Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82

Berücksichtigung der Oberflächenqualität von Wire Arc Additive Manufacturing in der Betriebsfestigkeit

Schwingfestigkeit von additiv gefertigtem EN AW-2319

M. Kiel, B. Möller

ZUSAMMENFASSUNG Die Bemessung der Lebensdauer von additiv gefertigten Bauteilen und Strukturen stellt eine Herausforderung dar. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in den Stand der Technik und beleuchtet spezifische Eigenheiten der Oberflächenbeschaffenheit mittels Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) hergestellter Strukturen. Es werden die eingesetzten Belastungssysteme und die zugehörigen Randbedingungen beschrieben. Experimentelle Ergebnisse zeigen den signifikanten Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die zyklische Beanspruchbarkeit der WAAM-Strukturen anhand von Proben.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Betriebsfestigkeit, DED-Arc (Direct Energy Deposition), WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), Schweißen (welding)

Fatigue strength of additively manufactured EN AW-2319

ABSTRACT The design for fatigue life of additively manufactured components and structures is challenging. This contribution provides an insight into the state-of-the-art and highlights specific characteristics of the surface quality of components produced by WAAM. The loading systems used, and the associated boundary conditions are described. Experimental results demonstrate the considerable influence of surface finishing on the cyclic load capacity of the WAAM structures using specimens.

1 Einleitung

In der heutigen Ingenieurpraxis wird der Betriebsfestigkeit von Werkstoffen und Bauteilen anwendungsbezogen eine entscheidende Bedeutung zu Teil, insbesondere in Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus, der Luft- und Raumfahrttechnik oder der Automobilindustrie, in denen auch immer häufiger die additive Fertigung Einzug erhält. Die Betriebsfestigkeit bezieht sich auf die Fähigkeit eines Bauteils oder Systems, wiederholten Belastungen unter Berücksichtigung des Werkstoffs, der Geometrie, der Belastung und von Umwelteinflüssen, standzuhalten, ohne dabei zu versagen. Während Betriebsfestigkeit infolge zyklischer Belastungen mit variablen Amplituden durch die sogenannte Gaßnerlinie beschrieben werden, wird der einfacherer Fall der Schwingfestigkeit unter konstanten Amplituden durch die Wöhlerlinie abgebildet. Diese werden jeweils durch Auftragung der Kraft-, Spannungs- oder Dehnungsamplitude beziehungsweise -schwingbreite (oder einer als Maß der Schädigung abgeleiteten Größe) über der Lebensdauer (Versagensschwingsspielzahl für ein definiertes Versagenskriterium) in einem doppelt-logarithmischen Diagramm dargestellt.

Traditionell wurde in vielen Anwendungen eine „dauerfeste“ Auslegung vorgenommen, das heißt ein Abknicken der Wöhlerlinie von der Zeitfestigkeitsgeraden in ein Horizontale vorausgesetzt, wodurch die Bauteile so dimensioniert werden, dass sie theoretisch unendlich viele Lastwechsel ohne Versagen überstehen können. Diese Herangehensweise führt jedoch oft zu überdimensionierten und somit schwereren und teureren Bauteilen. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Annahme einer „Dauerfestigkeit“ für eine Reihe von metallischen Werkstoffen und einer Vielzahl aus diesen Werkstoffen gefertigten Bauteilen nicht zutrifft, da die Schwingfestigkeit auch nach dem Abknickpunkt weiter abfällt – wenn auch mit einer flacheren Wöhlerlinienneigung – und der Begriff der „Dauerfestigkeit“ somit nicht allgemeingültig Verwendung finden kann, da auch einzelne Zyklen mit niedriger Belastung nach dem Abknickpunkt generell mit einer geringen Schädigung einhergehen und demnach ein Bauteil nie wirklich „dauerfest“ sein kann [1]. In [1] werden daher folgender Empfehlungen für die Neigungen nach dem Abknickpunkt gegeben, da deren experimentelle Ermittlung in Schwingfestigkeitsversuchen mit erhöhten Versuchszeiten und somit einem erhöhten Aufwand beziehungsweise Kosten verbunden ist:

- Für Eisenbasiswerkstoffe und Magnesiumlegierungen eine Neigung nach dem Abknickpunkt von $k^* = 45$ (5 % Schwingfestigkeitsabfall pro Dekade)
- Für Aluminiumlegierungen und Schweißverbindungen (mit hohen Zugeigenspannungen) eine Neigung nach dem Abknickpunkt von $k^* = 22$ (10 % Schwingfestigkeitsabfall pro Dekade)

Die in jüngerer Vergangenheit stärker in den Fokus gerückten Verfahren der additiven Fertigung fanden dort noch keine Be-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

rücksichtigung, sodass Erkenntnisse zunächst darauf zu übertragen und schließlich für diese Verfahren zu validieren sind. Insbesondere für die Verfahrensgruppe der Direct Energy Deposition (DED), zu der auch das lichtbogenbasierte Verfahren DED-Arc zählt [2], das verbreitet auch als Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) bekannt ist, wird auf Erkenntnisse aus der Schweißtechnik und für Schweißverbindungen zurückgegriffen.

Eine zunehmend bevorzugte Methode ist die betriebsfeste Auslegung. Hierbei werden die tatsächlichen Betriebsbelastungen und -bedingungen analysiert, um eine optimierte Bauteilgestaltung zu gewährleisten, welche die Anforderungen erfüllt und geforderte Lebensdauer sicherstellt, ohne Ressourcen übermäßig zu strapazieren. Diese Methode ermöglicht eine effizientere Nutzung von Werkstoffen und Ressourcen, reduziert Kosten und trägt zur Nachhaltigkeit bei, indem sie die Umweltbelastung durch Optimierung des Herstellungsprozesses verringert. Durch die betriebsfeste Auslegung werden Bauteile so konzipiert, dass sie eine definierte Anzahl von Belastungszyklen ertragen können, was in vielen Anwendungsfällen eine praktische und wirtschaftliche Lösung darstellt.

Besonders in der additiven Fertigung ist die betriebsfeste Auslegung häufig mit vielen Herausforderungen verbunden. Unterschiedlichste Oberflächenzustände, wie Rauigkeiten, Topografien oder (mechanisch abgetragene) Stützstrukturen, Temperaturgradienten und Abkühlgeschwindigkeiten, welche allein an einem Bauteil variieren können, einhergehend mit teilweise unstetigen Fertigungsparametern sorgen dafür, dass auch die Werkstoff- und Bauteileigenschaften lokal stark variieren. Vor diesem Hintergrund ist es besonders herausfordernd, bereits in der Auslegung zuverlässige Aussagen zur Lebensdauer treffen zu können.

