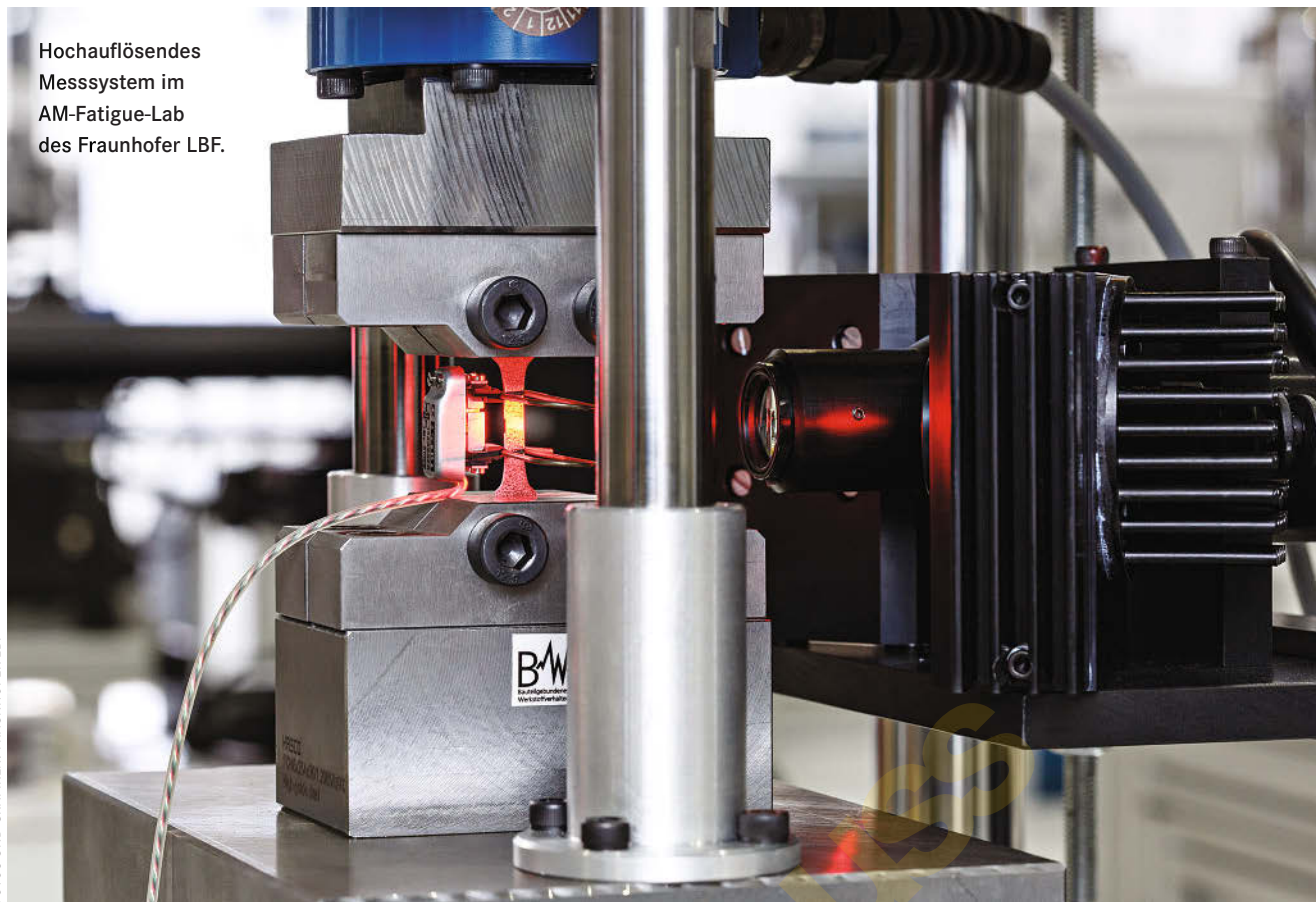


Hochauflösendes
Messsystem im
AM-Fatigue-Lab
des Fraunhofer LBF.



FOTOS UND GRAFIKEN: FRAUNHOFER LBF

Neue Wege in der Betriebsfestigkeit

Werkstoff-Strukturoptimierung in AM-Fatigue-Labs

VON RAINER WAGENER, DARMSTADT

Die Additive Fertigung (AM) ist eine ergänzende Fertigungstechnologie, deren Produkte aufgrund der schichtweisen Bauweise besondere Eigenschaften aufweisen können. Je nach Sichtweise kann dies als Chance für innovative Produkte und Prozesse oder als Hinderungsgrund für die Einführung dieser neuen Fertigungstechnologie aufgefasst werden. Aufgrund der kurzen Fertigungskette, die wenn möglich nur aus einem Fertigungsschritt bestehen soll, können sich lokal sehr komplexe Werkstoffzustände einstellen. Zur Hebung des Leichtbaupotenzials der Additiven Fertigung werden erweiterte Erkenntnisse bezüglich der Berücksichtigung von anisotropem Werkstoffverhalten, Eigenspannungen und Imperfektionen, z. B. Poren, benötigt. Abhängig vom Additiven Ferti-

gungsverfahren sind technologiebedingte Rahmenbedingungen zu beachten.

