

BILDER: FRAUNHÖFER LBF

Mittels Röntgenfluoreszenzanalyse lassen sich zerstörungsfrei Ungängen detektieren und in die Lebensdauerbeurteilung einbeziehen.

## Lebensdaueranalyse mit Kennwerten der zerstörungsfreien Prüfung

Gusskomponenten stellen heute dank der verfahrensbedingt hohen Freiheitsgrade sowie ihrer sehr guten Festigkeitseigenschaften hochleistungsfähige Konstruktionen dar. Dabei lassen sich neben Kleinstbauteilen auch schwere und dickwandige Komponenten aus Eisen- und Stahlguss herstellen. Bauteilspezifisch wechselnde Wanddicken erschweren jedoch eine zutreffende Lebensdauerabschätzung für die unterschiedlichen Geometriebereiche. Hier können digitale Methoden helfen, reproduzierbare Kennwerte zu liefern.

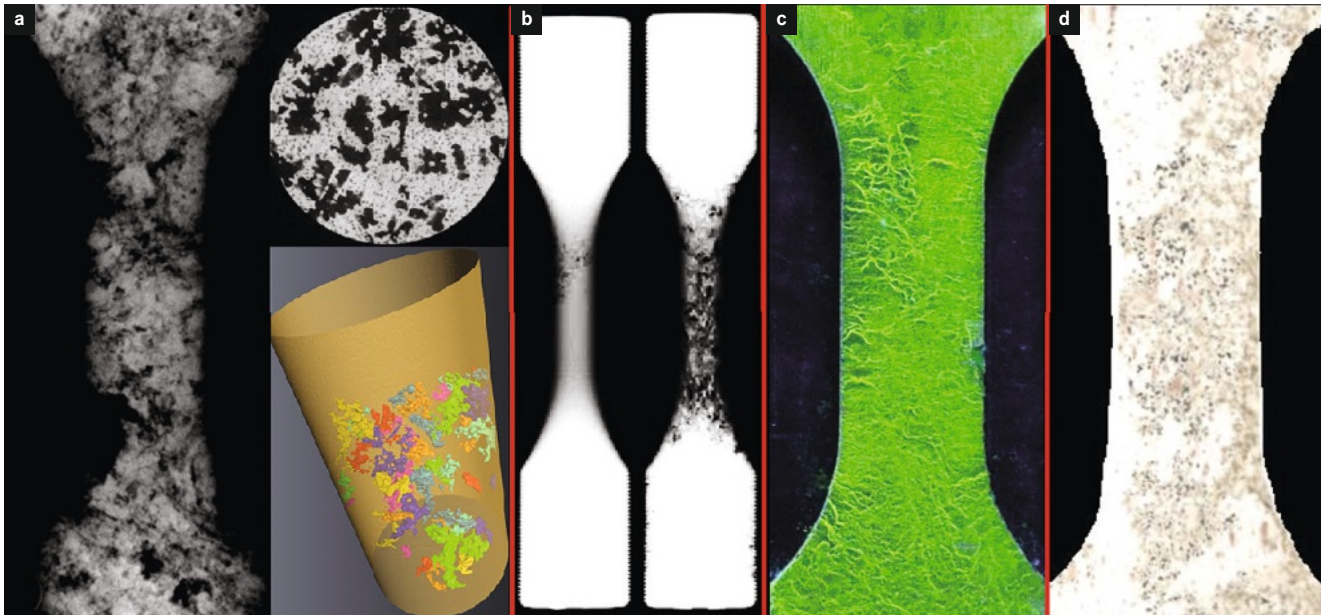
VON CHRISTOPH BLEICHER,  
DARMSTADT

Der Einsatz verschiedener, hochentwickelter Gießverfahren ermöglicht mittlerweile die Produktion integrierter Konstruktionen in einer Gusskomponente, sowohl im Eisen- als auch im Nichteisenguss. Daraus ergeben sich aber auch bauteilspezifisch wechselnde Wanddicken mit entsprechend unterschiedlichen Gefügen und Gefügeeigenschaften. Dies stellt die Ingenieure immer wieder vor die Herausforderung, eine verlässliche Betriebsfestigkeits- und Lebensdauerbeurteilung für die unterschiedlichen Bauteilbereiche durchführen zu können. Neben geometriebedingten, bereichsspezifischen Gefügeunterschieden und entsprechend variierenden Schwingfestigkeitseigenschaften, treten zusätzlich immer wieder Ungängen im Guss auf, die ebenfalls korrekt und möglichst eindeutig hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Bauteillebensdauer zu beurteilen sind.

Dabei sind nicht nur analoge, sondern im Sinne der Vernetzung auch digitale Methoden anzuwenden, die reproduzierbare Kennwerte für die Betriebsfestigkeit gegossener Komponenten liefern. Dies bedingt etwa die Einbindung der Erstarungssimulation sowie digitaler zerstörungsfreier Prüfmethode in die Bauteilbemessung, um ausgehend von bereichsspezifisch abgeschätzten Gefügen und Ungängen eine Lebensdauerabschätzung vor dem Abguss durchführen zu können. Eine anschließende Kontrolle der tatsächlich auftretenden Ungängen mittels zerstörungsfreier Prüfmethode könnte dann eine Nachbemessung bzw. eine valide Lebensdauerbeurteilung des realen Gussteils ermöglichen. So wird über digitale Prozesse der Beurteilungsaufwand massiv reduziert und eine beschleunigte Freigabe von Bauteilen erreicht.

