

Mechanisierte Ultraschallprüfung an einem Guss-Testkörper in Tauchtechnik

Zerstörungsfreie Materialcharakterisierung und Fehlerprüfung von Gusskomponenten

VON INES VEILE, RALF TSCHUNCKY, DIETMAR BRUCHE, MELANIE KOPP UND KLAUS SZIELASKO, SAARBRÜCKEN

Gusswerkstoffe werden überall dort eingesetzt, wo höchste Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Bauteils bei gleichzeitiger Komplexität der Bauteilgestaltung gestellt werden. Da die Herstellung von Gusswerkstücken jedoch vergleichsweise teuer ist, wird eine größtmögliche Ausnutzung des Werkstoffpotentials angestrebt. Dennoch kann das Auftreten von Ungenauigkeiten und Lunkern im Gussteilinneren sowie das Ausbilden von Dross oder anderen Fehlern an der Gussteiloberfläche nicht vollständig ausgeschlossen werden. Diese herstellungsbedingten Fehlstellen führen zu einer lokalen Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften. Eine präzise Lokalisierung und Charakterisierung der gefundenen

Fehlstellen ist vorteilhaft, denn sie ermöglicht entweder eine effiziente Nachbearbeitung oder eine Abschätzung der bruchmechanischen Folgen der Fehler, was eine Nachbearbeitung entbehrlich machen kann. In beiden Fällen führt die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) dazu, dass sowohl Kosten als auch Material, teilweise in erheblichem Maße, eingespart werden können. Darüber hinaus kann die ZfP zur Qualitätskontrolle der Nachbearbeitung verwendet werden oder aber bereits bei der

Charakterisierung des Ausgangsmaterials, u. a. der verwendeten Schmelze, eingesetzt werden.

Am Fraunhofer IZFP werden zu diesem Zweck innovative zerstörungsfreie Prüfungssysteme auf der Basis von Ultraschall-, Röntgen-, magnetischen Streufluss- und elektromagnetischen Verfahren entwickelt, die an Komponenten verschiedener Größenskalen sowie an verschiedenen Gussarten (Eisen-, Stahl-, Aluguss etc.) angewendet werden können.

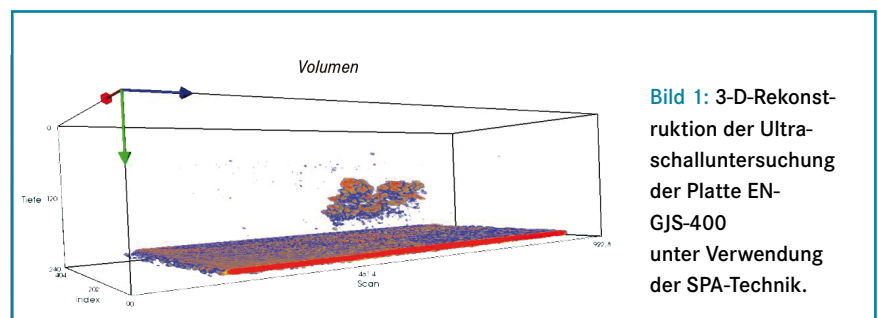


Bild 1: 3-D-Rekonstruktion der Ultraschalluntersuchung der Platte EN-GJS-400 unter Verwendung der SPA-Technik.

In diesem Beitrag werden exemplarisch drei aktuelle Projekte vorgestellt, die sich mit Aspekten der beschriebenen Fragestellungen befassen.

Ermüdungsfestigkeitsnachweis auf der Basis zerstörungsfreier Prüfungen an dickwandigen Eisengussbauteilen der Windenergiebranche

Aufgabenstellung

Das Gießen von Großbauteilen aus Guss-eisen ist für die Windkraftindustrie unverzichtbar. Insbesondere Großwindkraftwerke mit hoher Effizienz benötigen immer größere Bauteile mit hoher Duktilität und Betriebsfestigkeit.

Eine Abnahme der Großbauteile durch Lebensdaueruntersuchungen unter betriebsähnlichen Belastungen ist ab einer gewissen Bauteilgröße bereits heute kaum realisierbar. Um den zukünftigen Leistungsanforderungen gerecht werden zu können, müssen daher die Methoden der Fehlerdetektion und -bewertung der gegossenen Bauteile verbessert werden. Dabei kommt für die zerstörungsfreie Prüfung von großen Eisengussbauteilen nur die Ultraschallprüfung in Frage. Eine besondere Herausforderung stellt aktuell die Bewertung von Schwindungsporositäten (Lunkern) in sphärolithischen Eisengussbauteilen dar [1].