Das AM-Fatigue-Lab

Aufgrund der Fertigungszeit sowie des mitunter begrenzten Bauraums werden Additive Fertigungsverfahren auf absehbare Zeit vorzugsweise für kleine, filigrane Strukturen eingesetzt. Um deren bauteilgebundenes Werkstoffverhalten verstehen zu können, sind neue bzw. optimierte Analysemethoden erforderlich. Unter der Voraussetzung, dass die Ermüdung ein lokales Phänomen ist, das zum globalen Versagen führen kann, bieten sich kleinere Proben zur Charakterisierung des zyklischen Werkstoff- bzw. Strukturverhaltens an, sofern sichergestellt ist, dass die lokalen Eigenschaften der Proben mit den zu erwartenden Bauteileigenschaften übereinstimmen.

Durch die Additive Fertigung wird nicht nur eine neue Gestaltungsfreiheit für innovative Produkte erschlossen, sondern sie bietet auch die Möglichkeit, lokale Einflüsse besser zu verstehen und auf konventionelle Fertigungstechnologie zu transferieren. Um diese Chance ergreifen zu können, wurden am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF ein AM-Fatigue-Lab eingerichtet. Die Besonderheit dieses neuen Betriebsfestigkeitslabors ist die Fokussierung auf kleine Werkstoffproben oder Bauteile, um das lokale bauteilgebundene Werkstoffverhalten genauer zu verstehen und für die virtuelle Produktentwicklung aufbereiten zu können.

Die fortschreitende Digitalisierung, d. h. der Einsatz aktueller und kommender Rechnergenerationen, erlaubt eine detailliertere Betrachtung des (zyklischen) Werkstoffverhaltens im Rahmen einer nu-

merischen Beanspruchbarkeitsanalyse. Dabei darf die Wirtschaftlichkeit nicht vernachlässigt werden, denn nur wenn der gesteigerte numerische Aufwand zu signifikant besseren Ergebnissen führt, ist dieser auch gerechtfertigt. Um die Chancen der Digitalisierung auch für eine Lebensdauerabschätzung von zyklisch beanspruchten Bauteilen nutzen zu können, sind bestehende Grenzen bei der experimentellen Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung zu überwinden. Denn es widerspricht der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit, die Lebensdauer von Produkten zu begrenzen, weil kein ausreichendes, experimentell abgesichertes Wissen aufgrund von ungeeigneter Prüftechnik vorliegt, bzw. die erforderlichen Validierungskampagnen aufgrund des zeitlichen Aufwandes nicht realisierbar sind.

Generierung bemessungsrelevanter zyklischer Kennwerte

Zyklische Versuche zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens oder zum Nachweis der Betriebsfestigkeit sind in der Regel kosten- und zeitintensiv. Um die Zeit für die Schwingfestigkeitsversuche zu verkürzen und somit die Validierung zu beschleunigen, kann die Versuchsfrequenz erhöht werden. Dieses Vorgehen ist zulässig, sofern die resultierende Schwingfestigkeit dadurch nicht beeinflusst wird.

Anforderungen

Für die Erforschung und Charakterisierung des Werkstoffverhaltens im Bereich hoher und höchster Schwingspielzahlen auf Probenebene ist diese Vorgehensweise bereits Stand der Technik. Dabei ist anzumerken, dass Prüfmaschinen, die eine Eigenmode der Probe im Ultraschallbereich anregen, für makroskopisch elastisches Werkstoffverhalten eingesetzt werden. Für die Identifizierung des zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und einer kontinuierlichen Wöhlerlinie, wie zum Beispiel der Fatigue-Life-Curve [1, 2], ist diese Versuchstechnik nicht geeignet.

Um den Herausforderungen der Ressourcenschonung durch Leichtbau gerecht zu werden, muss im Rahmen des Betriebsfestigkeitsnachweises eine Verlängerung der Produkteinsatzzeit durch eine Verbesserung der Schädigungsbewertung kleiner Amplituden erfolgen. Aus diesem Grund ist die Hochfrequenzprüfung zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens im Langzeitfestigkeitsbereich notwendig, deren Vorteil sich oberhalb von $1 \cdot 10^6$ Zyklen auswirkt. Die Strategie zur

KURZFASSUNG:

Das Werkstoffverhalten zyklisch belasteter Bauteile wird von vielen Parametern beeinflusst. Um die Leistungsfähigkeit der zum Einsatz kommenden modernen und zukünftigen Werkstoffe und Fertigungstechnologien im Sinne des Leichtbaus und der Ressourceneffizienz ausschöpfen zu können, müssen die lokalen Werkstoffeigenschaften berücksichtigt werden. In vielen Fällen reichen die kommerziell verfügbaren experimentellen Belastungssimulatoren nicht mehr aus, um Kennwerte zur Beschreibung des zyklischen bauteilgebundenen Werkstoffverhaltens mit einer ausreichenden Güte abzuleiten. Der Einsatz von optimierten Belastungssimulatoren eröffnet neue Möglichkeiten zum Aufbau und zur Erweiterung des Werkstoffverständnisses und somit zur Verbesserung des Betriebsfestigkeitsnachweises. Mit dem AM-Fatigue-Lab hat das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF hierfür die erforderlichen Voraussetzungen geschaffen und beabsichtigt, die neuen Methoden auch auf die konventionellen Fertigungstechnologien zu transferieren, um den Leichtbau voranzutreiben.

