter verstanden werden. Nachteilig hierbei ist aktuell, dass diese Größe an gebrochenen Proben nur sehr schwer und manuell zu ermitteln ist und einer hohen Streuung und Subjektivität unterliegt. Demgegenüber steht ein großes Anwendungs-Potenzial in der Verwendung der Gleichmaßdehnung im Rahmen der Werkstoffqualifizierung sowie fortschrittlicher Lebensdauer- und Bruchmechanik - Ansätze zur Bauteilbewertung. Aus diesem Grunde wurde innerhalb dieses Vorhabens ein optisches 3D-Scanner-System entwickelt, mit welchem ein hoch-präzises, digitales Abbild von intakten und gebrochenen Zeitstandproben erstellt werden kann, um die Gleichmaßdehnung künftig hinreichend präzise und systematisch ermitteln zu können. Mit dem entwickelten System wurde eine umfangreiche Messkampagne an gebrochenen Zeitstandproben durchgeführt und die Ergebnisse vor dem Hintergrund einer etwaigen Duktilitätseinsatzgrenze für die industrielle Anwendung diskutiert und eingeordnet. Neben der Entwicklung und Anwendung des Messsystems wurden innerhalb des Vorhabens ebenso umfangreiche fraktographische Untersuchungen an gebrochenen Zeitstandproben mittels REM und μ CT-Messungen durchgeführt. Ziel hierbei war es, sowohl den Einfluss der Oxidschichtdicke bei der Bestimmung der Brucheinschnürung als auch die Rolle von Ungängen auf der Bruchfläche bei der Interpretation der Bruchverformbarkeit weiter und systematisch zu klären.



Weiterentwickelter Prüfstand u. a. mit applizierter hochempfindlicher Wechselstrompotenzialsonde zur Charakterisierung des HT-Schwellenwertverhaltens

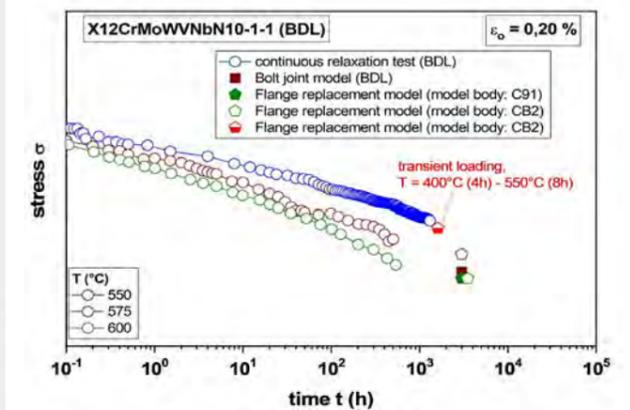
REVISIONSKONZEPTE FÜR HOCHTEMPERATURBEANSPRUCHETE FLANSCH- UND SCHRAUBENVERBINDUNGEN IM FLEXIBLEN ANLAGENBETRIEB – TEIL 2

Anhand der in dem Projekt gewonnenen Ergebnisse/Erkenntnisse können eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf das Relaxationsverhalten von Schraubenverbindungen abgeschätzt oder auch numerisch abgebildet/nachgerechnet werden. Die Versuche an dem Modellflansch sowie die gestuften Relaxationsversuche haben einen deutlichen Einfluss der vorherigen Kriechverformung auf die Restspannung bei wiederholtem Verspannen gezeigt. Eine Beachtung dieses Effektes könnte zukünftig dazu genutzt werden, den Abstand folgender Revisionsintervalle zustandsbedingt zu vergrößern. Anhand der umfangreichen und gezielt ergänzten Versuche steht nach Abschluss des Vorhabens eine erweiterte Datenbasis für typische Schrauben- und Flanschwerkstoffe zur Verfügung, die für

eigene Auslegungen und die Anpassung firmeneigener Werkstoffmodelle genutzt werden können. Ebenfalls wurde ein neuer Probenkörper entwickelt, der eine vereinfachte Abbildung der an Flanschverbindungen vorliegenden Gegebenheiten reproduziert und mit nur geringem Versuchsaufwand prüfbar ist. Die im Rahmen des Projektes weiterentwickelten Werkstoffmodelle sowie die erstellten Werkstoffanpassungen und die Werkzeuge zur Parameteranpassung für andere Werkstoffe stehen den Firmen zur Anwendung zur Verfügung. Die praktische Anwendbarkeit der Modelle, inklusive der Werkstoffanpassungen, konnte durch die erfolgreiche Nutzung durch die Arbeitskreismitglieder in eigenen Anwendungen bestätigt werden.



Entwickeltes Flanschersatzmodell (links) und beispielhaftes, vergleichendes Ergebnis des experimentell ermittelten Relaxationsverhaltens



OPTIMIERUNG DES PRÜFVERFAHRENS ZUM UMWELTBEDINGTEN WASSERSTOFFINDUZIERTEN SPRÖDBRUCHVERHALTEN VON HOCHFESTEN SCHRAUBENWERKSTOFFEN MIT BESCHICHTUNGSSYSTEMEN AUF ZINKBASIS

Hochfeste, ausscheidungsgehärtete Aluminiumknetlegierungen – wie bspw. EN AW-7075 und EN AW-6082 – erfahren in modernen integrierten Fertigungsverfahren oftmals auch eine nicht vermeidbare thermisch - induzierte Gefügeveränderung. Insbesondere von der Rohrformung und längsgeschweißten Fügezonen sind eine teils eklatant erhöhte Korrosionsanfälligkeit bekannt, welche sich auch im Hinblick auf Integrität des Werkstoffs für die Anwendung als ungünstig auswirken kann. Um einen optimalen Kompromiss zwischen den Festigkeitseigenschaften (gefordert wird in aller Regel der T6-Zustand) und der Korrosionsbeständigkeit zu erhalten, sind dem Fertigungsprozess nachgelagerte Wärmebehandlungsmaßnahmen von äußerster Relevanz.

Die Identifikation eines solchen Auslegungspunktes ist unter anderem Gegenstand des im Kompetenzbereich Oberflächentechnik durchgeführten ALLEGRO Verbundvorhabens (Teilprojekt B3). Hier wird der Einfluss der Umformprozesse auf das Korrosionsverhalten gezielt untersucht. Dabei handelt es sich unter anderem um Einflussgrößen wie die Glüh Temperatur und Haltezeit, Abkühlgeschwindigkeit, Schweißverfahren, Umformgrad und der Einfluss dieser Variationen auf das Korrosionsverhalten nach parametrisierter künstlicher Alterung. Auszugsweise konnten folgende Erkenntnisse im Rahmen des Vorhabens erarbeitet werden. Eine vollumfängliche Zusammenstellung ist dem Abschlussbericht zum Vorhaben zu entnehmen.

- Die grundsätzliche Korrosionsanfälligkeit der zunächst unbearbeiteten Grundwerkstoffe EN AW-7075 und EN AW-6082 im Anlieferungszustand T6 wurde mit sogenannten Immersionsversuchen nach DIN EN ISO 11846:2008-08 bewertet. Hierzu werden die Proben für insgesamt 24 Stunden im jeweiligen Medium ausgelagert. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Auslagerungsdauer einen dominierenden Einfluss auf die Anfälligkeit der EN AW-7075 gegenüber interkristalliner Korrosion (IK) hat, was vor allem durch den höheren Anteil an anodischen Phasenausscheidungen und den damit einhergehenden galvanischen Flächeneffekten begünstigt wird (Abb. 1).
- Die zugrunde liegende Korrosionskinetik wurde vorwiegend mittels elektrochemischer Verfahren weiterführend untersucht. Beispielsweise ist es durch Messung des sogenannten freien Korrosionspotenzial (außenstromlos) möglich, die grundsätzliche Anfälligkeit des jeweiligen Werkstoffs im vorliegenden Milieu einzuordnen. Anhand der dynamischen Polarisation (Stromdichte-Potenzialkurve) können spezifische Oberflächeneigenschaften, wie beispielsweise das Passivierungsverhalten, sowohl qualitativ bewertet als auch durch den Vergleich der sich einstellenden Stromdichten als Indikator für den Massenumsatz bewertet werden. Die Korrelation der Ergebnisse mit einer nachgelagerten metallografischen Befundung ermöglicht wiederum Aussagen zur Intensität der Korrosion sowie zu den der Degradation zugrunde liegenden selektiven Gefüge - immanenten Effekte. Eine zusammenfassende Bewertung des Befunds belegt, dass der Bearbeitungsprozess des Lösungsglühens nach der Umformung (T6-Prozessroute) zu tendenziell geringeren Korrosionsangriffstiefen führt, zumindest im Vergleich zur W - Temper - Prozessroute (Abb. 2). Letzteres Verfahren sieht ein Lösungsglühen vor der finalen Umformung vor.

Abb. 1: Metallographische Schlitte nach Immersionsversuch des Grundwerkstoffs EN AW-7075 T6 (IK + Lochkorrosion) und EN AW-6082 T6 (IK) im Anlieferungszustand.

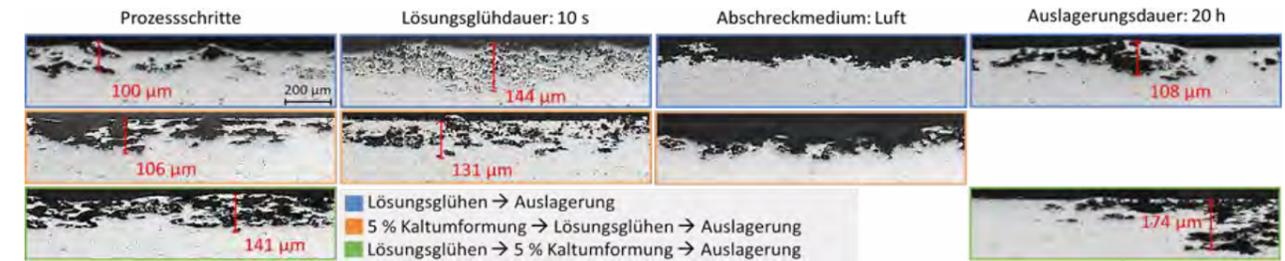
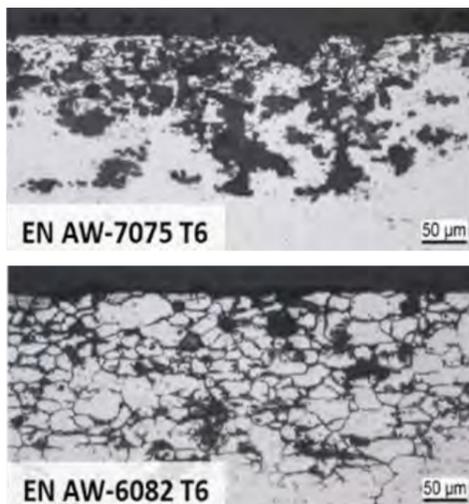


Abb. 2: Metallographische Schlitte nach Immersionsversuch von EN AW-7075. Sofern nicht anders angegeben findet das Lösungsglühen bei 480 °C für 5 min, Abschreckung in Wasser und Auslagerung bei 120 °C für 24 h.

- Abschließend wurden Empfehlungen zur Prozessführung beim Bearbeiten des Werkstoffs in Bezug auf Beeinflussung des Korrosionsverhaltens entwickelt und dokumentiert. Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass längere Lösungsglühedauern zur Ausbildung einer homogeneren Ausprägung des Gefüges beitragen. Eine Verbesserung des Korrosionsverhalten kann mit zunehmender Lösungsglühedauer (480 °C) von bis zu fünf Minuten erreicht werden. Abweichend von diesem optimalen Zustand begünstigt eine zu niedrige oder zu hohe Lösungsglüh Temperatur einen deutlichen Abfall des freien Korrosionspotenzials zu einem unedleren Wert, begünstigen, was sich wiederum in einer erhöhten grundsätzlichen Korrosionsempfindlichkeit äußert. Ebenfalls ist eine längere Auslagerungsdauer bei 120°C zu bevorzugen, um eine möglichst geringe Korrosionsangriffstiefe (Minimierung der Kerb-

wirkung) zu erzielen. Findet ferner eine thermo - mechanische Umformung statt, sollte eine Umformwerkzeugtemperatur von 24 °C nicht nennenswert überschritten werden. Die beste Korrosionsbeständigkeit zeigte sich bei der T6-Prozessroute, in dem den Werkstoff nach einer Umformung zunächst bei 480 °C für 5 Minuten lösungsgeglüht und anschließend im Wasserbad abgeschreckt wurde (zusätzliche Warmauslagerung bei 120 °C für 24 Stunden)

Die Ergebnisse konnten unmittelbar von den Forschungspartnern im Verbund adaptiert werden und sind damit vollumfänglich von wissenschaftlichem und anwendungsrelevantem Nutzen. Die Anschlussfähigkeit für Folgevorhaben mit spezifischeren Fragestellungen ist gegeben.