Lösungsansatz

Bisher existierte in der Qualitätsbeurteilung von Eisengussbauteilen nur eine Methode, mit der auf der Basis von Grauwertanalysen (Röntgen) lunkerbehaftete Bauteile hinsichtlich der Betriebsfestigkeit bemessen werden können [2]. Große, dickwandige Eisengussbauteile mit Stückgewichten zwischen 10 t und 250 t, wie z. B. Rotornaben oder Grundrahmen für Windkraftanlagen, können aufgrund der großen Wanddicken jedoch nicht geröntgt werden und entziehen sich daher gängigen Bemessungsmethoden. Dies führt zu besonders hohen Sicherheitsaufschlägen, die aus bruchmechanischen Ansätzen abgeleitet werden, und damit zu erhöhtem Ausschuss.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem mittels Ultraschall (US) eine 3-D-Abbildung von Gefügearauflockungszonen auch in dickwandigen Guss-eisenwerkstoffen möglich ist [3], wie **Bild 1** zeigt. Für die Betriebsfestigkeitsuntersuchungen wurde auf der Basis von Ultraschall Sampling Phased Array (SPA)-Daten ein Konzept zur Probenentnahme ausgearbeitet. Die erzielten Genauigkei-

KURZFASSUNG:

Trifft bei der Bauteilgestaltung ein komplexes Bauteildesign auf hohe Anforderungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften des Bauteils, fällt die Wahl beim zu verwendenden Werkstoff in der Regel auf Guss. Die Bildung von innenliegenden Ungängen und Lunkern sowie von oberflächennahen Materialveränderungen kann jedoch bei der Herstellung von Gusswerkstücken nicht vollständig ausgeschlossen werden. Daher werden zerstörungsfreie Verfahren benötigt, mittels derer diese auftretenden Defekte präzise und zuverlässig lokalisiert sowie umfassend charakterisiert werden können. Eine anschließende Bewertung der gefundenen Fehler bietet die Möglichkeit einer gezielten Nachbearbeitung oder zumindest einer Abschätzung der möglichen bruchmechanischen Folgen der Fehler, was eine Nachbearbeitung gegebenenfalls entbehrlich machen kann. Vor diesem Hintergrund werden am Fraunhofer IZFP zerstörungsfreie Prüfverfahren entwickelt, modifiziert und kombiniert, die an Komponenten verschiedener Größenskalen sowie an verschiedenen Gussarten angewendet werden können.

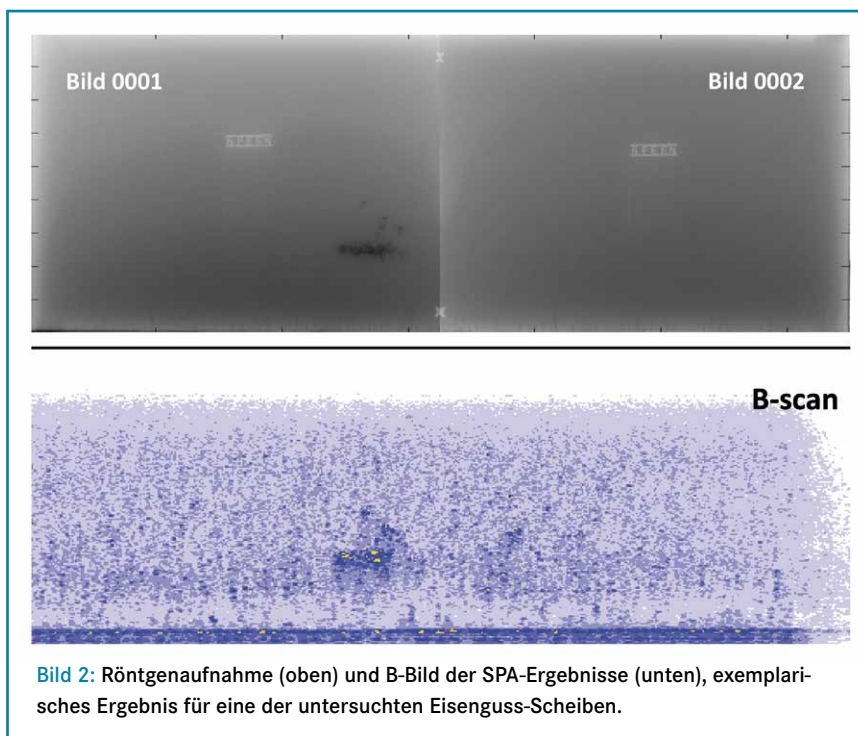


Bild 2: Röntgenaufnahme (oben) und B-Bild der SPA-Ergebnisse (unten), exemplarisches Ergebnis für eine der untersuchten Eisenguss-Scheiben.

