

# Untersuchungen von Schwindungsporositäten mittels mechanisierter Ultraschallprüfung mit Sampling Phased Array Technik an Sphäroguss von Windkraftanlagenkomponenten zur Abschätzung ihrer Schwingfestigkeit

Jochen H. KURZ \*, Christoph BLEICHER \*\*, Andrey BULAVINOV \*\*\*\*,  
Andre HEINRIETZ \*\*, Ute MAISL \*\*\*, Michael MAISL \*, Roman PINCHUK \*\*\*\*,  
Sergey PUDOVIKOV \*, Alexandra TSYBAN \*\*\*\*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP Campus E3 1, 66123  
Saarbrücken, Tel. 0681 9302 3880, Fax 0681 9302 11 3880,  
E-Mail jochen.kurz@izfp.fraunhofer.de

\*\* Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt  
\*\*\* Q-NET GmbH, Saarbrücken  
\*\*\*\* I-Deal Technologies GmbH, Saarbrücken

**Kurzfassung.** Das Gießen von Großbauteilen aus Eisenguss ist u.a. für die Windkraftindustrie derzeit und auch zukünftig unverzichtbar. Im Besonderen die geplanten Windgroßkraftwerke mit hoher Effizienz benötigen immer größere Bauteile mit hoher Festigkeit, Duktilität und Betriebsfestigkeit. Eine Abnahme der Großbauteile durch Lebensdauerversuche unter betriebsähnlicher Belastung ist ab einer gewissen Bauteilgröße bereits heute kaum mehr 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 Volumenprüfung großer Eisengussbauteile nur die Ultraschallprüfung in Frage. Eine besondere Herausforderung stellt aktuell die Bewertung von Schwindungsporositäten (Lunkern) in sphärolithischen Eisengussbauteilen dar, welche aufgrund der gestalterischen Anforderungen und der Größe der Komponenten in allen Bereichen des Gussteils nicht immer vermieden werden können. In diesem Beitrag werden Ergebnisse der im Rahmen des Projekts „Lunkerfest“ durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Die Abbildung von Schwindungsporositäten verschiedener Gussqualitäten erfolgte mit mechanisierter Ultraschallprüfung. Durch Einsatz der Sampling Phased Array Technik konnte eine dreidimensionale Abbildung der Lunkerbereiche erfolgen. Dies wurde an drei verschiedenen Werkstoffen (EN-GJS-400, EN-GJS-450-18, EN-GJS-700) mit gezielt hergestellten Schwindungsporositäten durchgeführt. Die Ultraschalluntersuchungen wurden durch Durchstrahlungsprüfungen verifiziert und eine Methode zur Entnahme von Schwingfestigkeitsproben auf Basis von Ultraschalldaten konnte entwickelt werden. Ein weiterer korrelativer Abgleich von Ultraschallbefunden und Schwindungsporositäten der Schwingfestigkeitsproben erfolgte auf Basis von mittels Röntgen CT durchgeführten Dichtebestimmungen. Die Ergebnisse dieses Vorhabens werden im Rahmen des Beitrags vorgestellt und diskutiert.



## 1. Einführung

Das Gießen von Großbauteilen aus Eisenguss ist für die Windkraftindustrie derzeit und auch zukünftig unverzichtbar. Im Besonderen die geplanten Windgroßkraftwerke mit hoher Effizienz benötigen immer größere Bauteile mit hoher Festigkeit, Duktilität und Betriebsfestigkeit. Eine Abnahme der Großbauteile durch Lebensdauerversuche 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 Prüfung von großen Eisengussbauteilen nur die Ultraschallprüfung (US-Prüfung) in Frage. Eine besondere Herausforderung stellt aktuell die Bewertung von Schwindungsporositäten (Lunkern) in sphärolithischen Eisengussbauteilen dar, welche aufgrund der gestalterischen Anforderungen und der Größe der Komponenten in allen Bereich des Gussteils nicht immer vermieden werden können.