HOCHLEISTUNGSKOMPONENTEN AUS ALUMINIUMLEGIERUNGEN DURCH RESOURCENOPTIMIERTE PROZESSTECHNOLOGIEN (ALLEGRO) - TEILPROJEKT B3: EINFLUSS DER UMFORMPROZESSE AUF DAS KORROSIONSVERHALTEN

Umgebungsbedingter Einfluss auf das Wasserstoffgefährdungspotenzial

Oftmals werden hoch- und ultrahochfeste Stähle auf Grund ihrer geringen Korrosionsbeständigkeit mit einem Überzug auf Zinkbasis versehen. Ein Nebeneffekt dieser kathodischen Schutzwirkung ist jedoch die Bildung von atomarem Wasserstoff an der Werkstoffoberfläche. Das Vorhaben mit dem Kurztitel „PrüfWas“ fokussiert sich dabei auf zwei Bereiche: Die quantitative Beschreibung umweltbedingter Einflussgrößen auf das Wasserstoffangebot und -gefährdungspotenzial sowie eine Optimierung der Prüfmethode. Am Beispiel des Einsatzes hochfester Schraubenwerkstoffe mit Überzugssystemen auf Zinkbasis können gewisse Umgebungsbedingungen (niedriger pH-Wert, hohe Salzkonzentration, hohe Sauerstoffkonzentration) einen elektrochemischen Korrosionsangriff begünstigen. Weitere Einflussgrößen stellen das

Überzugssystem selbst sowie der Grundwerkstoff dar. Der während der Korrosion aus der kathodischen Teilreaktion resultierende Wasserstoff adsorbiert an der Werkstoffoberfläche und kann wiederum atomar in das Kristallgitter eindiffundieren. Infolge dessen kann der absorbierte Wasserstoff zu einer metallphysikalischen Wechselwirkung mit dem metallischen Gefüge führen, was sich beispielsweise in einer Bauteilversprödung äußert. Das Bauteil verliert dabei einen Teil seiner Duktilität und es kommt zu einem spontanen, frühzeitigen Versagen.

Wissenschaftliche Herausforderung

Forschungsgegenstand des Vorhabens „PrüfWas“ ist die systematisierte Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Umgebungsbedingungen auf das Wasserstoffgefährdungspotenzial. Konkret geht es vorzugsweise um ein elektrochemisch - induziertes

Wasserstoffangebot, beispielsweise in wässrigen Salzlösungen oder im sauren (Schwefelsäure) beziehungsweise alkalischen (Natronlauge) Milieu. Die elektro-chemischen Prozesse der Wasserstoffentwicklung können durch Variation des pH-Werts, der Ionenkonzentration, dem Sauerstoffpartialdruck sowie durch Applikation eines kathodisch wirkenden Fremdpotenzials beeinflusst werden. Als Qualitätsmerkmal wurde sowohl die Wasserstoffentwicklung als auch die Wasserstoffaufnahme quantifiziert und mit der Anfälligkeit einer Wasserstoffversprödung korreliert. Flankierend erfolgte die Bewertung anhand von elektrochemischen Kenngrößen wie der Korrosionsstromdichte oder der Impedanz. Auf Basis der Ergebnisse werden anschließend Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Testmethodik gegeben, um nicht nur einen anwendungsrelevanten Betrieb simulieren zu können, sondern auch bei der Neuentwicklung von Werkstoffen und Überzugssystemen ein aussagekräftiges Tool zur Hand zu geben.

Zusammenfassende Ergebnisbewertung

Mithilfe der statistischen Versuchsplanung konnte erfolgreich ein mathematisches Modell erstellt werden, welches die Korrosionsstromdichte für alle sechs untersuchten Werkstoff-Überzug-Systeme innerhalb des untersuchten Parameterbereichs beschreibt. Neben der quantitativen Beschreibung konnten aber auch weitere qualitative Erkenntnisse

gewonnen werden. Zum Beispiel liegt das freie Korrosionspotenzial des Zinklamellenüberzugsystems bei derart niedrigen Werten, dass es selbst bei einer kathodischen Polarisation nicht zu einer Sättigungsreaktion kommt. Dies ist ein Indiz dafür, dass eine weitere kathodische Teilreaktion initiiert wird, wie beispielsweise die Elektrolyse von Wasser selbst, die neben der Wasserstoffreduktion ebenfalls zur Erzeugung von atomarem Wasserstoff führt. Die Ergebnisse zeigten zudem, dass die Korrosionsstromdichte im Fall der galvanisch Zink-Nickel-Beschichtung unabhängig vom variierten Sauerstoffpartialdruck ist.

Mittels Trägergasheißextraktion wurde der Gesamtwasserstoff der Proben nach einer 24-stündigen Wasserstoffbeladung bestimmt (Abb. 1). Die Prüflösungen wurden auf Basis der Ergebnisse aus dem ersten Teilziel definiert und um eine NaOH- sowie eine H₂SO₄-Lösung erweitert. Abgesehen von der H₂SO₄-Lösung konnte in keiner Lösung eine erhöhte Wasserstoffkonzentration im Vergleich zur unbeladenen Referenzprobe festgestellt werden. In den anschließend durchgeführten langsamen Zugversuchen mit konstanter Dehnrage (SSRT) sowie den diskontinuierlichen Laststeigerungsversuchen (SLT) wurde allerdings eine Versprödung der Werkstoffe durch diese Elektrolyte nachgewiesen. Die Versprödung war in der H₂SO₄-Lösung besonders ausgeprägt.

Abschließendes Ziel war die Angabe einer Risikobewertung zur Einordnung des wasserstoffinduzierten Sprödbruchverhaltens in den verschiedenen Umgebungsmedien. Hierzu wurden die bisher gewonnenen Erkenntnisse zum Korrosionsverhalten und zur Wasserstoffabsorption für mechanische Untersuchungen adaptiert. Es wurde festgestellt, dass die Korrosionsstromdichte nicht mit der Bruchlast im SLT korreliert (Abb. 2). Auch die Stromdichte und die Versuchslaufzeit bei einer kathodischen Polarisation in einer NaOH-Lösung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchlast. Die kathodische Schutzwirkung der Überzüge führte gegenüber dem unbeschichteten Grundwerkstoff nicht zu einem vorzeitigen Versagen des Werkstoffs. Eine Wasserstoffbeladung in der H₂SO₄-Lösung hat gegenüber allen anderen Elektrolyten zu einem erheblichen Abfall im Schwellenwert geführt, von 65 % auf 35 % der Referenzbruchzugfestigkeit. Für diesen Fall ist eine Korrelation der Bruchlast und der Wasserstoffgehaltsmessungen gegeben.

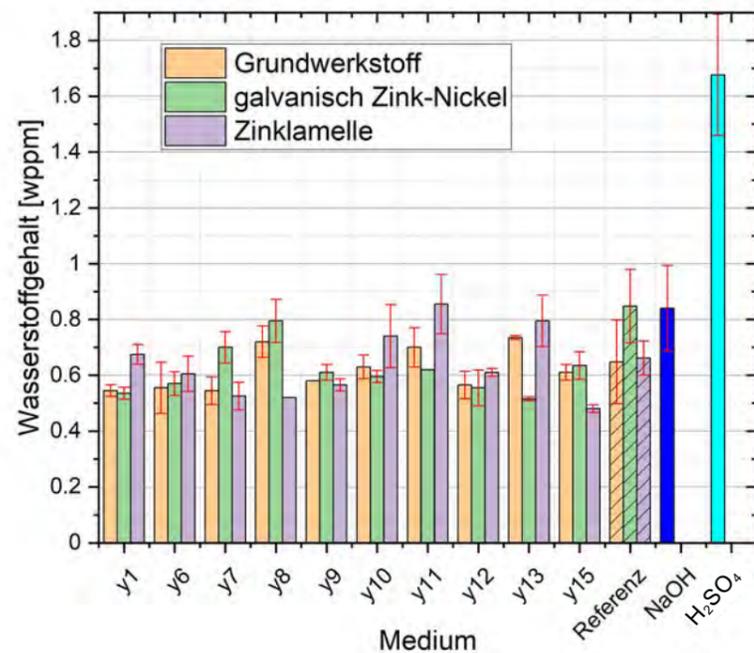
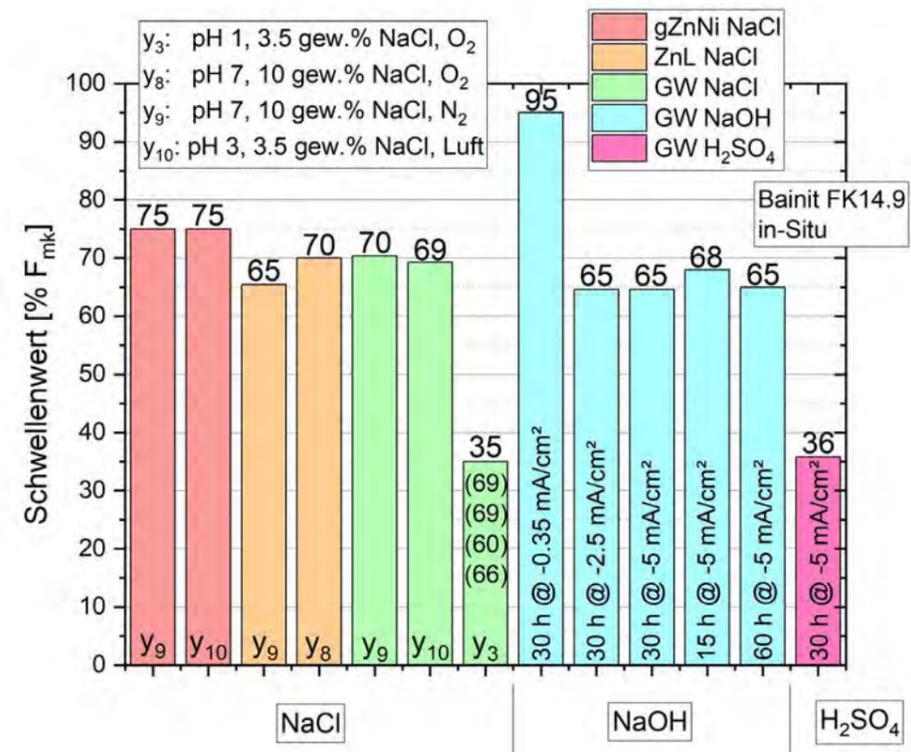


Abb. 1: Ergebnisse der Wasserstoffgehaltsmessung mittels Trägergasheißextraktion nach einer 24-stündigen Beladung. Bei den Medien y1 bis y15 handelt es sich um verschiedene Salzkonzentrationen. Alle Messungen wurden an der bainitischen Werkstoffvariante durchgeführt.



Aus den Ergebnissen der drei Teilziele konnten Optimierungsvorschläge für den SLT sowie die allgemeine Versuchsdurchführung bei der Bewertung eines Wasserstoffgefährdungspotentials formuliert werden. Diese umschließen – neben der Anpassung des diskontinuierlichen Stufenprofils im

SLT – auch die Auswahl des Elektrolyten sowie eine Trennung des Einflusses der Wasserstoffaufnahme gegenüber dem anodischen Korrosionsangriff. Durch den direkten Kontakt zum Normgremium fließen die Ergebnisse direkt in die Weiterentwicklung bestehender Regelwerke mit ein.

NACHHALTIGE MOBILITÄT DURCH SYNTHETISCHE KRAFTSTOFFE

Einsatzpotenzial von synthetischen Kraftstoffen

Synthetische Kraftstoffe besitzen ein großes Potenzial zur nachhaltigen Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Insbesondere Oxygenate wie Oxy-methylenether (OME) ermöglichen aufgrund des höheren molekularen Sauerstoffanteils zwischen benachbarten Kohlenstoff - Kohlenstoff - Bindungen auch eine Verringerung der lokalen Emissionen von gesundheitsschädlichen Verbindungen wie Stickoxiden und Rußpartikeln, wodurch sie insbesondere für den städtischen Verkehr als eigenständige Surrogate oder als Blendkomponente zu fossilen Energieträgern attraktiv sind. Im Hinblick auf eine rasche Markteinführung muss die Integrität von kraftstoffführenden Bauteilen sichergestellt werden. Aus eigenen Forschungsarbeiten ist bekannt, dass biogene Kraftstoffe einen elektrochemischen Korrosionsangriff an metallischen Werkstoffen begünstigen, die zum Teil empfindlich sein können. Im Gegensatz dazu ist das Degradationsverhalten in Wechselwirkung mit OMEs noch weitgehend unerforscht.

Projektziele und Konzept zur Umsetzung

Schwerpunkt des von uns bearbeiteten Arbeitspaketes im NAMOSYN-Forschungscluster FC2 liegt in der Analyse der Materialkompatibilitäten in OME3-5-Oxygenaten, sowohl als Reinform als auch im Blend mit fossilem Diesel berücksichtigt. Hierzu zählt auch der Einfluss durch Verunreinigungen wie beispielsweise Wasser oder Salze. Neben etablierten Auslagerungsversuchen in Anlehnung an das etablierte Prüfblatt VDA230-207 werden relevante elektrochemisch-instrumentierte Methoden für überlagerte mechanische Beanspruchungen erarbeitet. Etwaige Alterungsprozesse der Kraftstoffblends (Oxidation, thermisch-induzierte Zersetzung) werden ebenso berücksichtigt wie eine OME-spezifische Anpassung der Prüfbedingungen. Im Rahmen eines DoE-Ansatzes wurden die jeweiligen Werkstoffe in unterschiedlichen Kraftstoffmischungen für eine Gesamtprüfdauer von zwölf Wochen bei einer Temperatur von 60 °C gelagert. Die Werkstoffoberflächen wurden nach jeweils zweiwöchiger Auslagerung begutachtet. Zusätzlich wurden ausgewählte Proben

Abb. 2: Vergleich der mittels Laststeigerungsversuch (SLT) bestimmten Schwellenwerte. Für die Versuchsreihe im Elektrolyt y3 sind die Schwellenwerte der Einzelversuche zusätzlich angegeben. Alle Versuche wurden an der bainitischen Werkstoffvariante und in-Situ durchgeführt.