ten sind vergleichbar mit Ergebnissen von Durchstrahlungsprüfungen (**Bild 2**). Da die Schwingfestigkeitswerte mit der ermittelten Dichte korrelieren, wurde zunächst mittels Röntgen-CT die Dichte in mehr als 100 Proben ermittelt. Es wurde aufgezeigt, dass diese wiederum mit der Rückwandabschattung der US-Ergebnisse korreliert ist.

Am Fraunhofer LBF wurde ein Modell entwickelt, das eine Verwendung von US-Kennwerten zur Schwingfestigkeitsbemessung erlaubt.

Das Vorhaben mit dem Kurztitel „Lunkerfest“ (Förderkennzeichen 0325239A) wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMU gefördert und durch das Fraunhofer LBF koordiniert.

Einfluss von herstellungsbedingten Ungängen auf das Werkstoffverhalten von Stahlguss

Aufgabenstellung

Das Auftreten von Innenlunkern, Gasblasen, Einschlüssen oder Warmrissen in Stahlgussteilen kann trotz ausgereifter Herstellungsprozesse nicht vollständig ausgeschlossen werden. Inwiefern diese herstellungsbedingten Ungängen in einem Bauteil als relevante Fehler zu bewerten sind, ergibt sich pro Gussteilbereich aus dem lokalen Ausnutzungsgrad¹⁾. Da diese jedoch nur unzureichend bekannt sind, werden bislang konservative, kostenintensive und ressourcenintensive Vereinbarungen zwischen Kunde und Gießerei getroffen und damit viele Ungängen rein

1) Quotient aus bauteilspezifischer lokaler Belastung im Einsatz und den dazugehörigen lokalen, gegebenenfalls durch Ungängen geminderten Werkstoffeigenschaften bzw. der Belastbarkeit.

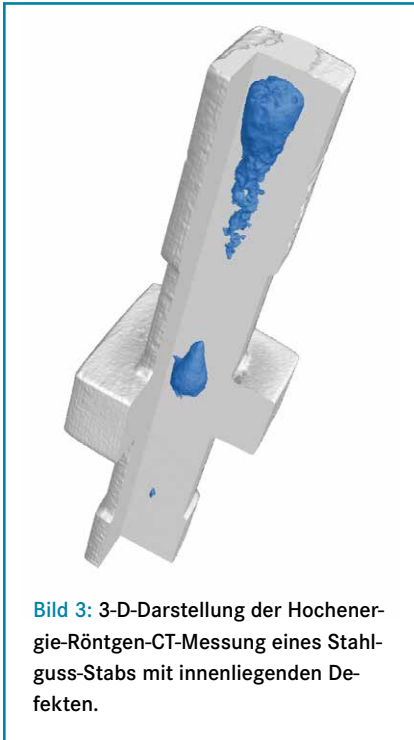


Bild 3: 3-D-Darstellung der Hochenergie-Röntgen-CT-Messung eines Stahlguss-Stabs mit innenliegenden Defekten.

formal und letztlich unnötig als Fehler deklariert. Eine realitätsnahe Trennung zwischen Ungängen ohne Fehlercharakter und Ungängen mit Fehlercharakter ist dementsprechend nur bei Vorliegen entsprechend genauer zerstörungsfreier Prüfergebnisse in Kombination mit geeigneten Werkstoffmodellen möglich.

Lösungsansatz

An dieser Stelle setzt ein laufendes von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke (AiF) gefördertes Forschungsprojekt an. Ziel ist einerseits die Ermittlung von wissenschaftlich gesicherten Korrelationen zwischen der 2- bzw. 3-dimensionalen Verteilung schwindungsbedingter Ungängen in Stahlguss der Legierungen G22Ni-MoCr5-6 und G20Mn5 und der lokalen bruchmechanischen Festigkeit bzw. der Belastbarkeit unter statischer Beanspruchung. Andererseits soll ein numerisches Konzept zur Festigkeitsbewertung von Stahlgussbauteilen mit realen oder postulierten Gießfehlern ermittelt werden.