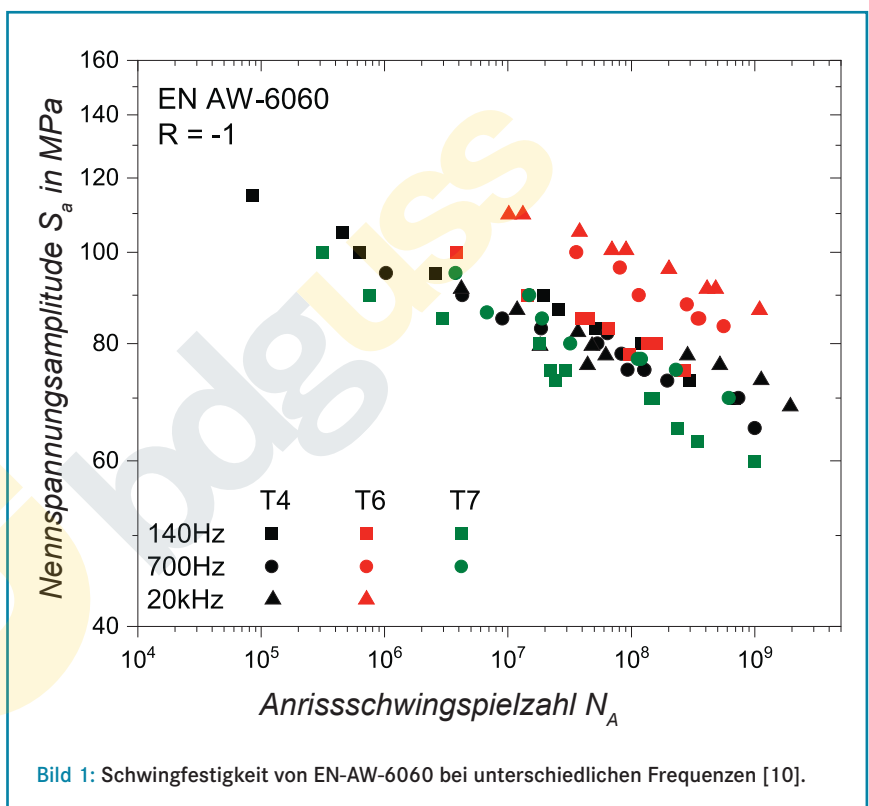


Bild 1: Schwingfestigkeit von EN-AW-6060 bei unterschiedlichen Frequenzen [10].

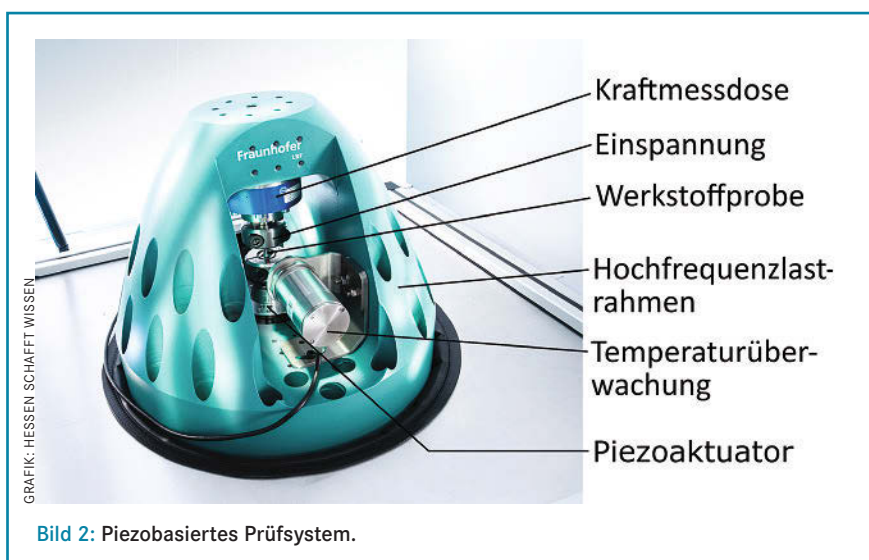


Bild 2: Piezobasiertes Prüfsystem.