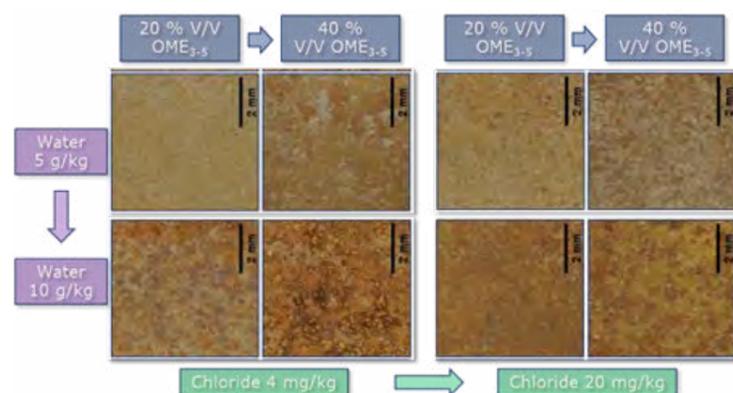
Abb. 1: Versuchsaufbau zur 4-Punkt-Biegeprüfung (links) und im Projekt konstruierte elektrochemische Messeinrichtung in einer servohydraulischen Zug-Druck-Prüfanlage (rechts)

nach Versuchsende metallographisch untersucht, um Einblicke in legierungsspezifische Phänomene zu erhalten. Die Proben wurden ebenfalls gravimetrisch ausgewertet. Ergänzende Prüfungen zur Ermittlung der Festeigenschaften bei überlagerter mechanischer Beanspruchung wurden mittels der sogenannten 4-Punkt-Biegung sowie mit einer elektrochemisch instrumentierten servohydraulischen Prüfanlage durchgeführt (Abb. 1). Abschließend erfolgt die Erstellung einer Bewertungsgrundlage zur raschen Übertragbarkeit der erhaltenen Ergebnisse für die technische Anwendung.

Relevante Erkenntnisse zur Materialverträglichkeit in OME-Blends

Am Beispiel eines niedrig legierten Stahls (Werkstoffbezeichnung DD13) wurde die Abhängigkeit der Kraftstoffzusammensetzung analysiert. Neben dem Blendverhältnis zwischen OME3-5 und dem fossilen Referenz - Dieselkraftstoff wurde auch der Anteil von Wasser (simuliert einen hygroskopischen Eintrag) und Chlorid (stellvertretend als NaCl) variiert. Die jeweiligen Konzentrationen sind in Abb. 2 dargestellt. Diese basieren auf kritischen, aber praxisrelevanten Szenarien, so dass die industrielle Übertragbarkeit der Ergebnisse sichergestellt ist. Die Auswertung des Korrosionsgrades dokumentiert einen signifikanten Einfluss des Blendanteils, insbesondere bei einem erhöhten Wassergehalt von 10 g/kg.

Abb. 2: Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung auf den Korrosionsgrad am Beispiel des niedrig legierten Stahls DD13.



Dagegen ist der Einfluss der Salzkonzentration als eher moderat einzuordnen, obwohl diese die eigentliche korrosionsfördernde Komponente des Kraftstoffes darstellen. Die visuell erhobenen Befunde werden durch die statistische Auswertung (Varianzanalyse) bestätigt: Signifikante Wechselwirkungen zeigen sich am Beispiel der Massenänderung bei steigender Wassermenge (Abb. 3). Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass die Materialverträglichkeit sowohl bei reinem OME als auch bei fossilem Dieselkraftstoff grundsätzlich als unkritisch eingestuft werden kann^[2]. Erst im Gemisch mit Verunreinigungen kommt es zu einem korrosiven Angriff. Offensichtlich bestimmt das Mischungsverhältnis der an sich unkritischen Komponenten OME und Diesel die Empfindlichkeit gegenüber einem chloridinduzierten Angriff. Die Assoziation im ternären System von Wasser, Detergens und hydrophober Komponente führt offensichtlich zur Bildung einer metastabilen Mikroemulsion mit heterogener Ionenlöslichkeit. Da sich die Mikrophasen im Wasser auflösen, kommt es zu einer lokalen Konzentration von Ionen, was wiederum die Gesamtkorrosivität erhöht.

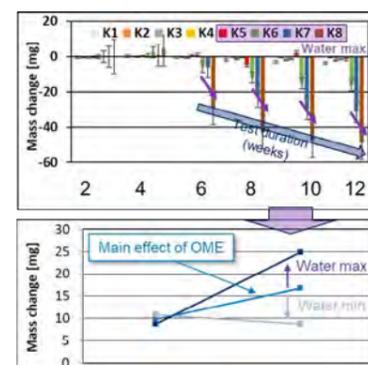


Abb. 3: Wechselwirkungseffekte von Wasser und OME, exemplarische Auswertung am Korrosionskriterium „Massenänderung“

Abschließende Arbeiten – daran forschen wir aktuell

Ein statistisch signifikanter Einfluss auf die Zugfestigkeit wurde bisher anhand der durchgeführten 4 - Punkt - Biegeversuche nicht beobachtet. Gegenstand der noch laufenden Versuche ist die Untersuchung eines zeitlich diskreten Zusammenhangs zwischen der Rissbildung und dem Korrosionsereignis (Initiierung und Fortschritt der Degradation). Diese Zielsetzung soll unter anderem durch Einsatz von elektrochemischem Rauschverfahren (ZRA) im stromlosen Zustand (OCP) realisiert werden. Eine nachgelagerte Transientenanalyse ermöglicht wiederum Aussagen über korrosionsauslösende Prozesse und das materialspezifische Passivierungsverhalten.

EINFLUSS VON ZINKBASIERTEN KORROSIONSSCHUTZSYSTEMEN AUF DIE ERMÜDUNGSBEANSPRUCHBARKEIT VON SCHRAUBENVERBINDUNGEN

Das Forschungsprojekt befasste sich mit dem Ermüdungsverhalten zyklisch beanspruchter Schrauben mit zinkbasiertem Korrosionsschutz. Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen wurden die Ermüdungseigenschaften durch die Bestimmung des Anrisszeitpunktes und des Rissfortschritts bis zum Versagen durch Bruch für anwendungsbezogen ausgewählte Beschichtungssysteme bewertet. Unter einstufigen Belastungen wurden an Kerbproben und Schrauben der Abmessung M8, ausgeführt in der Festigkeitsklasse 10.9 nach DIN EN ISO 898-1, umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Form des axialen Schwingversuches nach DIN 969 durchgeführt. Die zu bewertenden Beschichtungssysteme bilden galvanische Zink- und Zink-Nickeloberflächen nach DIN EN ISO 4042, nicht-elektrolytisch aufgetragene Zinklamellenüberzüge nach DIN EN ISO 10683, und eine Zn-phosphatiert geölte Beschichtung. Die Referenz bildet eine blank vergütete unbeschichtete Oberfläche. Ein weiteres untersuchtes System stellt die Variante „ δ -Ferrit“ dar, bei der phosphatiert vergütete Bauteile untersucht wurden. Für alle Varianten wurden die mechanischen Eigenschaften der beschichteten Bauteile mithilfe der Methoden der Werkstoffanalytik bestimmt. Ein Fokus lag auf den Veränderungen des Randbereiches infolge des Beschichtungsprozesses und der Ausführung des Beschichtungssystems. Da Schraubenverbindungen in der Regel mithilfe von Schmierstoffen eingesetzt werden, wurden die Beschichtungen sowohl trocken als auch geschmiert im Ermüdungsversuch bewertet. Für die Möglichkeit einer separierten Betrachtung des Einflusses der Korrosionsschutzschicht und der Schmierung auf das Ermüdungsverhalten wurde zunächst an einer Schraube M8x55-8.8 ein Basecoat exemplarisch gewählt und mit sieben ausgewählten Schmierstoffsystemen bewertet. Diese bilden Öle, Fette, Gleitlacke und in die Beschichtung integrierte Schmierung. Zur Eingangskarakterisierung wurden für die ausgewählten Varianten im Drehmoment/Vorspannkraft-Versuch nach DIN EN ISO 16047 Gewindereibungszahlen bestimmt. Die Schmierung im Gewindekontakt beeinflusst die Lebensdauer wie auch die Beanspruchbarkeit signifikant. Unabhängig von der Art des Schmierstoffsystems konnten durch Schmierung die Lebensdauer und die Beanspruchbarkeit gegenüber der ungeschmierten Schraubenverbindung erhöht werden. Eine niedrige

Gewindereibung reduziert die lokale Beanspruchung der Schraube und verschiebt den Anrisszeitpunkt zu höheren Lastspielzahlen. Durch die Gewindeschmierung wird ein Wechselgleiten zwischen Schrauben- und Muttergewinde vereinfacht. Diese Relativbewegung wird durch die aus der wechselnden axialen Betriebslast resultierenden Radialkraft auf die Gewindeflanken erzwungen. Wird das Wechselgleiten durch gleichbleibende Schmierungeigenschaften unter ermüdender Last kontinuierlich ermöglicht, kann die lokale Schraubenbeanspruchung reduziert und der Anrisszeitpunkt verschoben werden. Für die experimentelle Bewertung der Anrisszeitpunkte wurde eine Methode mittels Frequenzanalyse entwickelt. Aufgrund der Schwingungseigenschaften des Prüfsystems kann eine Zunahme der Nachgiebigkeit, die mit sich bildendem Anriss und zunehmendem Rissfortschritt eintritt, einem Frequenzabfall zugeordnet werden. Über die entwickelte Analyseverfahren konnte für eine reproduzierbar gleichgroße bereits geschädigte Fläche für ein hier beispielhaft betrachtetes Belastungsniveau nachgewiesen werden. Die Unterschiede der ermittelten Anrisszeitpunkte reichen nicht aus, um die unterschiedlichen Lebensdauern zu begründen. Flüssigschmierung beeinflusst durch die Mobilitätseigenschaften des Schmiermittels das Rissfortschrittsverhalten und führt hier zu den längsten Lebensdauern und der größten Beanspruchbarkeit. Durch eine hohe Kriechfähigkeit des Öls setzt sich bei Rissinitiierung das Schmieröl durch Kapillarwirkung an die Rissfront und verlangsamt den Rissfortschritt. Zugrundeliegende Mechanismen stellen beispielsweise Riss-schließeffekte, die dämpfende Wirkung des Öls sowie der Einfluss auf den Schwellenwert für das Rissfortschrittsverhalten dar.

Basierend auf den Erkenntnissen des Schmierstoffeinflusses wurden die sieben ausgewählten Beschichtungssysteme zunächst ungeschmiert geprüft. Mithilfe von Kerbproben ist es möglich, das Ermüdungsversagen ausschließlich auf den Eigenschaften der Beschichtung und den möglichen randnahen Veränderungen aus Beschichtungsprozessen zu bewerten. In der Zeitfestigkeit ist die Abminderung der Lebensdauer lastunabhängig ca. -40% für galvanische und Zinklamellenoberflächen gegenüber der unbeschichteten Referenz „blank vergütet“. Im Übergangsbereich ist die Beanspruchbarkeit max. 8% reduziert.

^[1] Reitz, R.: Regenerative Kraftstoffe - Einflussgrößen auf das Korrosionsverhalten von Aluminium in ethanolhaltigen Ottokraftstoffen (Dissertation). Shaker, (2019)

^[2] Reitz, R., Arya, V., Oechsner, M.: Oxymethylene dimethyl ethers (OMEs) – Investigation of Materials Compatibility with Automotive Alloys, FSC Conference (2021)

Bei der Schraubenverbindung, die im Ermüdungsversuch aus der Paarung M8x90-10.9 und Standardmutter nach DIN EN ISO 4032 (M8-10) besteht, überlagern durch die Lastübertragung mittels Kontakt die schraubenspezifischen Besonderheiten den Einfluss des Beschichtungssystems. Die Lastverteilung, die Lasteinleitungsbedingungen in der Kontaktfläche und die hohe Kerbwirkung sind die Lebensdauer bestimmenden Faktoren. Da die Beschichtungseigenschaften in Form der Härte, der Elastizität, der Oberflächenrauigkeit und der vorliegenden Reibungskoeffizienten im Gewinde das Kontaktverhalten bestimmen, wird die lokale Beanspruchung in der Schraube und dadurch der Zeitpunkt der einsetzenden Schädigung durch Anriss beeinflusst. Es werden ausgeprägte und lastabhängige Unterschiede in der Lebensdauer festgestellt, von ca. -15% bei 7 kN bis ca. -60% bei 3,8 kN Lastamplitude. Je kleiner die Lastamplitude desto höher ist die Beanspruchbarkeit für nicht-elektrolytisch erzeugte Oberflächen gegenüber galvanischen Beschichtungen. Abhängig vom Beschichtungssystem können die Zeitfestigkeitsgeraden gruppiert werden ($k = 2,6$ für galvanisch, $k = 3,2$ für ZnL, $k = 4,1$ für blank). Im Übergangsbereich ist die Beanspruchbarkeit ebenfalls um max. 8% reduziert. Die Variante δ -Ferrit, mit interkristallinem Ausgangsrisnetzwerk infolge der Phosphordiffusion, zeigt die geringste Beanspruchbarkeit. Dem folgen

die galvanischen Beschichtungen, mit hohen Gewindereibungszahlen (ungeschmiert). Die nicht-elektrolytisch Zinklamellensysteme haben spätere Anrisszeitpunkte, bei identischem Rissfortschritt. Höhere Lebensdauern erzielen die unbeschichtete Referenz und die Zn-phosphatiert geölte Schraube.