### Stand der Technik

Gerade bei der Lebensdauerbeurteilung von Gussbauteilen mit bereichsweisen Ungängen oder unterschiedlichen Gefügeeigenschaften existieren heute in Normungen und Richtlinien [1, 2] keine oder nur standardisierte Vorgehensweisen, etwa in Abhängigkeit der Gütestufen bzw. Fehlerklassen [z.B. 3, 4]. Diese berücksichtigten jedoch nur unzureichend die wanddicken- bzw. gefügespezifische Beanspruchbarkeit des Bauteils. Dabei kommen unter anderem sogenannte Fehlervergleichskataloge [3, 4] etwa für die Beurteilung von Lunkern zum Einsatz, denen



**Bild 1:** Zerstörungsfreie Charakterisierung von Schwingproben: Mittels digitaler Röntgen-Computertomografie (a) und Radiografie (b) zur Detektion von Dichteunterschieden, der Magnetpulverprüfung zum Nachweis von rissartigen Strukturen im Dross (c) sowie dem Schwefelnachweis nach Baumann (d) zum indirekten Nachweis von Dross.

ein rein visueller Vergleich von gefundenem zu genormtem Lunkerbild zugrunde liegt. Anschließend wird die zugewiesene Lunkerklasse am Bauteil über die Wanddicke in eine Gütestufe übersetzt [5]. Dabei ist das Vorgehen zwar genormt und nachvollziehbar, jedoch selten reproduzierbar und lässt wichtige Informationen wie die Bauteilbeanspruchung sowie die tatsächliche Ungänzengröße und -geometrie bei der Beurteilung außen vor.

Gerade im Bereich der Windenergie, etwa im Falle einer Bauteilbemessung nach der Richtlinie des DNV GL [2], baut eine Reihe von Abschlagfaktoren auf der Ungänzenbeurteilung auf, die die Bemessungswöhlerlinie in Abhängigkeit der bereichsspezifischen Bauteilgütestufe reduziert. Eine möglichst gute Abschätzung der Ungänze ist damit zwingend erforderlich. Allerdings findet eine Berücksichtigung von lokalen Beanspruchungen oder der tatsächlichen Lage, Form und Größe der Ungänze in der Normung in aller Regel nicht statt. Dabei fehlen auch Hinweise aus der Konstruktion, welche lokale Beanspruchung aus dem Bauteilbetrieb tatsächlich im fraglichen Bereich zu erwarten ist sowie eine entsprechende Vorgabe zum Einsatz unterschiedlicher zerstörungsfreier Prüfverfahren. So fehlen wichtige Informationen für die numerische Beurteilung der Bauteillebensdauer in kritischen Bereichen, etwa durch verringerte Steifigkeiten oder Spannungsverteilungen. Aber gerade für zügige Fertigungsprozesse und die schnelle Entwicklung von masseoptimierten Gussstücken sind hier standardisierte und vor allem

