

Prüfung von Rotorblattschalen mit Luftultraschall

Mate GAAL¹, Florian SCHADOW¹, Dustin NIELOW¹, Volker TRAPPE¹
¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kontakt E-Mail: mate.gaal@bam.de

Kurzfassung. Um den sicheren Betrieb von Windkraftanlagen zu gewährleisten, werden Rotorblätter nach der Fertigung und nach Reparatur mit verschiedenen zerstörungsfreien Verfahren auf Schaden untersucht. Bei der Fertigung von Blattschalen, die in einer Sandwich-Schalenbauweise gefertigt werden, entstehen Imperfektionen, die unter Belastung zu großen Rissen führen können. Zur Prüfung von Blattschalen wird unter anderem Ultraschallprüfung in Kontakttechnik eingesetzt. Um den Wartungsaufwand von Ultraschallanlagen zu reduzieren und um manche Kompositstrukturen vor Koppelmitteln zu schützen, wird die Anwendung von Luftultraschall erforscht. Insbesondere große Fortschritte gibt es im Bereich der Entwicklung neuer Wandler.

In diesem Beitrag berichten wir über die Luftultraschallprüfung von Schalen für Rotorblätter. Es wurden typische Sandwichschalenstrukturen hergestellt und mit einem eigenentwickelten Schalenprüfstand unter simulierter Betriebsbeanspruchung belastet. Die in den Schalenprüfkörpern entstandenen Schäden wurden außerhalb des Prüfstandes mit Luftultraschall in Durchschallung untersucht. Es wurden fokussierende Wandler auf Basis von Ferroelektronen entwickelt und für diese Prüfungen eingesetzt. Mit zusätzlicher elektrischer Vorspannung konnte die Empfindlichkeit der Empfänger deutlich erhöht werden. Die nach dem Lastwechsel entstandenen Schäden in den Rotorblattschalen waren eindeutig zu detektieren.

Einführung

Mit dem Einsatz von immer größeren Windkraftwerken und den damit verbundenen wachsenden Kosten für die Instandhaltung und den Austausch eines defekten Rotorblattes, erfreuen sich zerstörungsfreie Prüfmethode steigender Beliebtheit und finden in der Praxis vermehrt Anwendung. Die bildgebenden ZfP-Verfahren ermöglichen es, Imperfektionen in einem Rotorblatt zu detektieren und zu lokalisieren, bevor es zu einem Versagen des Bauteils kommt. Typischerweise werden Rotorblätter im Rahmen der Qualitätssicherung nach der Fertigung, im wiederkehrenden Turnus alle zwei bis vier Jahre in Betrieb, sowie nach notwendigen Reparaturarbeiten geprüft [1]. Derzeitig finden hauptsächlich die ZfP-Verfahren Sichtprüfung und akustische Emission Anwendung. Diese sind, bedingt durch die manuelle Prüfung, stark von der subjektiven Einschätzung des Prüfers abhängig. Vereinzelt findet die Ultraschall-Impuls-Echo-Technik mit Flüssigkeitsankopplung bei der Fertigungsprüfung des Herstellers Anwendung. Um den Wartungsaufwand zu reduzieren und um empfindliche Kompositstrukturen vor dem Eindringen des Koppelmittels zu schützen, wurde die Anwendung und Prüfbarkeit durch Luftultraschall erforscht. Zu diesem



Zweck wurden neuartige Luftultraschallwandler entwickelt. In diesem Beitrag wird die Prüfung mit Luftultraschallwandlern basierend auf einem ferroelektrischen Material vorgestellt.

Rotorblätter basieren meist auf einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien. So finden Glasfaserkunststoffe (GFK) in Kombination mit beispielweise Balsa-Holz, Schaumstoff, Carbon-Faser-Kunststoffen oder Honigwabenstrukturen Verwendung [2]. Die zwei häufigsten Fehlerarten, die sowohl bei der Herstellung als auch in Betrieb ihren Ursprung haben können, sind Delaminationen zwischen den Einzelnen GFK-Lagen und die Ablösung der Stegverklebungen [1]. Andere mögliche Fehler sind das Auftreten von Porositäten, der Verlust an Haftung, Einschlüsse sowie Falten [2]. Insbesondere bilden sich ausgehend von fertigungsbedingten Imperfektionen Risse in den Deckschichten der Sandwichschale, die in die Tiefe wachsen und zu einem durchgehenden Bruch der Schale führen können. In diesem Beitrag wird die Luftultraschall-Prüfung vom Blattkörper vor und nach der erfolgten Reparatur dargestellt.