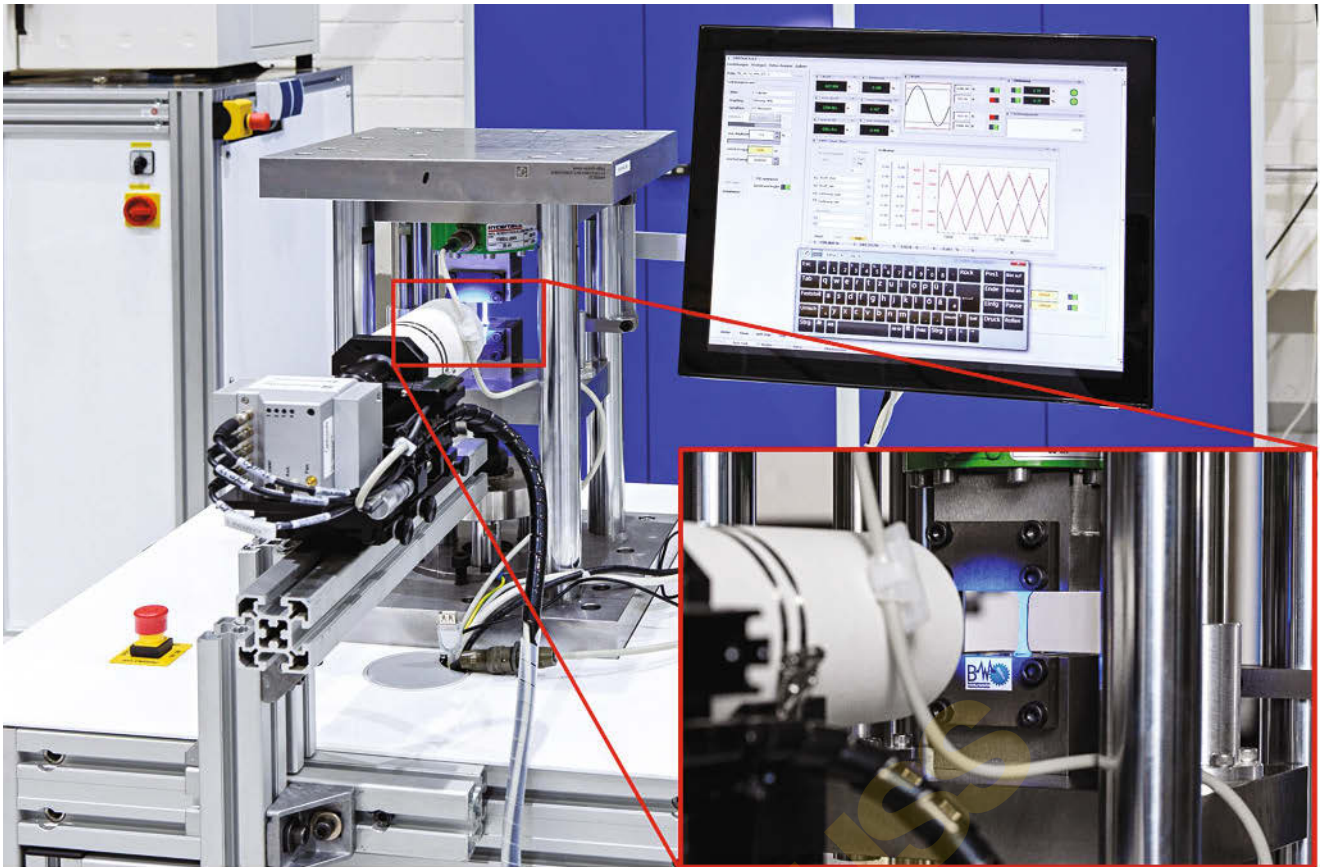


Bild 3: E-Zylinder-Belastungssimulator mit optischer Dehnungsfeldmessung.

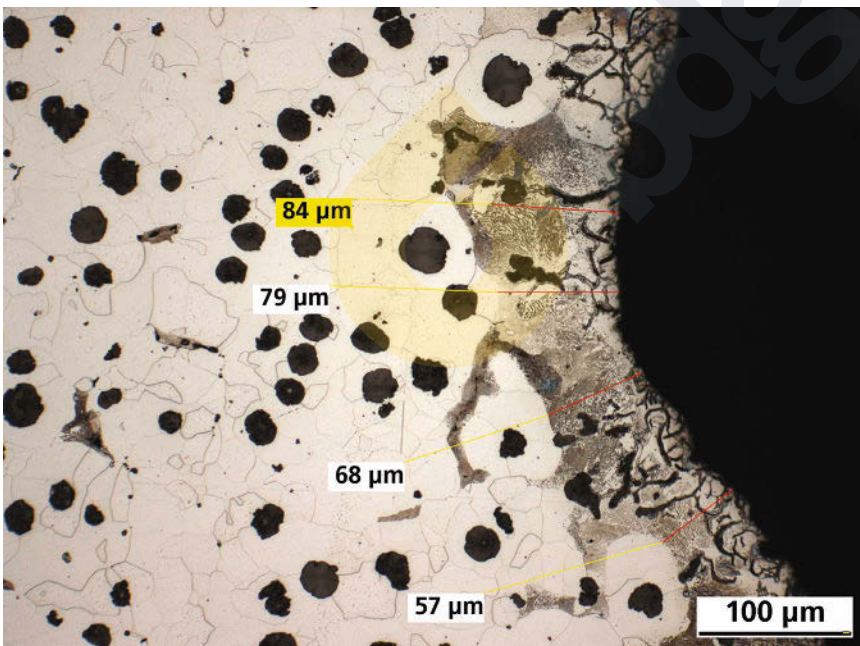


Bild 4: Randbereich eines gegossenen und kugelgestrahlten Bauteils aus Gusseisen.

