

» Werkstoffprüftechnik – effiziente Prüfstrategien zur Qualitäts- und Leistungsbewertung von Werkstoffsystemen«

Das Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT) der Fakultät Maschinenbau der Technischen Universität Dortmund wird seit seiner Gründung im Dezember 2010 von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther geleitet. Im Zeitalter von Hightech und Perfektion sind fehlerfreie Hochleistungsprodukte und individualisierte Fertigungsstrategien für viele Branchen unverzichtbar geworden. Ohne fortschrittliche, maßgeschneiderte Werkstoffprüf- und -analyseverfahren sowie erstklassige Prüfkompetenz sind diese Innovationen undenkbar. Durch die möglichst exakte Bewertung des Einflusses von Produktionsprozessen und Betriebsbeanspruchungen auf die Mikrostruktur und damit auf die Bauteileigenschaften wird eine Optimierung des Eigenschaftsprofils sowie eine Erhöhung der Funktionssicherheit im Betrieb erzielt. Die Werkstoffprüftechnik leistet durch die Ermittlung grundlegender Werkstoff- und Bauteildaten einen wichtigen Beitrag zur Bewertung der Wechselwirkung zwischen Produktion, Mikrostruktur und Bauteileigenschaften im Sinne einer möglichst effizienten Produktentwicklung und -optimierung.

Stahl und Aluminium – hochfeste Werkstoffe im Wettbewerb

Mit modernen Mess- und Prüfverfahren sowie optimierten Analyse- und Auswertetechniken liefert die Werkstoffprüftechnik die Datenbasis für die Konstruktion und Fertigung sowie für die virtuelle Entwicklung betriebssicherer Hochleistungsprodukte für unterschiedlichste wirtschaftliche Branchen. Als Entscheidungshilfe bei der Werkstoffauswahl, Qualitätskontrolle, Bauteilüberwachung und Schadensanalyse umfasst die Werkstoffprüfung hierbei die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung, die Untersuchung der Gefügestruktur mit Licht-, Elektronen- und Röntgenstrahlen, die Ermittlung von Werkstoffeigenschaften und -kennwerten unter Einsatz zerstörender

und zerstörungsfreier Prüfungen sowie die Entwicklung von Materialmodellierungs- und -berechnungsansätzen. Neben der beanspruchungsgerechten Qualifizierung der Werkstoffe und der Optimierung industrieller Fertigungsprozesse gewinnen Maßnahmen des Structural Health Monitoring (SHM) zur kontinuierlichen Überwachung der strukturellen Integrität hochbeanspruchter Bauteilsysteme genauso an Bedeutung wie Berechnungsansätze zur präzisen Bestimmung der Restlebensdauer.

In Forschung und Lehre werden grundlegende- und anwendungsorientierte Themen der zerstörenden und zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung in Theorie und Praxis behandelt. Im Fokus steht dabei die Charakterisierung von Prozess-Struktur-Eigenschaft-Beziehungen, die

Beurteilung des Verformungsverhaltens und Schädigungsfortschritts sowie die Berechnung der Lebensdauer metall- und polymerbasierter Konstruktionswerkstoffe, Verbindungen und Bauteile. Die mikrostruktur- und mechanismenbasierte Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens vom Low-Cycle-Fatigue- (LCF-) bis zum Very-High-Cycle-Fatigue- (VHCF-) Bereich bildet einen Themenschwerpunkt. Als Kernbausteine der Untersuchungsstrategie dienen die Analyse der Werkstoffe und Mikrostrukturen sowie der Einsatz prozess- und produktoptimierter Mess- und Prüfverfahren einer präzisen Charakterisierung der Werkstoffe, Verbindungen und Bauteile, sowie der Modellierung der Eigenschaften und Berechnung der Lebensdauer. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Mikrostruktur „als Fingerabdruck“ die Ursache der mecha-

1



Abbildung 1: Forschungsgruppen des Fachgebiets Werkstoffprüftechnik

nisch-technologischen Eigenschaften liegt. Die exakte Beschreibung des Einflusses von Herstellungs-, Umgebungs- und Betriebsbedingungen auf die grundlegenden Materialkennwerte zielt auf die Optimierung des Eigenschaftsprofils und die Erhöhung der Funktionssicherheit der Bauteile ab.

Die in wissenschaftlichen und industriellen Forschungsprojekten adressierten Themen beschäftigen sich mit Untersuchungen zu Stählen, Leichtmetallen, additiv gefertigten Werkstoffen und Verbundwerkstoffen (Abb. 1). Am WPT sind circa 20 Doktoranden/innen und circa 30 studentische Hilfskräfte, Bachelor- und Masterarbeiter/innen sowie Gastwissenschaftler/innen wissenschaftlich tätig.

Die Inhalte in geförderten Forschungsprojekten adressieren u.a. die Themen Automobil- und Bahntechnik, Luft- und Raumfahrt, Biomedizintechnik, Kernenergie und Bauwesen. Gemäß dem Titel des Jahresmagazins „Stahl und Aluminium – hochfeste Werkstoffe im Wettbewerb“ stehen die untersuchten Werkstoffklassen in Konkurrenz, allerdings finden diese in ausgewählten Hybridsystemen auch gemeinsam Anwendung.

Im Folgenden wird auszugsweise die Laborausstattung zur Durchführung mechani-

scher, mikroskopischer und röntgenografischer Untersuchungen dargestellt, wobei die in mechanischen Untersuchungen eingesetzte Messtechnik zusätzliche Möglichkeiten zur Auswertung werkstoffspezifischer Reaktionsgrößen ermöglicht und dadurch der Erkenntnisgewinn signifikant erhöht wird:

Mechanische Prüfsysteme

- Universalprüfsysteme
- Kerbschlagbiegeprüfsysteme
- Umlaufbiegeprüfsysteme
- Elektromagnetische Mikroschwingprüfsysteme
- Servohydraulische Schwingprüfsysteme
- Resonanzschwingprüfsysteme (Abb. 2a)
- Ultraschallschwingprüfsysteme

- Zubehör für Tief- und Hochtemperatur (Abb. 11a)
- Zubehör für Feuchtigkeit und Korrosion (Abb. 6a)

Messtechnik

- Mechanische Sensorik (Abb. 2b, Abb. 8a, Abb. 11a)
- Thermische Sensorik (Abb. 2b, Abb. 4a)
- Elektrische Sensorik (Abb. 2b, Abb. 8a)
- Magnetische Sensorik
- Optische Sensorik
- Akustische Sensorik