1. Eingesetztes Prüfsystem und die Testkörper

1.1 Luftultraschallwandler auf Basis von Ferroelekturen

Die marktüblichen Luftultraschallwandler werden mit Anpassschichten versehen, um den großen Impedanzsprung zwischen dem piezoelektrischen Teil des Wandlers und der Luft zu reduzieren. Mit dem Einsatz von Ferroelekturen kann auf Anpassschichten verzichtet [3][4][5] werden. Bei Ferroelekturen handelt es sich um geladene zelluläre Polymere, von denen bisher lediglich zelluläres Polypropylen für die Fertigung von Luftultraschallwandler verwendet wurde. Dieses Material liegt in Form einer biegsamen Folie mit einer Dicke von bis zu 100 µm vor und eignet sich ebenfalls für die Realisierung sphärisch gekrümmter und somit fokussierender Wandler [6]. Die Empfindlichkeit kann zudem durch das Anlegen einer elektrischen Vorspannung am Empfänger erhöht werden. Zur Realisierung der notwendigen Hochspannung wurde ein separates Hochspannungsmodul entwickelt und in das Prüfsystem integriert [7].

Die Prüfungen in diesem Beitrag wurden in Durchschallung mit fokussierenden Ferroelekturet-Wandlern durchgeführt. Die verwendeten Wandler hatten eine Apertur von 19 mm, einen Krümmungsradius von 50 mm und eine Mittenfrequenz von 250 kHz. An den Empfänger wurde eine Vorspannung von 1,6 kV angelegt, was die Empfindlichkeit des Prüfkopfs um ca. 10 dB erhöht hat, wobei das Rauschen um nur 1 dB gestiegen ist. Somit ist der Signal-Rausch-Abstand dieser Wandler um ca. 30 dB höher als bei marktüblichen Wandlern mit vergleichbaren Parametern.

1.2 Testkörper

Für diesen Beitrag wurden zwei Testkörper in der für die Fertigung von Rotorblattschalen üblichen Sandwich-Bauweise experimentell untersucht. Der erste Testkörper mit Kennzeichen BAM_SI_4 war eine Nachbildung einer Rotorblattschale mit einem Schaumkern. In der Abbildung 1 (a) wird der Testkörper vor der Schädigung dargestellt. Dieser Schalenprüfkörper wurde im Substrukturen-Maßstab ausgelegt und hat die Abmessungen 810 mm x 510 mm x 12,7 mm. Die Krümmung des Schalenprüfkörpers entspricht der mittleren Krümmung der Rotorblattschale eines 27 m langen Blattes. Die Dicke der GFK-Deckschichten beträgt 1,3 mm (bestehend aus zwei biaxialverstärkte +45/-45 Glasfaser-Gelegelagen) und die Dicke des Schaumkerns beträgt 10 mm. Um einen repräsentativen Prüfkörper zu gewährleisten, werden sowohl Halbzeuge (Glasfasergelege, Harzsystem, Stützwerkstoff), als auch der Lagenaufbau entsprechend der realen