beschleunigten Schwingfestigkeitsermittlung muss einige Randbedingungen wie Probenerwärmung und Umgebungsmedium berücksichtigen, da diese die resultierende Schwingfestigkeit bzw. Lebensdauer beeinflussen können. Um hochfrequente zyklische Prüfungen durchführen zu können, sind die Probensteifigkeit und die erforderliche Auslenkung zwei der wichtigsten Parameter. So führen zyklische

Versuche unter axialer Belastung zu höheren Frequenzen als unter Biege- oder Torsionsbelastung.

Im Hinblick auf verlängerte Einsatzzeiten von Anlagen und zyklisch beanspruchten Produkten können moderne und perspektivische Werkstoffentwicklungen wie ADI-Gusslegierungen [3] unterstützen, sofern das gesamte Festigkeitsvermögen ausgeschöpft werden kann. Die Kenntnis

der Schwingfestigkeit sowie deren Einflussfaktoren ist hierfür unerlässlich. Um das zyklische Werkstoffverhalten zu ermitteln, werden neue experimentelle Belastungssimulatoren inklusiver Messtechnik benötigt, die Experimente im Frequenzbereich von 0,1 Hz für dehnungsgeregeltere zyklische Untersuchungen in der Kurzzeitfestigkeit bis zu 1000 Hz für den Very-High-Cycle Fatigue-Bereich ermöglichen.

Umsetzung

Durch die Verwendung des gleichen Belastungssimulators über den gesamten Frequenzbereich können maschinelle Einflüsse auf die Versuchsergebnisse vermieden und die Untersuchung des Einflusses der Belastungsfrequenz auf die resultierende Schwingfestigkeit ermöglicht werden. Dabei sollte die verwendete Messtechnik zu jedem Zeitpunkt zumindest Informationen über die tatsächliche Belastung liefern, sodass die Grundlage für die Weiterentwicklung der Lebensdauerabschätzung von zyklisch beanspruchten Bauteilen gelegt wird.

Begleitet wird diese Entwicklung durch die Digitalisierung, bzw. eine erhöhte zur Verfügung stehende Rechnerleistung. Diese gilt es nicht nur für die Regelung neuer hochdynamischer piezokeramischer Hochleistungs-Aktoren mit sehr guter Reproduzierbarkeit einzusetzen

zen [4-6], sondern auch für die Messdatenverarbeitung, -analyse und -visualisierung, um das Verständnis zur Entwicklung des bauteilgebundenen Werkstoffverhaltens unter Betriebsbeanspruchung zu verbessern. Zudem ermöglicht eine große Datenbasis die Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz, um weitere, bisher nicht offensichtliche Erkenntnisse zu gewinnen.

Aufgrund des Zeitbedarfs ist es für Betriebsfestigkeitsuntersuchungen auf Probenbasis üblich, den Versuch bei $1 \cdot 10^7$ Zyklen abzubrechen, auch wenn Schädigungen noch nicht erkennbar sind. Aufgrund des stetigen Abfalls der Schwingfestigkeit, auch nach dem Abknickpunkt der Wöhlerlinie, empfahl Gaßner, Ermüdungsversuche mindestens bis zu $1 \cdot 10^8$ Zyklen durchzuführen [7]. Um dies zu berücksichtigen, schlug Sonsino vor, die Schwingfestigkeit nach dem Abknickpunkt der Wöhlerkurve, im Bereich der Langzeitfestigkeit, um z. B. 5 % für Stahl und 10 % für Aluminiumlegierungen und Schweißverbindungen pro Dekade zu reduzieren [8, 9], sofern kein experimentell abgesichertes Wissen vorliegt.

Die alleinige Erhöhung der Versuchsfrequenz erlaubt jedoch bislang nicht die Ableitung von Bemessungskennwerten, da die resultierende Schwingfestigkeit, je nach Werkstoff bzw. Werkstoffzustand, von der Beanspruchungsfrequenz abhängig sein kann (Bild 1). Solange dieser Einfluss auf die Ermüdungslebensdauer nicht bewertet werden kann, müssen bei der experimentellen Bestimmung der Werkstoffkennwerte für eine numerische Betriebsfestigkeitsbewertung einsatzrelevante Frequenzen verwendet werden.

Anforderungen an die Prüfsysteme

Handelsübliche und sehr flexible Prüfsysteme für variable Belastungen, wie der servo-hydraulische Prüfstand, sind in den meisten Fällen auf niedrige Frequenzen bis 60 Hz beschränkt. Andere Prüfsysteme, wie z. B. Resonanzpulsatoren, arbeiten bei hohen Frequenzen bis zu 300 Hz, in Sonderapplikationen bis 1000 Hz, sind aber auf die spezifische und konstante Eigenfrequenz der Kombination aus Prüfling und Prüfstand beschränkt. Eine Kombination der Vorteile der servo-hydraulischen Prüfsysteme, z. B. frei definierbare Last- und Frequenzverläufe, mit der Schnelligkeit der Resonanzprüfsysteme würde eine komplexere Kennwertgenerierung erlauben und das Verständnis für die Betriebsfestigkeit zyklisch belasteter Bauteile, welche unter Betriebsbedingungen ein breites Frequenzspektrum erfahren, steigern.