abgestimmte Freigabeprozesse zu etablieren, die die Bedarfe von Konstruktion, Produktentwicklung, Gießereitechnik, Betriebsfestigkeit und zerstörungsfreier Prüfung mit einbeziehen.

Dennoch fehlt immer wieder der entsprechende Austausch zwischen diesen Disziplinen, etwa wenn es um die Frage eines guss- und prüfgerechten Bauteildesigns oder die Einbindung von numerischen Erstarrungs- und Beanspruchungssimulationen in die Abschätzung der Lebensdauer von Bauteilen geht. Für diese Beurteilung, die meist am Ende des Fertigungsprozesses, insbesondere beim unerwarteten Auftreten von bereichsspezifischen Ungänzen, die Bauteilleistungsfähigkeit nachweisen muss, fehlt es meist an hinreichend belastbaren Informationen. Können dagegen Erfahrungen sowie digital vorliegende Prüfergebnisse über die Bauteilfestigkeit im Zusammenhang mit bereichsspezifischen Ungänzen an den Konstrukteur zurückgespiegelt werden, ermöglicht dies auch für die Zukunft eine exaktere Vorabbemessung und Konstruktion neuer Gussstücke.

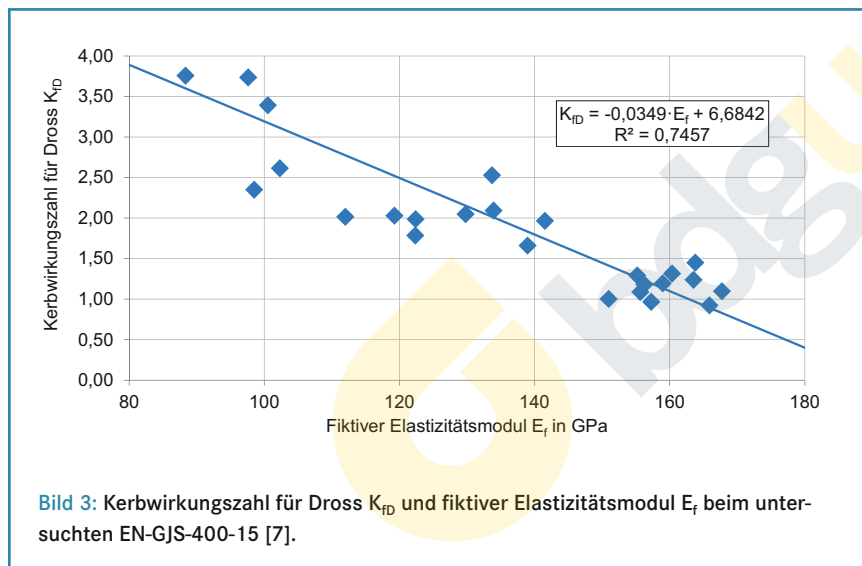
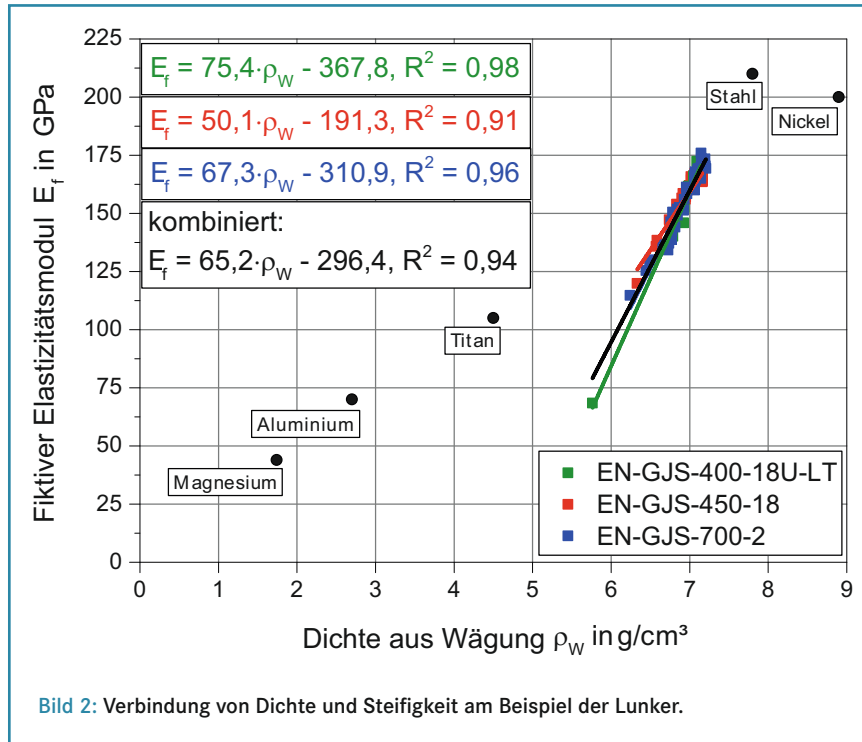
### Einbindung digitaler Messdaten aus der zerstörungsfreien Prüftechnik