Rotorblattschale eines 27 m langen Blattes ausgeführt. Für Sandwichkonstruktionen im Rotorblattbau werden geschlossenzellige Schaumkerne verwendet, weil diese eine Durchtränkung mit dem Harzsystem und eine damit verbundene Gewichtszunahme verhindern. Der Stützwerkstoff (geschlossenzelliger PVC-Schaum, AIREX C70.55) des Schalenprüfkörpers wird mit jeweils zwei BIAX-Decklagen (Flächengewicht 810 g/m², Faserorientierung +45/-45°) an der Vorder- und Rückseite des Prüfkörpers belegt. Um den spröden Stützschaum an die stark gekrümmte Kontur anzulegen, wird dieser in Längsrichtung mit ca. 1,5 mm – 2 mm breiten Längsschlitzten geschlitzt. Aufgrund des angewendeten Infusionsverfahrens für die Prüfkörperfertigung kommt als Matrixsystem ein niedrigviskoses Infusionsharz (Hexion RIMR135/RIMH137) zum Einsatz. Der Schaumkern besitzt regelmäßig angeordnete Durchgangsbohrungen um die Tränkung der unteren Gelegetagen mit dem flüssigen Epoxidharz zu ermöglichen. Um den Schalenprüfkörper für die mechanische Prüfung in den dafür entwickelten Prüfstand einspannen zu können, werden die Stirnseiten des Schalenprüfkörpers als monolithisches GFK-Laminat ausgeführt und mit einem Bohrbild versehen. Weitere Details zu dem Aufbau des Testkörpers sind im Beitrag [8] dieser Jahrestagung ausgeführt.

Der Schalenprüfkörper ohne nominelle Schädigung oder Imperfektion wurde bei einer Zug-Druck-Wechselast ($R=-1$) von 3 ‰ bis zum Versagen schwingend belastet. Zum Vergleich besitzt ein GFK-Rotorblatt bei Nennwind eine Randfaserdehnung von ca. 2 ‰, damit stellt das geprüfte Belastungsniveau von 3 ‰ eine erhöhte Belastung für die Struktur dar und führt zu verhältnismäßig geringen Lastspielzahlen. Das geprüfte Belastungsniveau von 3 ‰ führt zu einer Rissbildung im Laminat, wobei eine ausgeprägte Ermüdungsschädigung (Matrixrisse bzw. Querrisse) nicht zu verzeichnen ist.

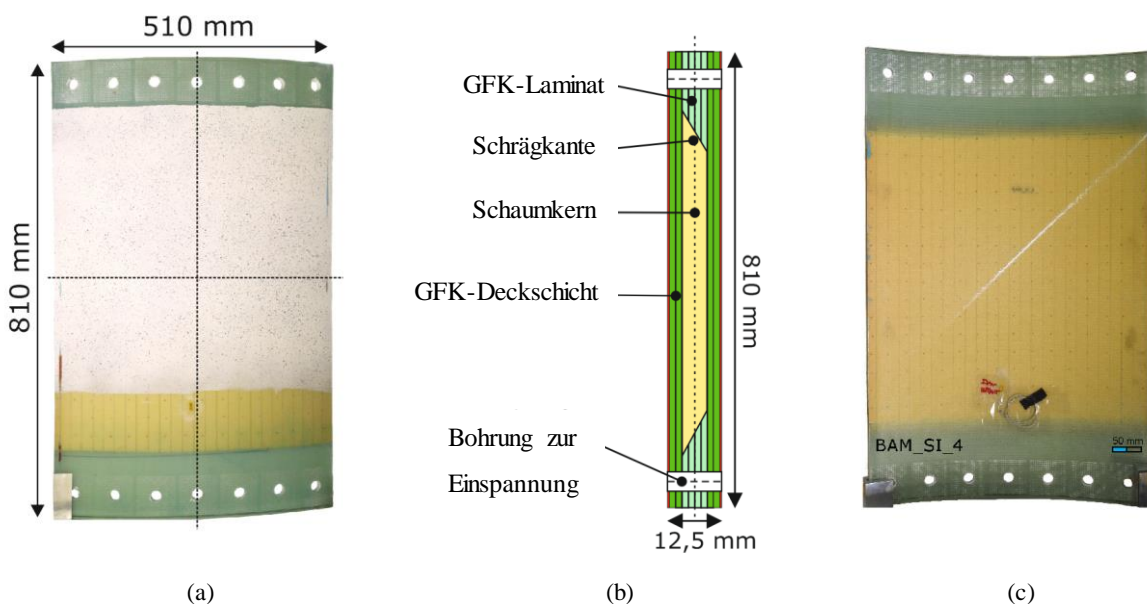


Abbildung 1. Die Rotorblattschale mit einem Schaumkern, (a) Aufnahme mit Maßen, (b) Skizze des Querschnitts und (c) die gleiche Rotorblattschale nach der zyklischen Belastung.