Piezo-Aktoren bieten sich aufgrund ihres hervorragenden dynamischen Verhaltens für diese Art der experimentellen Betriebslastensimulation an. Als Antriebsquelle für zyklische Versuche können sie die Versuchszeit verkürzen, da Frequenzen von bis zu 1000 Hz einstellbar sind. Bei entsprechender Integration des Piezo-Aktors in den Lastpfad, können dessen dynamischen Eigenschaften direkt genutzt werden, um Ermüdungsversuche mit beliebigen Lastverläufen und Frequenzspektren zu realisieren. Aus den Ergebnissen können betriebslastenrelevante zyklische Werkstoffeigenschaften abgeleitet werden. Die Kombination aus einem Piezo-Aktor und einer neu entwickelten Controller-Einheit mit Mess- und Regelraten von 100 kHz ermöglicht die Erschließung neuer Bereiche der Materialcharakterisierung mittels kleiner Werkstoffproben (Bild 2).

Lokales Werkstoffverhalten

Erlauben die Rahmenbedingungen nur geringe Frequenzen, so erweitert eine neue Generation von E-Zylinder-Belastungssimulatoren, die ursprünglich für dehnungsgeregelte Versuche entwickelt worden ist, die Steigerung der Informationen je Versuch (Bild 3). Neben den mechanischen Voraussetzungen bildet ein neuer Regelalgorithmus das Herzstück dieser Belastungssimulatoren. Im Gegensatz zu konventionellen Regelalgorithmen, bei denen Abweichung ausgeglichen wird, erreicht der neue Regelalgorithmus vom ersten Umkehrpunkt an dessen Sollwert. Durch die Kombination von optischer Dehnungsfeldmesstechnik und den neuen Belastungssimulatoren ergeben sich neue Möglichkeiten zur Analyse von Reihenfolgeeffekten und somit die Grundlagen zur Verbesserung von Nachweis Konzepten für die Betriebsfestigkeit.

Eine Herausforderung im Rahmen des Betriebsfestigkeitsnachweises ist der Transfer der anhand von Werkstoffproben ermittelten Kennwerte auf beliebige Bauteilgeometrien [11-14]. Die verwendeten Einflussfaktoren beruhen auf phänomenologischen Erkenntnissen und sind für die Entwicklung eines physikalischen Modells nur bedingt geeignet. Eigenschaftsgradienten werden durch die Abkühlung von der Schmelze bis zur Raumtemperatur, bedingt durch unterschiedliche lokale Abkühlbedingungen, z. B. infolge von Massenkonzentrationen und Wärmeübergangswiderständen bzw. Wärmeleitkoeffizienten, hervorgerufen und unterliegen weiteren Einflüssen aus dem Fer-

Der GIESSEREI Newsletter

Schneller als die
Polizei
erlaubt!

FOTO: ©VANTHOPE - STOCK.ADOBE.COM

Keine Neuigkeit
verpassen.
Jetzt anmelden!

<http://tinyurl.com/y455njxy>

G GIESSEREI

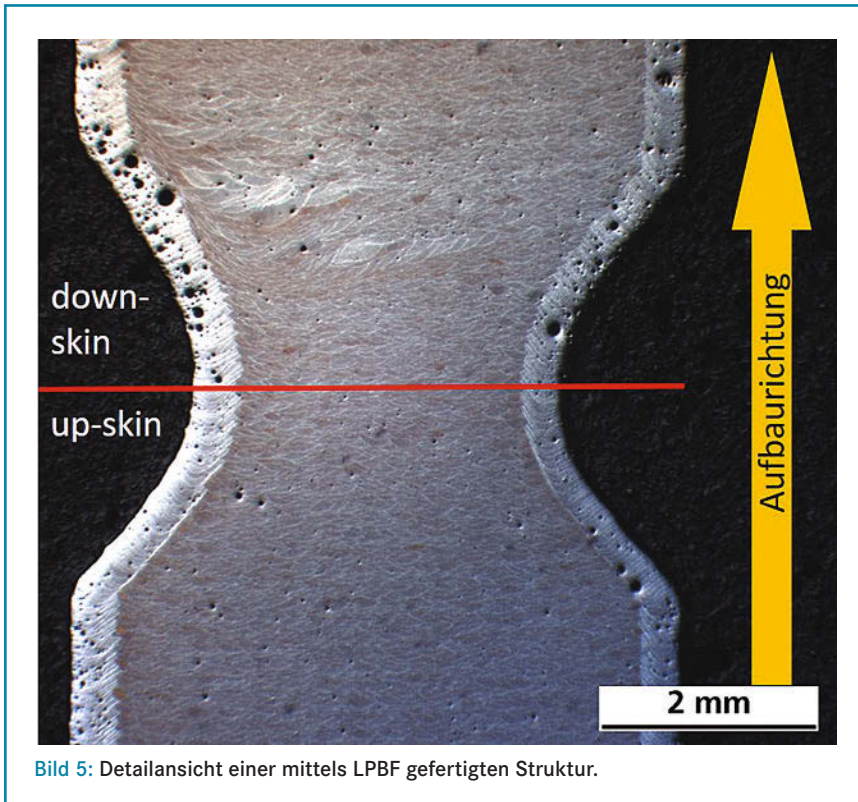


Bild 5: Detailsicht einer mittels LPBF gefertigten Struktur.