Härteprüfsysteme

- Instrumentierte Eindringprüfung
- Mikrohärtprüfsysteme
- Makrohärtprüfsysteme

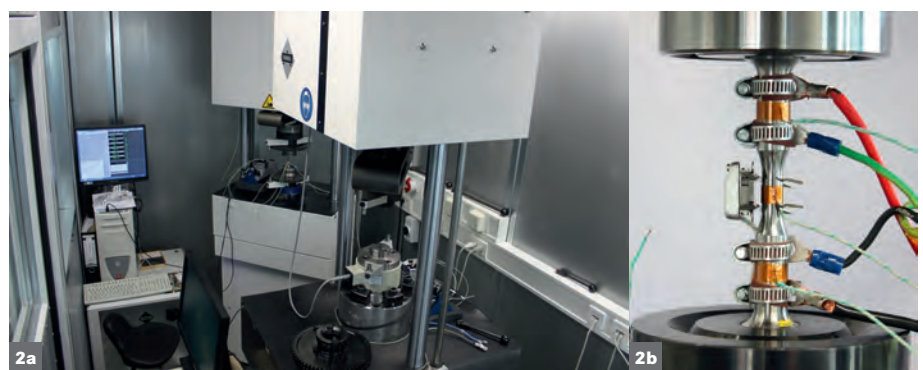


Abbildung 2: (a) Resonanzschwingprüfsysteme zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens (b) instrumentierter Proben

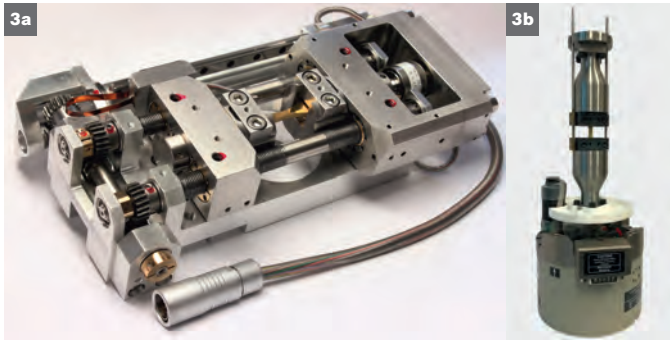


Abbildung 3: In-situ-Belastungseinrichtungen für Untersuchungen unter mechanischer Beanspruchung im (a) Rasterelektronenmikroskop und (b) Computertomograf

Bildgebende Analytik

- Lichtmikroskopie
- Rasterelektronenmikroskopie
- Computertomografie
- In-situ Zug-/Biegemodule (Abb. 3)

Forschungsgruppe „Stähle“

Im Bereich der Stahlwerkstoffe stehen u.a. Baustähle, Einsatz- bzw. Vergütungsstähle 16MnCrS5 und 42CrMo4, Dualphasenstahl DP800 und säurebeständige, austenitische Chrom-Nickel-Stähle im Fokus der Untersuchungen. Nachfolgend werden exemplarisch einige Forschungsarbeiten aus der Gruppe „Stähle“ dargestellt.

SFB/TRR 188: Schädigungskontrollierte Umformprozesse (www.trr188.de)

Ziel des Transregios 188 ist es, Kompetenzen aus den Bereichen Umformtechnik, Werkstoffwissenschaften und der mechanischen Werkstoffmodellierung zu bündeln, um die Schädigungsnukleation und -evolution in der Umformung prozess- und skalenergreifend zu verstehen. Es sollen gemeinsam Strategien entwickelt werden, um die

Leistungsfähigkeit umformtechnisch erzeugter Bauteile nachhaltig zu verbessern, indem Schädigungsprofile und Lastpfade prädictiv optimiert werden. Zu diesem Zweck wird in den am WPT geförderten Teilprojekten B01 und C01 die messtechnische Erfassung der Inter-

aktion von duktiler und zyklischer Schädigung erforscht.

Das Projektziel in TP B01 ist die Entwicklung und Qualifizierung einer Kurzzeitversuchsmethodik auf der Basis instrumentierter uniaxialer Wechselverformungsversuche an Prüfkörpern aus 16MnCrS5 und DP800, um die Einflüsse duktiler Vorschädigung auf das Betriebsverhalten und die Lebensdauer umformtechnisch hergestellter Werkstoffzustände zu charakterisieren. Durch die messtechnische Erfassung der Schädigungsevolution auf der Makroskala wird ein grundlegendes Verständnis über die Interaktion einzelner Umformprozesse und Lastpfade im Hinblick auf die erzielbare Werkstoff- und Bauteilleistungsfähigkeit generiert.

Das Projektziel in TP C01 besteht in der Vorhersage des Betriebsverhaltens von Bauteilen aus 16MnCrS5 unter Berücksichtigung einer duktilen Vorschädigung und der Quantifizierung versagensauslösender mikrostruktureller Defekte sowie deren Beschreibung

auf der Basis thermomechanisch gekoppelter Materialmodelle. Auf der makroskopischen Skala soll insb. der Einfluss einer durch den Umformprozess induzierten duktilen Vorschädigung des Werkstoffs auf die Schädigungsevolution bei zyklischer torsionaler sowie axial-torsionaler Beanspruchung experimentell charakterisiert und modelliert werden.

In **Abb. 4** sind thermografische Aufnahmen zur orts aufgelösten Erfassung plastischer Verformungen an einer 16MnCrS5-Probe im Schwingversuch dargestellt. Neben der Thermografie soll die digitale Bildkorrelation in den Versuchsaufbau integriert werden, um den Übergang von der duktilen zur quasi-spröden Schädigung zu erfassen. Die Einflussgrößen Kaltverfestigung, Eigenspannungen und Schädigung auf die Ermüdungsfestigkeit von Kaltfließpressteilen konnten erfolgreich separiert werden. Mit geringeren Umformgraden hergestellte Prüfkörper weisen eine signifikant geringere Lebensdauer und ein deutlich stärker ausgeprägtes Entfestigungsverhalten auf als Varianten mit höheren Umformgraden. [Tek17]