Die Entwicklung immer größerer Anlagen erfordert auch in der Windkraftindustrie die Reduzierung des Materialeinsatzes, wofür höherfeste Eisengusswerkstoffe entsprechendes Potential bieten. Andererseits können Lunker in Gussteilen nicht immer vermieden werden. Aufgrund der Tatsache, dass höher ausgelastete Bauteile aus höherfesten Gusseisenwerkstoffen im Vergleich zu niederfesten und duktileren Sorten eine verkürzte Lebensdauer zwischen Anriss und Bruch aufweisen und Lunker als Anrissauslöser wirken können, werden Bauteile aus höherfestem Gusseisen von den Zertifizierungsstellen mit Zurückhaltung und nur mit hohem Aufwand für die Industrie freigegeben [1].

Geometrie und Wanddickenverläufe lassen sich bei Gussbauteilen genau an die auftretenden Beanspruchungen anpassen [2]. Diese kraftflussgerechte Formgebung und die damit verbundene, mögliche Gewichtsoptimierung und Materialeinsparung sind bei Schweißkonstruktionen nicht oder nur mit hohem wirtschaftlichem Aufwand möglich. Dies führte in der Vergangenheit zu einer zunehmenden Substitution von Schweißkonstruktionen durch Gussbauteile [3]. Die Realisierbarkeit von großen Anlagen, in Hinblick auf Transport und Montage der Komponenten sowie der Bodenmechanik, wird bei zunehmender Größe schwieriger, wenn das Leistungsgewicht der Komponenten nicht erhöht werden kann.

Bisher existierte in der Qualitätsbeurteilung von Eisengussbauteilen nur eine Methode, mit der auf Basis von Grauwertanalysen (Röntgen) lunkerbehaftete Bauteile hinsichtlich der Betriebsfestigkeit bemessen werden können [4]. Die Schwingfestigkeitsbewertung [5] der berechneten Beanspruchungen wird auf Basis von Gütestufen durchgeführt. Große, dickwandige Eisengussbauteile mit Stückgewichten zwischen 10t und 250t, wie z.B. Rotornaben oder Grundrahmen für Windkraftanlagen, Motorgehäuse für Schiffsdieselmotoren oder Anlagen zur Energieerzeugung, Pressenrahmen für Walzwerke oder Fertigungsstrassen, Mahlteller, können aufgrund der großen Wandstärken jedoch, nach vorangegangener Ultraschallinspektion, nicht geröntgt werden und entziehen sich daher gängigen Bemessungsmethoden, was in der Regel zu Ausschuss in Folge zu hoher Sicherheitsfaktoren führt, die aus bruchmechanischen Ansätzen abgeleitet werden.

Die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall stellte bei den durchgeführten Untersuchungen, als in der manuellen Ausführung etabliertes Prüfverfahren in der Qualitätsprüfung von dickwandigen Bauteilen aus Eisenguss, den Ansatzpunkt dar; eine einheitliche und akzeptierte Vorgehensweise zur Schwingfestigkeitsbemessung von Eisengussbauteilen auf Basis von Ultraschallergebnissen existiert jedoch bisher nicht. Bei der Ultraschallprüfung auf Volumenfehler werden zur Fehlergrößenbestimmung in modernen Systemen, bildgebende Techniken eingesetzt. Das setzt natürlich die Verwendung einer präzisen Manipulationstechnik voraus, welche die Prüfkopfkoordinaten

in Bezug auf ein Referenzkoordinatensystem an der zu prüfenden Komponente neben der Ultraschallinformation erfasst und speichert. Im Rahmen der Untersuchungen kamen sowohl Einwinkelprüfköpfe als auch die Sampling Phased Array Technik (SPA) zum Einsatz [6]. Die Ergebnisse, der SPA wurden für die weiterführenden Auswertungen verwendet.

Die methodische und qualifizierte Verknüpfung von belastbaren Ergebnissen der Ultraschallprüftechnik, numerischer Bemessungsmethodik und Betriebsfestigkeit eröffnet das Potential, erkannte, klassierte und quantitativ charakterisierte Fehler in ihrer Auswirkung auf die Lebensdauer bewerten zu können. Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts „Lunkerfest“, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit (Förderkennzeichen 0325239A), durchgeführt. Seitens der ZfP bestand das Vorgehen hierzu aus zwei Schritten: zunächst wurde ein Konzept zur Schwingfestigkeitsprobenentnahme auf Basis von SPA Ergebnissen entwickelt. An den Rundproben wurden dann Dichtebestimmungen mittels Röntgen CT durchgeführt. Die Dichteverteilung wurde abschließend mit Ultraschallparametern korreliert, so dass eine Schwingfestigkeitsbewertung auf Basis der Ultraschalldaten bei gleichzeitiger Verifikation mittels Dichteverteilungen möglich wurde.