Um diese Ziele zu erreichen, stellt die Qualifizierung zweier innovativer ZFP-Verfahren zunächst ein Teilziel dar. Hierfür wurden am Fraunhofer IZFP mechanisierte US-Prüfungen (Anregung durch Einzelschwinger sowie SPA) an Stahlgussstäben im Wasserbad durchgeführt. Als Ergebnis dieser Messungen stehen A-Bilder sowie zweidimensionale B-, C-, und D-Bilder zur Verfügung. Basierend auf den US-Messdaten liefert ein am IZFP entwickeltes Rekonstruktionsverfahren eine dreidimensionale Darstellung der lokalisierten In-

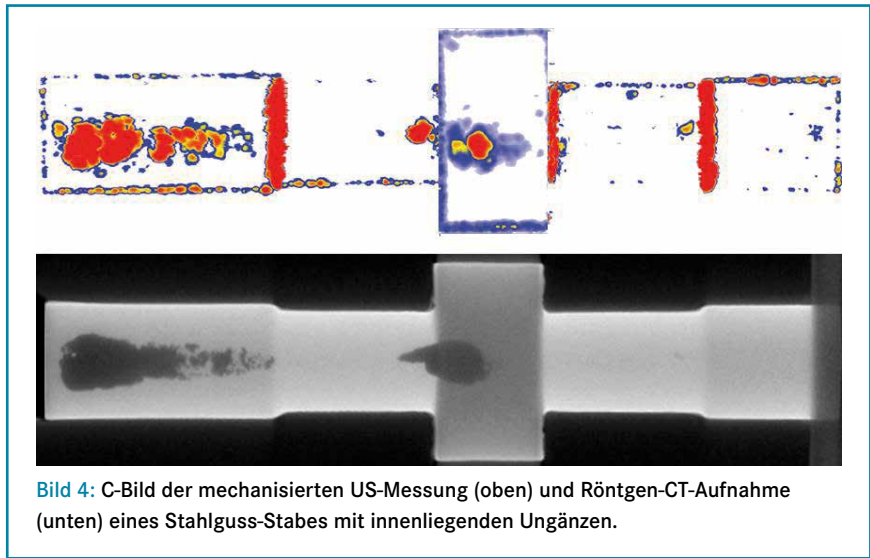


Bild 4: C-Bild der mechanisierten US-Messung (oben) und Röntgen-CT-Aufnahme (unten) eines Stahlguss-Stabs mit innenliegenden Ungängen.



Bild 5: Vergleich der Ergebnisse aus US-Handprüfung in Kontakttechnik (links) und mechanisierter US-Prüfung in Tauchtechnik (rechts) – Bewertung anhand von A-Bildern nach Norm mit Zuordnung zu Gütestufen vs. Bewertung anhand von B- und C-Bildern.

nendefekte. Als zweites innovatives Prüfverfahren wurden Hochenergie-Röntgen-CT-Messungen durchgeführt. Auch hieraus resultieren hochauflösende 3-D-Darstellungen der Probekörper inkl. der detektierten Ungängen (Bild 3). Basierend auf den Ergebnissen der beiden innovativen Verfahren lassen sich Lage, Position, Größe sowie Verteilung der detektierten Ungängen präzise bestimmen. Diese Daten werden sowohl untereinander (Bild 4) als auch mit Ergebnissen konventioneller, zertifizierter ZFP (Durchstrahlungsprüfungen [4] und US-Handprüfungen in Kontakttechnik [5]) verglichen (Bild 5) und durch zerstörende Prüfungen (metallografische Schlibfbilder in 1-mm-Ebenen) validiert. Eine Abweichung zwischen den rekonstruierten 3-D-Daten und den Validierungsdaten wird genutzt, um das angewendete Rekonstruktionsverfahren zu verbessern. Die ermittelte Ungängenverteilung pro Stahlgussstab wird in einem nächsten Schritt an das Fraunhofer IWM übergeben, da dort Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt werden, um vorherzusagen, wie sich die gefundenen Ungängen unter statischen Belastungen auf das Werkstoffverhalten auswirken. Gleichzeitig werden statische Zugversuche durch-

geführt, um das simulierte mit dem realen Bruchverhalten abzugleichen.

Das IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Gießereitechnik e.V. (FVG) mit dem Akronym „Ungängen Stahlguss“ (Förderkennzeichen: 469 ZN) wird über die AiF vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und durch das Fraunhofer IWM koordiniert.