Oberflächenrandzonenbeeinflussung durch Tiefbohren

Beim Einsatz von Vergütungsstählen in industriellen Anwendungen, insbesondere in der Automobilindustrie, ist das Schwingfestigkeitsverhalten von elementarer Bedeutung. Technologische Trends wie die Steigerung des Einspritzdruckes in der Dieseleinspritztechnologie oder Down-Sizing von Motorenkomponenten führen dazu, dass die Leistungsfähigkeit von vielen Komponenten hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit gesteigert werden muss. Neben einer Verwendung alternativer Werkstoffe stellen prozessseitige Optimierungen eine Möglichkeit dar, auf diese steigenden Anforderungen zu reagieren. Im Forschungsprojekt wird das Ermüdungsverhalten in Abhängigkeit unterschiedlicher Reinheitsgrade von Vergütungsstahl durch für diesen Zweck ausgelegte Zerspanprozesse verbessert. Das genaue Zusammenwirken zwischen Werkstoff und Werkzeug bei definierten Bearbeitungsparametern an der Werkstückoberflächenrandzone und deren Einfluss auf die Schwingfestigkeit sind bislang unerforscht. Für den Vergütungsstahl 42CrMo4+QT wird die Wechselwirkung zwischen Oberflächenrandzonenbeeinflussung

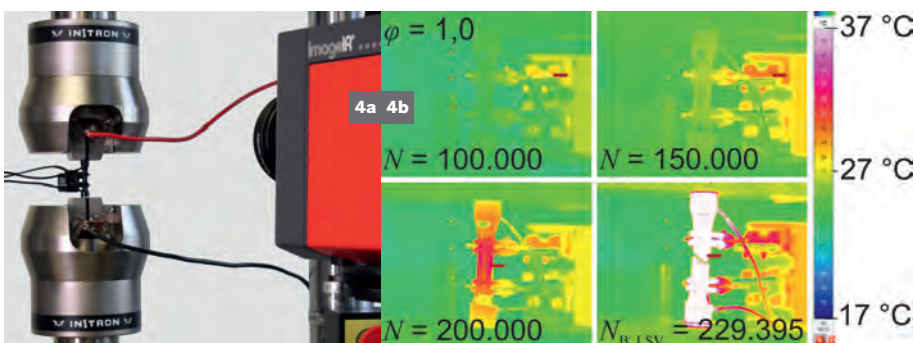


Abbildung 4: (a) Versuchsaufbau für (b) Thermografie-Aufnahmen zur Lokalisierung plastischer Verformungen im Schwingversuch; Werkstoff: 16MnCrS5

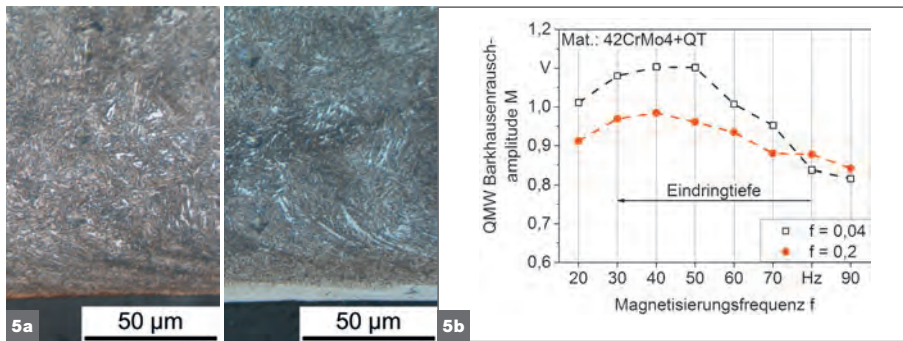


Abbildung 5: (a) Lichtmikroskopische Aufnahmen im Querschliff, $f = 0,04$ mm (links) und $f = 0,2$ mm (rechts); (b) quadratischer Mittelwert der Barkhausenrauschamplitude als Funktion der Magnetisierungsfrequenz; Werkstoff: 42CrMo4+QT

durch Tiefbohren, Mikrostruktur und Ermüdungsverhalten qualitativ und quantitativ beschrieben. Die Ergebnisse dienen der Entwicklung einer modellbasierten Korrelation zum werkstoff- und fertigungsparameter-abhängigen Randzonen-Schwingfestigkeits-Zusammenhang. Zur vergleichenden Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens kommen etablierte Versuche der zerstörenden Werkstoffprüfung in Kombination mit neuen zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Anwendung, die hinsichtlich der Charakterisierung von tiefgebohrten Proben weiterentwickelt werden.

Abb. 5a zeigt lichtmikroskopische Aufnahmen der Querschliffe von 42CrMo4+QT-Proben für zwei Vorschübe. In der unmittelbaren Bohroberfläche entstehen unterschiedlich ausgeprägte weiß-anätzende Schichten (White Etching Layer, WEL). Zur Korrelation röntgendiffraktometrischer Eigenspannungsmessungen wurde der

quadratische Mittelwert (QMW) der Barkhausenrauschamplitude M herangezogen. Die Magnetisierungsfrequenz variierte zwischen 20 und 90 Hz, wobei geringere Frequenzen ein tieferes Eindringen des Anregungssignals begünstigen. Die QMW(M)-Werte sind in Abb. 5b als Funktion der Magnetisierungsfrequenz für die zwei Vorschübe aufgetragen. Es konnte gezeigt werden, dass Werkstoffverfestigungen in der Bohrungsrandszone, unterstützt durch WEL-Bildung, einen großen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben und Eigenspannungen weniger dominant sind.

Korrosions-Ermüdungsverhalten von Lötverbindungen

Die Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens und die Bestimmung der Lebensdauer von Lötverbindungen ist bei überlagerter korrosiver Beanspruchung für viele industrielle Anwendungen von zentraler Bedeutung und eine grundlegende Voraussetzung für den zuverlässigen und wirt-

schaftlichen Betrieb gelöteter Bauteile. Aktuelle Forschungsarbeiten fokussieren i.d.R. auf die zeitintensive Aufnahme von Wöhlerkurven bis $2E6$ Lastwechsel. In diesem Falle sind eine vorgangs- und mechanismenorientierte Bewertung des Ermüdungsverhaltens sowie die systematische Evaluierung wesentlicher Einflussgrößen auf die Ermüdungseigenschaften von Lötverbindungen nicht möglich. Die der mechanischen Beanspruchung überlagerte korrosive Beanspruchung wird oftmals nicht betrachtet, obwohl die Korrosionsbeanspruchung die mechanischen Eigenschaften maßgeblich herabsetzen kann. Für die Lötverbunde aus X5CrNi18-10 mit Ni 620-Lot und X5CrNi18-10 mit Au 827-Lot kommt eine Prüfsystematik zur Anwendung, die mit reduzierter Probenanzahl detaillierte Kenntnisse zum Ermüdungs- und Lebensdauerverhalten ohne und mit überlagerter Korrosionsbeanspruchung garantiert. Durch die kombinierte Anwendung von ein- und mehrstufigen Experimenten und die Adaptierung anwendungsoptimierter Sensorik kann die Wechselverformung und Lebensdauer mit kleiner Versuchsanzahl zuverlässig ermittelt und berechnet werden. Dies bietet die Möglichkeit, schnell die Auswirkung von Einflussgrößen, wie Lötnahtfehlern und Sprödphasen, auf das Verformungs- und Schädigungsverhalten qualitativ und quantitativ zu erfassen. Der Einfluss korrosionsfördernder Atmosphäre wird anhand von Auslagerungsversuchen und Korrosions-Ermüdungsversuchen systematisch erforscht.