Maßnahmen, die Disziplinen Simulation, Bemessung und zerstörungsfreie Prüfung für die Bauteilfestigkeits- und Lebensdaueranalyse näher zusammenzuführen, werden am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF) gemeinsam mit zahlreichen Partnern schon sehr lange verfolgt, [6, 7, 8, 9]. So

wurden im Rahmen von MABIFF [10] und LEA [11] Ansätze verfolgt, um bei GJS-Werkstoffen anhand von Gefügebewertungen lokale Bauteilfestigkeiten für ferritische und ausferritische Werkstoffe abzuleiten und dabei die Erstarrungs- und Beanspruchungssimulation miteinander zu verbinden.

In weiteren Schritten wurde in den Projekten „Lunkerfest“ [6] und „unverDROSSen“ [7] zusammen mit Kollegen aus den Bereichen Gießerei, Anwender und zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) daran geforscht, in wieweit Kennwerte über Größe, Lage und Form von Lunkern und Dross, etwa aus der Computertomografie, der Magnetpulverprüfung oder dem mechanisierten Ultraschall, für eine Lebensdaueranalyse von dickwandigen Bauteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit verwendet werden können. Dabei wurden insbesondere digitale Messverfahren wie mechanisiertes Ultraschall oder Sampling Phased Array zurückgegriffen [8], um eindeutig und reproduzierbar messbare Kennwerte der Lage, Dichte und Geometrie der Ungänzen im Bauteil in die numerische Bauteilbemessung überführen zu können. Neben der reinen Charakterisierung von Bauteilen wurden auch die daraus entnommenen Schwingproben eingehend zerstörend und zerstörungsfrei untersucht.

Für die Schwingproben mit Lunkern und Dross erfolgte dies im Nachgang zur Probenfertigung mithilfe der fluoreszierenden Magnetpulverprüfung sowie Schwefelnachweisen und der Durchstrahlungstechnik, die sowohl radiografisch als



auch digital durchgeführt wurde. Dies erlaubt eine engere Eingrenzung der vorliegenden Ungängen in der Schwingprobe und gibt zusätzlich Informationen für die Beurteilung jeder einzelnen Schwingprobe im Hinblick auf ihre mechanischen und zyklischen Eigenschaften sowie auch deren Rückverfolgbarkeit ins Bauteil (Bild 1). Dabei erlauben die digitalen Methoden der Ultraschalltechnik, die an den Schwingproben ermittelten mechanischen Kennwerte auch mit Messgrößen der zerstörungsfreien Prüfung an den Bauteilen zu vergleichen.