Durch Schmierung des Gewindes kann der Einfluss aus dem Beschichtungssystem in der Zeitfestigkeit reduziert und im Übergangsbereich sogar positiv genutzt werden. In der Zeitfestigkeit ergeben sich durch Schmierung annähernd identische Steigungen ($k \approx 4,3$) der Zeitfestigkeitsgeraden im Wöhlerschaubild, bei geringfügig reduzierter Lebensdauer gegenüber unbeschichteten Schrauben. Die dauerhaft ertragbare Beanspruchbarkeit kann durch Schmierung angehoben werden, sogar über das Niveau von unbeschichteten Schrauben. Beschichtete Schrauben, insbesondere Zinklamellensysteme, können den Schmierstoff (hier: MoS₂-Fett) aufnehmen und auch bei zyklischer Belastung die Kontaktbedingungen aufrecht erhalten. Eine in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2230 modifizierte Wöhlerlinie ermöglicht eine konservative Auslegung der Zeitfestigkeit und eine in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2230 modifizierte Wöhlerlinie ermöglicht eine konservative Auslegung der Zeitfestigkeit und eine verbesserte Ausnutzung im Bereich der dauerhaft ertragbaren Beanspruchbarkeit.

EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNG DES SELBSTTÄTIGEN LOSDREHENS VON SCHRAUBENVERBINDUNGEN MIT KONSTANTEN UND VARIABLEN AMPLITUDEN UND ENTWICKLUNG EINER BEWERTUNGSMETHODE

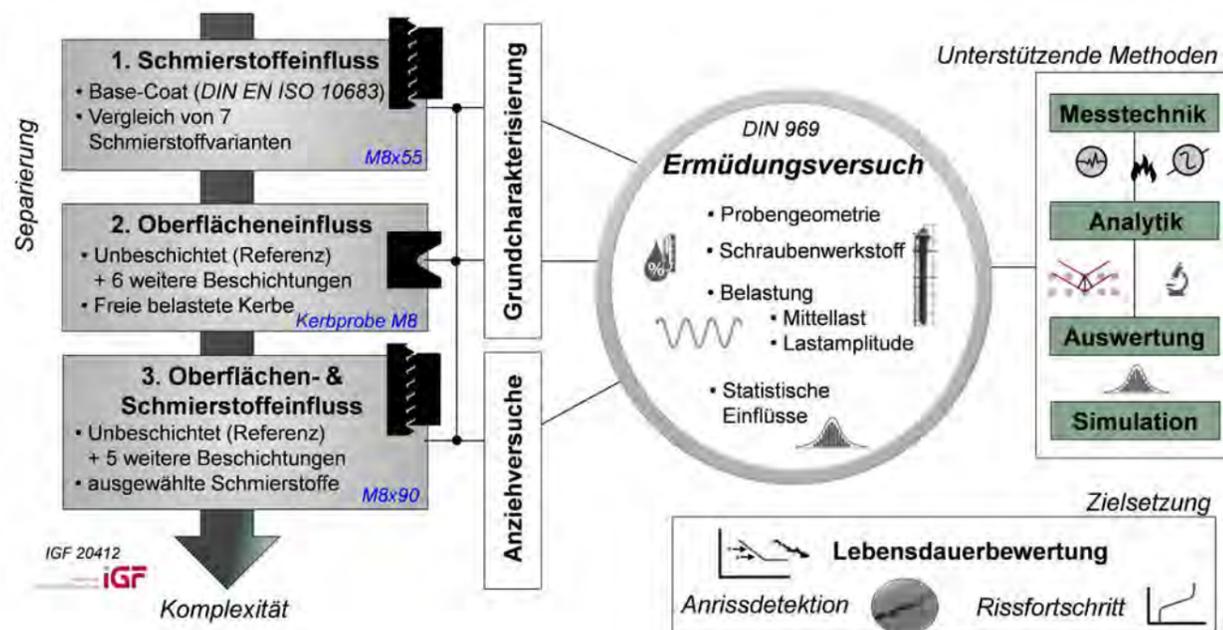
Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine Methode zur Bewertung des selbsttätigen Losdrehens einschrittiger Schraubenverbindungen unter harmonisch oszillierender, transversaler Belastung zu entwickeln. Im Zuge des Forschungsvorhabens wurde eine Bewertungsmethodik des selbsttätigen Losdrehverhaltens von Stahl-Stahl-Schraubenverbindungen unter Einwirkung von Querkräften erarbeitet. Zum Erreichen dieses Ziels wurden die Schraubenverbindungen experimentell charakterisiert und Kennwerte in Form parametrisierter Verschiebungsgrenzkurven, die das selbsttätige Losdrehen beschreiben, ermittelt. Auf Basis der experimentell ermittelten Kennwerte konnte eine Methode zur Akkumulation des Vorspannkraftverlusts abgeleitet werden. Diese ermöglicht für die durchgeführten Versuche eine Berechnung des Vorspannkraftverlusts auf Basis der Relativverschiebungsamplituden der verspannten Bleche. Es erfolgte eine numerische Abbildung des nichtlinearen Querkraft-Verschiebungsverhaltens von Stahl-Stahl-Schraubenverbindungen. Das nichtlineare Verschiebungsverhalten zwischen den Blechen wurde auf Basis von numerischen Modellen mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden unter Berücksichtigung von realen Reibungsverhältnissen ermittelt und experimentell validiert. Die relevanten Einflussgrößen wurden identifiziert und deren Wirkung auf das selbsttätige Losdrehverhalten analysiert.

Das im Zuge des Projektes erstellte Gesamtkonzept zur Abschätzung des Losdrehverhaltens von Schraubenverbindungen ist in Abb. 1 dargestellt. Der zur Umsetzung des Konzeptes benötigte Input lässt sich in zwei Kategorien einteilen. Auf der einen Seite stehen alle Informationen, welche einmalig innerhalb des Projektes bestimmt worden sind und für die weitere Anwendung beibehalten werden können. In diese Kategorie fallen die experimentell bestimmten Verschiebungsgrenzkurven, welche die Grundlage für die entwickelte Methode zur Bestimmung des Vorspannkraftverlustes bilden. Es werden die verbindungsspezifischen, für die Berechnungen notwendigen Grenzkurvenparameter erzeugt, zu denen auch die kritische Grenzverschiebung zählt. Weitere Inputs dieser Kategorie sind die Reibungszahlen, welche im Zuge des Projektes auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen bestimmt wurden, sowie das Modell zur Beschreibung der Steifigkeit des benutzerdefinierten Schraubenelements.

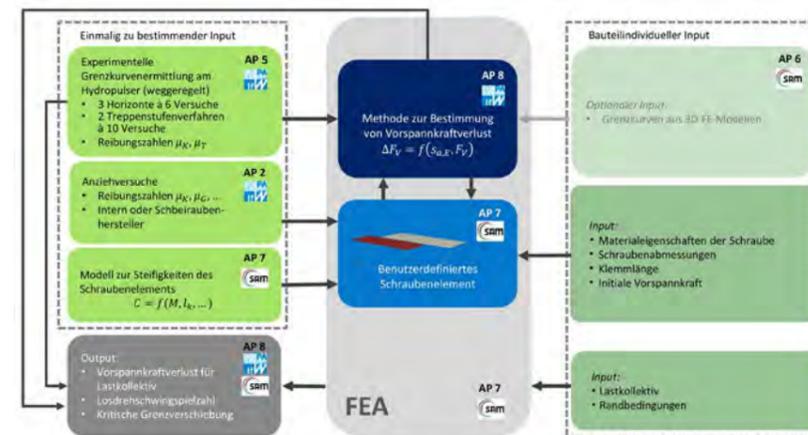
Die zweite Kategorie beschreibt auf der anderen Seite jene Inputargumente, welche bei der Anwendung des Gesamtkonzepts auf vergleichbare Schraubenverbindungen erneut vorgegeben werden müssen. Diese Kategorie umfasst die Abmessungen und Materialeigenschaften der Schraube, sowie die Klemmlänge und die Vorspannkraft zu Beginn der Berechnung. Entsprechend der im Anwendungsfall gegebenen Randbedingungen muss anschließend das FE-Modell aus Schalenelementen aufgebaut werden. Sobald dies abgeschlossen ist, kann die Rechnung gestartet werden. Dabei greift Abaqus über das benutzerdefinierte Schraubenelement in jedem Zeitschritt auf die Methode zur Akkumulation des Vorspannkraftverlustes zu und berechnet die verbleibende Vorspannkraft, welche in dem aktuellen Berechnungsschritt berücksichtigt wird. Aus den Ergebnissen der Rechnung können schließlich der Verlauf des Vorspannkraftverlusts über die Versuchsdauer und die Losdrehzyklenanzahl abgeleitet werden.

In der aktuellen Form ist das entwickelte Gesamtkonzept in der Lage, das Losdrehverhalten von Schraubenverbindungen unter einachsiger Querbelastrung abzubilden. Da es im realen Anwendungsfall auch zu mehrachsigen Belastungen kommen kann, bietet es sich für weitere Arbeiten an, das Konzept in dieser Hinsicht zu erweitern. Um dies umzusetzen, wäre eine Modifikation des Modells zur Beschreibung der Steifigkeit des Schraubenelements von Nöten, um an beiden Endknoten jeweils den zusätzlichen Verschiebungs- und Verdrehungsfreiheitsgrad zu berücksichtigen. Dies hätte einer Erweiterung der Steifigkeitsmatrix von 6x6 auf 10x10 zur Folge. Es bietet sich an, diese Thematik in einem nachfolgenden Forschungsprojekt zu untersuchen.

Abb. 1: Ablaufplan des Gesamtkonzepts zur Abschätzung des Losdrehverhaltens von Schrauben



Bearbeitungskonzept und Untersuchungsschwerpunkte zu IGF 20412



ERMITTLUNG DES INTRINSISCHEN SCHWELLENWERTS UND DESSEN VALIDIERUNG ALS WERKSTOFFPARAMETER

Bruchmechanische Methoden zählen zu den wichtigsten Werkzeugen zur Bewertung zyklisch belasteter Bauteile und Strukturen. Die Kenntnis des Ermüdungsrissausbreitungsverhaltens ermöglicht die Simulation des Risswachstums unter Belastung und, darauf aufbauend, die Abschätzung der Ermüdungslebensdauer vorgeschädigter Bauteile. Häufige Vorhersagefehler ergeben sich aus der Verwendung effektiver Rissausbreitungsdaten $da/dN-\Delta K_{eff}$ aufgrund der analytischen Korrektur experimenteller, von Riss-schließeffekten beeinflusster Daten. Da die verfügbaren Modelle nicht alle Riss-schließmechanismen explizit berücksichtigen, ergibt sich eine große Datenstreuung. Letztere ist unter anderem vom Spannungsverhältnis R und den Umgebungsbedingungen abhängig und wird größer bei Beanspruchungen im Schwellenwertbereich, der erheblich zur Lebensdauer beiträgt. Die ungenaue Abschätzung des Schwellenwerts gegen Ermüdungsrissausbreitung ΔK_{th} und des sich anschließenden Schwellenwertbereiches der Ermüdungsrissausbreitung kann das Ergebnis der Bauteilanalyse stark beeinträchtigen. Das Ziel des Projekts bestand darin, eine robuste und zuverlässige Methode zur Ermittlung des intrinsischen Schwellenwerts $\Delta K_{th,eff}$ abzuleiten und eine Bauteil-auslegeprozedur auf Basis der Verwendung von effektiven (nahezu riss-schließfreien) bei hohen Spannungsverhältnissen ($R \approx 0,8$) ermittelten Rissfortschrittsdaten bzw. des $\Delta K_{th,eff}$ zu entwickeln. Im Vorhaben untersucht wurden drei hochfeste, korrosionsanfällige Stähle: die Feinkornbaustähle S690QL und S960QL sowie ein Turbinenstahl (26NiCrMoV14-5).

Zur Untersuchung des Einflusses der Umgebungsbedingungen auf das Risswachstum im Schwellenwertbereich wurde eine Klimakammer entwickelt und aufgebaut, welche es erlaubt Rissfortschrittsuntersuchungen in feuchter Luft sowie unter Intergasatmosphäre durchzuführen. Systematisch angewendet wurden die Empfehlungen zweier technischer Prüfstandards: ASTM E647 und ISO 12108. Die entsprechenden Rissfortschrittsraten für die Ermittlung des Schwellenwertes gegen Ermüdungsrissausbreitung waren $da/dN_{th,ASTM} = 1 \cdot 10^{-7}$ mm/Zyklus für ASTM und $da/dN_{th,ISO} = 1 \cdot 10^{-8}$ mm/Zyklus für ISO. Das Spannungsverhältnis wurde auf $R \approx 0,8$ festgelegt, um möglichst riss-schließfreie Daten zu erhalten. Angewendet und variiert wurden:

- die experimentellen Methoden (Lastabsenkung, K_{max} -konstant, CPLR und ΔF -konstant)
- und
- die Prüfatmosphären (Laborluft, erhöhte Luftfeuchtigkeit (60% r.F. und 80% r.F.), inerte Atmosphäre (Argon)).

Als Kontrast zu dem (nahezu) riss-schließfreien Zustand wurden Daten mit ausgeprägtem Riss-schließeffekt bei $R = 0,1$ und $R = -1$ erhoben. Unabhängig des R bestätigte ein ausgeprägter Abfall (asymptotisches Verhalten) der Rissfortschrittsraten unterhalb $da/dN_{th,ISO}$ die Eignung der Schwellenwertdefinition nach der ISO-Norm im Vergleich zu ASTM. Für das Material S690QL zeigten die (nahezu) riss-schließfreien Daten, die bei $R \approx 0,8$ in Laborluft erhalten wurden, keine Abhängigkeit von der Versuchsmethode und der angewendeten Prüffrequenz (90 Hz und 108 Hz). Auf Basis von Hypothesentests konnte gezeigt werden, dass die Variation der Prüfatmosphäre hingegen statistisch signifikant unterschiedliche Ergebnisse lieferte. Die höchsten Schwellenwerte wurden bei der niedrigsten Frequenz (55 Hz) und bei erhöhter Luftfeuchtigkeit (60% r.F. und 80% r.F.) gemessen: $2,47 \pm 0,07$ MPa·m^{1/2} bzw. $2,62 \pm 0,01$ MPa·m^{1/2}. Eine Auswertung der Kraft-Extensometerweg-Daten einer bei 80% r.F. geprüften Probe zeigte eindeutige Hinweise auf das Vorhandensein von Riss-schließeffekten.