Abb. 6a zeigt den Versuchsaufbau zur Untersuchung bei überlagerter Korrosionsermüdungsbeanspruchung im synthetischen Abgaskondensat (K2.2) unter Verwendung einer Miniatur-Korrosionszelle. Die in situ-Zelle wurde so konstruiert, dass ein Extensometer und ein Standard-Dreielektrodensystem für elektrochemische Messungen integriert werden können. In Abb. 6b werden die Ergebnisse der Bruchlastspielzahlen in Abhängigkeit der Oberspannungen für X5CrNi18-10 mit Ni 620-Lot dargestellt. Es zeigt sich eine signifikante Beeinträchtigung des Ermüdungsverhaltens durch die vorangegangene und überlagerte Korrosionsbeanspruchung in synthetischem Abgaskondensat.

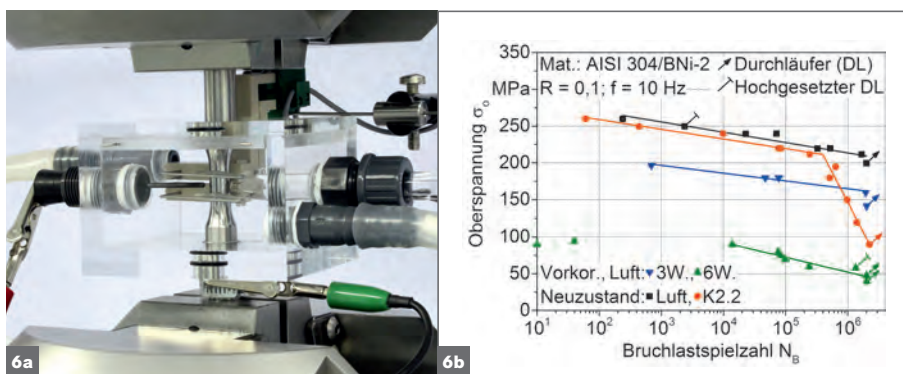


Abbildung 6: (a) Versuchsaufbau für Korrosionsermüdungsversuche mit in situ-Korrosionszelle; (b) Ergebnisse von Ermüdungsversuchen an Luft vor und nach Vorkorrosion sowie bei in situ-Prüfung im Abgaskondensat K2.2; Werkstoff: X5CrNi18-10 mit Ni 620-Lot [Sch16]

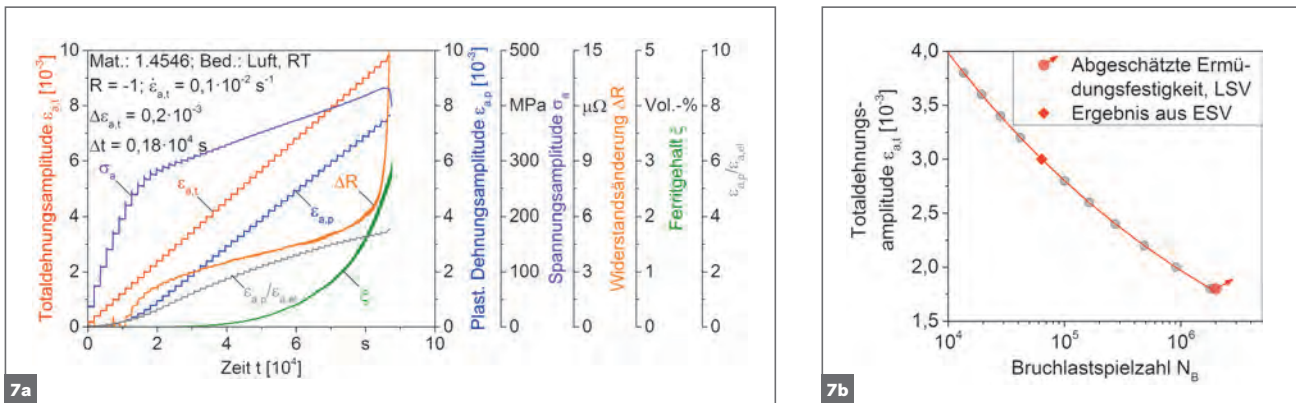


Abbildung 7: (a) Totaldehnungssteigerungsversuch mit Reaktionsgrößen an Luft; (b) Berechnung der Ermüdungsfestigkeit basierend auf Gleichungen von Basquin und Manson-Coffin; Werkstoff: X10CrNiNb18-9 [Kle16]

Ermittlung der Einsatzdauer von Werkstoffen und Komponenten der Kerntechnik

Rostfreie Stähle finden in einer Vielzahl von Industriezweigen Anwendung, u.a. in der Energie-, Chemie- und Pharmaziebranche sowie in der Textil-, Nahrungsmittel- und Papierindustrie. Sicherheitstechnisch relevante Bauteile und Komponenten aus metastabilen austenitischen Stählen, wie z.B. Rohrleitungen in Leichtwasserreaktoren von Kernkraftwerken, unterliegen bestimmten betriebsbedingten thermischen, mechanischen sowie medialen Beanspruchungen, wodurch ihre Lebensdauer erheblich reduziert werden kann. Das Projektziel ist eine prozessorientierte Analyse der verschiedenen Ermüdungsmechanismen mithilfe zerstörungsfreier Prüfung und elektrochemischer Messtechniken, um ein Bemessungskonzept zur Ermittlung der maximalen Einsatzdauer ermüdungs- sowie korrosionsermüdungsbeanspruchter Werkstoffe und Komponenten zu entwickeln.