## **2. Konzept zur Probenentnahme auf Basis von SPA Ergebnissen**

### *2.1 Lunkerproben*

Die im Rahmen des Vorhabens untersuchten Proben setzten sich aus eigens hergestellten Platten, in die gezielt Lunker eingebracht wurden und lunkerbehafteten Ausschussbauteilen zusammen. Für die im Rahmen dieses Artikels vorgestellte Methodik wird nur auf Daten zurückgegriffen, die an den abgegossenen Platten aufgenommen wurden.

Die Plattengröße wurde auf Größen von 1000x600x120 mm<sup>3</sup> bis 1250x550x230 mm<sup>3</sup> festgelegt, um eine Möglichkeit zu haben Lunker in die Platte einzubringen und die Platte trotzdem einfach handhaben zu können. Angestrebt sind Lunker, die eine Einstufung der Platten in ausreichende Lunkerbereiche nach DIN 12680 [7] möglich machen.

Folgende Werkstoffe wurden zur Untersuchung ausgewählt:

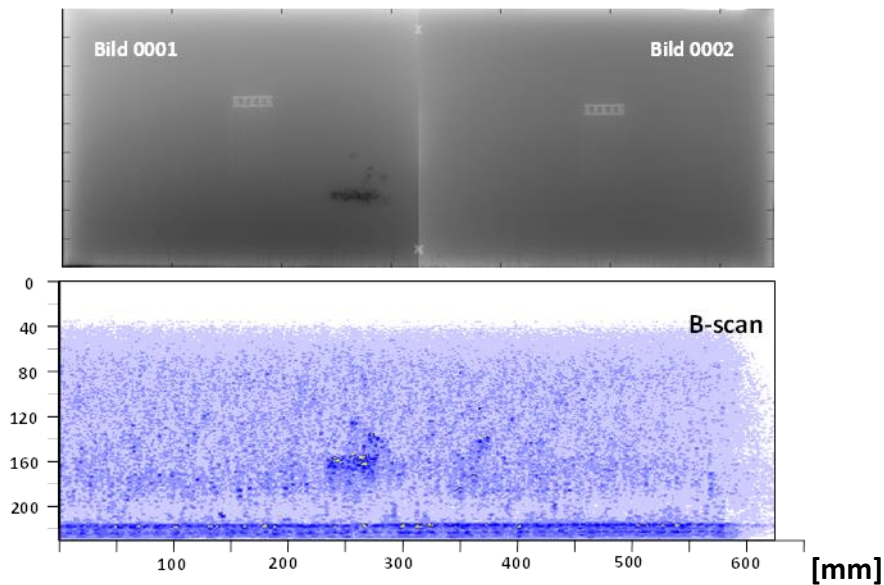
- EN-GJS-400
- EN-GJS-700
- EN-GJS-450-18

Für die Prüfung der abgegossenen Lunker behafteten Platten wird zur Abbildung der Ungängen von der Rückseite geprüft, um mögliche Störeinflüsse z. B. durch Dross zu umgehen. Aufgrund des Gießprozesses befanden sich die Lunker im mittleren Bereich und oberhalb der Mitte der Probe. Die Ultraschall Untersuchungen wurden mechanisiert mittels 2D-Manipulator durchgeführt. Für die hier vorgestellten Methoden wurden Daten verwendet, die mittels SPA Technik aufgenommen wurden. Verwendet wurden 1 MHz Prüfköpfe.