Von allen Versuchsbedingungen und Parametern wurden die konservativsten (und daher näher am intrinsischen Schwellenwert liegenden) Schwellenwerte bei höheren Frequenzen (90 Hz und 108 Hz), in Laborluft und bei 60% r.F. ermittelt: $2,27 \pm 0,04$ MPa·m^{1/2} und $2,24 \pm 0,03$ MPa·m^{1/2}. Diese zeigten eine sehr geringe Datenstreuung. Sie wurden für die Entwicklung der Auslegungsprozedur zugrunde gelegt. Die bei Spannungsverhältnis $R \ll 0,8$ erhaltenen Daten wurden durch die untersuchten Parameter, dem Spannungsverhältnis, der Prüfmethode und -frequenz sowie dem ΔK -Anfangswert (ΔK_0), erheblich beeinflusst. Bei den Lastabsenkungsversuchen ergaben sich bei 60 Hz im Vergleich zu 108 Hz höhere Schwellenwerte. Bei letzteren verursachte (mutmaßlich) Reibkorrosion ein Abknicken der $da/dN-\Delta K$ -Kurve hin zu kleineren ΔK -Werten sowie einem Kurvenverlauf mit alternierenden Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen des Rissfortschritts.

Ein vergleichbares wurde bei $R = 0,1$ festgestellt. Bei den CPLR-Proben wurden für geringere ΔK_0 -Anfangswerte niedrigere Schwellenwerte ermittelt. Beim Vergleich der CPLR-Ergebnisse ($\Delta K-\Delta a$ Datenpaare) mit experimentellen zyklischen R-Kurven erwies sich, dass etliche der CPLR-Schwellenwerte unterhalb der Schwellenwerte des Langrisses lagen. Letztere ergaben sich erst, wenn die Rissausbreitung (Δa_{LR}) wenigstens 3,5 mm betragen hatte. Aufgrund dieses Ergebnisses ist es erforderlich, den Prüfnormen ein weiteres Kriterium für die Erfassung von Rissfortschrittsdaten hinzuzufügen, das ein minimales Risswachstum beinhaltet, um sicherzustellen, dass der Langrissbereich erreicht wird. Der erforderliche Betrag Δa_{LR} könnte zunächst durch die Aufnahme einer zyklischen R-Kurve vor dem Lastabsenkungsversuch bestimmt werden, sollte später aber in verallgemeinert vorgegeben werden. Wir schlagen ein Einprobenverfahren vor, das den Übergang vom Kurz- zu Langrissregime auf einfache Weise wiedergibt. Die fraktographische Untersuchung der Bruchflächen zeigte eine vernachlässigbare Menge von Oxidprodukten an den bei $R \approx 0,8$ geprüften Proben. Dies wurde durch die FIB-Untersuchung repräsentativer Proben aus den Werkstoffen S690QL (1 Probe in Laborluft und 1 Probe in 60% r.F.) und 26NiCrMoV14-5 (1 Probe in Laborluft) bestätigt, bei denen nur Dunkelinseln (vermutlich Oxidprodukte) lokal festgestellt wurden. Im Gegensatz dazu wurde auf den Bruchflächen massive Oxidation bei $R \ll 0,8$ festgestellt. Die FIB-Analysen der S690QL-Proben, die bei $R = -1$ (108 Hz

und 60 Hz) und $R = 0,1$ (108 Hz) getestet wurden, ergaben eine Oxidschichtdicke in der Größenordnung von mehreren hundert Mikrometern. Bei $R = -1$ war die Dicke der Schicht für beide Prüffrequenzen annähernd konstant, während sie bei $R = 0,1$ mit der Rissausbreitung zunahm. Auf der Grundlage der für den Werkstoff S690QL erzielten Ergebnisse wurden Anwendungsempfehlungen abgeleitet. Es wurde eine robuste Auswertungsstrategie für die Bestimmung von Schwellenwerten aus Rissausbreitungsdaten entwickelt. Die bei $R \approx 0,8$ ermittelten $da/dN-\Delta K$ -Daten, die durch Riss-schließen nicht oder nur geringfügig beeinflusst waren, ließen sich mit einer Polynomfunktion mit Exponent -4 anpassen, wobei ein geringfügig konservativer Schwellenwert gewährleistet war. Für durch Riss-schließen und Umwelteinflüsse beeinflusste $da/dN-\Delta K$ -Daten bei $R \ll 0,8$ wurden alternative Bewertungsempfehlungen gegeben. Schließlich wurde ein bruchmechanisches Bauteil-auslegeverfahren, basierend auf (nahezu) riss-schließfreien Rissausbreitungsdaten, entwickelt und für den Werkstoff S690QL demonstriert. Experimentelle Verifizierungs- und Validierungsversuche bestätigten, dass das Modell konservative Vorhersagen mit einem tolerablen Fehler lieferte und daher für die Bauteil-auslegung geeignet war. Die im Rahmen des Projekts erreichten Ziele erbrachten Strategien und Methoden, die in der Industrie angewendet werden können. Die methodischen Vereinfachungen und auch die Reduzierung des Analyseaufwandes machen die vorgeschlagenen Verfahren für die industrielle Anwendung attraktiv.

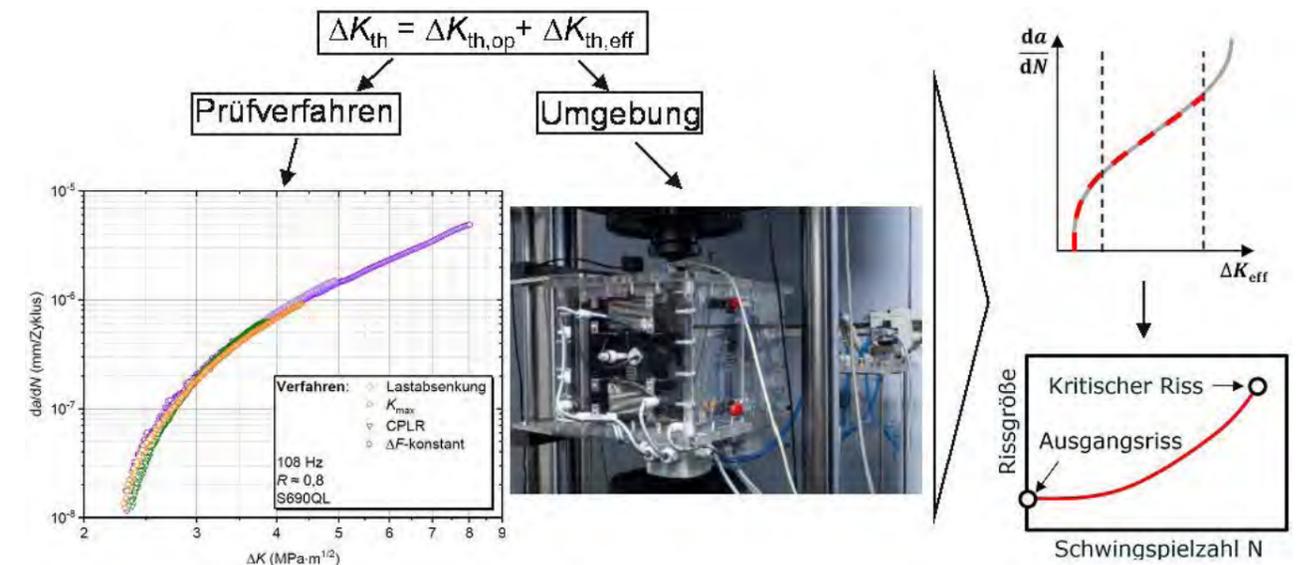


Abb. 1: Auf Basis der Untersuchung von Einflüssen auf den Schwellenwert gegen Ermüdungsrissausbreitung wurden im Projekt „Ermittlung des intrinsischen Schwellenwerts und dessen Validierung als Werkstoffparameter“ Empfehlungen zur experimentellen Ermittlung effektiver Schwellenwerte sowie eine Prozedur zur Berechnung der Restlebensdauer vorgeschädigter Bauteile auf Basis effektiver Rissfortschrittsdaten erarbeitet.

AKTUELLE UND IN 2022 ABGESCHLOSSENE FORSCHUNGSPROJEKTE

OBERFLÄCHEN- TECHNIK

In 2022 abgeschlossen:

- Optimierung des Prüfverfahrens zum umweltbedingten wasserstoffinduzierten Sprödbruchverhalten von hochfesten Schraubenwerkstoffen mit Beschichtungssystemen auf Zinkbasis – PrüfWas (AiF)
- Hochleistungskomponenten aus Aluminiumlegierungen durch ressourcenoptimierte Prozesstechnologien – ALLEGRO, Teilprojekt B3: Einfluss der Umformprozesse auf das Korrosionsverhalten (LOEWE)

Laufende Projekte:

- Kritische Schadensmechanismen und deren Verlauf identifiziert und beschrieben via Experiment und Modellierung – AIKoMo II (DFG)
- Nachhaltige Mobilität durch synthetische Kraftstoffe – NAMOSYN (BMBF)
- Thermisch - strömungsinduzierte Materialdegradation und Korrosionsschutz in komplexen Kühlkanälen integrierter Thermomanagementsysteme – Strömungserosion II (AiF)
- Bewertung der Materialverträglichkeit und Medienalterung in Brennstoffzellen-Kühlsystemen – Kühlung Brennstoffzelle II (AiF)
- Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von rührreibgeschweißten Aluminiumkonstruktionen – RührKorro (AiF)
- Bewertung des Ermüdungsverhaltens von PVD-Beschichtungen mittels schwingungsinduzierter Kavitation – Kavitationsermüdung – KavErm (AiF)
- Warum versagen Beschichtungen in korrosiven Kunststoffschmelzen? – Schichtversagen (AiF)
- Grundlagen für die Bemessung Druckwasserstoff exponierter Komponenten unter Berücksichtigung werkstoffspezifischer Schädigungsmechanismen – React H2HT (EU)
- Untersuchung des Wechselwirkungsmechanismus zwischen Werkstoff und Wasserstoff während des Beizvorganges unter Einwirkung von Inhibitoren nach DIN EN ISO 50940 Teil 2 – InhibeizNorm (WIPANO)

Laufende Projekte:

- Fused Glass Deposition Modelling on Flat Glass: Investigations of process-structure-properties and feasibility of novel glass joints (DFG)

BAUSTOFFE

In 2022 abgeschlossen:

- Erhöhung der Sicherheit beim Einsatz hochfester Stähle gegenüber Wasserstoff (H)-Versprödung durch ein verbessertes Verständnis des H-Asorptions- und Einlagerungsverhaltens – SicherHAEit (AiF)
- Gezielte Einstellung von Eigenspannungen während der Kaltmassivumformung II (DFG)
- Qualifizierung der Additiven Fertigung für die Herstellung verfahrenstechnischer Druckgeräte – QuAFD (AiF)
- Qualitätsbewertung metallischer AM-Pulver durch Elementaranalyse – QAMEA (LOEWE 3)
- Weiterentwicklung und Ertüchtigung TiMgSEN-basierter PVD-Schichten zur Verbesserung des Korrosions- und Verschleißschutzes un- und niedriglegierter Stähle (AiF)

Laufende Projekte:

- Entwicklung einer Methode zur Haftfestigkeitsprüfung von Verbindungselementen mit Feuerverzinkungsüberzügen – HaftVerzinkung (AiF)
- Korrelation mikrostruktureller, chemischer und bruchmechanischer Einflussfaktoren mit der Werkstoffanfälligkeit gegenüber H-SpRK - Mischbruchfaktor (AiF)
- Einfluss des Kaltumformprozesses hochfester Schrauben auf die lokale Anfälligkeit gegenüber einer wasserstoffinduzierten (H) Spannungsrisskorrosion - Kalo-H-Korr (AiF)
- Ressourceneffizientes plasmanitrieren nichtrostender Stähle für kombinierte tribologische und korrosive Beanspruchung – RePlaNiro (AiF)
- Korrosionsoptimierung ternärer PVD-Hartstoff-Nitridschichten – Kopter (AiF)
- Einfluss plasmadiffusionsbasierter Oberflächenmodifikationen auf das Korrosionsverhalten und den Kontaktwiderstand rost- und säurebeständiger Stähle – KoKorost (DFG)
- Gezielte Einstellung von Eigenspannungen während der Kaltmassivumformung III (DFG)

WERKSTOFFANALYTIK

In 2022 abgeschlossen:

- Revisionskonzepte für hochtemperaturbeanspruchte Flansch- und Schraubenverbindungen im flexiblen Anlagenbetrieb – Teil 2 (AiF)
- Rechnerische Methode zur Bewertung des Schwellenwert- und Ausbreitungsverhaltens physikalisch kurzer Risse bei hohen Temperaturen am Beispiel einer additiv und konventionell gefertigten Nickellegierung (AiF)
- Absicherung, Entwicklung und Anwendung von Bewertungsverfahren des Rissverhaltens unter mehrachsigen bauteilnahen Beanspruchungssituationen (AiF)
- Verbundprojekt HOWEFLEX: Neue Hochleistungs-Rotorwerkstoffe für lastflexible Kraftwerke (BMW/BMWK)
- Robuste Bruchkennwert-Ermittlung zur Verwendung der Kriechduktilität innerhalb fortschrittlicher Lebensdauerbewertungskonzepte (AVIF)
- Abgesicherte Beschreibung des Hochtemperaturrissverhaltens innerhalb der FKM-Richtlinie „Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis“ (AiF)