Totaldehnungsgeregelte Laststeigerungs- (LSV) und Einstufen-Versuche (ESV) erlauben eine Unterscheidung der Ermüdungs- und Schädigungsvorgänge in Abhängigkeit des Auftretens an der Oberfläche, im oberflächennahen Bereich sowie im Volumen von Proben oder Bauteilen. Ergänzend zu etablierten Kennwerten aus mechanischen Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleifen wurden elektrische Widerstands- und magnetische Kenngrößen sowie das elektrochemische Ruhepotential erfasst, um das zyklische Verformungsverhalten des metastabilen austenitischen Stahls X10CrNiNb18-9 an Luft (Abb. 7a) und in destilliertem Wasser zu charakterisieren. Alle Messgrößen zeigen ein belastungs- bzw. lastspielzahlabhängiges Verhalten aufgrund der stufenweisen Erhöhung der Totaldehnung, wodurch eine Identifikation und Separation der Ermüdungsphasen (rein elastisch, überwiegend elastisch, elastisch-plastisch, überwiegend plastisch) möglich wird. Das Ergebnis der Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit

anhand der Werkstoffreaktionsgrößen ist in Abb. 7b dargestellt und in exzellenter Übereinstimmung mit vergleichbaren Untersuchungen aus der Literatur.

Magnetpuls geschweißte Stahl/ Aluminium-Hybridbleche

Die Magnetpulstechnologie bietet die Möglichkeit, Stahl mit Aluminium linienförmig, verzugsarm, stoffschlüssig und ohne Gefügeänderungen durch Temperatureinflüsse zu fügen. Hierbei entsteht eine wenige Mikrometer dünne, intermetallische Phase, wodurch ein sprödes Versagen der Verbindungszone vermieden wird. Des Weiteren können mittels Magnetpuls-schweißen (MPS) in einem Puls und mit geringer Taktzeit (Schweißzeit $\ll 1 s$) große Schweißnahtlängen mit bis zu 2.000 mm Länge gefertigt werden, sodass das Verfahren eine hohe Produktivität aufweist. Besonders im Bereich der E-Mobilität gewinnt die Magnetpulstechnologie an Bedeutung und erfordert Erkenntnisse bei Hybridverbindungen und deren zyklischen Eigenschaften. Weitere potentielle Anwendungsgebiete sind der Schiffsbau, Bereiche der Elektrotechnik oder das Bauwesen. Das Ziel des Forschungsprojekts liegt in der Bestimmung zyklischer Eigenschaften magnetpuls geschweißter Stahl/Aluminium-Hybridbleche. In diesem Zusammenhang wird ermittelt, wie gezielte Topografieeinstellungen und korrosive Vorschädigungen die Schwingfestigkeit beeinflussen.

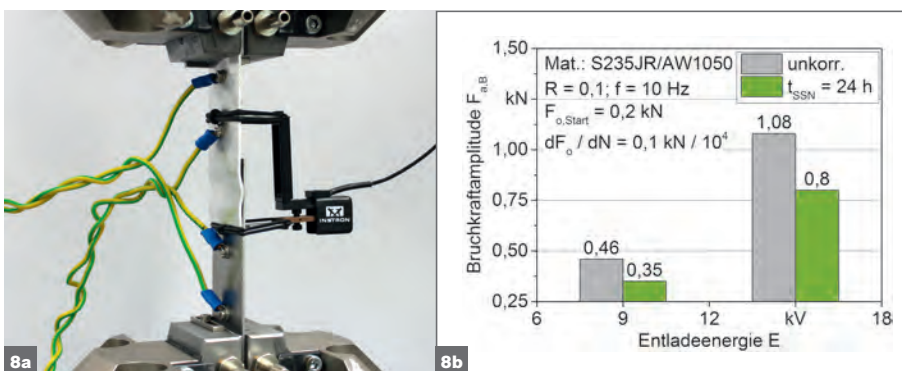


Abbildung 8: (a) Versuchsaufbau für Ermüdungsversuche instrumentierter Hybridbleche; (b) Bruchkraftamplituden aus kontinuierlichen Laststeigerungsversuchen; Werkstoff: S235JR/Al99,5-Hybridbleche

Die zyklischen Eigenschaften magnetpuls geschweißter St/Al-Hybridbleche der Werkstoffpaarung S235JR/Al99,5 wurden

mikrostrukturbasiert ermittelt. Verglichen wurden dabei Proben, die mit unterschiedlichen Prozessparametern (Entladeenergie bzw. Ladespannung) gefertigt wurden. Zur Untersuchung der Einflüsse korrosiver Belastungen wurden Proben für 24 Stunden in einer Salzsprühnebelkammer vorkorrodieren. Die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens erfolgte in kontinuierlichen Laststeigerungsversuchen mit sinusförmiger Last-Zeit-Funktion im Zugschwellbereich. Als Werkstoffreaktionsgrößen wurden die plastische Dehnung und elektrische Widerstandsänderungen der Hybridbleche erfasst. **Abb. 8a** zeigt eine Probe mit applizierter Sensorik. **Abb. 8b** zeigt den Vergleich der Bruchkraftamplituden aus kontinuierlichen Laststeigerungsversuchen. Es ist zu erkennen, dass die höhere Entladeenergie bei der Probenfertigung eine erhebliche Performancesteigerung bewirkt, wohingegen die Auslagerung der Hybridbleche in korrosiver Atmosphäre eine Absenkung der Ermüdungsfestigkeit zur Folge hat.

Forschungsgruppen „Leichtmetalle“ und „Additive Fertigung“

Im Bereich der Leichtmetalle bzw. additiv gefertigten Leichtmetalle werden u.a. die Aluminiumlegierungen EN AW-6060 (AlMgSi0,5), EN AW-7075 (AlZn5,5MgCu), AlSi12, AlSi10Mg und AlSi7Mg0,3, die Magnesiumlegierungen AE42, AZ31, AZ91 und Mg-4Al-2Ba-2Ca (DieMag422) und die Titanlegierung Ti6Al4V untersucht. In der Folge werden exemplarisch einige Forschungsarbeiten zu Aluminiumlegierungen aus den Gruppen „Leichtmetalle“ und „Additive Fertigung“ dargestellt.