2 Stand der Technik

2.1 Versuchsführung

Grundlage für die betriebsfeste Auslegung bilden mechanische Kennwerte, die das zyklische Werkstoffverhalten beschreiben. Das zyklische Werkstoffverhalten, beschrieben durch die zyklische Spannungs-Dehnungs-Linie (zSDL) und die Dehnungs-Wöhlerlinie, wird in dehnungsgeregelten Versuchen an Werkstoffproben ermittelt, deren Kennwerte als Eingangsgrößen in das örtliche Konzept (Kerbgrundkonzept) Einzug finden. In diesem Konzept wird das elastisch-plastische Werkstoffverhalten berücksichtigt, was insbesondere dann an Relevanz gewinnt, wenn lokale plastische Beanspruchungen im Bauteil nicht auszuschließen sind. In dehnungsgeregelten zyklischen Schwingfestigkeitsversuchen wird eine Werkstoffprobe mit konstanten Dehnungsamplituden belastet. Dabei findet die zyklische Belastung so lange statt, bis Versagen eintritt, was beispielsweise der Probenbruch sein kann. Um eine Aussage hinsichtlich der Lebensdauer für unterschiedliche Belastungsniveaus treffen zu können, ist es erforderlich Schwingfestigkeitsversuche bei verschiedenen Dehnungsamplituden durchzuführen und nachfolgend eine Regression für eine Inter- oder gebenenfalls Extrapolation durchzuführen. Aus den aufgezeichneten Daten können versuchsspezifische Kennwerte, wie die vorgegebene Dehnungsamplitude ε_a und die stabilisierte Spannungsamplitude σ_a beziehungsweise die Spannungsamplitude bei Versagen (10 %iger Abfall der Spannung gegenüber dem stabilisierten Zustand) sowie die zugehörige Versagensschwingspielzahl N_V, ausgewertet werden. Die sogenannte stabilisierte Spannungsamplitude ist durch die bei halber Versagensschwingspielzahl vorliegende Spannungsamplitude definiert. Anhand der ermittelten Kennwerte ist es möglich, Dehnungswöhlerlinien und zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven durch Regressionsrechnung aus Versuchspunkten abzuleiten. Durch die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und die Dehnungswöhlerlinie wird das zyklische Werkstoffverhalten vollständig beschrieben und es kann zur Berechnung von Lebensdauern für Bauteilen Verwendung finden.

2.2 Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens

Die Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens findet konventionell zum einen mithilfe der Dehnungswöhlerlinie nach dem Ansatz von Basquin-Coffin-Manson-Morrow (BCMM, häufig auch nur Coffin-Manson, CM, oder dieses erweitert auch Coffin-Manson-Basquin-Morrow, CMBM) [3-6] statt. Zum anderen kann unter Berücksichtigung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven (zSDK, engl. Cyclic stress-strain curve, cssc) nach Ramberg-Osgood [7] und der Verwendung von Kompatibilitätsgleichungen das zyklische Werkstoffverhalten mit den charakteristischen Parametern b, c, σ_f und ε_f für die Dehnungswöhlerlinie sowie die mithilfe der Kompatibilitätsbedingungen abgeleitet K' und n' für die Spannungs-Dehnungs-Kurve bestimmt werden.

Eine verbesserte Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens durch die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie wurde in [8] gezeigt und zu einer sogenannten Fatigue Life Curve (FLC) [9] erweitert, in der bei niedrigen Beanspruchungen mit linear-elastischem Werkstoffverhalten Versuchsergebnisse kraftgeregelter Versuche in der Auswertung berücksichtigt werden. Dem Ansatz der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie folgend wird der elastische Teil in drei Bereiche unterteilt und folglich durch die Parameter b_1, $\sigma'_{f,1}$, b_2, $\sigma'_{f,2}$, b_3, $\sigma'_{f,3}$, sowie c und ε'_f für den plastischen Teil charakterisiert. Die Parameter K' und n' werden weiterhin aus den Kompatibilitätsgleichungen unter Verwendung der Parameter des ersten Bereichs (b_1, $\sigma'_{f,1}$) abgeleitet. Das Vorgehen und die Herleitung der Parameter ist beispielsweise in der VDA 239-300 ausführlicher beschrieben [10].

2.3 Additive Fertigung mit dem Verfahren DED-Arc beziehungsweise WAAM

DED-Arc [2], Direct Energy Deposition using the process of gas metal arc welding (GMAW), das verbreitet auch als WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) bekannt ist, ist ein fortschrittliches Fertigungsverfahren, das die Prinzipien des Schweißens nutzt, um große Metallteile schichtweise aufzubauen. Dabei wird Schweißdraht als Ausgangsmaterial verwendet, der durch einen elektrischen Lichtbogen geschmolzen wird. Die Schmelze wird präzise positioniert, um nach dem Erstarren die gewünschte Bahn zu formen. DED-Arc beziehungsweise WAAM ermöglicht eine schnelle Produktion von großen und komplexen Bauteilen und ist besonders kosteneffektiv bei der Herstellung von Einzelstücken oder Kleinserien. Diese Technologie bietet erhebliche Vorteile hinsichtlich Material- und Zeitersparnis verglichen mit traditionellen Fertigungsverfahren und eröffnet neue Möglichkeiten beispielsweise in Bereichen der Luft- und Raumfahrt, dem Schiffbau oder der Automobilindustrie.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

2.4 Besonderheiten bei der Lebensdauerabschätzung additiv gefertigter Strukturen

Additiv gefertigte Bauteile und Strukturen stellen die Betriebsfestigkeit vor neue Herausforderungen, da Charakteristika aus unterschiedlichsten Oberflächenzuständen, Temperaturgradienten und Abkühlgeschwindigkeiten, einhergehend mit teilweise unstetigen Fertigungsparametern dazu führen, dass auch die Werkstoff- und Bauteileigenschaften lokal stark variieren. Werden Bauteiloberflächen anschließend an die Fertigung großzügig nachbearbeitet, zum Beispiel überfräst und/oder geschliffen, kann durch die Untersuchung des Kernwerkstoffes, das heißt polierte Proben aus dem inneren einer additiv gefertigten Struktur, eine recht gute Aussage zu den zyklischen Werkstoffeigenschaften im Bauteil getroffen werden und etablierte Bemessungskonzepte Verwendung finden können. Jedoch verliert die additive Fertigung für einige Anwendungen an Attraktivität, wenn Bauteile zwingend nachbearbeitet werden müssen. Zudem ist bei Hohlstrukturen, wie beispielsweise Kühlkanälen, oder Hinterschnitten eine Nachbearbeitung nur begrenz oder schlicht nicht möglich. Auch steigt der zusätzliche Aufwand, die Energiebilanz wird schlechter und die Kosten steigen.

Werden gedruckte Bauteile im as-built („wie gefertigt“; hier: bezogen auf den Oberflächenzustand, nicht eine potenzielle nachträgliche Wärmebehandlung) Zustand verwendet, muss auch eine Berücksichtigung der lokalen Eigenschaften stattfinden. So können deutlich unterschiedliche Oberflächentypen bereits an einem Bauteil vorliegen, wie **Bild 1** schematisch zeigt. Unterschieden wird, ob es sich beispielsweise um eine Oberfläche im Rand- oder Eckbereicht handelt (1 in Bild 1), ob die Kante eine Steigung aufweist, das heißt „up-skin“ liegt (2), ob es sich um einen „Überhang“ handelt, das heißt „down-skin“ positioniert ist (3), die Struktur so dünn ist, dass beidseitig Oberflächenstruktur anliegt und berücksichtigt werden muss (4), es sich um ein Volumen aus der innenliegenden Struktur handelt, das heißt Kernwerkstoff vorliegt (5), oder sogar die Grundfläche im Bauteil enthalten ist (6).