### *2.2 Konzept der Probenentnahme für Schwingfestigkeitsuntersuchungen*

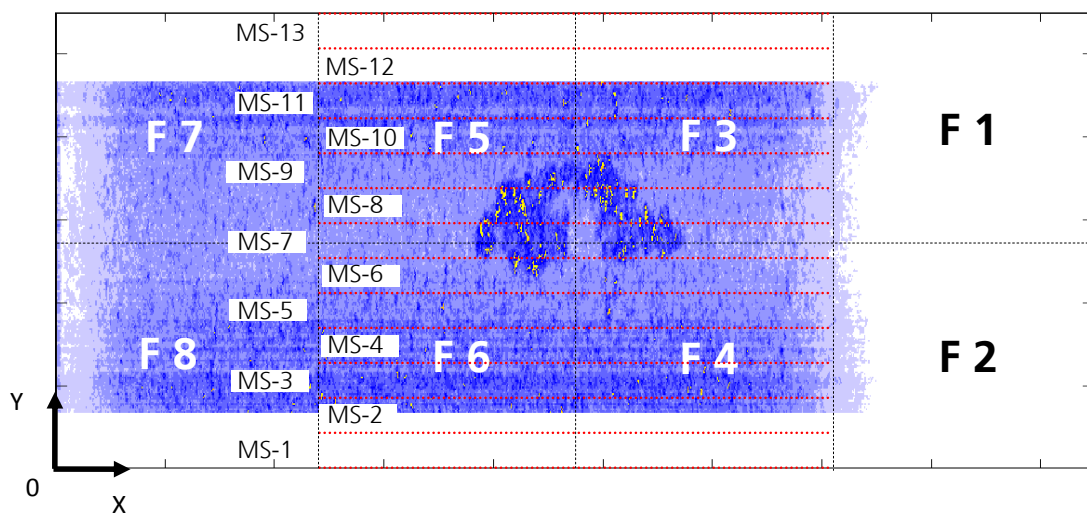
Die Bewertung der Schwingfestigkeit lunkerbehafteter Proben erfordert zunächst eine ausreichende Menge an Schwingfestigkeitsproben, da Bauteilversuche bei diesen Stückgutgewichten nicht für eine statistisch abgesicherte Menge an Untersuchungen realisierbar sind. Die bestehende Methodik zur Bemessung lunkerbehafteter Bauteile basiert auf der Röntgen Durchstrahlung. Da es ein Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen ist, eine auf Ultraschall basierende Alternative zur Bemessung der





**Abb. 3.** Röntgenaufnahme (oben) und B-Bild der SPA Ergebnisse (unten) für Scheibe MS-6.

Weitere Intention dieses Vorgehens war, dass bei Durchstrahlung der Gesamtplatte flache, horizontale Strukturen mit Röntgen nicht aufgelöst werden können, die im Ultraschall C-Bild jedoch deutlich auftreten. Somit sollte anhand der Scheiben eine deutliche Korrelation zwischen Röntgenbefund und Ultraschallergebnis möglich sein, d.h. die Lunckerklasse (die mit der Schwingfestigkeit korreliert) sollte äquivalent im Ultraschall Ergebnis abbildbar sein. Die erzielten Ergebnisse zur Probenentnahme zeigen, dass eine vollständige Abbildung der Gefügeflockungen mittels mechanisierter SPA Technik möglich ist. Daher wurde für die weiteren Testkörper die Probenentnahme ausschließlich auf Basis der Ultraschallergebnisse durchgeführt. Abb. 4 zeigt eine Skizze einer Platte mit der eingezeichneten Lage der Röntgenfilme (F1 – F8) und dem darüber gelegten Ultraschall C-Bild (SPA). Weiterhin ist die Lage der aus der Platte herausgearbeiteten Scheiben (MS-1 – MS-13) eingezeichnet. Dieses Vorgehen wurde für alle Platten und ohne Durchstrahlungsprüfung für die untersuchten Bauteile angewendet.