Neben der zerstörungsfreien Werkstoffcharakterisierung wurden sowohl der Grundwerkstoff als auch die vorliegenden Werkstoffungängen zerstörend untersucht [6, 7]. Für die Lunker geschah dies mithilfe

fe kraft geregelter Wöhlerversuche sowie Messungen der Probensteifigkeit anhand von quasi-statischen, dehnungsgeregelten Versuchen. Für die Schwingproben mit Dross wurde eine Charakterisierung anhand zyklischer, dehnungsgeregelter Versuche vorgenommen, um auch Änderungen des Spannungs-Dehnungsverhaltens in Abhängigkeit des Drosses in der jeweiligen Schwingprobe über die Lebensdauer erfassen zu können.

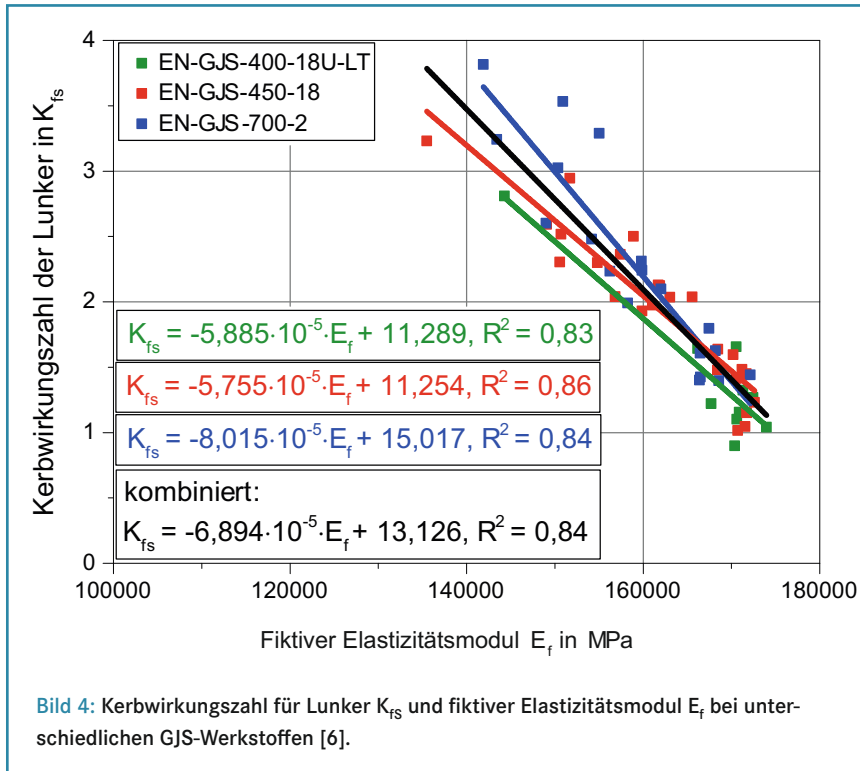
Der Fokus solcher zerstörender Analysen liegt dabei generell darauf, mechanische Kennwerte oder Bemessungsgrößen, wie die Kerbwirkungszahl  $K_f$ , für verschiedene Werkstoffungängen zu definieren, die sich mit einer Messgröße der zerstörungsfreien Prüfung korrelieren lassen. Eine solche Messgröße wurde so-

wohl für Lunker als auch für Dross in der Dichte bzw. dem fiktiven Elastizitätsmodul in Verbindung mit einer neu definierten Kerbwirkungszahl für Dross ( $K_{ID}$ ) und Lunker ( $K_{IS}$ ) gefunden. So konnten je nach Konfiguration des Drosses bzw. der Lunker eine deutliche Reduktion der Werkstoffsteifigkeit, genannt fiktiver Elastizitätsmodul  $E_f$ , auf teilweise nur wenige GPa ermittelt werden [6, 7]. Ein Verbindungsglied von fiktivem Elastizitätsmodul  $E_f$  und der zerstörungsfreien Prüftechnik stellt nunmehr die Dichte dar (Bild 2), die sich durch eine mechanisierte Ultraschallprüftechnik [7, 8] oder die Röntgentechnik [6] in gewissen Grenzen abschätzen lässt.