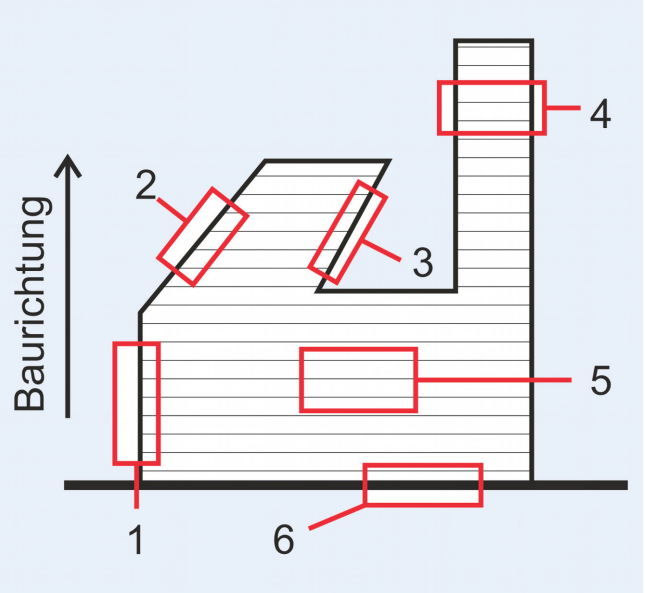

Bild 1. Oberflächentypen *Grafik: angelehnt an [10]*

Da sich bereits in der Oberflächentopografie größere Unterschiede einstellen können, unterliegt auch die Lebensdauer dieser Oberflächenabhängigkeit. Als Folge der beim WAAM-Prozess unweigerlich entstehenden Schweißraupen bildet sich eine wellige Oberfläche aus, die verfahrensabhängig zu unterschiedlich starken Spannungskonzentrationen in den Tälern führt. Spannungskonzentrationen wirken sich negativ auf die Lebensdauer aus, da eine Rissinitiierung begünstigt wird. Vergangene Untersuchungen haben gezeigt, dass durch einen 3D-Scan und einer anschließenden Finite Elemente Analyse der WAAM-Oberflächenstuktur, Versagensorte zuverlässig vorhergesagt werden können, was zeigt, welchen Einfluss die Oberflächentopografie haben kann, wie **Bild 2** zeigt. Bei dem gezeigten Probekörper handelt es sich um eine hohle geschweißte WAAM-Struktur mit annähernd dreieckigem Querschnitt aus dem Werkstoff EN AW-6063 T6, die unter zyklischer Axial-Biegebelastung untersucht wurden [11].

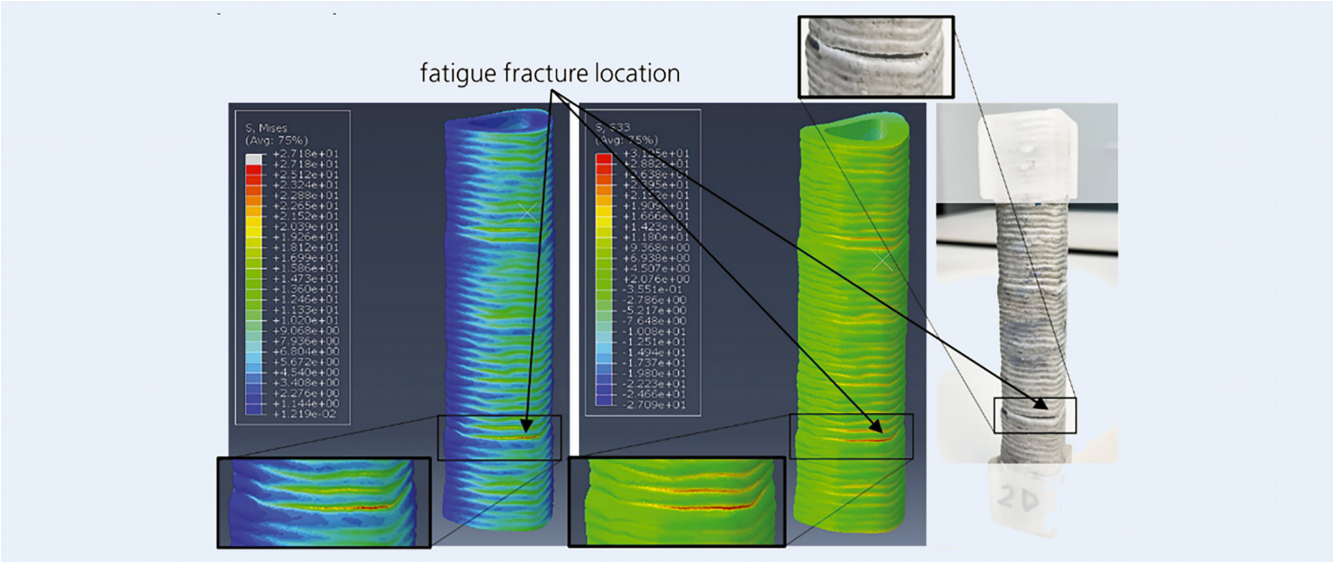

Bild 2. Oberflächenscan mit anschließender Finite-Elemente-Analyse. *Grafik: [11]*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

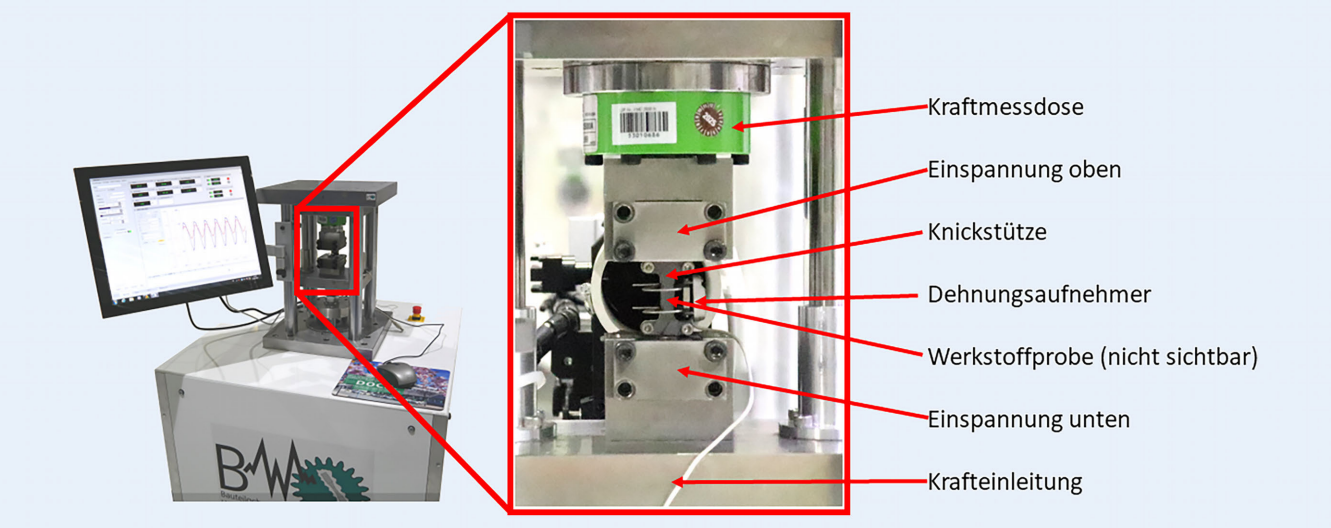

Bild 3. E-Zylinder Belastungssystem. *Foto/Grafik: Fraunhofer LBF*

Es besteht zwar nicht die Möglichkeit Bauteile frei vom Oberflächeneinfluss zu fertigen, jedoch kann deren Einfluss auf die Betriebsfestigkeit berücksichtigt werden, wenn die Oberfläche ausreichend gut charakterisiert ist. Das zyklische Werkstoffverhalten kann dabei zur Quantifizierung herangezogen werden. Eine Methode zur Charakterisierung der Oberfläche kann zum Beispiel das taktile oder optische Erfassen der Oberflächentopografie bieten. Eine anschließende Auswertung des Höhenprofiles und die Berücksichtigung der aus dem Höhenprofil resultierende Kerbwirkung, bietet Möglichkeiten unterschiedliche Oberflächen zu charakterisieren und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Schwingfestigkeit beziehungsweise des zyklischen Werkstoffverhaltens einzuordnen [12].