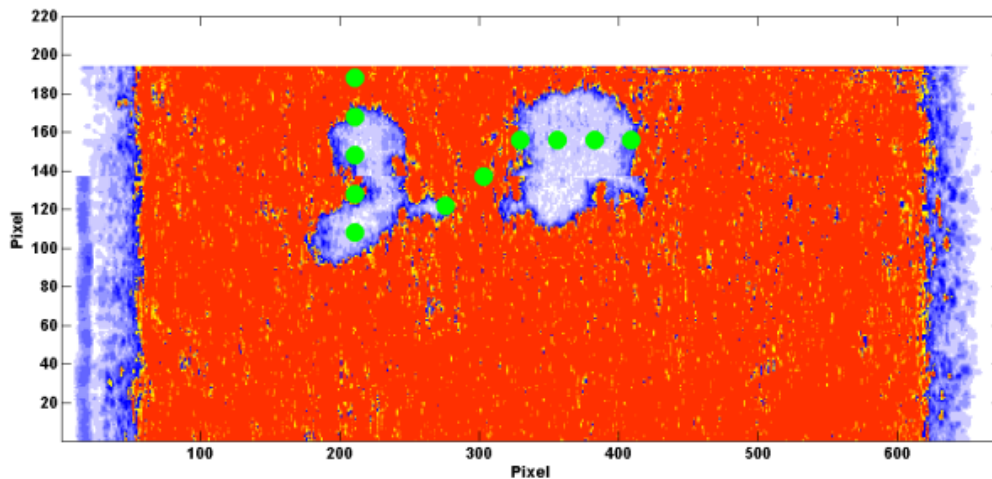
**Abb. 4.** UT C-Bild ( Draufsicht), Sampling Phased Array mit Lunckerbereich in der Mitte. Eingezeichnet wurde die Lage der Röntgenfilme (F1 - F8) und die Lage der herausgearbeiteten Scheiben (MS-1 – MS-13).



### 3. Korrelation von Ultraschallbefund und Schwingfestigkeit

Mit dem beschriebenen Vorgehen wurden insgesamt ca. 600 davon 106 lunckerbehaftete Rundproben für Schwingfestigkeitsuntersuchungen am Fraunhofer LBF aus den zur Verfügung stehenden Testkörpern erstellt. Abbildung 5 zeigt die Lokationen der Proben der Platte aus EN-GJS-450-18, die im Bereich der Luncker entnommen wurden. Dabei wurde hier die Position der Proben in der Platte (Mitte der Rundproben, liegend entnommen) nochmal auf die aus den Ultraschalldaten ermittelte Rückwandabschattung projiziert. Tatsächliche Probenpositionen und Ultraschallergebnisse sind konsistent.

Da die bisherige Basis für die Bemessung lunckerbehafteter Bauteile hinsichtlich der Betriebsfestigkeit Grauwertanalysen (der Röntgen Durchstrahlung) sind [4], d.h. letztendlich Dichteunterschiede herangezogen werden, wurde zur weiteren Verifikation bei 106 Rundproben eine Dichtebestimmung und Lunckeranalyse mittels Röntgen CT durchgeführt. Die so ermittelten Dichtewerte wurden dann mit der Ultraschall Rückwandabschattung als Äquivalent zur Durchstrahlungsprüfung korreliert.



**Abb. 5.** UT-Bild Rückwandabschattung (Draufsicht) der Platte aus EN-GJS-450-18, Sampling Phased Array. Eingezeichnet ist die Lage der entnommenen Proben (grüne Punkte).

#### 3.1 Dichtebestimmung mit Hilfe der Röntgen CT an den Schwingfestigkeitsproben

Die Untersuchungen wurden mit einer 3D-CT-Anlage des Fraunhofer IZFP an insgesamt 106 Rundproben von 3 Herstellern durchgeführt (Tabelle 1). Hierbei wurden Proben aus lunckerbehafteten Bereichen (Abb. 6) sowie Proben aus defektfreien Bereichen einbezogen. Die Aufnahmen erfolgten mit einer 220-kVRöhre und einer Voxelbreite von etwa 30 µm.

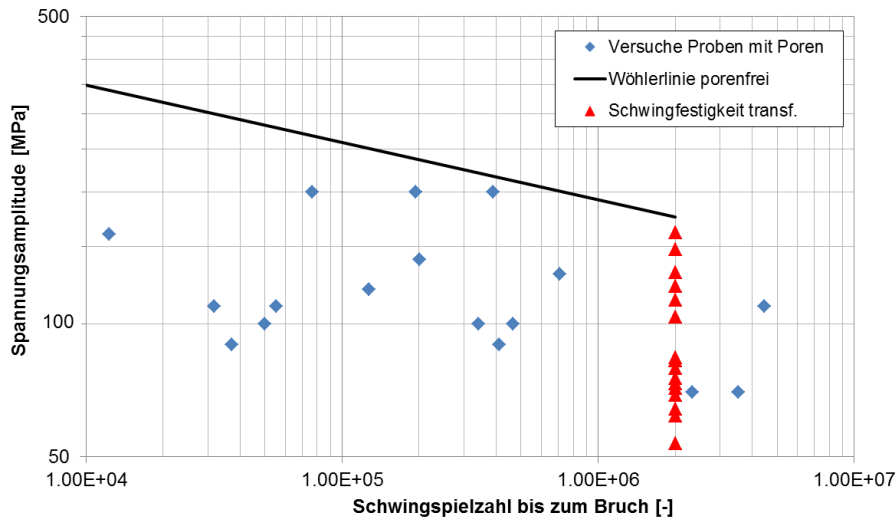
**Tabelle 1.** Anzahl und Werkstoffe der mittels CT untersuchten Rundproben