Laufende Projekte:

- Bewertung von Fehlergrößen bei Schweißverbindungen in Kraftwerken unter flexibler Fahrweise II (AVIF)
- Validierung des innovativen Werkstoffes A286mod für den Einsatz in zukünftig wasserstoffbefeuerten Gasturbinen (BMW/BMWK)
- Simulation und Fertigung eines leistungsoptimierten Triebwerkdemonstrators mittels perfektionierter additiver Fertigung (ZIM)
- Verbesserte Restlebensdauerbewertung durch Ermittlung der tatsächlichen Kriechstreubandlage von Kraftwerksbauteilen während des Betriebs (AiF)
- Verbesserte Genauigkeit von Lebensdauerbewertungsmethoden für Gasturbinenmaterialien unter Berücksichtigung relevanter mehrachsiger Ermüdungsbeanspruchungen (BMW/BMWK)
- Verbundvorhaben HWT-III – Auslegung und Betrieb einer Teststrecke im Großkraftwerk Mannheim zur Abbildung zukünftiger Beanspruchungen des flexiblen, hocheffizienten Kraftwerksbetriebs auf verbesserte Werkstoffe (BMW/BMWK)
- Anwendung und Vergleich von Modellen zur Lebensdaueranalyse von Hochtemperaturbauteilen unter Kriechermüdung auf Basis fortschrittlicher probabilistischer Methoden (AVIF)
- Untersuchung zum Einfluss von Grobkorn auf die Ermüdungseigenschaften austenitischer Kraftwerkstähle (AiF)
- Untersuchungen zum Einfluss der Oxidation und des Kriechens auf das bruchmechanische Verhalten (BMW/BMWK)
- Entwicklung von Konzepten zur Ermittlung von Kennwerten zur Bewertung von additiv-gefertigten Komponenten für den Hochtemperatureinsatz (AiF)
- Untersuchung zum Einfluss flexibler Betriebsweisen von Industrieöfen auf die Lebensdauer metallischer Hochtemperaturkomponenten (AiF)
- MatCom-ComMat: Materials Compounds from Composite Materials for Applications in Extreme Conditions (DFG)
- Zirkoniumdioxidbasierte Wärmedämmschichtsysteme für erweiterte Temperaturbereiche (DFG/FVV)
- Lebensdauerbewertung auf Basis der Gefüge- und Schädigungsentwicklung von 9-12% Cr-Stählen (AVIF)

- LEIMAT – Entwicklung einer leichten Superlegierung für große Gasturbinenschaufeln als hocheffiziente Turbinentechnologie zur Unterstützung der Energiewende (BMW/BMWK)
- 3D-ML-CREEP – Entwicklung einer Echtzeitbewertung des Hochtemperatur-Deformationsverhaltens von Komponenten thermischer Maschinen und Anlagen mittels Machine-Learning (BMW/BMWK)
- Aufbau eines „H2HT Testing Labs“ (EU)

In 2022 abgeschlossen:

- Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode (AVIF)
- Ermittlung des intrinsischen Schwellenwerts und dessen Validierung als Werkstoffparameter (AiF)
- Ermüdungsverhalten zyklisch beanspruchter Schrauben mit zinkbasiertem Korrosionsschutz (AiF)
- Bewertung des Einflusses realer Bauteilgeometrien auf die Beanspruchbarkeit von Tellerfedern anhand numerischer Simulation (AVIF)

Laufende Projekte:

- addLight - Design- und Fertigungskonzepte für additiv gefertigte Leichtbaustrukturen (PTJ/BMW)
- Auslegung und Montage gewindeformender Schraubenverbindungen (AiF)
- Experimentelle und numerische Untersuchung zur Berücksichtigung der Stützwirkungseffekte in der Schwingfestigkeit biegebeanspruchter vorgespannter Schraubenverbindungen (AiF)

LEHRE UND FORTBILDUNG

Übersicht der Lehrveranstaltungen in 2022

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:

*Dipl.-Ing. Marius Hofmann
Pia-Sophie Becks, M. Sc.*



Verbindungstechnik (Schraubenverbindung)

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

NEWS AUS DER LEHRE AM INSTITUT FÜR WERKSTOFFKUNDE

Die starken Einschränkungen aufgrund der Covid-19-Pandemie konnten mit dem Beginn des Sommersemesters 2022 wieder deutlich zurückgenommen. Vorlesungen und Übungen konnten wieder in Präsenz erfolgen, wenn auch noch mit Mund-/Nasenschutz. Bei einigen, insbesondere bei ausländischen Studierenden, bedeutete dies nach ca. 2 Jahren Home-Office den Umzug nach Darmstadt. Vom überwiegenden Teil der Studierenden ist der Präsenz-Lehrbetrieb aber sehnlichst erwünscht

worden, da sowohl so der Lernerfolg höher ist, als auch das Bearbeiten von Bachelor- und Masterarbeiten deutlich vereinfacht wird. Mit der Rückkehr zum regulären Präsenzbetrieb sind auch die Sonderregelungen zur Prüfungswiederholung, zu Fristen von An- und Abmeldungen zu Prüfungen, zu Industriepraktika und zu Bearbeitungszeiten von Bachelor- und Masterarbeiten wieder aufgehoben worden.

An Fachgebiet Werkstoffkunde werden nun alle Lehrveranstaltungen der neuen Prüfungsordnung des Fachbereichs Maschinenbau in Präsenz angeboten.

Im Studienplan für den Fachbereich Maschinenbau sind unserer Lehrveranstaltung wie folgt eingebunden:

Bachelor Maschinenbau - Sustainable Engineering:

- *Pflichtfächer:* Werkstoffkunde I (1. Semester) und Werkstoffkunde III (2. Semester) mit je 4 CPs, Werkstoffkunde III (3. Semester) mit 2 CPs
- *Wahlpflichtfächer:* Werkstofftechnologie und -anwendung (5. Semester) mit 6 CPs

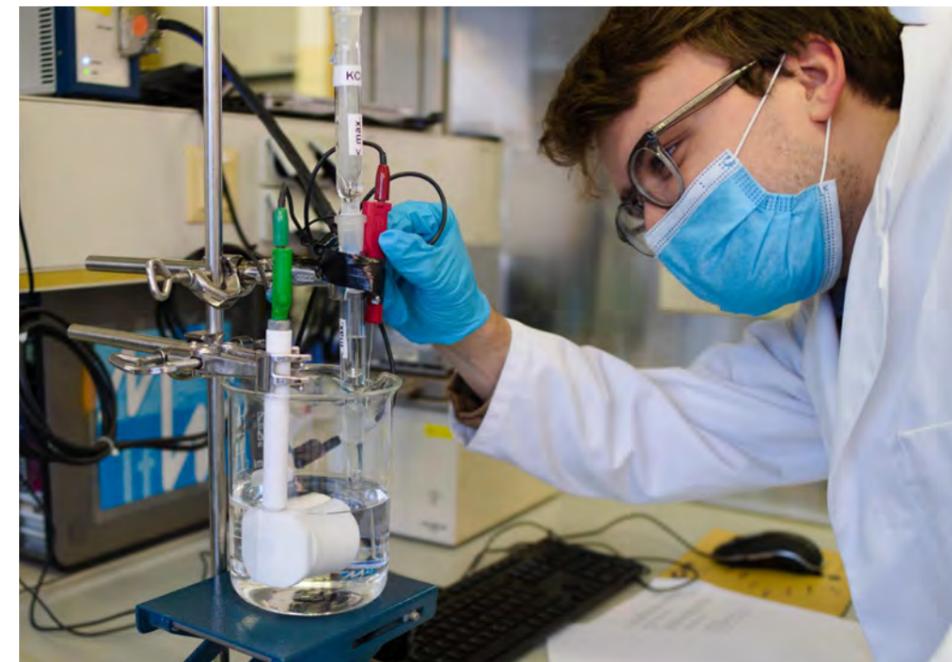
Master Maschinenbau:

- *Wahlpflichtfächer je 6 CPs:* Oberflächentechnik I, Oberflächentechnik II, High Temperature Material Behaviour
- *Wahlpflichtfächer je 4 CPs:* Schadenskunde, Verbindungstechnik, Leichtbauwerkstoffe, High Temperature Materials Behaviour II

Mit dem Wintersemester 2022/23 begann die Bachelor-Veranstaltung „Werkstoffkunde III“, die aus einer Vorlesung und einem Praktikum besteht. Im „Praktikum Werkstoffkunde III“ werden vier Versuche durchgeführt:

- Zugversuch/Kerbzugversuch
- Kerbschlagbiegeversuch/Härtemessung
- Metallographie
- Elektrochemischer Korrosionsversuch

Hier führen die Studierenden in Gruppen die Versuche in den Laboren des Fachgebiets durch, nachdem zuvor Aufgaben zur Versuchsdurchführung gearbeitet wurden. Das Praktikum wurde, gegenüber dem vorangegangenen Praktikum der alten Prüfungsordnung, um den Korrosionsversuch erweitert.



Durchführung des elektrochemischen Korrosionsversuchs im Rahmen des Praktikums Werkstoffkunde III

VERANSTALTUNGEN & HIGHLIGHTS

AMC KICK-OFF WORKSHOP

18. + 19. Juli 2022 | Campus Lichtwiese

Am 18. und 19. Juli 2022 fand der 1. AMC Workshop (Additive Manufacturing Center) statt. Der Workshop markiert den Startschuss einer in Zukunft wichtigen Kooperationsgemeinschaft an



der TU Darmstadt, die fachbereichsübergreifend gemeinsame Interessen vertritt und vorantreibt. Der Workshop begann am 18. Juli mit einer Abendveranstaltung in der Weststadtbar in Darmstadt. Prof. Oechsner eröffnete den Abend mit der Präsentation der Mission des „Additive Manufacturing Centers“. Im Anschluss gab Prof. Matthias Weigold (Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen) einen Rückblick auf das Erreichte der letzten 2 Jahre. Am darauffolgenden Tag wurde mit fast 40 Teilnehmenden unter anderem über die Organisation, die Beteiligungsstruktur und das Schulungsangebot im AMC diskutiert. In der Mittagspause führte Dr. Michael Krämer die Teilnehmenden in zwei Gruppen durch die Baustelle des AMC. Dort gab er den Beteiligten einen Überblick über den aktuellen Stand des Bauvorhabens und gab Details über die Innenraum-Planung preis.

Wir freuen uns auf weiterhin gute Zusammenarbeit mit den beteiligten Instituten und blicken gespannt auf die Fertigstellung des Forschungsgebäudes

Dr. Michael Krämer



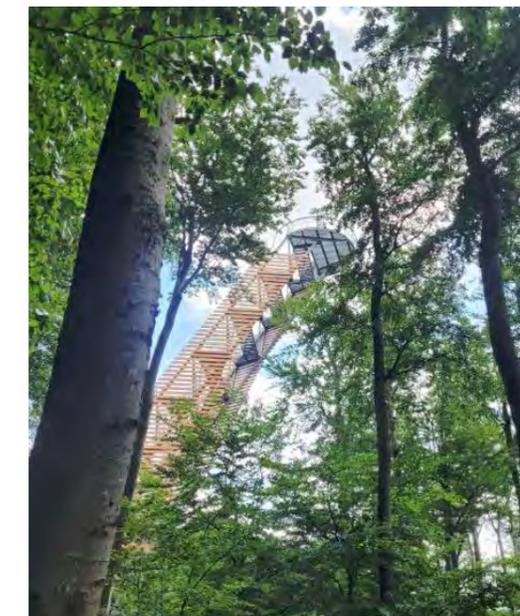
WISSENSCHAFTLICHES KOLLOQUIUM GRASELLENBACH

20. - 22. Juli 2022 | Hotel Siegfriedbrunnen in Grasellenbach

Nachdem die 18. Auflage des traditionellen wissenschaftlichen Kolloquiums in Riezeln in den Jahren 2020 und 2021 coronabedingt pausieren musste, sollte im Sommer 2022 unbedingt eine Möglichkeit zum kompetenzbereichsübergreifenden Austausch für die wissenschaftlich Mitarbeitenden von MPA-IfW geschaffen werden. Aufgrund von anhaltenden Unsicherheiten bezüglich möglicher Reisebeschränkungen wurde diesmal eine Alternative zum, in den letzten Jahren regelmäßig besuchten, Alphotel „Walserstuba“ in Riezeln gesucht und mit dem Landhotel „Siegfriedbrunnen“ in Grasellenbach im Odenwald gefunden. Nach der Anreise, die aufgrund der geographischen Nähe von zumindest vier der 24 Teilnehmerinnen und Teilnehmern mit dem Fahrrad absolviert wurde, konnten Ende Juli bei sommerlichen Temperaturen interessante Fachvorträge zu unterschiedlichsten Themen genossen werden. Angefangen bei zukunftsorientierten Themen, die sich mit dem Einsatz von synthetischen Kraftstoffen im Bereich der Mobilität der Zukunft abspielten über die Vorstellung aktueller Forschungsschwerpunkte einzelner Mitarbeiter*innen, zum Werkstoffverhalten und der Materialprüfung unter Hochtemperatur und Raumtemperatur, bis hin zu historisch bedeutsamen Erfindungen und gesellschaftlichen Entwicklungen (z. B. der Geschichte des Bieres) waren viele interessante und lehrreiche Vorträge im Programm enthalten. Auch mit Hinblick auf den in Zukunft bevorstehenden Umzug des Instituts MPA-IfW in das Center for Reliability Analytics (CRA) und der damit verbundenen Herausforderung den hausinternen Materialfluss möglichst effizient gestalten zu können, wurden beachtliche Fortschritte bei der Gestaltung eines Materiallagers (inklusive der digitalen Abbildung und Steuerung des Materialflusses) präsentiert. Insbesondere für die Doktoranden unter den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Kolloquiums sorgte der Vortrag von Prof. Oechsner zum Thema „Nützliches zur Dissertation“ für großes Interesse. Neben den aktuellen Randbedingungen zu Dissertationen im Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt wurden dort auch Tipps zur Struktur der wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen einer Dissertation präsentiert. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Teilnehmerinnen und Teilnehmern wurde über die sehr

lebhaften Diskussionen im Rahmen der Fachvorträge hinaus auch bei einer gemeinsamen Wanderung auf die Tromm gestärkt. Der von einer Planungsgesellschaft aus Darmstadt entworfene und umgesetzte sehenswerte Trommturm konnte dabei leider nur von unten bestaunt und noch nicht bestiegen werden. Alles in allem konnten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer auch abseits des in den letzten Jahren zu bestaunendem Bergpanoramas des Hohen Ifen, eine interessante und lehrreiche Zeit im nahegelegenen Odenwald verbringen.