Detektion, Prüfung und Bewertung von Dross im Großgussbereich

Aufgabenstellung

Bei der Herstellung von Großgusskomponenten aus Gusseisen mit Kugelgraphit (EN-GJS) kommt es häufig zur Bildung von Dross (oxidische, sulfidische und silikatische Verunreinigungen), der sich meist an oder unmittelbar unter der Gussoberseite ausbildet. Da für eine Berechnung der Betriebsfestigkeit eines entsprechenden Bauteils keine exakten, mechanischen Kennwerte des vorliegenden Drosses zuverlässig ermittelt werden können, werden bislang vollständig drossfreie Bauteile gefordert. Gießtechnisch kann dies jedoch nicht gewährleistet werden, sodass bisher eine aufwendige, großzügige Nacharbeitung zur verlässlichen Ent-

fernung der Drossanteile erfolgt. Die Kenntnis der tatsächlichen Dicke sowie der Verteilung der Drossschicht würde den Aufwand bei der Bearbeitung reduzieren und dadurch sowohl Material- als auch Produktionskosten erheblich senken. An dieser Stelle sind innovative ZfP-Verfahren gefragt.

Lösungsansatz

Im Rahmen eines laufenden, vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens werden zerstörungsfreie Prüfmethoden weiterentwickelt und getestet, um Dross zu detektieren, abzubilden und zu charakterisieren.

Hierzu wird zum einen die mechanisierte US-Prüfung als Volumenprüfverfahren eingesetzt, mit dem Ziel, die Dross-Verteilung dreidimensional abzubilden. Bisher musste die US-Prüfung stets von der Dross-Gegenseite erfolgen. Da diese oft nicht zugänglich oder aufgrund von Geometriebedingungen nicht prüftauglich ist, wurde die US-Methode am IZFP so optimiert, dass eine direkte Messung an der gut erreichbaren drossbehafteten Seite möglich ist. Hierzu wurden spezielle US-Prüfköpfe ausgewählt, und die Messdatenerfassung wurde durch eine spezielle Blendenauswahl optimiert.

Zum anderen werden sondengestützte magnetische Streuflussprüfungen sowie die Mikromagnetische Multiparameter-, Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse (3MA) als oberflächensensitive Verfahren eingesetzt, um Bauteile auf Drossfreiheit zu überprüfen. Die am Fraunhofer IZFP entwickelte, sondengestützte magnetische Streuflussprüfung basiert darauf, dass sich bei Magnetisierung einer drossbehafteten Fläche im Bereich der lokalen Ungängen magnetische Streufelder ausbilden, welche mittels hochempfindlicher Magnetfeldsensoren erfasst werden. Hierbei werden die Sensoren mit einer Scan-Vorrichtung über die zu prüfende Oberfläche geführt, wobei die Streufeldsignale ortsabhängig erfasst werden. Die elektromagnetische 3MA-Methode nutzt aus, dass in ferromagnetischen Werkstoffen die magnetischen mit den mechanisch-technologischen Eigenschaften korrelieren. Sie ermöglicht somit eine Unterscheidung von drossbehafteten und drossfreien Werkstoffbereichen. Die Ummagnetisierung sowie die Messung des Ummagnetisierungsverhaltens erfolgen mit einem Sensor in kompakter Bauform, der zur Erfassung der flächigen Verteilung von Werkstoffzuständen scannend über das Bauteil geführt wird.

Zur Erprobung der zerstörungsfreien Prüfmethoden wurden von einem Pro-

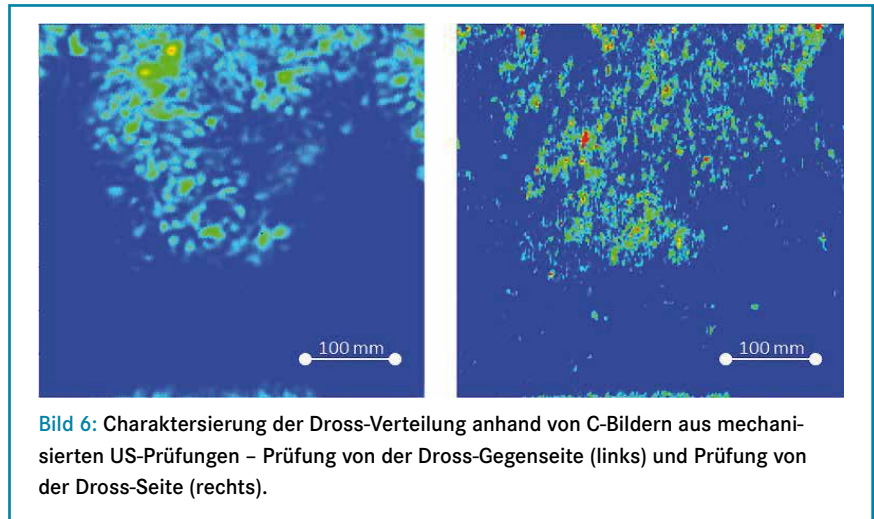


Bild 6: Charakterisierung der Dross-Verteilung anhand von C-Bildern aus mechanisierten US-Prüfungen – Prüfung von der Dross-Gegenseite (links) und Prüfung von der Dross-Seite (rechts).