Schwingfestigkeitsproben zuverlässig reproduzierbar einzustellen (Bild 4).

Ebenso wie bei Gussbauteilen gewinnt die Bewertung von Randschichten auch bei additiv gefertigten Bauteilen an Bedeutung (Bild 5), da diese, sofern die Gestaltungsfreiheit ausgenutzt wird, nicht abrasiv nachbearbeitet werden können. Abhilfe schafft hier eine neue Interpretation der während der Belastungssimulation aufgetragenen Beanspruchungen mittels repräsentativer Strukturelemente [17]. Während klassischerweise vom reinen Werkstoffverhalten ausgegangen wird und Imperfektionen, wie Oberflächenrauheit oder Poren, mithilfe von Einflussfaktoren oder Anpassung der geometrischen Repräsentation bei der FE-Simulation erfolgt, beschreiben repräsentative Strukturelemente das integrale Strukturverhalten und somit die Einflüsse auf die Schwingfestigkeit im zyklischen Werkstoffkennwert. Die Imperfektionen reduzieren nicht nur die Lebensdauer, wie es die phänomenologischen Einflussfaktoren aus kraftgeregelten Versuchen vermuten lassen, sondern auch das Spannungs-Dehnungs-Verhalten (Bild 6), wie anhand des Unterschiedes zwischen den polierten und den as-built-Proben ersichtlich ist. Verglichen mit den konventionellen Werkstoffkennwerten liegen die Kennwerte der repräsentativen Strukturelemente bei kürzeren Lebensdauern und auch niedrigeren statischen und zyklischen Festigkeiten.

tigungsprozess. Hier bietet es sich an, für die beschriebenen Belastungssimulatoren kleinere Probekörper, z. B. Mikroproben, zu entnehmen, um die Bestimmung von lokalen Werkstoffeigenschaften zu ermöglichen und so ein verbessertes Verständnis des Bauteilverhaltens zu generieren. Für das AM-Fatigue-Lab weiterentwickelte Messtechnik, z. B. auf Basis des digitalen Bildvergleichs [15, 16], in Verbindung mit erweiterten Möglichkeiten der Messdatenauswertung, unterstützt diesen Erkenntnisgewinn.

Repräsentative Strukturelemente

Auch für hochauflösende experimentelle Belastungssimulatoren existieren Grenzen, die nicht beliebig verschoben werden können. Diese müssen nicht zwingend auf die Messtechnik zurückzuführen sein, sondern können ihre Ursache bereits in den Möglichkeiten der Probenfertigung haben. So ist die Charakterisierung von (Rand-)Schichten, z. B. Gusshäuten, eine Herausforderung, da es kaum möglich ist, die geometrischen und metallurgischen Eigenschaften getrennt oder kombiniert in

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die AM-Fatigue-Labs setzen die lange Tradition der Entwicklung anwendungsspezifischer Belastungssimulatoren im Fraun-