3 Belastungstechnik für zyklische Versuche

Die beiden zur Untersuchung des zyklischen Werkstoffverhaltens und im Folgenden vorgestellten Belastungssysteme sind vollständige Eigenentwicklungen des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF. Sie sind darauf abgestimmt in Kombination die Schwingfestigkeit beziehungsweise das zyklische Werkstoffverhalten von der Kurzzeitfestigkeit bis in die Langzeitfestigkeit untersuche zu können. Für die Regelung des Systems, die Datenaufzeichnung und die anschließend Datenauswertung kommt ebenfalls eine eigenentwickelte Softwareumgebung zum Einsatz. „FasTest“ wurde variabel konzipiert, sodass Schwingfestigkeitsversuche in Kraft-, Weg-, oder Dehnungsreglung durchgeführt, dokumentiert und ausgewertet werden können. Dabei findet eine kontinuierliche Abtastung und Speicherung der Eingangssignale statt. Es bietet demnach die Möglichkeit beispielsweise das Spannungs-Dehnungs-Verhalten über die gesamte Versuchslaufzeit zu analysieren. Dabei können Abtast- und Regelraten bis zu 100 000 Hz umgesetzt werden, sodass auch hochfrequente Versuchsabläufe realisiert werden können.

3.1 E-Zylinder Belastungssystem

Die E-Zylinder Belastungssysteme bestehen aus einem Schrittmotor und einem rotatorischen-translatorischen Übersetzungsgetriebe für eine axiale Lasteinleitung, **Bild 3**. Sie finden Verwendung, wenn Untersuchungen im Kurzzeitfestigkeits- und Zeitfestigkeitsbereich, also vorzugsweise dehnungsgeregelt, angestrebt sind.

Angetrieben wir das Belastungssystem durch einen leistungsstarken Schrittmotor, welcher sich mit der Antriebstechnik und Steuerung unten im inneren des Gehäuses hinter der Verkleidung verbirgt. Leistungsstarke Schrittmotoren bieten zahlreiche Vorteile, die sie für präzise Positionierungsanwendungen besonders geeignet machen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Positionsgenauigkeit aus und liefern ein starkes Drehmoment auch bei niedrigen Geschwindigkeiten. Zudem sind Schrittmotoren für ihre Zuverlässigkeit und Robustheit bekannt. Die geringen Resonanz- und Vibrationswerte zusammen mit ausgezeichneten Haltemoment-Eigenschaften bieten eine gute Grundlage, um widerholgenau zyklische Versuche durchführen zu können. Eingeschränkt ist das Belastungssystem in der maximalen Verfahrgeschwindigkeit, weshalb für Untersuchungen mit hohen Versuchsfrequenzen, also Versuche im hochzyklischen Bereich der Zeitfestigkeit und in der Langzeitfestigkeit, auf ein alternatives Belastungssystem, beispielsweise eine servohydraulische, resonanzgetriebene oder piezo-elektrische Aktorik ausgewichen werden sollte.

Im gut einsehbaren und zugänglichen freiliegenden Versuchsraum zwischen den Klemmbacken befindet sich die zu untersuchende Werkstoff- oder auch Bauteilprobe. Die Flachprobe dieser Untersuchung wird in Bild 3 von einer montierten Knickstütze überdeckt. Knickstützen werden benötigt, sobald die Proben Druckbeanspruchungen ausgesetzt sind und deswegen Gefahr des Ausknickens besteht. Da dehnungsgeregelte Versuche in der Regel bei einem Dehnungsverhältnis von $R_\varepsilon = -1$, das heißt in gleicher Beanspruchungshöhe wechselnd zwischen Zug- und Druckdehnung, durchgeführt werden, sind Knickstützen bei Flachproben gängige Praxis. Werkstoffproben werden durch die obere und untere Einspannung kraftschlüssig gehalten. Am oberen Ende befindet sich ein Kraftaufnehmer, welcher die aktuell anliegende Kraft erfasst, während auf der Unterseite die Last eingeleitet wird. Auf der Probenoberfläche ist ein Aufsetzextensometer mithilfe von Metallklammern montiert, welches die Dehnung der Probe im Untersuchungsbereich erfasst. Die mit dem Extensometer erfasste Messgröße Dehnung wird in dem Fall als Regelgröße verwendet.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

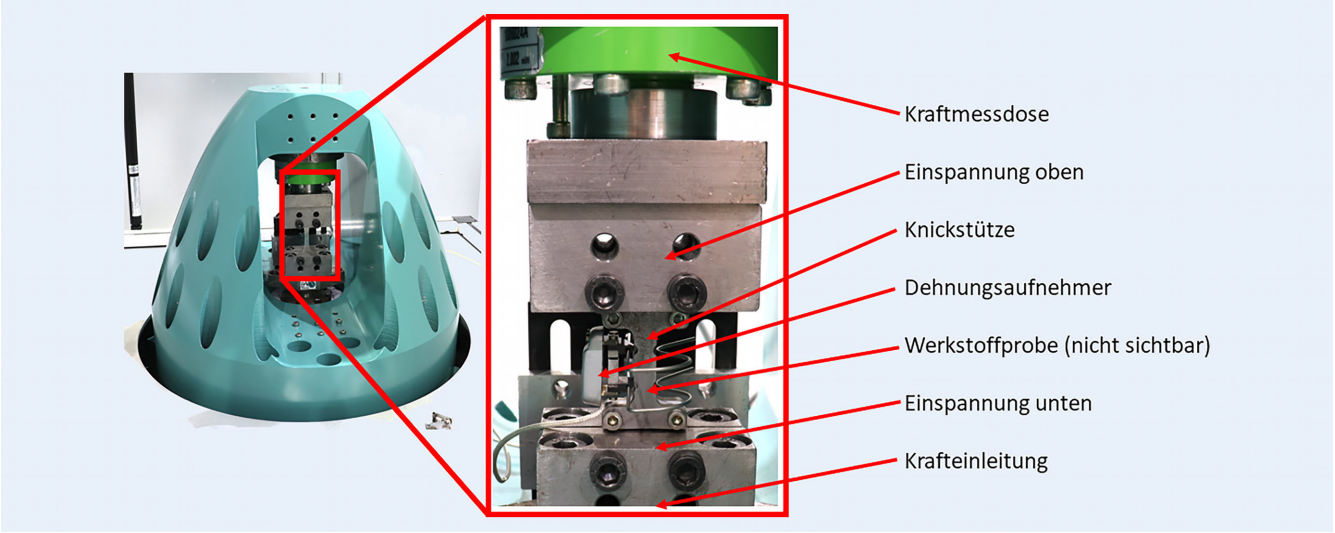

Bild 4. Piezobasierendes Belastungssystem. *Foto/Grafik: Fraunhofer LBF*

3.2 Piezo-elektrische Belastungssysteme

Die piezo-elektrischen Belastungssysteme bestehen hingegen aus einem circa 1 m langen Stack-Aktor, der aus einzelnen Piezo-Keramik-Schichten besteht, und die darüber die Last direkt durch Anbringen einer Hochspannung einleitet, **Bild 4**. Sie sind sehr gut geeignet, Schwingfestigkeitsversuche in der Zeit- und Langzeitfestigkeit, da sie präzise und wiederholbare Bewegungen generieren und hohe Frequenzen erreichen können. Der Frequenzbereich kann sogar bis in den Kilohertz-Bereich ausgedehnt werden, wenn es die übrigen Randbedingungen zulassen. Die Systemeigenschaften ermöglichen es, Versuchskörper unter kontrollierten, zyklischen Lasten und hohen Frequenzen zu untersuchen, was entscheidend ist, um das zyklische Werkstoffverhalten bis in den Langzeitfestigkeitsbereich zu bestimmen und eine Aussage über die Lebensdauer treffen zu können. Weiterführende Information zu diesem Belastungssystem sind in [13] dokumentiert.