Werkstoff	Probenanzahl
EN-GJS-450-18	14
EN-GJS-700	43
EN-GJS-400	49

Ein wesentlicher Aspekt zur Kopplung von Porosität und Schwingfestigkeit auf Basis von Ultraschallergebnissen ist die Ermittlung der Dichte des hochbelasteten Bereichs (Prüfquerschnitt) der Rundproben. Für eine dichtegetreue Rekonstruktion wurde auf alle Probendaten eine Strahlaufhärtungskorrektur, basierend auf den 3D-CT-Daten einer Reineisenprobe (99,9%-Fe), angewendet. Ziel war es, eine Kalibrierung der Dichte mit Hilfe der Röntgenabsorption durchzuführen. Hierzu ist für jede Probe die mittlere Röntgenabsorption ermittelt worden. Die Dichte der Rundproben wurde auf Basis der



wurden die Schwingspielzahlen der porenbehafteten Proben auf eine Schwingspielzahl transformiert, um den Einfluss der Belastungshöhe zu eliminieren (Abb. 8).

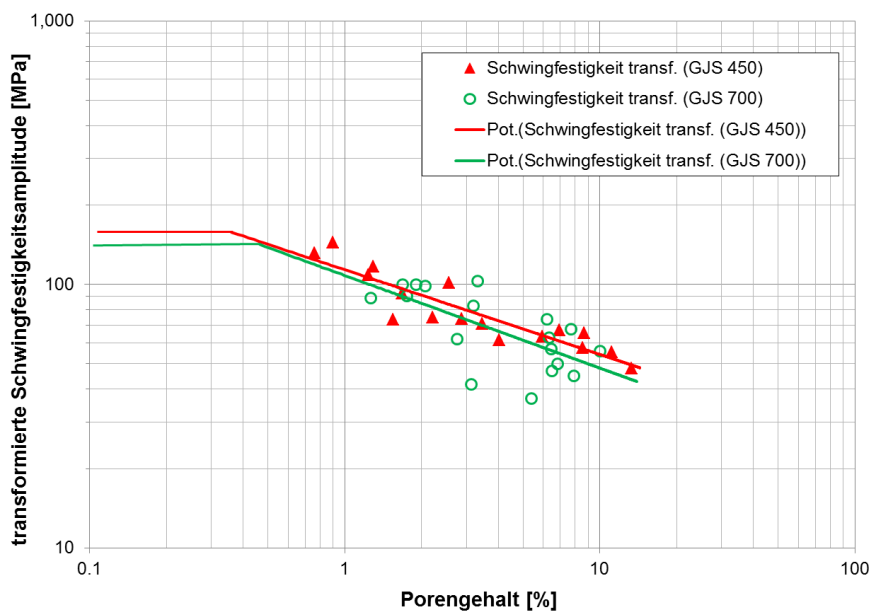


**Abb. 8.** Schwingspielzahlen bis zum Bruch von Proben mit Poren und transformierte Schwingfestigkeiten des Werkstoffs EN-GJS-450-18.

In dem in Abb. 8 dargestellten Beispiel wurde die Schwingspielzahl am Abknickpunkt der Wöhlerlinie von  $N_k = 10^6$  gewählt, welcher als Abknickpunkt für das porenfreie Material ermittelt wurde.

Da an allen untersuchten porenbehafteten Werkstoffen jedoch Brüche jenseits der Schwingspielzahlen der Abknickpunkte des jeweiligen porenfreien Materials festgestellt wurden, ist die Annahme eines Abknickpunktes für Wöhlerlinien von porenbehaftetem Material von  $N_k = 5 \cdot 10^6$  Schwingspielen für eine Bemessung vorgeschlagen worden.