Umformtechnische Wiederverwertung von Aluminiumspänen

Aufgrund des großen Potenzials zur Ressourcenschonung stellt die direkte Wiederverwertung von Aluminiumspänen durch Strangpressen eine vielversprechende Alternative zum energieintensiven Einschmelzen mit anschließendem Urformprozess dar. In einem abgeschlossenen Projekt konnte gezeigt werden, dass durch dieses Fertigungsverfahren der Massivumformung Strangpressprofile aus Aluminiumspänen erzeugt werden können, die vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen wie stranggepresstes Guss-

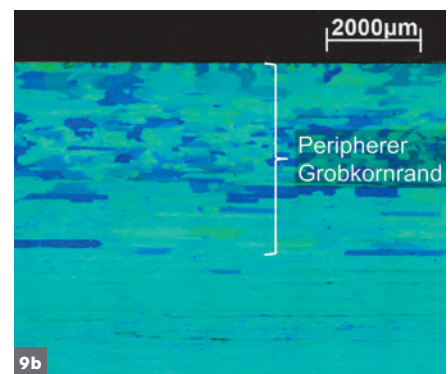
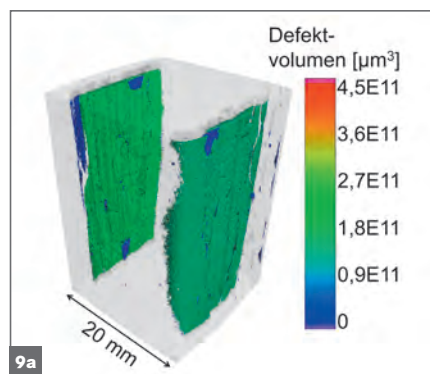


Abbildung 9: (a) Mikro-computertomografische Defektanalyse; (b) lichtmikroskopische Aufnahme im Querschliff, peripherer Grobkornrand; Werkstoff: AlMgSi0,5 [Goe17]

material. Das Ziel ist die Erweiterung der Prozessgrenzen des Spänestrangpressens. Für die Ausweitung des Einsatzfeldes spänebasierter Strangpressprofile besteht jedoch Forschungsbedarf hinsichtlich der zyklischen Eigenschaften sowie der Abhängigkeit der Eigenschaften von der Art und Richtung auftretender Beanspruchungszustände der Strangpressprofile aus Spänen. Zusätzlich ist eine Vorhersage der Eigenschaften spänebasierter Strangpressprofile in Abhängigkeit der Prozessparameter nicht möglich. Um die Wechselwirkung zwischen Prozessparametern, den im Strangpressprofil auftretenden Zustandsgrößen und den daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften ermitteln zu können, soll ein numerisches Modell des Spänestrangpressens entwickelt werden.

Zur Charakterisierung des Einflusses der Qualität der Späneverschweißung auf die mechanischen Eigenschaften, wurden quadratische und runde Profile aus AlMgSi0,5 mit einer Flachmatrize gepresst und in drei Zonen unterteilt: Profil, Übergang und Kontakt. An den Proben wurden mikro-computertomografische Defektanalysen durchgeführt. Die Profilproben beider Geometrien weisen sehr geringe Defektanzahlen und -volumina auf, während zur Kontaktzone hin die Anzahl stark ansteigt und ebenfalls kleine Delaminationen auf der Oberfläche auftreten (**Abb. 9a**). Zur Ermittlung der Härteverteilung wurde ein Makro-Härtemapping durchgeführt. Der im äußeren Bereich der Proben entstandene Grobkornrand (**Abb. 9b**), der infolge einer erhöhten Temperatur durch Rezipientenreibung und Scherspannung entstanden ist, weist eine leicht höhere Härte auf.

Kurzrissmodellierung von Al-Si-Mg-Gusslegierungen bei sehr hohen Lastspielzahlen

Die Anwendbarkeit und die Entwicklung von Aluminiumgusslegierungen für hochbeanspruchte Bauteile im Maschinenbau, in der Fahrzeug- und Energietechnik, erfordert sichere und quantitative Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen der Mikrostruktur und den Ermüdungseigenschaften. Diese Kenntnisse sind bei Gusslegierungen von besonderer Bedeutung, da die Werkstoffeigenschaften von der Bauteilgeometrie abhängen und entsprechend der lokalen Erstarrungsbedingungen erheblich variieren können. Wenngleich mittels Gießsimulation eine Vorausberechnung von Mikrostrukturcharakteristiken möglich ist, können diese nur unzulänglich mit den mechanisch-technologischen Eigenschaften korreliert werden. Vor diesem Hintergrund soll anhand gezielt erstarrter Modelllegierungen und Werkstoffproben des Systems Al-Si-Mg eine Zuordnung von Mikrostrukturparametern und Ermüdungsfestigkeit erfolgen. Neben der Identifikation der Ermüdungsschädigungsmechanismen auf mikrostruktureller Ebene ist deren Implementierung in ein physikalisch-basiertes Kurzrissmodell vorgesehen. Zielsetzung ist eine sichere Vorhersage der Ermüdungslebensdauer für unter frei wählbaren Bedingungen erstarrte Aluminiumgusslegierungen. Das Modellierungskonzept soll ferner einen Beitrag für ein gezieltes Werkstoffdesign liefern, indem die als wesentlich identifizierten Parameter in vereinfachten Modellgefügen variiert werden können.

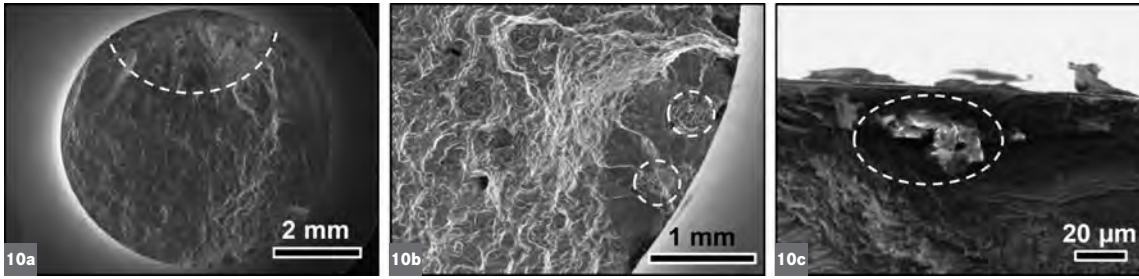


Abbildung 10: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen charakteristischer Bruchflächen; (a) Übersichtsaufnahme; (b) poreninduzierte Rissinitiiierung; (c) Rissinitiiierung an einer Mikrozele; Werkstoff: AlSi7Mg0,3 [Kno16]

In Abb. 10 sind charakteristische Bruchflächen für porenbehaftete (a, b) und porenfreie Zustände (c) der Legierung AlSi7Mg0,3 dargestellt. In Abb. 10a ist der Übergang zwischen Ermüdungs- zu Restgewaltbruchfläche mit gestrichelter Linie gekennzeichnet. Je nach Zustand kann festgestellt werden, dass die Rissinitiiierung an Poren (Abb. 10b) oder Mikrozele (Abb. 10c) erfolgt. Während die kritische Defektgröße (gestrichelte Kreise, Rissinitiiierung) für die porenbehafteten Zustände bei mehreren 100 µm liegt (Abb. 10b: circa 400–500 µm), ist diese für den porenfreien Zustand mit mehreren 10 µm (Abb. 10c: circa 30–40 µm) um den Faktor 10 geringer. Die verringerte Kerbwirkung führt bei gleicher Beanspruchung zu einer vielfach längeren Lebensdauer.