Die Arbeitsweise basiert auf dem piezoelektrischen Effekt, bei dem ein piezoelektrisches Material ausdehnt, wenn eine elektrische Spannung angelegt wird. Diese Formänderung ist sehr präzise und kann schnell erfolgen, was Piezoaktoren ideal für Anwendungen macht, bei denen es auf genaue und schnelle Bewegungen ankommt. Begrenzt ist das System jedoch im aufzubringenden Maximalweg, weshalb Versuche in der Kurzzeitfestigkeit, wo mit erhöhten Maximalwegen zu rechnen ist, verursacht durch hohe plastische Anteile, ungeeignet sind. In Kombination mit den E-Zylinder Belastungssystemen kann die volle Bandbreite von der Kurzzeit- bis zur Langzeitfestigkeit abdeckt werden, um diese im zyklischen Werkstoffverhalten abzubilden.

Der Piezo-Stackaktor ist ebenfalls unten im Gehäuse verbaut und bringt die Belastung von unten über die Krafteinleitung und Probenklemmung auf die Probe auf. Der Aufbau ähnelt daher dem des E-Zylinder Belastungssystems. Die Werkstoffprobe wird durch die obere- und untere Einspannung fixiert und bildet einen Kraftschluss zum Kraftaufnehmer. Zusätzliche ist auch hier ein Aufsetzextensometer auf der Probenoberfläche mithilfe von Metallklammern montiert, sodass auf das Dehnungssignal geregelt werden kann. Eine Knickstütze verhindert wiederum das Ausknicken bei vorliegenden Druckbeanspruchungen.

4 Schwingfestigkeit additiv mittels WAAM gefertigter Strukturen

4.1 Untersuchungsgegenstand „WAAM-Wand“ und Probenentnahme

Untersuchungsgegenstand ist eine als „WAAM-Wand“ bezeichnete Struktur, das heißt eine im DED-Arc Verfahren in einer geraden Schweißraupe schichtweise additiv gefertigte Massivstruktur, hergestellt aus dem Werkstoff EN AW-2319 (Al-Cu6MnZrTi), welche keine nachträgliche Wärmebehandlung erfahren hat, **Bild 5** (links). Aus dieser wurden verschiedene Proben für zyklische Schwingfestigkeitsuntersuchungen entnommen. Bild 5 (links). Dabei wurde unterschieden zwischen Proben aus dem inneren Kernwerkstoff und Proben mit der as-built Oberfläche. Die Proben aus dem Kernwerkstoff dienen durch Entnahme in Aufbaurichtung, orthogonal zur Aufbaurichtung oder im 45°-Winkel, Bild 5 (Mitte), zur Charakterisierung der Anisotropie und weisen eine Gesamtlänge von 50 mm mit einen Untersuchungsbereich von 3,2 mm x 2,2 mm (Breite x Dicke) auf, Bild 5 (rechts). Beide Probentypen sind durch einen elliptischen Verlauf zwischen Einspannfläche und Untersuchungsquerschnitt geprägt, was zu einer Kerbformzahl $K_t \approx 1$, also ungekerbt, führt. Aufgrund ihrer vergleichsweisen geringen Größe eignen sich diese Proben besonders für die Charakterisierung von und Entnahme aus kleineren oder filigranen Bauteilbereichen oder Strukturen. Im Gegensatz dazu sind die Proben mit as-built Oberfläche größer dimensioniert, was die Untersuchung des Einflusses von Oberflächenkerben ermöglicht. Daher beträgt die Gesamtlänge 80 mm, Bild 5 (rechts). Die Breite der Probe umfasst 6 mm, jedoch lässt sich der Prüfquerschnitt nicht analog zu den polierten Proben ermitteln, da sich die Probendicke infolge der Schweißraupen lokal kontinuierlich ändert. Die Probenentnahme erfolgte mittels Drahterodierverfahren. Anschließend wurde die erodierten Konturfläche poliert, um potenzielle Herstellungseinflüsse zu eliminieren.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

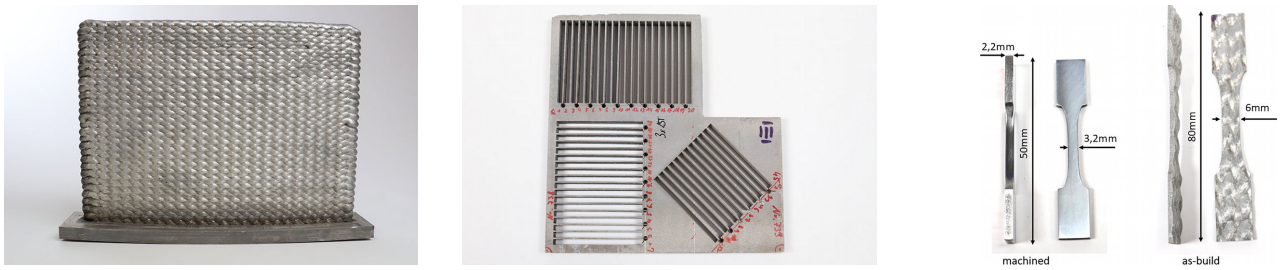

Bild 5. „WAAM-Wand" Nr. 1 aus EN AW-2319 ohne Wärmebehandlung (links), Probenentnahme und Probenpositionen (Mitte) sowie Probengeometrien (rechts). *Foto: Fraunhofer LBF*

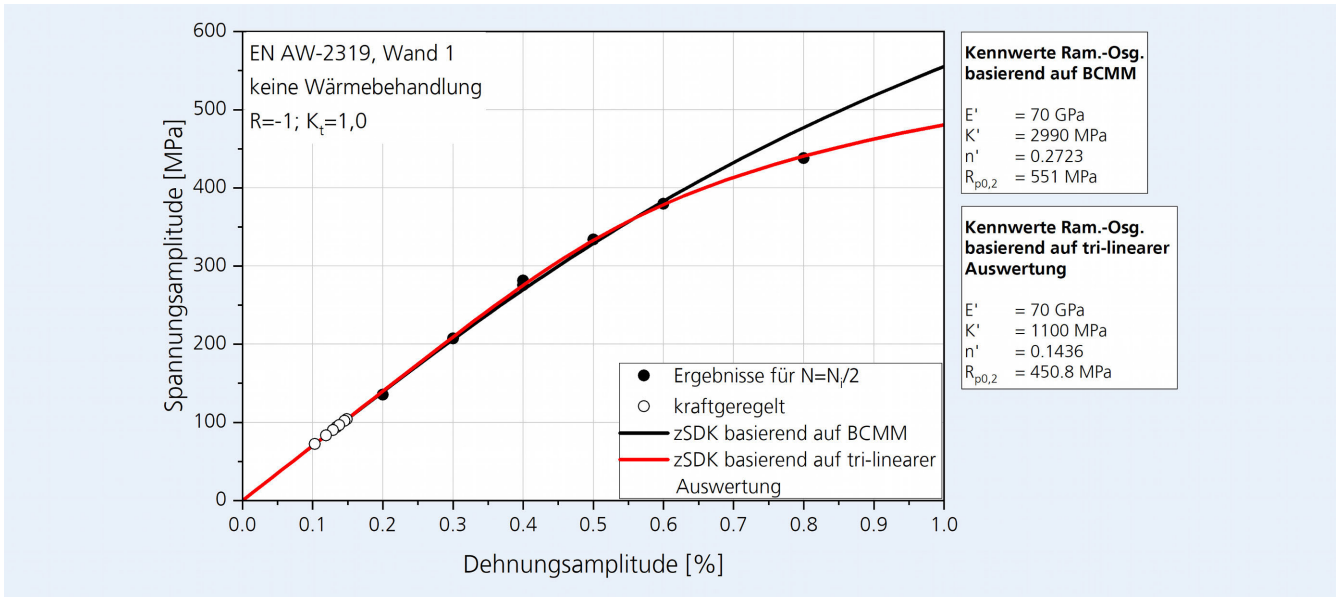

Bild 6. Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve für polierte Proben aus Kernwerkstoff (in Aufbaurichtung). *Grafik: Fraunhofer LBF*