Die auf diese Art ermittelten Schwingfestigkeiten wurden in Zusammenhang zum Porenvolumengehalt gebracht (Abb. 9).



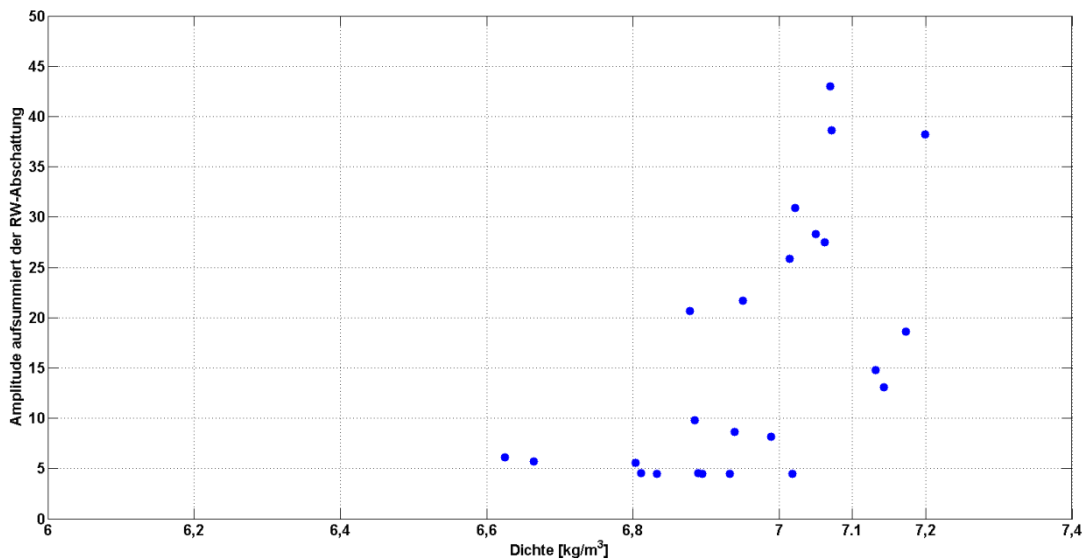
**Abb. 9.** Transformierte Schwingfestigkeiten in Abhängigkeit des Porenvolumengehalts der Proben, Eisenguss mit Kugelgraphit EN-GJS 450 - 18 und EN-GJS 700.



Das in Abb. 9 dargestellte Porenvolumengehalt ist aus CT Analysen abgeleitet. Mit Hilfe der aus den SPA Ergebnissen ermittelten Porenvolumengehalte kann über den Korrelationszusammenhang der Potenzfunktion der dargestellten Geraden (doppelt-logarithmische Darstellung) in Abb. 9 eine Schwingfestigkeit für jeden beliebigen Porenvolumengehalt bis ca.  $P_V = 15\%$  ermittelt werden. Die berechnete Schwingfestigkeit wird dabei auf die transformierte Schwingfestigkeit des porenfreien Materials nach oben begrenzt.

### 3.3 Korrelation von Dichte und Ultraschallamplitude der Rückwandabschattung

Da eine Bemessung der Betriebsfestigkeit auf Basis von Dichtewerten (Porenvolumengehalten) möglich ist, wurde eine Korrelation von Dichtewerten und Ultraschallergebnissen durchgeführt. Hierzu ist aus den aufgenommenen Ultraschalldaten die Rückwandabschattung ermittelt worden. Die Amplitudenwerte werden am Ort der jeweiligen entnommenen Rundprobe aufsummiert (Summe über Probenfläche) und dann über den Referenzdichtewerten aufgetragen (Abb. 10).



**Abb. 10.** Aufsummierte Amplitudenwerte (normiert auf Pixel pro Fläche) der Ultraschall Rückwandabschattung über der Dichte für den Werkstoff EN-GJS-450-18.