Der zweite Testkörper mit dem Kennzeichen BAM_SI_3 war ein baugleicher Testkörper mit einer Reparaturstelle, wie in den Abbildungen 2 und 3(a) dargestellt. In einen nominell ungeschädigten Schalenprüfkörper ohne Imperfektion wurde eine Reparatur nach derzeitigem Stand der Technik eingebracht. Die Einbringung der Reparatur erfolgte händisch nach dem Stand der Technik wie es bei Reparaturen von Rotorblättern im Feld angewendet wird. Bei der Reparatur wurde der schlimmste anzunehmende Schadensfall simuliert und repariert. Dafür wurden die Decklagen, der Schaumkern und der „simuliert geschädigte

Bereich“ der hinteren Decklagen freigelegt und für die Reparatur vorbereitet. Anschließend wurden das Laminat und der Schaumkern mit den oberen Decklagen wiederaufgebaut. Für die Reparatur wurde wie für die Decklagen des Schalenprüfkörpers, ein BIAX-Gelege (Faserorientierung $+45^{\circ}/-45^{\circ}$) verwendet. Das für die Reparatur verwendete BIAX-Gelege besaß das halbe Flächengewicht (ca. 400 g/m^2) und damit 50% der Laminatdicke des Ausgangsmaterials. Dünnere Gelegelagen lassen sich besser drapieren und positionieren. Um die Dicke des Ausgangslaminates zu erreichen, muss dementsprechend die doppelte Lagenanzahl gewählt werden.

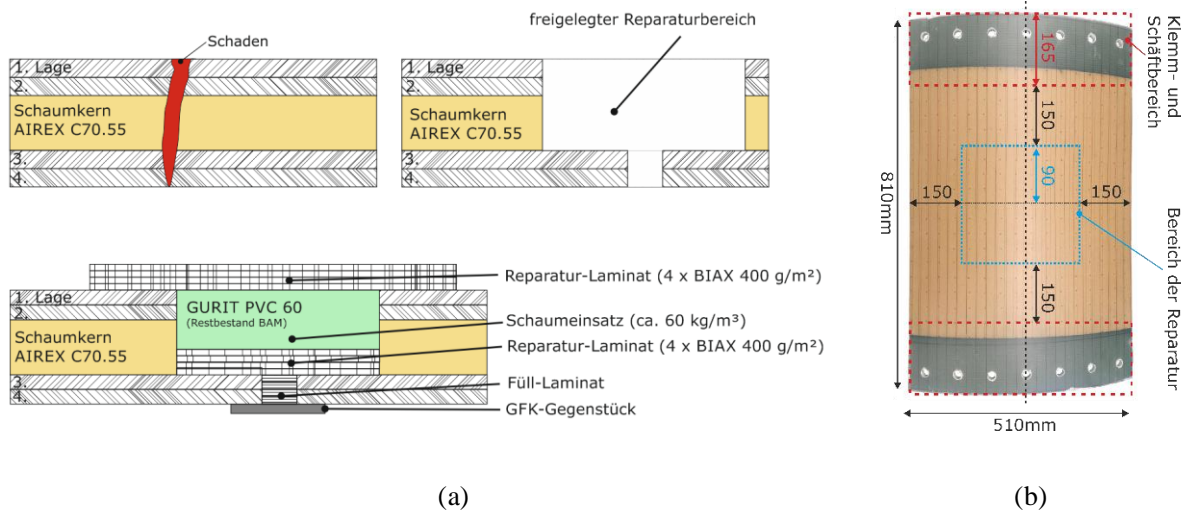


Abbildung 2. Die Reparatur einer Rotorblattschale mit Schaumkern, (a) Skizze und (b) Aufnahme mit Maßen.