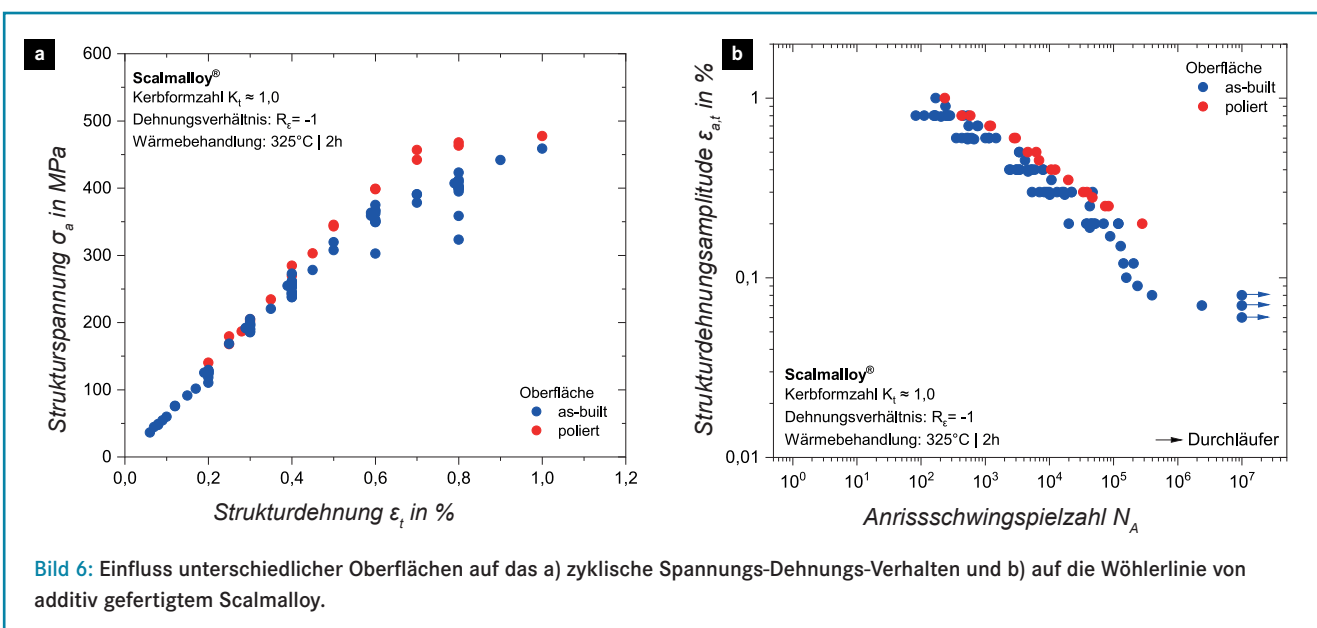


Bild 6: Einfluss unterschiedlicher Oberflächen auf das a) zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten und b) auf die Wöhlerlinie von additiv gefertigtem Scalmalloy.

hofer LBF fort und bilden die Grundlage für die systematische Untersuchung relevanter Schädigungsmechanismen und deren Einflussfaktoren, auch über additiv gefertigten Strukturen hinaus. Neuentwickelte Belastungssimulatoren in Kombination mit hochauflösender Messtechnik verschaffen einen Einblick in das bauteilgebundene Werkstoffverhalten, der so bisher nicht möglich war. Mit der synergistischen Zusammenführung der LBF-Kernkompetenzen ‚Betriebsfestigkeit‘ und ‚Adaptronik‘ konnten das AM-Fatigue-Lab eingerichtet und so die Grenzen der experimentellen Betriebsfestigkeit zugunsten des Leichtbaus und der Ressourcenschonung in eine neue Dimension verschoben werden.

Dr.-Ing. Rainer Wagener, Gruppenleiter Bauteilgebundenes Werkstoffverhalten, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt

www.lbf.fraunhofer.de

Literatur:

- [1] Wagener, R., Melz, T.: *Deriving a continuous fatigue life curve from LCF to VHCF*, SAE 2017-01-0330 (2017), DOI:10.4271/2017-01-0330
- [2] *Materials Testing* 60 (2018), [Nr.10], S. 924-930.
- [3] *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 39 (2008), [Nr. 10], S.761-768.
- [4] Fischer, C.; Wagener, R.; Melz, T.; Kaufmann, H.: *Piezo based testing facilities to discover new areas in material characterization*, AMM, India (2014).
- [5] Fischer, C., Wagener, R., Friedmann, A., Axt, C., Matthias, M., Melz, T., Kaufmann, H.: *Piezo electric Driven Testing Facilities to Research the Very High Cycle Fatigue Regime*, VHCF5 Berlin, June 28-30, 2011
- [6] *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42 (2011), [Nr. 10], S.929-933.
- [7] Gaßner, E.; Pries, H.: *Zeit- und Dauerfestigkeitsschaubilder für stabartige Bauteile aus Cr-Mo-Stahl, Duraluminium, Hydroaluminium und Elektron*. *Luftwissen* 8 (1941), pp. 1-4
- [8] *Konstruktion* 57 (2005), [Nr.4], pp. 87-93.
- [9] *International Journal of Fatigue* 29 (2007), pp. 2246-2258.
- [10] Fischer, Chr.: *Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Wöhlerlinie der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060*, Dissertation TU Darmstadt, 2017.
- [11] VDI-Berichte Nr. 214 (1974), S. 85-95.
- [12] VDI-Berichte Nr. 268 (1976), S. 63-76.
- [13] Kuguel, R. A. (1961): *Relation between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Deduced From the Concept of Highly Stressed Volume*. In: *ASTM Proceeding* 61, S. 732-744
- [14] *Konstruktion* 47, S. 222-232
- [15] Conrad, F., et. al.: *GPU-based digital image correlation system for uniaxial and biaxial crack growth investigations*, 1st Virtual European Conference on Fracture, *Procedia Structural Integrity* 28 (2020) 2195-2205.
- [16] Blug, A., et. al.: *Real-Time GPU-Based Digital Image Correlation Sensor for Marker-Free Strain-Controlled Fatigue Testing*, *Simulation-Supported Testing of Smart Energy Product Prototypes*, Volume 9, Issue 10, Mai (II), 2019.
- [17] Wagener R., Hell M., Scurria M., Bein T. (2020) *Deriving the Structural Fatigue Behavior of Additively Manufactured Components*. In: *The Minerals, Metals & Materials Society (eds) TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6_13.