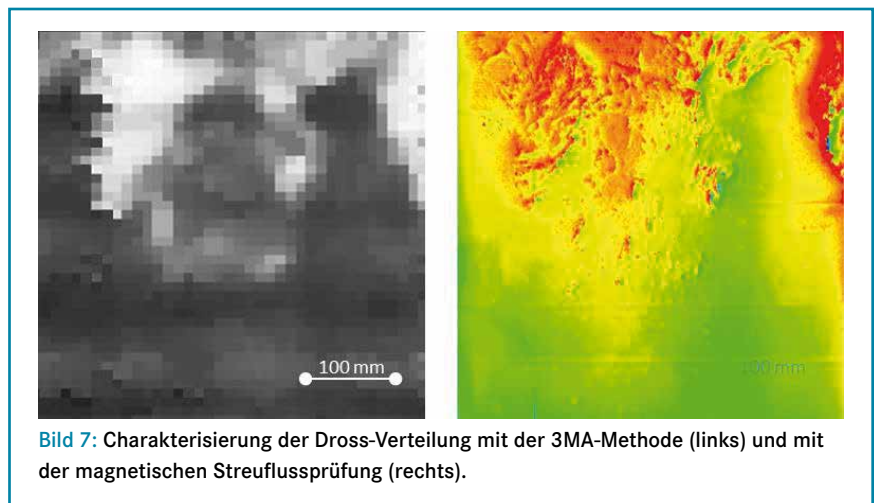


Bild 7: Charakterisierung der Dross-Verteilung mit der 3MA-Methode (links) und mit der magnetischen Streuflussprüfung (rechts).

jektpartner mehrere Gussquader der Größe 500 x 500 x 200 mm (L x B x H) mit unterschiedlicher Ausprägung von Dross bereitgestellt. Mit der konventionellen US-Methode wurde die Dross-Gegenseite mit der speziell angepassten US-Methode die drossbehaftete Guss-oberseite abgescannt. Die Prüfungen von der Dross-Seite zeigen, dass die Messergebnisse mit Ultraschallprüfköpfen, die ein hohes Nahaufklärungsvermögen aufweisen, gut mit den konventionellen Ultraschall-Messungen von der Gegenseite übereinstimmen (**Bild 6**). Ebenso wurden die Gussoberseiten (Dross-Seiten) mit der 3MA-Methode und der magnetischen Streuflussmethode vermessen. Auch diese Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der konventionellen US-Messungen (**Bild 7**), was die Empfindlichkeit aller Methoden in ihrem jeweiligen Analysiertiefenbereich bestätigt. Je nach Anwendungsfall kann daher eine Auswahl oder ggf. Kombination geeigneter ZfP-Verfahren erfolgen. Im weiteren Verlauf des Projektes sind Optimierungen der eingesetzten Prüf- und Auswertmethoden sowie Messungen an weite-

ren Testkörpern und an realen Bauteilen geplant.

Das Vorhaben mit dem Akronym „un-verDROSSen“ (Förderkennzeichen 0325802A) wird vom BMWi gefördert und durch das Fraunhofer LBF koordiniert.

Dr. Ines Veile, Dr. Ralf Tschuncky, Dietmar Bruche, Dipl.-Ing. Melanie Kopp und Dr. Klaus Szielasko, Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken

Literatur:

- [1] Germanischer Lloyd: Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Ausgabe 2003 mit Ergänzung, 2004.
- [2] Kaufmann, H.: Zur schwingfesten Bemessung dickwandiger Bauteile aus GGG-40 unter Berücksichtigung gießtechnisch bedingter Gefügeungängen. Fraunhofer LBF, Darmstadt, Bericht Nr. FB-214, 1998.
- [3] Bulavinov, A., u. a.: Industrial application of real-time 3D imaging by sampling phased array. In: European Federation for Non-Destructive Testing (EFNDT): European Conference on Non-Destructive Testing (10): ECNDT, Vortrag 1.3.22, 2010.
- [4] DIN EN 12681.
- [5] DIN EN 12680-1/2.