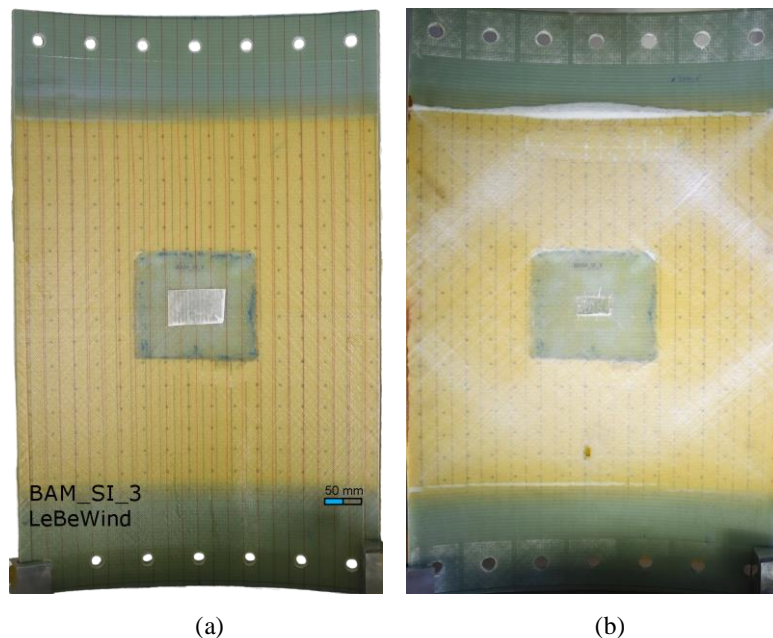


Abbildung 3. Eine reparierte Rotorblattschale mit Schaumkern (a) vor der Belastung und (b) nach der Belastung.

Der reparierte Schalenprüfkörper wurde einem Zweistufen-Schwingversuch zugeführt. Die erste Belastungsstufe entspricht der Nennwindbelastung von 2 ‰ bis zu einer Lastspielzahl von 1,5 Mio. Lastwechseln, anschließend wurde das Belastungsniveau auf 3 ‰ erhöht und der Schalenprüfkörper bis zum Versagen belastet. Der Schalenprüfkörper zeigt

aufgrund der sehr hohen Lastspielzahlen bei 3 ‰ von 1,7 Mio. Lastwechseln eine sehr ausgeprägte Ermüdungsschädigung mit einem hohen Maß an Querrissbildung und Eintrübung des Laminates, wie in der Abbildung 3 dargestellt. Der Reparaturbereich führt zu einer erheblichen Versteifung des Schalenprüfkörpers und damit zu einer Lastumlagerung und massiven Ermüdungsschädigung außerhalb des Reparaturbereiches.

2. Prüfergebnisse

2.1 Rotorblattschale nach dem zyklischen Belastungswechsel

Die Nachbildung der Rotorblattschale wurde vor und nach einem zyklischen Belastungswechsel geprüft. Durch die beaufschlagte Belastung wurde ein Riss entlang der Faserorientierung der Deckschichten (+45°/-45°) induziert, der mit dem eingesetzten Prüfsystem erfolgreich lokalisiert und nachgewiesen werden konnte (Abbildung 4). Eine lamino-graphische Untersuchung ergab, dass der Riss sich sowohl durch die Deckschichten als auch durch den Schaumkern erstreckt. Die resultierende Änderung des Ultraschallsignals ist insbesondere in der logarithmischen Darstellung gut sichtbar ist. Die dunklen vertikalen Linien und die periodisch verteilten kreisförmigen Anzeigen bilden mit Epoxidharz gefüllte Kanäle ab.

2.2 Reparierte Rotorblattschale nach dem zyklischen Belastungswechsel

Nach der Reparatur war die Zusammensetzung des Testkörpers lokal verändert. Die veränderten Materialeigenschaften können mit Luftultraschallprüfung in Durchschallung gut abgebildet werden. Die Abbildung 5 zeigt, dass die Laufzeitdarstellung (D-Bild) die Umrisse der reparierten Stelle noch leichter erkennen lässt, als die übliche Darstellung der Signalhöhe (C-Bild).