Die lokale und vor allem reproduzierbare Bestimmung von Dichteverteilung, Größe und Lage der Ungänge im Bauteil anhand mechanisierter Prüfmethode ermöglicht es nun, digitale Messdaten in die numerische Beanspruchungssimulation zu überführen. Die anschließende Bewertung der Dichteverteilung mithilfe ihrer Korrelation zum fiktiven Elastizitätsmodul  $E_f$  ermöglicht eine genaue Beurteilung der Spannungsverteilung im Bauteil sowie der sich aufgrund der Ungänge ergebenden Änderungen in der Spannungsverteilung, die häufig eine erhöhte Beanspruchung des angrenzenden Grundwerkstoffes zur Folge haben.

**Schwingfestigkeitsabschätzung mit gemessenen Kennwerten**

Neben der reinen Beurteilung von Steifigkeit und lokaler Beanspruchbarkeit anhand der gewonnenen Messdaten und der numerischen Simulation stellt sich natürlich auch die Frage nach lokaler Beanspruchbarkeit der Bereiche, in denen die Ungänge vorliegt. Hierfür lässt sich sowohl für Lunker als auch für Dross in den untersuchten GJS-Werkstoffen dem fiktiven Elastizitätsmodul jeweils die lokale Kerbwirkungszahl gegenüberstellen, deren Zusammenhänge ebenfalls in den Projekten „unverDROSSen“ und „Lunkerfest“ entwickelt wurden. Dies führt in beiden Fällen zu einer linearen Regression zwischen  $K_{IS}$  bzw.  $K_{ID}$  und  $E_f$  (Bild 3 und 4). Damit ist nun abhängig vom Ergebnis der zerstörungsfreien Bauteilprüfung auch eine lokale Beurteilung der Bauteilbeanspruchbarkeit möglich (Bild 5). Hierzu wird ausgehend von einer Spannungs-Referenzwöhlerlinie für den ungängenfreien Werkstoffzustand und der lokal abgeschätzten Dichte am Bauteil ein individueller, rechnerisch nachvollziehbarer sowie reproduzierbarer Abminderungsfaktor ermittelt, mit dem sich eine bereichsspezifische Bauteilwöhlerlinie abschätzen lässt.



Festlegung von Grenzfehlern bzw. Grenzungenzen, die gerade noch unkritisch sind. Werden im Qualitätssicherungsprozess nun Abweichungen gefunden, können diese bauteil- und beanspruchungsspezifisch schnell beurteilt werden, ohne aufwendige Nachberechnungen oder Freigabeprozesse durchlaufen zu müssen; unter Einbindung entsprechender Methoden wäre dies auch rein digital möglich.