Spanlose Gewindefertigung in Leichtbauprofilen

Metallische Leichtbauwerkstoffe werden zur Dynamiksteigerung, Ressourcenschonung und Emissionsminderung in vielen Bereichen der Verkehrstechnik eingesetzt, wobei Bauteile mit Hilfe von Schweiß-, Löt-, Klebe- oder Schraubverbindungen hergestellt werden. Das Fließbohren bietet als umformendes

Verfahren in Kombination mit anschließender Gewindefertigung für metallische Leichtbauprofile die Möglichkeit, durch lokales Aufweiten des Materials ein Innengewinde mit größerer nutzbarer Gewindetiefe als die eigentliche Profilstärke zu erzeugen. Für die Aluminium- und Magnesiumlegierungen AlSi10Mg, AZ31 und AZ91 wird ein prozesssicheres Fließbohrkonzept entwickelt, um im Anschluss mittels Gewindeformen lösbare Fügstellen zu generieren. Dabei bietet das Gewindeformen im Gegensatz zu spanender Gewindebearbeitung den Vorteil, dass es spanlos durchgeführt wird und dass es durch die Umformung zu einer Kaltverfestigung des Werkstoffs in der Randzone kommt. Das Ziel besteht in der ganzheitlichen Entwicklung, Charakterisierung und Optimierung der innovativen Fließbohrbearbeitung mit anschließender Gewindefertigung für Aluminium- und Magnesiumlegierungen, wobei insbesondere die modellbasierte Korrelation zur Ermittlung von Prozess-Struktur-Eigenschaft-Beziehungen im Vordergrund steht. Die prozessbedingten geometrischen bzw. mikrostrukturellen Eigenschaften der Innengewinde werden mit den mechanischen Eigenschaften korreliert, wodurch eine strukturbasierte

Hochtemperaturversuche bei betriebsrelevanten Temperaturen (z.B. 210° C für Anwendungen im Motorenbau) durchgeführt. In Abb. 11a ist ein Versuchsaufbau zur Charakterisierung mechanischer Eigenschaften bei höheren Temperaturen dargestellt. Zur Ermittlung von Totaldehnungen im Zugversuch bzw. Hysteresis-Kennwerten im Schwingversuch kommt ein taktiles Hochtemperatur-Extensometer zum Einsatz. Die Magnesiumlegierung AZ31 weist höhere ertragbare Beanspruchungen im Vergleich zur Aluminiumlegierung AlSi10Mg auf [Wit16], was neben geometrisch bedingten Unterschieden in prozessbedingten Kaltverfestigungen in Randbereichen der Gewindeflanken der Mg-Legierungen begründet ist. Für AlSi10Mg-Gewindeproben wurden keine Härtesteigerungen in den Randbereichen festgestellt (Abb. 11b).

Additiv gefertigte Aluminiumlegierungen für Luftfahrtanwendungen

Topografieoptimierte und ressourceneffiziente Leichtbau-Komponenten, die in der Luft- und Raumfahrt benötigt werden, sind aufgrund komplexer Strukturen durch konventionelle maschinelle Bearbeitung meist kosteneffizient nicht zu realisieren. Additive Herstellungsprozesse bieten die Möglichkeit komplexe kundenspezifische Bauteile aus Pulvern zu generieren, die die Anforderung erfüllen müssen, defektfrei zu sein. Da derzeit keine hochfesten Aluminiumlegierungen verarbeitet werden, soll ein additives Fertigungsverfahren für AlZn5,5MgCu entwickelt werden, das hohe Bauteilqualitäten garantiert. Zu diesem Zweck wird eine effiziente Prüfmethodik angewandt, um den Einfluss prozessbedingter Defekte und ihrer Verteilung auf die Ermüdungsfestigkeit zuverlässig vorherzusagen und Prozessoptimierungsmaßnahmen ableiten zu können.

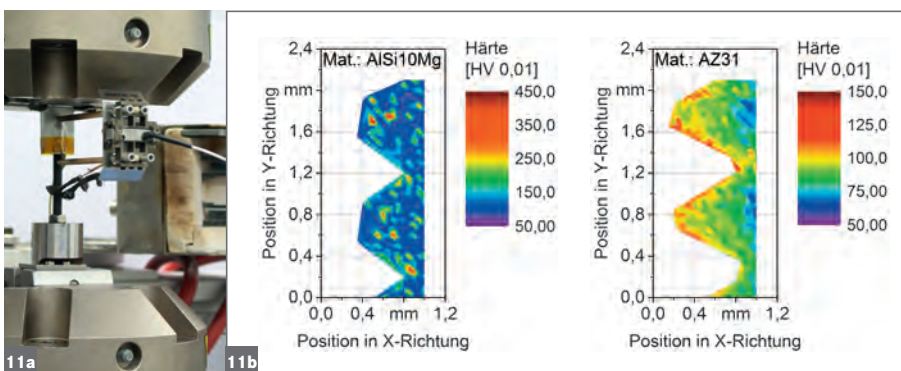


Abbildung 11: (a) Versuchsaufbau für Hochtemperatur-Ermüdungsversuche instrumentierter Gewindeproben; (b) Mikro-Härtemappings von Gewindeproben; Werkstoffe: AlSi10Mg und AZ31