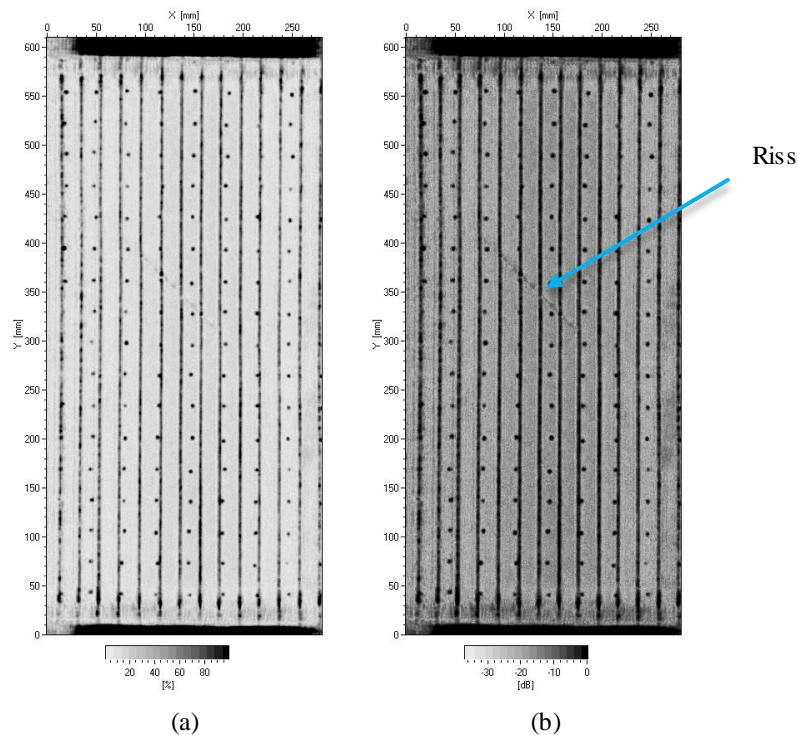


Abbildung 4. (a) Das C-Bild der Rotorblattschale mit Schaumkern geprüft mit fokussierenden Ferroelektret-Luftultraschallwandlern in Durchschallung, linear skaliert und (b) in logarithmischer Darstellung.

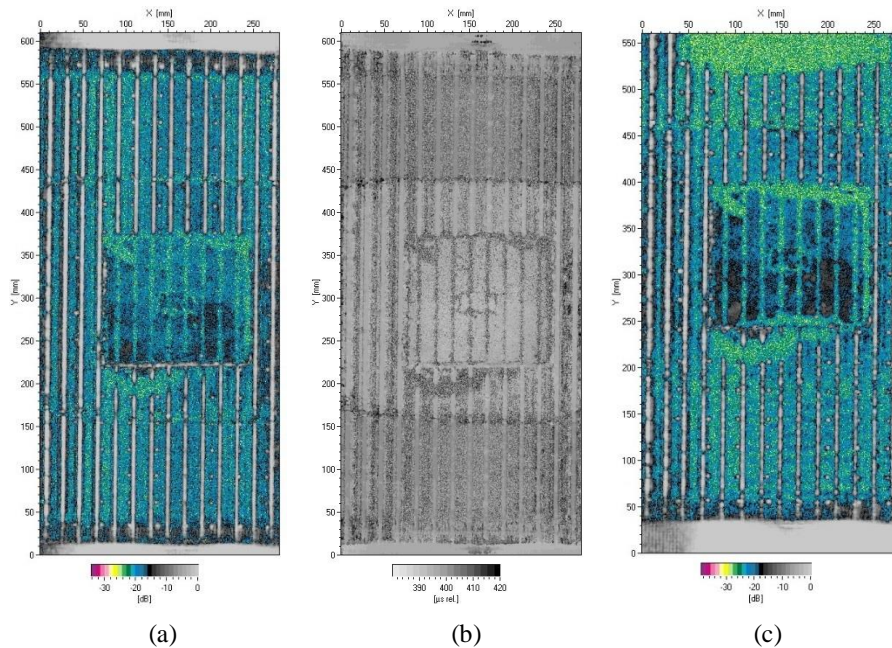


Abbildung 5. (a) Das C-Bild und (b) das D-Bild (Laufzeit) der reparierten Rotorblattschale mit Schaumkern geprüft mit fokussierenden Ferroelektret-Luftultraschallwandlern in Durchschallung. (c) Das C-Bild der gleichen Rotorblattschale nach zyklischer Belastung.