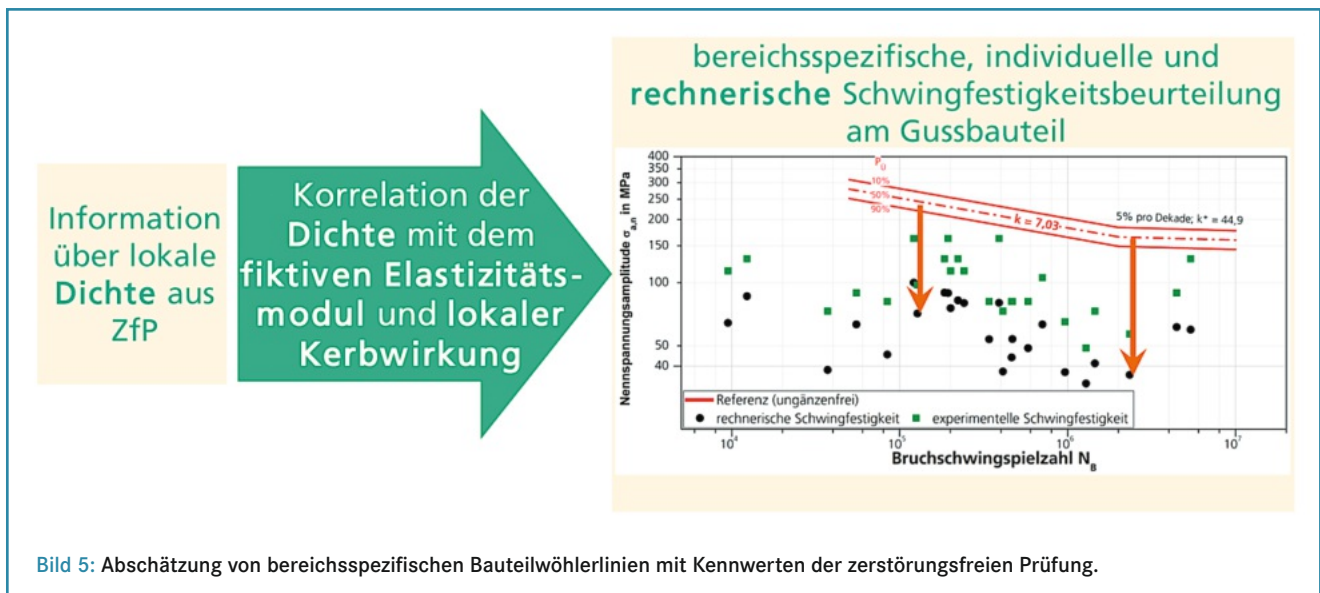
Dieses Vorgehen bietet darüber hinaus die einsatzspezifische Selektion von Bauteilen: Die Gegenüberstellung der beschriebenen Beanspruchbarkeit am Bauteil mit einer zu erwartenden Schädigung in Abhängigkeit von der geplanten Bauteilnutzung, oder sogar einem Conditional Monitoring, ließe dann eine Nutzung auch bei vorhandenen Ungängen zu. Dies jedoch gegebenenfalls für einen Einsatzbereich mit geringeren Beanspruchungen, wie dies etwa für Gussbauteile in der Windenergie der Fall sein kann.

**Fazit**

Das Vorgehen im Rahmen der Lebensdauerbeurteilung von ungenzenbehafteten Bauteilen bietet langfristig zahlreiche weitere Möglichkeiten, Bauteile und deren Lebensdauer zu optimieren und weitere Disziplinen wie etwa die Erstarrungssimulation oder die Bauteilentwicklung einzubinden. So können beispielsweise durch die Erstarrungssimulation ermittelte Gefügestände oder möglicherweise auftretende Ungängen in ihrer Wirkung auf die Lebensdauer rechtzeitig schon vor dem Abguss in die Bauteilbemessung einbezogen werden. Auch dieser Aspekt wird aktuell in einem Forschungsvorhaben am Fraunhofer LBF zusammen mit For-

schungsstellen und Industrievertretern aus Maschinenbau, Simulation, zerstörungsfreier Prüfung und Gießereitechnik im Vorhaben „GrenzQualifizierung“ erarbeitet [9]. Ziel ist dabei die Erstellung von virtuellen Grenzmustern für Großgussbauteile aus GJS, in denen stellvertretend für das Serienbauteil mögliche Ungängen in ihrer Wirkung auf Struktursteifigkeit und Lebensdauer bereits numerisch analysiert wurden. Gleichzeitig werden bauteilspezifisch zerstörungsfreie Nachweisverfahren für die Detektion der jeweilig auftretenden Ungängen definiert. Der Vorteil liegt dabei in der bereits bei der Bemessung und Konstruktion stattfindenden

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, wie sich Prozesse im Rahmen von Qualitätssicherung und Betriebsfestigkeit miteinander verbinden lassen. Dennoch sind weitere Disziplinen am Bauteillebensdauerprozess beteiligt, die ihrerseits Informationen beisteuern können, um die Lebensdauer besser abschätzbar zu machen. Dabei gilt es insbesondere, Erfahrung, Wissen und Bedürfnisse der Disziplinen der Erstarrungs- und Prozesssimulation und der Gießtechnik selbst sowie der zugrunde liegenden Normung und der Produktentwicklung einzubeziehen, um optimierte Gussbauteile herstellen zu können. Dazu muss aber auch ein ver-



stärkter Austausch dieser Disziplinen stattfinden.