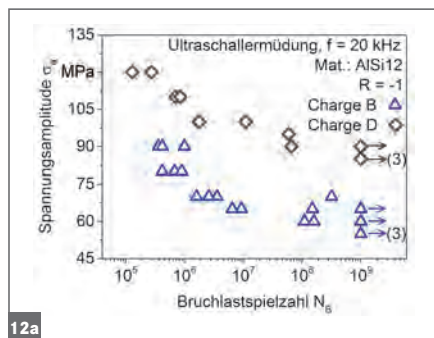
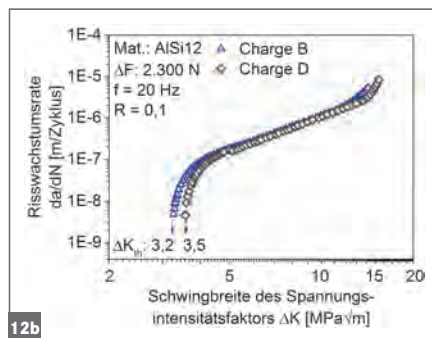


Abbildung 12: (a) Wöhlerkurven im LCF- und VHCF-Bereich; (b) Risswachstumsgeschwindigkeit; Werkstoff: AISi12 [Sid17]



Da bezüglich der Prozessierung der Aluminiumlegierung AlZn5,5MgCu Untersuchungen zum Einfluss von Prozessparametern auf die Entstehung und Vermeidung von Heißrissen stattfinden, finden sich nachfolgend ausgewählte Ergebnisse aus Untersuchungen an laseradditiv gefertigten AISi12-Werkstoffen. Einfluss auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften laseradditiv gefertigter Werkstoffe hat neben laserspezifischen Parametern die Vorwärmung der Grundplatte (Base Plate Heating, BPH) des SLM-Systems. **Abb. 12a** zeigt Wöhlerkurven im Low-Cycle-Fatigue- (LCF-) und Very-High-Cycle-Fatigue- (VHCF-) Bereich für Proben, die ohne vorgewärmte (Charge B) und mit vorgewärmter Grundplatte (Charge D) prozessiert wurden. Proben der Charge D besitzen eine um circa 45% höhere Ermüdungsfestigkeit und eine geringere Streuung als Proben der Charge B. Proben der Charge D weisen zudem geringere Mikro-Porositäten auf und sind daher weniger anfällig für Rissinitiierungen an inneren Defekten. Die Risswachstumsgeschwindigkeiten beider Chargen sind in **Abb. 12b** dargestellt. Im Bereich der Paris-Gerade zeigen beide Chargen ein ähnliches Verhalten in Bezug auf die Rissausbreitung, wohingegen Unterschiede im Schwellenwert und im kritischen Spannungsintensitätsfaktor zu erkennen sind. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Vorwärmung der Grundplatte während der Prozessierung der Proben, die mit niedrigeren Abkühlraten und somit größeren Mikrostrukturen einhergeht, den Widerstand gegen Risswachstum erhöht.

Es ist offensichtlich, wie vielfältig und weitreichend die Werkstoffprüftechnik ist,

in der an der TU Dortmund unterschiedlichste Themen von der wissenschaftlichen Grundlagenforschung bis zur anwendungsbezogenen Entwicklungs- und Untersuchungsdienstleistung für Industrieunternehmen bearbeitet werden. Das Fachgebiet Werkstoffprüftechnik ist national und international vernetzt und bearbeitet Projekte kooperativ in interdisziplinärer Zusammensetzung, um auch bei steigender Komplexität qualitative Exzellenz zu garantieren. In der Lehre werden wissenschaftliche Grundlagen mit aktuellen Anwendungsbeispielen kombiniert, um die Studierenden für die Werkstofftechnik zu begeistern und optimal auf die späteren Erfordernisse in der Praxis vorzubereiten. Diese Herangehensweise fördert die Motivation und trägt zum besseren Verständnis bei.

Autoren:

Dipl.-Ing. Philipp Wittke, Prof. Dr.-Ing. Frank Walther

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung diverser Forschungsprojekte im Bereich der Einzel- und koordinierten Förderung, wie z.B. SFB/Transregio 188. Weiterhin gilt der Dank der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) bzw. dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung von Projekten im Bereich anwendungsorientierter Grundlagenforschung. In diesem Zusammenhang wird der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.) sowie der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) für Ihre Unterstützung gedankt. Ein besonderer Dank gilt unseren akademischen und industriellen Forschungspartnern, die im Sinne wissenschaftlicher Exzellenz mit dem Fachgebiet Werkstoffprüftechnik zusammenarbeiten.

Literatur

[Goe17] Goerlich, P.; Walther, F.: Micro-computed tomographic defect analysis and hardness distribution of flat-face extruded EN AW-6060 aluminum chips. *Materials Testing* 59 (2017), accepted.

[Kle16] Klein, M.; Starke, P.; Nowak, D.; Boller, C.; Walther, F.: Separation of surface, subsurface and volume fatigue damage effects in AISI 348 steel for power plant applications. *Materials Testing* 58, 7–8 (2016) 601–607.

[Kno16] Knorre, S.; Krupp, U.; Michels, W.; Tenkamp, J.; Walther, F.: Einfluss der Porositätscharakteristik auf das Ermüdungs- und Rissfortschrittsverhalten der Aluminiumgusslegierung EN AC-AISI7Mg0,3. *Werkstoffprüfung 2016 – Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis*, Hrsg.: H.-J. Christ, Stahl-eisen, ISBN 978-3-514-00830-4 (2016) 77–82.

[Sch16] Schmiedt, A.; Heinen, M.; Walther, F.; Manka, M.; Tillmann, W.: Korrosionsermüdungsverhalten gelöteter AISI 304/BNI-2 Verbindungen in synthetischem Abgaskondensat. *Werkstoffprüfung 2016 – Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis*, Hrsg.: H.-J. Christ, Stahl-eisen, ISBN 978-3-514-00830-4 (2016) 119–124.

[Sid17] Siddique, S.; Imran, M.; Walther, F.: Very high cycle fatigue and fatigue crack propagation behavior of selective laser melted AISi12 alloy. *International Journal of Fatigue* 94, 2 (2017) 246–254.

[Tek17] Tekkaya, A.E.; Ben Khalifa, N.; Hering, O.; Rickmer, M.; Myslicki, S.; Walther, F.: Forming induced damage and its effects on product properties. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 66 (2017), in press.

[Wit16] Wittke, P.; Walther, F.: Cyclic deformation behavior of friction drilled internal threads in AISi10Mg and AZ31 profiles. *Procedia Structural Integrity* 2 (2016) 3264–3271.

KONTAKT:

Technische Universität Dortmund
 Fakultät Maschinenbau
 Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT)
 Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther
 Baroper Straße 303
 44227 Dortmund
 Tel.: +49 (0)231 755-8028
 Fax: +49 (0)231 755-8029
 mail@wpt-info.de
 www.wpt-info.de