3. Diskussion und Schlussfolgerungen

Mit Ferroelektret-Wandlern wurden in Durchschallung 12,6 mm dicke Nachbildungen von Rotorblattschalen geprüft. Risse in der Deckschicht mit der gleichen Orientierung wie die Faserorientierung wurden beim nicht-reparierten Testkörper sowohl mit Sichtprüfung als auch mit Luftultraschall detektiert, wobei es eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse gab (Abbildungen 1(c) und 4). Die Ergebnisse der Prüfung des reparierten Testkörpers ergeben ein anderes Bild. Ein Vergleich der Abbildungen 3(b) und 5(c) macht es deutlich, dass mit der Luftultraschallprüfung andere Risse detektiert werden können als mit der Sichtprüfung, wobei manche Risse in Faserorientierung nicht detektiert werden. Die Bereiche mit einem verkleinerten Signal in Abbildung 5(c) könnten großflächige Delaminationen sein, die von außen nicht sichtbar, aber sicherheitsrelevant sind. Die 1 bis 2 mm breiten Epoxidkanäle, die bei der Herstellung der Testkörper entstanden, konnten sehr gut abgebildet werden. Die Stellen mit Kanälen zeichnen sich durch ein höheres Ultraschallsignal, weil die Dämpfung im Schaumkern das Signal deutlich unterdrückt. Diese hohe Ortsauflösung wird durch die sphärische Fokussierung der Wandler ermöglicht. Im Vergleich mit marktüblichen Wandlern bieten Ferroelektret-Wandler einen um 30 dB höheren Signal-Rausch-Abstand, was Prüfung von dickeren oder stärker schalldämpfenden Strukturen ermöglicht [7].

4. Danksagung

Wir bedanken uns bei Herrn Uwe Beck und Matthias Weise (BAM) für die Elektronenstrahlverdampfung zu den Ferroelektret-Wandlern und bei Herrn Daniel Kotschate (BAM) für das Korrekturlesen.

Referenzen

- [1] T. Bruch and Y. Oberdörfer, “Prüfung von GFK Windkraft Rotorblättern mittels 500kHz Phased-Array Technologie,” in *DACH-Jahrestagung*, 2015, pp. 1–8.
- [2] A. Lamarre, “Improved Inspection of Composite Wind Turbine Blades with Accessible Advanced Ultrasonic Phased Array Technology,” in *15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT2017)*, Singapore, 2017, pp. 1–8.
- [3] G. M. Sessler and J. Hillenbrand, “Electromechanical response of cellular electret films,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 21, pp. 3405–3407, 1999.
- [4] M. Paajanen, J. Lekkala, and K. Kirjavainen, “ElectroMechanical Film (EMFi) - a new multipurpose electret material,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 84, no. 1, pp. 95–102, 2000.
- [5] J. Döring, J. Bartusch, M. Gaal, M. Kreuzbruck, A. Erhard, and V. Bovtun, “Ferroelectret probes for non-destructive testing with airborne ultrasound,” *Mater. Test.*, vol. 55, no. 2, 2013.
- [6] M. Gaal, J. Bartusch, E. Dohse, F. Schadow, and E. Köppe, “Focusing of ferroelectret air-coupled ultrasound transducers,” in *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1706.
- [7] M. Gaal, R. Caldeira, J. Bartusch, and M. Kupnik, “Air-Coupled Ultrasonic Ferroelectret Receiver with Additional DC Voltage,” *Proc. Eurosensors 2017*, vol. 1, no. 4, p. 362, 2017.
- [8] V. Trappe, D. Nielow, S. Hickmann, A. Kupsch, M. Gaal, B. Redmer, and R. Krankenhagen, “Sandwich-Schalenstrukturen in situ charakterisiert mit Thermographie und Felddehnungsmessungen,” in *DGZfP-Jahrestagung*, 2018, pp. 1–11.