Um diesen Austausch zu fördern, bietet das Fraunhofer LBF vom 01. bis 03.03.2021 die Möglichkeit zu einem interdisziplinären Austausch rund um den Produktentstehungsprozess für Gussbauteile im Rahmen des neuen Kongressformates „InCeight Casting C<sup>8</sup>“. Dabei soll durch Vorträge aus Industrie und Forschung zwischen den genannten Disziplinen ein interaktiver Austausch zu Herausforderungen und Lösungen im Bereich der Entstehung von Gussbauteilen angeregt werden.

#### Weitere Informationen:

##### **Dr.-Ing. Christoph Bleicher**

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF  
Qualifizierung gegossener Komponenten  
Bartningstraße 47, 64289 Darmstadt  
E-Mail:

christoph.bleicher@lbf.fraunhofer.de  
Internet: www.lbf.fraunhofer.de

#### **Literatur:**

[1] FKM-Richtlinie – Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6., überarbeitete Ausgabe, For-

schungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt am Main, 2012.

[2] DNV GL: Machinery for Wind Turbines, Standard DNVGL-ST-0361, DNV GL AS, Oslo, Norway, 2016.

[3] Adjunct to E446 Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (51 mm) in Thickness. ASTM International, 2010.

[4] Institut für Gießereitechnik GmbH (IfG), Gesellschaft für Radiographie (GfR) GmbH: VDG-Merkblatt P-541, Fehlervergleichskatalog für die Bewertung von Durchstrahlungsprüfungen an dickwandigen Gussstücken aus unlegierten EN-GJS-Werkstoffen. Verein Deutscher Gießereifachleute e.V. VDG, 2001.

[5] Normenausschuss Eisen und Stahl (FES) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN: DIN 1690 Teil 2 – Technische Lieferbedingungen für Gussstücke aus metallischen Werkstoffen – Stahlgussstücke; Einteilung nach Gütestufen aufgrund zerstörungsfreier Prüfungen, Juni 1985.

[6] C. Bleicher: Ein Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit mit besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen von Lunkern auf die Bauteillebensdauer, Dissertation, Tech-

nische Universität Darmstadt, Fraunhofer LBF, Darmstadt, LBF-Bericht FB-246, 2016.

[7] C. Bleicher et al.: Schlussbericht zum BMWi-Vorhaben unverDROSSen – Detektion, Prüfung und Bewertung von Dross im Großgussbereich, FKZ 0325802A, Darmstadt, 19.12.2018.

[8] Kurz, J. et al.: Untersuchungen von Schwindungsporositäten mittels mechanisierter Ultraschallprüfung mit Sampling Phased Array Technik an Sphäroguss von Windkraftanlagenkomponenten zur Abschätzung ihrer Schwingfestigkeit. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Potsdam, 26. bis 28. Mai, 2014.

[9] GrenzQualifizierung – Rechnergestützte Beurteilung der Bauteilfestigkeiten auf Basis virtueller Grenzmuster, Förderkennzeichen FKZ 0324271, andauernd seit 01.07.2018.

[10] W. Schäfer et al.: LEA – Leichtbau mit gegossenen ADI Bauteilen, FKZ 03X3013G, Abschlussbericht, 2011.

[11] A. Heinriet: Maßgeschneiderte Bauteileigenschaften durch Integration von Fertigungs- und Funktionssimulation, BMBF-Verbundprojekt MABIFF; FKZ 01RI0713, Darmstadt, 2011.