Fabian Kraemer & Timo Brune





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

DR.-ING.
PETER HOF

WASSERSTOFFSEMINAR 2022

12. + 13. Juli 2022 | Maritim Hotel Darmstadt

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

Schon zum zweiten Male wurde in diesem Jahr ein Seminar zum Thema Wasserstoff vom Verein der Freunde ausgerichtet. Unter dem Thema „Wasserstoff – Anforderungen an die Werkstoffqualifizierung“ trafen sich am Thema Interessierte zu einer eineinhalbtägigen Veranstaltung im Maritim Hotel in Darmstadt. Neben einem Grundlagenseminar am Nachmittag des ersten Tages wurde am zweiten Tag die Thematik in insgesamt neun Fachvorträgen, davon zwei aus dem eigenen Haus, intensiv diskutiert. Die Veranstaltung wurde allseits als voller Erfolg gewertet.



Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ist erklärtes politisches Ziel zur Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern und der Realisierung der Energiewende. Die Nationale Wasserstoffstrategie des Bundes sowie der Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft in Verbindung mit der Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff aus regenerativen Energien werden die Wasserstofftechnologie langfristig etablieren. Neben den unbestrittenen Chancen für eine klimaneutrale Energiewirtschaft besitzt Wasserstoff unter bestimmten Bedingungen ein nicht zu vernachlässigendes Gefährdungspotenzial, da es in Wechselwirkungen mit Werkstoffen zur Schädigung oder einer beschleunigten Degradation derer Eigenschaften kommen kann.

Das eineinhalbtägige Seminar rund um das Thema Wasserstoff beleuchtet diese Gefährdungspotenziale für relevante Anwendungen mit Fokus auf Energietechnik und Mobilität. Es leistet für die Teilnehmenden einen Beitrag bezüglich der daraus resultierenden Anforderungen an eine Werkstoffqualifizierung für den sicheren Einsatz in der Praxis.

externe Vortragende:

- Prof. Dr. J. P. Hofmann**
FG Oberflächenforschung, TU Darmstadt
- Prof. Dr. M. Spiegel**
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg
- Dr. K. Schöttler**
Liebherr Aerospace, Lindenberg
- Dr. J. Riedel**
Firma iChemAnalytics GmbH, Detmold
- Dr. B. Waldmann**
RWE Power AG, Bergheim
- Prof. Dr. F. Opferkuch**
Kompetenzzentrum Energietechnik, TH Nürnberg

9. MPA-IFW KOLLOQUIUM 2022

30. August 2022 | Georg-Lichtenberg-Haus

Das diesjährige neunte MPA-IfW Kolloquium des Vereins der Freunde des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe MPA-IfW fand am 30.08.2022 in kleinem Rahmen im Georg-Lichtenberg-Haus der TU Darmstadt statt.

Durch den Vorsitzenden des Vereins, Herrn Prof. Dr.-Ing. Oechsner, wurden traditionell die Preisträger mit den MPA-IfW-Awards für die beste studentische Arbeit und der Preis für die beste Promotion aus dem Hause des vergangenen Jahres gekürt. Die Preisträger stellten ihre Arbeit im Rahmen eines Vortrages auf der Veranstaltung vor. Zum Ausklang der Veranstaltung hatten Preisträger und Gäste der Veranstaltung bei einem kleinen Stehempfang auf der Terrasse des Gebäudes 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
Tel.: +49 6151 16-25142
peter.hof@tu-darmstadt.de

Beste studentische Arbeit / Beste Promotion 2021:

- Experimental and numerical investigations on the joining zone formation during direct thermal joining of metal/polymer connections
Fabiano Icisaca Indicatti, M.Sc.
- Ein mechanismenbasiertes Konzept zur Bewertung der Strukturintegrität keramischer Multilagen-Wärmedämmschichten
Dr.-Ing. Marcel Adam



v. l. n. r.: Fabiano Icisaca Indicatti, M.Sc.; Prof. Matthias Oechsner;
Dr.-Ing. Marcel Adam



ERÖFFNUNG GLASS COMPETENCE CENTER (GCC)

Die seltene Kombination aus Transparenz, Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Rezyklierbarkeit macht die Faszination von Glas als Baustoff aus und ist für verschiedene Anwendungen, wie im Fassaden- und Automobilbau, äußerst attraktiv. Das Potential des vergleichsweise alten und recycelbaren Werkstoffs Glas ist jedoch noch nicht ausgeschöpft. Mit neuen Technologien, wie Additive Fertigung und Künstliche Intelligenz, sowie kontinuierlicher Forschung, lässt sich das Leistungsvermögen und der Anwendungsbereich von Glas weiter vergrößern. Das neugegründete Glass Competence Center (GCC) der TU Darmstadt leistet dazu einen wesentlichen Beitrag im universitären Umfeld. Im GCC sind die Kompetenzen des Instituts für Statik und Konstruktion (ISM+D) und der Materialprüfungsanstalt (MPA-IW) auf dem Gebiet des konstruktiven Glasbaus und Fassadenbaus gebündelt. In dem neu geschaffenen Forschungsbau lassen sich alle wesentlichen Prozesse der Flachglasverarbeitung realisieren. Im Einzelnen können die Flachgläser

durch die Verarbeitungsmaschinen zugeschnitten, geschliffen, gebohrt, gewaschen und zu Verbundsicherheitsglas laminiert werden. Weitere Maschinen, wie eine thermische Vorspannanlage und ein Glasschmelzofen sind in der Planung. Neben den Glasverarbeitungsmaschinen verfügt das GCC über ein Klebelabor, ein Schmelzlabor und ein optisches Labor zur Analyse von Glasprodukten. Weitere Ausstattungshighlights sind der selbstentwickelte Glas-3D-Drucker zum Bedrucken von Flachglas und ein Fassadenprüfstand (Abmessungen 12 m x 3,6 m). Diese Anlagen in Kombination mit den hervorragenden Untersuchungsmöglichkeiten ermöglichen es uns am GCC Theorie und Experiment in der Forschung zu verknüpfen, mit unseren Partnern gemeinsam nachhaltige Innovationen zu entwickeln, unseren Studierenden in Lehre und Forschung ein ideales Lernumfeld zu bieten und den Wissensaustausch zwischen Anwendern, Behörden, Industrie, Studierenden und Forschenden zu stärken.

Dr. Matthias Seel, GCC



Übersicht über die Themenfelder im Glass Competence Center

DVM-JUNIORINNEN-PREIS

DVM AK Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen | 09.11.2022

Wir gratulieren ganz herzlich Frau Sandra Megahed, M. Sc. zur Verleihung des DVM-JuniorInnen-Preis für ihren herausragenden Vortrag im Rahmen des DVM AK Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen zum Thema:

„Mechanical Evaluation of Generic Components for Property Assessment of LPBF Components“.

Der Vortrag beruht auf Ergebnissen aus dem AIF-IGF Vorhaben „LPBF Hochtemperaturlebensdauer“, welches über die FVV e.V. koordiniert wird.

Der 2011 neu geschaffene DVM-JuniorInnen-Preis ist eine Auszeichnung für junge WissenschaftlerInnen. Sie wird für einen herausragenden Vortrag bei einer DVM-Arbeitskreisveranstaltung vergeben. Der Preis soll Anerkennung für diese herausragende Arbeit und Motivation für weiteres engagiertes Forschen in der Zukunft sein.



Preisträgerin Frau S. Megahed, M.Sc.; Fachgebietsleiter Prof. M. Oechsner

FORMNEXT 2022

15.-18.11.2022 | Messe Frankfurt

Die Formnext 2022 war auch dieses Jahr ein absolutes Highlight für unser Zentrum. Als Teil des Gemeinschaftsstands des „Technologieland Hessen“ konnten wir unser Schulungsprogramm vorstellen und Möglichkeiten für die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Wissenschaftler*innen der TU Darmstadt für den Wissens- und Technologietransfer diskutieren. Viele positive Rückmeldungen zu unserem Schulungsangebot sowie neue Kontakte und Projektideen haben unseren Auftritt auf der Messe zu einem vollen Erfolg gemacht. Ein herzliches Dankeschön an alle Mitarbeitenden, die sich am Stand und in den Vorbereitungen engagiert haben!

Dr. Michael Krämer



VORTRAGSVERZEICHNIS 2022

M. Adam – J. Filipovic, C. Kontermann, M. Oechsner
On the structural integrity of multilayer thermal barrier coating systems.
10 RIPT Conference, Forschungszentrum Jülich, 1.-3. Juni 2022

V. Arya – R. Reitz, M. Oechsner
Alkoxide corrosion in future fuels: Development of experimental methods and a simulation approach.
MSE2022, Darmstadt, 27.-29. Sept. 2022

V. Arya – R. Reitz, M. Oechsner
Analysis and simulation of alkoxide corrosion occurring in automotive metals with Biofuels.
MS&T 2022, Pennsylvania, 9. Okt. 2022

A. Blug – A. Bertz, D. Carl, F. Conrad, C. Kontermann, M. Oechsner
Echtzeit-Bildkorrelation: Neue Möglichkeiten zur Datenerfassung an mehrachsigen Risswachstumsversuchen.
DVM Arbeitsgruppe Mixed Mode, Köln, 14. Juli 2022

T. Brune – M. Krämer, S. Megahed, C. Kontermann, M. Oechsner
Correlations between microstructural characteristics of IN718 from different manufacturing routes and mechanical properties under static and cyclic loading.
MSE2022, Darmstadt, 27.-29. Sept. 2022

C. K. Chandra – B. Heider, R. Reitz, M. Oechsner
Influence of Forming and Heat Treatment Processes on the Corrosion Behavior of EN AW-7075.
MSE2022, Darmstadt, 27.-29. Sept. 2022

C. K. Chandra – B. Heider, R. Reitz, M. Hatzky, S. Böhm, M. Oechsner
Influence of Friction Stir Weld Parameters on the Corrosion Susceptibility of EN AW-7075 Weld Seam and Heat Affected Zone.
MSE2022, Darmstadt, 27.-29. Sept. 2022

F. Conrad – A. Blug, J. Kerl, D. J. Regina, A. Bertz, C. Kontermann, D. Carl, M. Oechsner
Direction and Path-Independent DIC Strain-Field Evaluation for uniaxial and biaxial Fatigue Crack Growth Investigations.
LCF9 Ninth International Conference on Low Cycle Fatigue, Berlin, 21.-23. Juni 2022

F. Conrad – J. Filipovic, C. Kontermann, M. Oechsner, A. Blug, A. Bertz, D. Carl
Numerical and experimental investigation of plasticity induced crack-closure in case of multiaxial fatigue crack growth with constant and component-near loading cases.
ECF23, Funchal - Madeira, 27. Juni - 1. Juli 2022

F. Conrad – A. Blug, C. Kontermann, M. Oechsner, A. Bertz, D. Carl
Zum Einfluss mehrachsiger Beanspruchungen auf das Ermüdungsrisswachstum - Eine vergleichende Studie mit Corner-Crack

und Kreuzproben.
DVM Arbeitsgruppe Mixed Mode, Köln, 17. Juli 2022

F. Conrad – C. Kontermann, A. Blug, D. J. Regina, A. Fischersworing-Bunk, G. Dhondt, D. Carl, M. Oechsner
Crack growth behavior of Ti6246 alloy using corner crack and cruciform specimen under uniaxial, biaxial and static-cyclic loading.
ICMFF13, New Orleans, 2.-4. Nov. 2022

F. Conrad - A. Erbe, C. Kontermann, M. Krämer, M. Oechsner
Influencing factors on the fatigue life of a 1Cr-cast steel at elevated temperatures under multiaxial loading.
ICMFF13, New Orleans, 2.-4. Nov. 2022

J. Filipovic – M. Adam, C. Kontermann, M. Oechsner
Mechanical and thermokinetic description of innovative coating systems.
23. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Poster, Loeben, 20.-22. Juli 2022

J. Filipovic – M. Adam, C. Kontermann, M. Oechsner
Mechanical and thermokinetic description of innovative coating systems.
International Thermal Spray Conference and Exposition (ITSC), Poster, Wien, 6.-4. Mai 2022

E. Gazenbiller – D. Höche, V. Arya, R. Reitz, M. Oechsner
Phase field modelling of alcoholate pitting corrosion of Al in nonaqueous ethanol-blended fuels.
EUROCORR 2022, Berlin, 29. August 2022

J. Hasnain – H. Scheerer, R. Reitz, M. Oechsner
Evaluation of the Fatigue Behavior of PVD Coatings using Vibration-induced Cavitation.
PSE 2022, Erfurt, Poster, 12.-15. Sept. 2022