4.2 Zyklisches Werkstoffverhalten anhand polierter Proben

Die ermittelten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der polierten Proben aus dem Kernwerkstoff in Aufbaurichtung sind in **Bild 6** dargestellt. Aus zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven lassen sich bei einer vorliegenden Spannung, die beispielsweise aus einer Finite-Elemente-Belastungsanalyse eines Bauteils stammen kann, dazugehörige Dehnungen ermitteln. Der verwendete zyklische Elastizitätsmodul E' entspricht 70 GPa, was ein typischer Wert für Aluminiumlegierungen ist. Auffällig ist, dass der rote Kurvenverlauf, abgeleitet aus der Kompatibilität mit der tri-linear ausgewerteten Fatigue Life Curve, die Versuchspunkte besser widerspiegelt als die Kompatibilität mit der traditionellen Auswertung der Dehnungswöhlerlinie nach Basquin-Coffin-Manson-Morrow. Aufgrund des einheitlichen zyklischen Elastizitätsmoduls von E' = 70 GPa kommen Unterschiede erst mit steigenden plastischen Anteilen zum Tragen. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven der as-built Proben können nicht unmittelbar analog dazu ermittelt werden, da der Prüfquerschnitt nicht konstant über den Untersuchungsbereich ist. Demnach kann kein direkter Vergleich stattfinden. Diese Argumentation greift auch bei der Geometrie- und Spannungsdefinition von Bauteilen. So entspricht die nicht nachbearbeitete Struktur in der Regel nicht dem digitalen Vorbild, da der Schweißprozess stets gewisse Abweichungen mit sich bringt, vor allem aber die Oberflächentopografie unstetig ist. Bei der Analyse von Bauteilen mit as-built Oberfläche ist dessen Einfluss beispielsweise durch eine feste Berechnungsgröße bei der Ermittlung von Spannungen jedoch Voraussetzung. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, die Dimensionen der technischen Zeichnung oder des digitalen Vorbildes zu verwenden, wodurch zwar geometrische Abweichungen berücksichtigt, aber keine Kennwerte wie der Elastizitätsmodul bestimmt werden können.

Ergänzend zu den Daten aus der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve wird das zyklische Werkstoffverhalten durch Dehnungswöhlerlinien und die zugehörige Information über die Lebensdauer komplettiert. Die klassische Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie nach BCMM liefert ein Ergebnis, welches die Versuchspunkte nur bedingt widerspiegelt, **Bild 7**. Besonders im Bereich der Langzeitfestigkeit, trifft die Regressionskurve die Versuchspunkte nicht.

Wird die Auswertung der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie herangezogen und um Ergebnisse aus kraftgeregelten Versuchen im Bereich linear-elastischen Verhaltens ergänzt, um eine Fatigue Life Curve abzuleiten, trifft die Regressionskurve die Versuchspunkte deutlicher besser, **Bild 8**. Durch die Unterteilung der Dehnungswöhlerlinie in drei Bereiche, werden drei bereichsspezifische Regressionen durchgeführt, wodurch die Beschreibung der Versuchspunkte deutlich verbessert werden kann. Zudem lässt sich aus der Bereichseinteilung ablesen, wann im Werkstoff mit elastisch-plastisches (Bereich 1), zunächst elastisch-plastisches, zyklisch „stabilisierend" in linear-elastisches (Bereich 2) oder

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

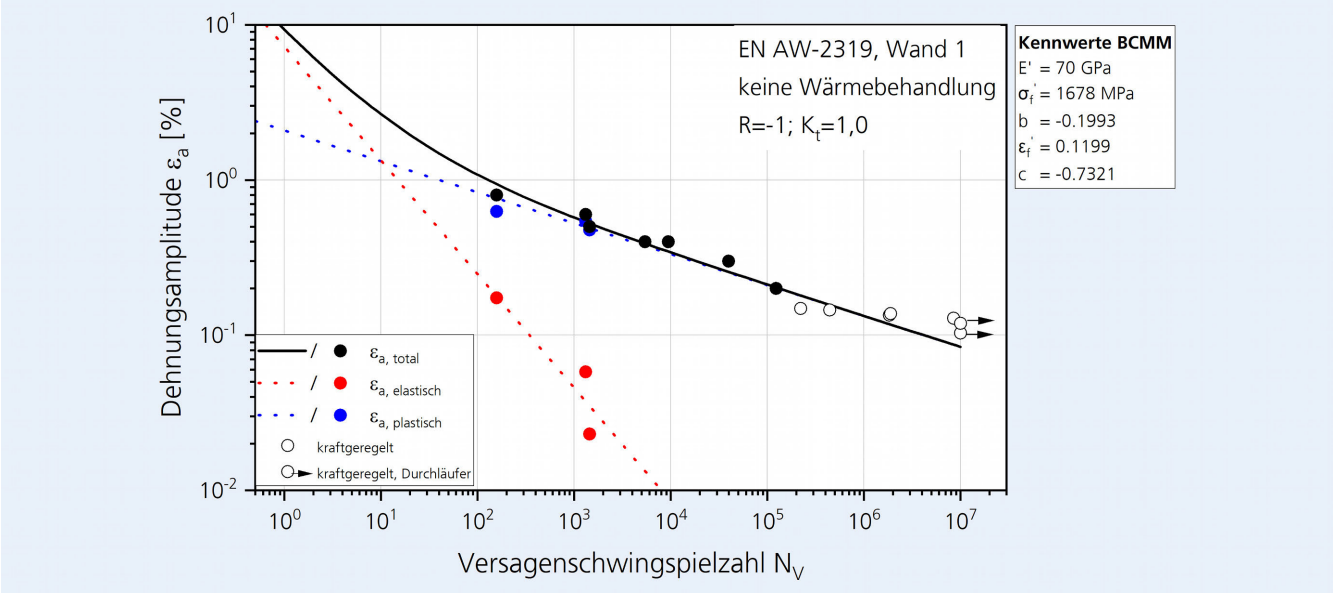

Bild 7. Dehnungswöhlerlinie nach BCMM für polierte Proben aus Kernwerkstoff (in Aufbaurichtung). *Grafik: Fraunhofer LBF*