Am Beispiel der Werte für den Werkstoff EN-GJS-450-18 (Abb. 10) zeigt sich, dass eine Korrelation mit stetigem Verlauf gegeben ist, auch wenn einige Werte streuen. Diese Korrelation ist werkstoffabhängig. Ein ferritisches Matrixgefüge, wie das bei diesem Werkstoff vorliegende, gilt als quasi porenfrei bei einer Dichte von  $7,1 \text{ kg/m}^3$ , was auch durch die Dichtebestimmungen aus den CT-Untersuchungen an den lunkerfreien Proben bestätigt wurde. Dies passt zum Verlauf der Werte, da die Amplitudenwerte der Proben, die außerhalb der Lunkerbereiche entnommen wurden, mit den Dichtewerten im Bereich von  $7,1 \text{ kg/m}^3$  korrelieren. Je weniger Lunker die Probenbereiche aufweisen, desto mehr nähern sich die Werte denen des porenfreien Werkstoffs an. Eine Parametrierung für die Berücksichtigung bei einer numerischen Betriebsfestigkeitsbemessung war daher auf Basis der in dieser Form aufbereiteten Ultraschallergebnisse möglich.

## 4. Schlussfolgerung

Das Gießen von Großbauteilen aus Eisenguss ist für die Windkraftindustrie derzeit und auch zukünftig unverzichtbar. Im Besonderen die geplanten Windgroßkraftwerke mit hoher Effizienz benötigen immer größere Bauteile mit hoher Festigkeit, Duktilität und

Betriebsfestigkeit. Bisher existierte in der Qualitätsbeurteilung von Eisengussbauteilen nur eine Methode, mit der auf Basis von Grauwertanalysen (Röntgen) lunkerbehaftete Bauteile hinsichtlich der Betriebsfestigkeit bemessen werden können. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde ein Ansatz entwickelt, mit dem mittels Ultraschall eine Abbildung von Gefügebrauchzonen auch in dickwandigen Eisengusswerkstoffen möglich ist. Für die Betriebsfestigkeitsuntersuchungen wurde auf Basis der SPA Daten ein Konzept zur Probenentnahme auf Basis von Ultraschalldaten herausgearbeitet. Die erzielten Genauigkeiten sind vergleichbar mit Ergebnissen von durchgeführten Durchstrahlungsprüfungen. Für eine Korrelation von Ultraschallergebnissen und Schwingfestigkeit wurde zunächst mittels Röntgen CT die Dichte an 106 Rundproben ermittelt, die dann wiederum mit der Rückwandabschattung der Ultraschallergebnisse korreliert wurde. Da die Schwingfestigkeitswerte mit der ermittelten Dichte korrelieren wurde vom Fraunhofer LBF ein Modell entwickelt, das eine Verwendung von Ultraschall Kennwerten zur Schwingfestigkeitsbemessung erlaubt.

## **5. Danksagung**

Dem BMU wird hiermit für die Förderung des Projekts Lunkerfest gedankt (Förderkennzeichen 0325239A). Weiterhin gilt den Projektpartnern Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, SIEMPELKAMP GIESSEREI GmbH, Robert Bosch GmbH, GE Wind Energy GmbH, Friedrich Wilhelms - Hütte Eisenguss GmbH, Polysius AG, Meuselwitz Guss - Eisengießerei GmbH der Dank für Unterstützung und die Beiträge im Rahmen des Vorhabens.

## **6. Referenzen**

- [1] Germanischer Lloyd: 4th Meeting Gearbox Manufacturer and GL – High Strength Cast Irons in Wind-craft Turbine Gearboxes; Minutes of Meeting, unveröffentlicht, 2007
- [2] Vollrath, K.: Qualitätsteile für die Windenergie, In: Produktion, Nr. 14, S. 11, 2008
- [3] Werner, H., Sonntag, W.: Neue Dimensionen – Windenergie fordert die Gießereibranche, Konstruieren + Gießen 30 Nr. 2, S. 10-13, 2005
- [4] Kaufmann, H.: Zur schwingfesten Bemessung dickwandiger Bauteile aus GGG-40 unter Berücksichtigung gießtechnisch bedingter Gefügebrauchzonen Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt; Bericht Nr. FB-214, 1998
- [5] Germanischer Lloyd: Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Ausgabe 2003 mit Ergänzung, 2004
- [6] Bulavinov, A., Pinchuk, R., Pudovikov, S., Reddy, K., Walte, F.: 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. 2010, Vortrag 1.3.22, 2010
- [7] DIN, Deutsches Institut für Normung e.V.: Gießereiwesen - Ultraschallprüfung. DIN EN 12680-3, Teil 3: Gussstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit Berlin, Beuth, 2012 02. - Normnr. DIN EN 12680-3, 2012