J. Hasnain – H. Scheerer, R. Reitz, M. Oechsner
Initial Deterioration Mechanisms of PVD Coatings in Corrosive Polymer melts.
PSE 2022, Erfurt, Poster, 12.-15. Sept. 2022

H. Hoche – T. Ulrich, M. Oechsner
Enhancement of the corrosion properties by alloying binary magnetron sputtered DC-PVD-TiN coatings with MgGd.
PSE 2022, Erfurt, 12.-15. Sept. 2022

H. Hoche
Bauteilschäden – Bewertung, Folgerungen und Abhilfemaßnahmen.
DVM-Fortbildungsseminar, Clausthal-Zellerfeld, 27.-29. Sept. 2022

F. Jäger – H. Hoche, A. Franceschi, M. Oechsner, P. Groche
Enhancement of the corrosion properties by alloying binary magnetron sputtered DC-PVD-TiN coatings with MgGd.
ICRS 11, Nancy, 27.-30. März 2022

T.-U. Kern – A. Diwo, U. Langer, M. Schwienheer, G. Maier
Project HOWEFLEX- MarBN Rotor Qualification for Load Flexible Application.
MIMA-2, Online, 11.-13. Okt. 2022

A. Klink
Evaluation of Flow Dynamic Test Bench Methods to Estimate Coolant Thermal Stability.
EUROCORR, 28. Aug. - 1. Sept. 2022

C. Kontermann – A. Erbe, V. Knauthe, M. von Buelow, T.-U. Kern, M. Oechsner
Ergebnisse einer systematischen und objektiven Ermittlung der Gleichmaßdehnungen an Zeitstandproben.
45. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, 25. Nov. 2022

S. Megahed – A. Udoh, M. Krämer, C. Heinze, C. Kontermann, S. Weihe, M. Oechsner
Influence of LPBF Build Direction on IN738LC Creep Behavior.
EuroSuperalloys 2022, Bamberg, 18.-22. Sept. 2022

S. Megahed – A. Udoh, M. Krämer, R. Herzog, C. Kontermann, S. Weihe, M. Oechsner
Bewertung generischer Bauteile zur mechanischen Beurteilung von LPBF-Bauteilen.
7. Tagung des DVM-Arbeitskreises Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen 2022, Berlin, 08.-09. Nov. 2022

M. Oechsner – M. Adam, C. Kontermann
Assessing the structural integrity of plasma-sprayed multilayer thermal barrier coatings.
Thermal and Environmental Barrier Coatings VI conference, Isee, 19.-24. Juni 2022

M. Pieperhoff – V. Arya, R. Reitz, M. Oechsner
Investigation of the effect of fuel ageing and corrosion in oxymethylene ether (OME).
EUROCORR 2022, Berlin, Poster, 29. Aug. 2022

P. Reinders – P. Kaestner, H. Hoche
Influence of plasma-diffusion-based surface modifications on the corrosion behavior and the contact resistance of austenitic stainless steels.
PSE 2022, Erfurt, Poster, 12.-15. Sept. 2022

R. Reitz – V. Arya, M. Oechsner
Test Method Development to Evaluate the Corrosion Behavior of Aluminum Materials in Oxygenates (OMEs).
MS&T 2022, Pennsylvania, 9. Okt. 2022

H. Scheerer
Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus.
TREFF EFDS 2022/1, Webinar, 2. März 2022

H. Scheerer
Korrosionsschutz von Federn.
Lehrgang „Kaltgeformte Federn“, Ilmenau, 20. Sept. 2022

A. Udoh – A. Klenk, S. Megahed, C. Kontermann
Entwicklung von Prüfkonzepten zur Bewertung additiv gefertigter Bauteile für den Hochtemperatureinsatz.
48. VDI Jahrestagung - Schadensanalyse in der Energietechnik 2022, Würzburg, 18.-19. Okt. 2022

T. Ulrich – H. Hoche, P. Polcik, M. Oechsner
Influence of gadolinium on the mechanical and corrosion properties of PVD-TiMgN and PVD-TiMgGdN sputtered by multicomponent powder metallurgical targets.
PSE 2022, Erfurt, 12.-15. Sept. 2022

PUBLIKATIONSVERZEICHNIS 2022

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, 2022, Vol. 145, S. 031014-1 - 031014-7, ISSN 1528-8919
<reviewed>

V. Arya – M. Oechsner, R. Reitz
Synthetic Fuels – How to Successfully Evaluate the Materials Compatibility of Automotive Alloys in OMEs.
FSC Conference Report 2022, Konferenzbandbeitrag, S. 113

A. Blug – A. Bertz, D. Carl, F. Conrad, C. Kontermann, M. Oechsner
GPU-basierte Bildkorrelation für uni- und biaxiale Risswachstumsversuche.
Tagung Werkstoffprüfung 2022, Konferenzbandbeitrag, S. 428-433

C. Bullough – E. DeBruyker, E. Poggio, M. Schwienheer, M. Spindler
Creep rupture properties of ATI 718Plus – an approach to assessing sparse data.
Materials at High Temperatures, 2022, Vol. 39, Nr. 6, S. 655-667, ISSN 9603409
<reviewed>

M. Brilz – H. Hoche, M. Oechsner
Hydrogen-assisted cracking (HAC) as a function of the hydrogen pre-charging time.
Engineering Fracture Mechanics, 2022, Vol. 261, Nr. 108246, ISSN 1875-9262
<reviewed>

T. Brune – M. Krämer, C. Kontermann, M. Oechsner
Comparison of Wrought and Additively Manufactured IN718 Concerning Crack Growth Threshold and Fatigue Crack Growth Behaviour.
Strength, Fracture and Complexity, 2022, Vol. 15, Nr. 1, S. 17-28, ISSN 1875-9262
<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, 2022, Vol. 145, S. 011016-1 - 011016-10, ISSN 1528-8919
<reviewed>

F. Conrad – A. Blug, J. Kerl, D. J. Regina, A. Bertz, C. Kontermann, D. Carl, M. Oechsner
Direction and Path-Independent DIC Strain-Field Evaluation for uniaxial and biaxial Fatigue Crack Growth Investigations
LCF9 Ninth International Conference on Low Cycle Fatigue, Konferenzbandbeitrag, S. 205-210

- F. Conrad – C. Kontermann, A. Blug, D. Carl, M. Oechsner
Influence of multiaxial far field loadings on the fatigue crack-growth behaviour by using corner-crack and cruciform specimen.
ASME Turbo Expo 2022, 2022, Konferenzbandbeitrag, Nr. GT2022-79394
 <reviewed>
- L. Duarte, J. A. Schönherr, M. Madia, U. Zerbst, M. B. Geilen, M. Klein, M. Oechsner
Recent developments in the determination of fatigue crack propagation thresholds.
International Journal of Fatigue 164, 2022, Vol. 4, Nr. 107131
 <reviewed>
- A. Erbe – F. Conrad, K. M. Krämer, C. Kontermann, M. Bianchini, D. Kulawinski, M. Oechsner
A systematic experimental study on the impact of multiaxiality on fatigue life of cast steels at high temperature.
Procedia Structural Integrity, 2022, Vol. 38, S. 192-201, ISSN 2452-3216
 <reviewed>
- J. Ewald – S. Sheng, H. Almstedt, F. Müller, D. Osorio
40 Jahre Projektgruppe W14 - Fortschritte in der Beschreibung des Kriechrisshverhaltens.
45. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Konferenzbandbeitrag, S.558-577
- A. Franceschi – F. Jäger, H. Hoche, M. Oechsner, P. Groche
Calibration of the residual stresses with an active die during the ejection phase of cold extrusion.
International Journal of Material Forming, 2022, Vol. 15, Nr. 56
 <reviewed>
- F. Garnadt – C. Kontermann, M. Oechsner
Einfluss von Haltezeiten auf Risssschließen.
54. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchmechanik und Bauteilsicherheit, 2022, Vol. Br-2022-BB, S. 175-184
 <reviewed>
- F. Garnadt – C. Kontermann, M. Oechsner
Crack Closure in Cycles with Dwell Times at High Temperature.
Engineering Fracture Mechanics, 2022, Vol. 268, S. 108463, ISSN 0013-7944
 <reviewed>
- F. Garnadt – C. Kontermann, M. Oechsner
Early Crack Growth from Notches under Creep-Fatigue Loading.
Procedia Structural Integrity, 2022, Vol. 42, S. 1113-1120, ISSN 2452-3216
 <reviewed>
- M. B. Geilen – M. Klein, M. Oechsner, D. S. Leininger
A New Method for the Calculation of Characteristics of Disc Springs with Trapezoidal Cross-Sections and Rounded Edges.
Materials, 2022, Vol. 15, Nr. 5
 <reviewed>
- M. B. Geilen – T. Niwinski, M. Klein, M. Oechsner
Ermüdungsfestigkeit von Schraubendruckfedern - Vergleich der Berechnung nach DIN EN 13906-1 und der FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Federn und Federelemente“.
Neue Entwicklungen für die Bauteilfestigkeitsnachweise (DVM Tagung), 2022, S. 203-210
 <reviewed>
- S. Sajjadifar – T. Suckow, B. Heider, M. Oechsner, P. Groche, T. Niendorf
Cooling rate as a process parameter in advanced roll forming to tailor microstructure, mechanical and corrosion properties of EN AW 7075 tubes.
Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2022, Vol. 53, Nr. 12, S. 1479-1493
 <reviewed>
- C. Heinemann – C. Kontermann, M. Schwienheer, F. Müller, M. Oechsner
Extrapolation Methods: Development, Application and Validation of Novel Methods – Part 1: Advanced Testing Concepts.
Materials at High Temperatures, 2022, Vol. 39, Nr. 6, S. 634-646, ISSN 9603409
 <reviewed>
- D. Jobski – S. Linn, C. Kontermann, M. Oechsner
Harmonized modelling of low cycle fatigue life curves with temperature, dwell, and strain rate variation.
LCF9 Ninth International Conference on Low Cycle Fatigue, Konferenzbandbeitrag, S. 198-202
- A. Klink – J. Hussong, S. Jarkirlic, M. Oechsner, R. Reitz, S. Wegt
LES-Predicted Flow Patterning in a Newly-Designed Reference Test Sample with Relevance to IC Engine-Related Cooling Channels.
SAE Technical Paper, 2022, Nr. 2022-01-0394, ISSN 0148-7191
 <reviewed>
- A. Klink – M. Oechsner, R. Reitz
Evaluation of the Material and Media Compatibility in Integrated Thermal Management Systems.
14th Expert Forum Electric Vehicle Drives, 2022, Konferenzbandbeitrag, S. 47-55
- C. Kontermann – A. Erbe, F. Conrad, M. Krämer, D. Kulawinski, M. Bianchini, M. Oechsner
Deformation and Damage Behavior of a 1 Cr-Cast Steel under Multiaxial Loading at Elevated Temperatures.
Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, Vol. 145, S. 041017-1 - 031014-9, ISSN 1528-8919
 <reviewed>
- A. Kraemer – M. Klein, M. Oechsner
Bewertung von Mikrostruktureffekten der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter Stahl- und Verbundbrücken.
23. DAST-Forschungskolloquium, 2022, Konferenzbandbeitrag, S. 9-12
 <reviewed>
- F. Kraemer – M. Stähler, M. Klein, M. Oechsner
Influence of Lubrication Systems on the Fatigue Strength of Bolted Joints.
Applied Sciences, 2022, Vol. 12, Nr. 6
 <reviewed>
- M. Krämer – T. Brune, F. Müller, C. Kontermann, M. Oechsner
Crack growth measurement under thermo-mechanical fatigue loading using alternating current potential drop.
ASTM STP, 2022, Vol. 163820210039, S. 160-185
 <reviewed>
- M. Krämer – L. Wöllmann, C. Kontermann, M. Oechsner
In-situ observation of the local deformation behavior of coarse grained nickel cast alloys under thermo-mechanical fatigue loading using digital image correlation.
ASTM STP, 2022, Vol. 163820210039, S. 116-137
 <reviewed>
- K. Neumann – P. Hofmann, M. von Buelow, V. Knauthe, T. Wirth, C. Kontermann, A. Kuijper, S. Guthe, D. Fellner
A Structure from Motion Pipeline for Orthographic Multi-View Images.
2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2022, Konferenzbandbeitrag, S. 1181-1185, ISBN 978-1-6654-9620-9/22
 <reviewed>
- T. Niwinski – M. Becker, S. Herter, M. Klein, M. Oechsner
Vorspannkraft-Monitoring mittels Ultraschallmethoden ohne Referenzmessung - Verlässliche Vorspannkraftermittlung für verbaute Schraubenverbindungen.
Schweißen und Schneiden, 2022, Vol. 4, S. 446-452
 <reviewed>
- M. Schwienheer – T.-U. Kern, A. Diwo, U. Langer, G. Maier
Qualifizierung des Werkstoffs MarBN für Rotoranwendungen – Grundcharakterisierung und Langzeiteigenschaften.
45. Vortragsveranstaltung zum Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Konferenzbandbeitrag, S. 516-527
- H. M. Vu – S. Meiniger, B. Ringel, H. Hoche, M. Oechsner, M. Weigold, M. Schmitt, G. Schlick
Investigation of Material Properties of Wall Structures from Stainless Steel 316L Manufactured by Laser Powder Bed Fusion.
Metals, 2022, Vol. 12-2, Nr. 285
 <reviewed>
- J. Zhu – M. Madia, U. Zerbst, H. Schlums, M. Schurig, F. Conrad, C. Kontermann, M. Oechsner
Kennwertermittlung für die Bewertung der Integrität einer Turbinenscheibe bei Überdrehzahl.
Tagung Werkstoffprüfung 2022, Konferenzbandbeitrag, S. 411-426