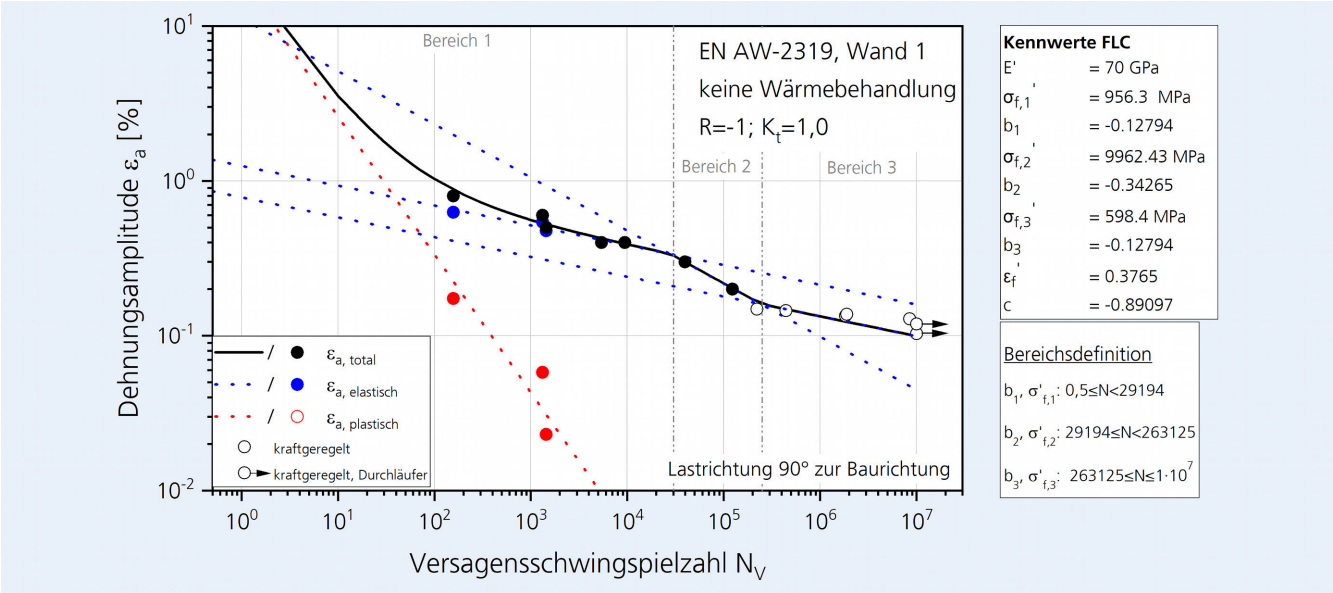

Bild 8. Fatigue Life Curve für polierte Proben aus Kernwerkstoff (in Aufbaurichtung). *Grafik: Fraunhofer LBF*

rein linear-elastisches (Bereich 3) Werkstoffverhalten vorliegt. Diese Vorzüge untermauern einen deutlichen Mehrwert durch die Auswertung der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie beziehungsweise Fatigue Life Curve.

4.3 Einfluss der Oberfläche im as-built-Zustand

Von gesteigertem Interesse der additiv mittels DED-Arc beziehungsweise WAAM gefertigten Strukturen ist der Einfluss der as-built Oberfläche auf die Schwingfestigkeit beziehungsweise Lebensdauer, weil dieser Oberflächenzustand nach Möglichkeit auch in Bauteilen oder Strukturen vorliegen soll, um Aufwände und Kosten der Nacharbeit zu reduzieren. Erwartungsgemäß liegen alle Versuchsergebnisse der Proben mit as-built-Oberfläche deutlich unterhalb der Proben aus dem Kernwerkstoff, wie die Gegenüberstellung der Versuchspunkte der as-built Proben mit der Fatigue Life Curve für poliert Proben in **Bild 9** zeigt. Grund hierfür sind die Unregelmäßigkeiten, die geometrischen Kerben der Oberfläche, welche zu Spannungskonzentrationen führen und demnach zu höheren lokalen Beanspruchungen an der Probenoberfläche. Im Mittel zeigen die Proben mit der as-built Oberfläche eine um den Faktor von circa 4,5 kürzere Lebensdauer (zwischen ½ und 1 Dekade), ohne zusätzliche die Unterschiede aus dem zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu berücksichtigen.

5 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Lücken im Stand der Technik bei Schwingfestigkeitsbewertung von additiv gefertigten Bauteilen oder Strukturen noch nicht vollumfänglich geschlossen ist, insbesondere um prozessspezifische Beson-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

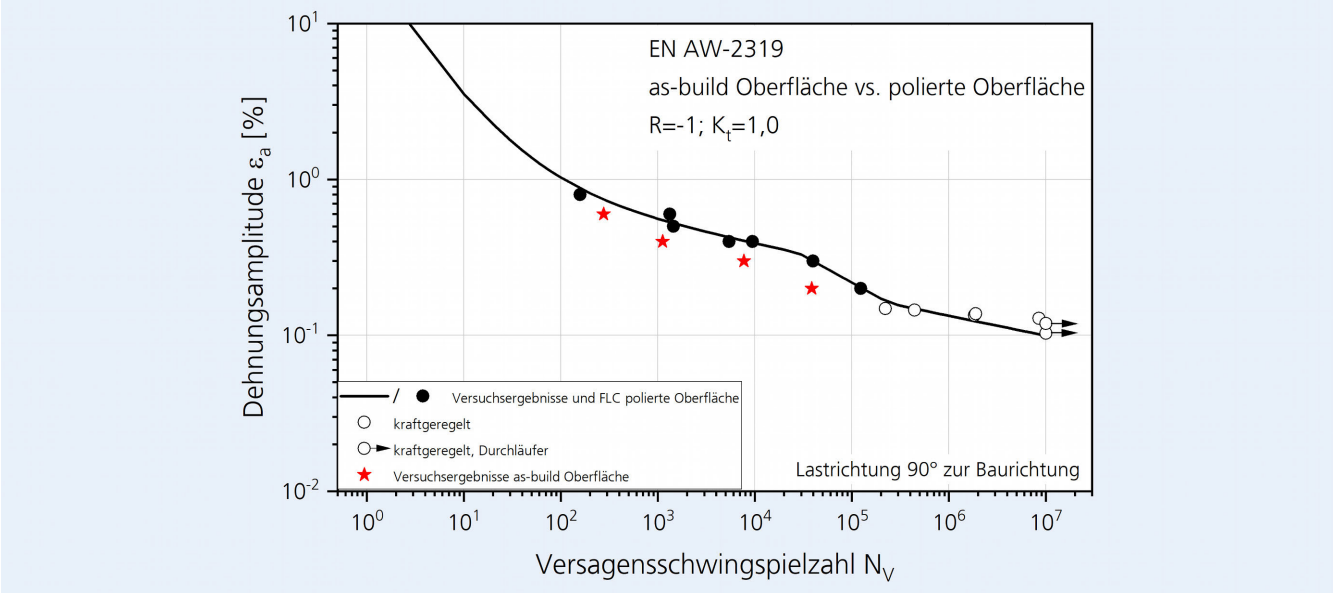

Bild 9. Fatigue Life Curve für poliert Proben ergänzt um Versuchsergebnisse der as-built Proben. *Grafik: Fraunhofer LBF*

derheiten zu berücksichtigen. Dies gilt beispielsweise auch für die inhomogenen Oberflächenzustände, die sich aus der additiven Fertigung mittels DED-Arc, das heißt WAAM, ergeben. Gängige Verfahren bei der Schwingfestigkeitsbewertung umfassen solche Fälle, wodurch entweder weitere Erkenntnisse oder zutreffende Annahmen erforderlich sind, um eine zuverlässige Abschätzung Lebensdauer anstellen zu können. Mit der vorgestellten Prüftechnik ist es möglich, die erforderlichen zyklische Versuche zur Generierung weiterführender Ergebnisse durchzuführen. Zwar können zyklische Kennwerte, abgeleitet aus Versuchen an polierten Proben, auf nicht nachbearbeitete Bauteile übertragen werden, jedoch bedarf es der Berücksichtigung maßgeblicher Einflüsse wie der Oberflächentopografie, um die Lebensdauer nicht zu überschätzen. Probenuntersuchungen in dehnungsgeregelten, zyklischen Versuchen liefern dazu Erkenntnisse. Die Auswertung von Fatigue Life Curves, das heißt um Ergebnisse kraftgeregelter Versuche ergänzte Dehnungswöhlerlinien, ergibt eine im Mittel um den Faktor 4,5 kürzere Lebensdauer für Proben mit der as-built Oberfläche gegenüber polierten Proben.

Eine sehr gute Prognose des Rissausgangspunkts von as-built-Strukturen gelingt mithilfe einer linear-elastischen Finite-Elemente-Belastungssimulation 3D-gescannter Modelle inklusive real abgebildeter Oberflächentopografie infolge des Ortes der Maximalspannung, sodass es zielführend erscheint diese Spannungskonzentration mit der zugehörigen Vergleichsspannung für die Schwingfestigkeitsbewertung heranzuziehen, was zufriedenstellende Ergebnisse liefert [11], ohne weitere Einflussgrößen wie beispielsweise innenliegende Poren zu berücksichtigen.

Wird elastisch-plastisches Werkstoffverhalten betrachtet, so können zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven für homogene Werkstoffzustände im Kern ermittelt werden, vorzugsweise mithilfe der Kompatibilität mit der Fatigue Life Curve basierend auf der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie. Abweichend vom homogenen Werkstoff bestehen jedoch Herausforderungen, da das Spannungs-Dehnungsverhalten von Proben (oder Bauteilen) im as-built Zustand aufgrund der nicht konstanten Untersuchungsquerschnitte wegen der unregelmäßigen Schweißoberfläche nicht zuverlässig ermittelt werden kann. Ganz allgemein zeigt dieses Beispiel welche Unterschiede zwischen der realen Geometrie und der gewünschten Zielgeometrie vorliegen können. Es wird daher bis auf Weiteres vorgeschlagen, Beanspruchungen anhand der Auslegungskenngrößen, also beispielsweise nominellen Dimensionen, abzuleiten.

Einen Ansatz, um dies in eine Lebensdauerabschätzung zu implementieren und die teils vielfältigen Besonderheiten additiv gefertigter Bauteile und Strukturen zu berücksichtigen, liefert das Konzept der Repräsentativen Strukturelemente (RSE) [14–16] (graphische Erläuterungen des RSE werden beispielsweise in [14, 15, 17] gegeben), wodurch das bauteilspezifische zyklische Verhalten (mithilfe von Probenversuchen) charakterisiert wird, in dem die relevanten Einflüsse wie Poren oder Oberflächenzustände bereits Berücksichtigung finden und nicht im Nachgang betrachtet werden.

Abschließend sei erwähnt, dass dieser Bericht den abgrenzten Teilaspekt des zyklischen Werkstoffverhaltens und der Schwingfestigkeit additiv im DED-Arc-Verfahren gefertigter Bauteile und Strukturen mit den zugehörigen Herausforderungen umfasst, wobei der Fokus speziell auf den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit gelegt wird. Über die Oberflächentopografie hinausgehend entstehen zum Beispiel auch unterschiedliche Werkstoffeigenschaften infolge des Abkühlens oder der Variation von Schweißparametern während des Fertigungsprozesses. Zurzeit werden Bemessungskonzepte entwickelt, die ortsabhängige, lokale Eigenschäften berücksichtigen, darunter auch der Ansatz des RSE.

FÖRDERHINWEIS

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 862617 – MULTI-FUN.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei allen Projektpartnern des Projekts „Multi-Fun“, darüber hinaus im Besonderen denjenigen Partnern, die es ermöglicht haben, die für die Untersuchungen zu dieser Publikation notwendigen Arbeiten durchzuführen.

Literatur

[1] Sonsino, C. M.: „Dauerfestigkeit“ - Eine Fiktion. Konstruktion 4 (2005), S. 87–92
[2] DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-03: Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2021); Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2021, DOI: 10.31030/3290011
[3] Basquin, O. H.: The exponential law of endurance tests, 1910, S. 625–630
[4] Coffin, L. F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Trans. ASME 76 (1954), S. 931–981
[5] Manson, S. S.: Fatigue: a complex subject – some simple approximations. Experimental Mechanics 5 (1965) 7, S. 193–226
[6] Morrow, J. D.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. In: ASTM STP 378. American Society for Testing and Materials (ASTM) 1965, S. 45–87
[7] Ramberg, W.; Osgood, W. R.: NACA technical notes, No. 902, Description of stress-strain curves by three parameters, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1943
[8] Wagener, R.: Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanter und variabler Beanspruchungsamplitude, Dissertation: IMAB, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld (2007)
[9] Wagener, R.; Melz, T.: Deriving a Continuous Fatigue Life Curve from LCF to VHCF. SAE Technical Paper 2017-01-0330, 2017, DOI: 10.4271/2017-01-0330
[10] VDA Recommendation 239-300: Experimental Determination of Mechanical Properties of Aluminum Sheets for CAE-Calculation – Testing and Documentation, February 2021 (2021)
[11] Möller, B.; Kiel, M.; Wagener, R., Taliani, E.; Kordaß, R.; Schramm, M.; Gradinger, R.: Development and fatigue assessment of wire arc additively manufactured hollow structures made of AA6063 as a basis for functional integrated sections applied to a motorcycle handlebar. Procedia Structural Integrity 53 (2024), S. 190–202, DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.024
[12] Wagener, R.; Kiel, M.: Deriving Representative Structural Elements for the fatigue approach of Wire Arc Additively Manufactured components. Procedia Structural Integrity 53 (2024), S. 161–171, DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.019
[13] Wagener, R; Melz, T.; Fischer, C.; Matthias, M.; Kaufmann, H.: Neue experimentelle Methoden zur Untersuchung des Einflusses variabler zyklischer Belastungen in HCF- und VHCF-Bereich. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 42 (2011) 10, S. 929-933, DOI: 10.1002/-mawe.201100866
[14] Wagener, R.; Möller, B.; Scurria, M.; Bein, T.: A fatigue life approach for additively manufactured structures. TMS 2020, 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings, The Minerals, Metals and Materials Society (TMS Annual Meeting and Exhibition) 2020, FS 127-137, DOI: 10.1007/978-3-030-36296-6_12
[15] Wagener, R.; Chiocca, A.: Representative structure elements for the fatigue assessment of additively manufactured components. Procedia Structural. Integrity 34 (2021), S. 259–265, DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.037
[16] Wagener, R.; Kiel, M.: Enhancing the fatigue life approach by the usage of Representative Structural Elements. Procedia Structural Integrity 53 (2024), S. 151-160, DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.019
[17] Schnabel, K.; Baumgartner, J.; Möller, B.: Fatigue Assessment of Additively Manufactured Metallic Structures Using Local Approaches Based on Finite-Element Simulations. Procedia Structural Integrity 19 (2019), S. 442-451. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.12.048

Marvin Kiel, M.Sc.
Abteilung Werkstoffe und Bauteile
marvin.kiel@lbf.fraunhofer.de
Foto: Fraunhofer LBF

Dr.-Ing. Benjamin Möller
Abteilungsleiter Werkstoffe und Bauteile
benjamin.moeller@lbf.fraunhofer.de
Foto: Fraunhofer LBF

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt
www.lbf.fraunhofer.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-04-82 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY