

Ferroelektret-Prüfköpfe für berührungslose Ultraschallprüfung von faserverstärkten Kunststoffen

Mate GAAL^{*}, Joachim DÖRING^{*}, Jürgen BARTUSCH^{*}, Thorid LANGE^{*},
Wolfgang HILLGER^{**}, Gerhard BREKOW^{*}, Marc KREUTZBRUCK^{*}

^{*} BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87,
12205 Berlin, mate.gaal@bam.de

^{**} Ingenieurbüro Dr. Hillger, Wilhelm-Raabe-Weg 13, 38110 Braunschweig,
hillger@dr-hillger.de

Kurzfassung. Die Ultraschallprüfung mit Ankopplung über Luft vermeidet die Nachteile von Koppelmitteln und wird seit mehr als 15 Jahren vor allem in der Forschung und Entwicklung eingesetzt. Die größte Herausforderung ist die Anpassung der akustischen Impedanz der häufig verwendeten piezoelektrischen Materialien an die Luft. Hierfür werden eine oder mehrere Anpassschichten verwendet. Die Dicke, Materialeigenschaften und Verarbeitung dieser Schichten bestimmen das Übertragungsverhalten. Daher ist eine reproduzierbare Fertigung sehr aufwändig.

Eine vielversprechende Alternative ist die Nutzung von Ferroelektreten, insbesondere von polarisiertem zellulärem Polypropylen. In geladenem Zustand weist es piezoelektrische und ferroelektrische Eigenschaften auf. Seine kleine Schallgeschwindigkeit (85 m/s) und Dichte (330 kg/m³) ergeben eine sehr niedrige akustische Impedanz, wodurch es sich für Luftultraschallanwendungen besonders gut eignet.

Deswegen wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens zwischen der BAM und dem Ingenieur-Büro Dr. Hillger Ferroelektret-Prüfköpfe für Luftultraschallprüfung sowie die dafür erforderliche elektrische Interface-Technik entwickelt. In diesem Beitrag werden diese Prüfköpfe mit marktüblichen piezokeramischen Prüfköpfen anhand von mehreren Messungen verglichen. Die verwendeten Testkörper waren eine Sandwichplatte mit Wabenkern mit Impact-Schaden, sowie eine Platte aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit Impact-Schaden und Flachbodenbohrungen. Diese Testkörper wurden durchschallt, die Schäden mittels C-Bilder abgebildet und der Signal-Rausch-Abstand (SNR) ermittelt. Im Vergleich mit piezokeramischen Prüfköpfen wurde mit Ferroelektret-Prüfköpfen eine Verbesserung des SNR von bis zu 16 dB erreicht. Die Impact-Stellen sind mit allen getesteten Prüfköpfen deutlich erkennbar, wobei die C-Bilder der Ferroelektret-Prüfköpfe eindeutig weniger verrauscht sind. Die Flachbodenbohrungen werden im Vergleich zu piezokeramischen Prüfköpfen genauso gut oder besser abgebildet.

1. Wandler aus zellulärem Polypropylen

In den letzten Jahren steigt der Bedarf an luftgekoppelten Ultraschallwandlern für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) [1,2]. Sie werden für oberflächenempfindliche Prüflinge eingesetzt: z.B. Textilien, Nahrungsmittel, poröse Materialien, Papier und vor allem carbonfaserverstärkte Kunststoffe, deren Eigenschaften in Berührung mit flüssigen Koppelmitteln verändert werden können [3]. Die größte Schwierigkeit bei Luftschallsensoren ist die Anpassung der spezifischen akustischen Impedanz des Wandlers an die extrem kleine Impedanz der Luft. Typischerweise wird das durch das Anbringen von Anpassschichten an den piezokeramischen Wandler gemacht [2]. Die effizienteste Anpassschicht hätte eine Dicke gleich einem Viertel der Wellenlänge und eine akustische Impedanz, die genau in der geometrischen Mitte zwischen der Impedanz des Wandlers und der Luft liegt [4]. Allerdings haben Anpassschichten mehrere Nachteile: es gibt wenige Materialien mit ausreichend niedriger akustischer Impedanz; Anpassschichten reduzieren die Bandbreite, wobei sie wie ein Filter wirken, was die Zeitauflösung beeinträchtigt; die Klebverbindung zwischen der Piezokeramik und der Anpassschicht kann sich ablösen; die Schichtdicke hat einen erheblichen Einfluss auf das Signal, was alles die Produktion erschwert.

Eine vielversprechende Alternative zu Wandlern mit Anpassschichten sind Ferroelektrite, insbesondere das geladene zelluläre Polypropylen (zPP) [5-8]. Wegen seiner polarisierten Zellen weist es piezoelektrische und ferroelektrische Eigenschaften auf. Seine niedrige Dichte (330 kg/m^3) und Schallgeschwindigkeit (85 m/s) ergeben eine außergewöhnlich niedrige akustische Impedanz von $0,028 \text{ MRayl}$, wodurch sich der Einbau einer Anpassschicht vermeiden lässt.

Die Vorteile vom zPP haben den Bau der ersten Ferroelektret-Ultraschallwandler für ZfP ermöglicht [8-10]. Neulich wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens zwischen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und dem Ingenieur-Büro Dr. Hillger das elektrische Anpassungsnetzwerk in das Prüfkopf-Gehäuse integriert. Die Besonderheit dieses Wandlers ist die Hochspannungsanregung mit $2,5 \text{ kV}$ Rechteckpulsen [10-11]. So hohe Spannung würde piezokeramische Wandler überheizen und mit der Zeit beschädigen. Hochspannungsanregung von zPP hat dagegen Vorteile, die zu einem effektiven Schallpegel von ca. 145 dB führen, gemessen direkt vor dem Wandler. Das ist das Ergebnis zweier Effekte am Sender: des piezoelektrischen Effekts des elektrostriktiven Effekts (elektrostatische Anziehungskraft zwischen den Kondensatorplatten) [12-14]. Während die Elektrostriktion bei harten Materialien wie Piezokeramik vernachlässigt werden kann, kann sie bei weicheren Materialien sogar größer sein, als die Kraft des piezoelektrischen Effekts. Tatsächlich ist die Dickenänderung durch Elektrostriktion beim zPP bei einer Anregung mit $2,5 \text{ kV}$ um 2 bis 3 mal größer als die Dickenänderung durch den piezoelektrischen Effekt. Die Elastizitätskonstante von zPP liegt nämlich in der Größenordnung 1 MPa , während sie für Bleizirkoniumtitanat (PZT), die am häufigsten benutzte Piezokeramik, um 60 GPa beträgt. Beim Empfang mit zPP wird ausschließlich der piezoelektrische Effekt benutzt. Der Wandler ist von der inneren Seite schallhart abgeschlossen und hat eine Mittenfrequenz von ca. 250 kHz .

In diesem Beitrag wird der zPP-Wandler mit marktüblichen piezokeramischen Wandlern anhand von mehreren Messungen verglichen. Durchschallungsversuche haben einen Unterschied im Signal-Rausch-Abstand (SNR) um 11 bis 16 dB zugunsten zPP-Wandler nachgewiesen. Die Vorteile der zPP-Wandler werden durch mehrere C-Bilder von Bauteilen mit Faserverbundwerkstoffen veranschaulicht. Die verwendeten Testkörper waren

eine Sandwichplatte mit Wabenkern mit Impact-Schaden, sowie eine Platte aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) mit Impact-Schaden und Flachbodenbohrungen.

2. Experimenteller Aufbau

2.1 Die Wandler

Die zPP-Wandler wurden mit zwei ähnlichen marktüblichen piezokeramischen Luftultraschallwandlern verglichen. Für jede Durchschallung wurde ein Paar von gleichartigen Wandlern gewählt, die in der Tabelle 1 dargestellt sind.

Tabelle 1. Wandler für Vergleichsmessungen: (a) zPP-Wandler, (b) und (c) PZT-Wandler mit Anpassschichten.

<i>Wandler</i>	<i>(a) zPP*</i>	<i>(b) PZT** mit Anpassschichten</i>	<i>(c) PZT** mit Anpassschichten</i>
Mittenfrequenz	235 kHz	200 kHz	200 kHz
Durchmesser	19 mm	11 mm	25 mm
Fokussierung	nein	nein	ja
Anregung, Rechteckpulse	2,5 kV	800 V	800 V

* zelluläres Polypropylen, ** Bleizirkoniumtitanat

Die Sender wurden mit Rechteckpulsen unterschiedlicher Spannungen angeregt: 2,5 kV für zPP-Wandler und ca. 800 V für die piezokeramischen Wandler. Das Signal am zPP-Empfänger wurde mit einem selbstentwickelten rauscharmen 60dB-Vorverstärker verstärkt. Wegen eines kleineren Durchmessers hat der PZT-Wandler (b) einen kleineren Fokus als der zPP-Wandler (a). Der Fokusdurchmesser des anderen piezokeramischen Wandlers (c) ist vergleichbar mit dem des zPP-Wandlers.

Alle Wandler wurden an das Luftultraschallgerät USPC 4000 AirTech vom Ingenieur-Büro Dr. Hillger angeschlossen. Die piezokeramischen Wandler mit Anpassschichten wurden über Anpassnetzwerke angeschlossen, die für diesen Zweck von Fa. Hillger gebaut und optimiert wurden (siehe Abbildung 1).

2.2 Signal-Rausch-Abstand

Der Signal-Rausch-Abstand (SNR) von drei Wandlerpaaren wurde aus der Durchschallung einer 3 mm dicken Aluminiumplatte ermittelt. Die Platte wurde zwischen den Sender und den Empfänger gelegt, wie in Abbildung 1. Der Abstand der Wandler zur Platte entsprach der Nahfeldlänge des jeweiligen Wandlers.

2.3 C-Bilder von Testkörpern mit Faserverbundwerkstoffen

Der Messaufbau für die Durchschallung der Testkörper war der gleiche wie der Aufbau für die SNR-Messungen, siehe Abbildung 1. Die Testkörper waren:

(i) Sandwich-Platte mit Wabenkern. 15 mm dicker Wabenkern aus Pappe wurde zwischen zwei 1 mm dicken Schichten vom 0/90 carbonfaserverstärkten Kunststoff (CFK) geklebt. Ein Impact-Schaden von 5 Joule wurde eingebracht.

(ii) Eine 4 mm dicke CFK-Monolith-Platte mit einem Impact-Schaden und fünf 2 mm tiefen Flachbodenbohrungen mit den folgenden Durchmessern: 2, 3, 4, 6 und 8 mm.

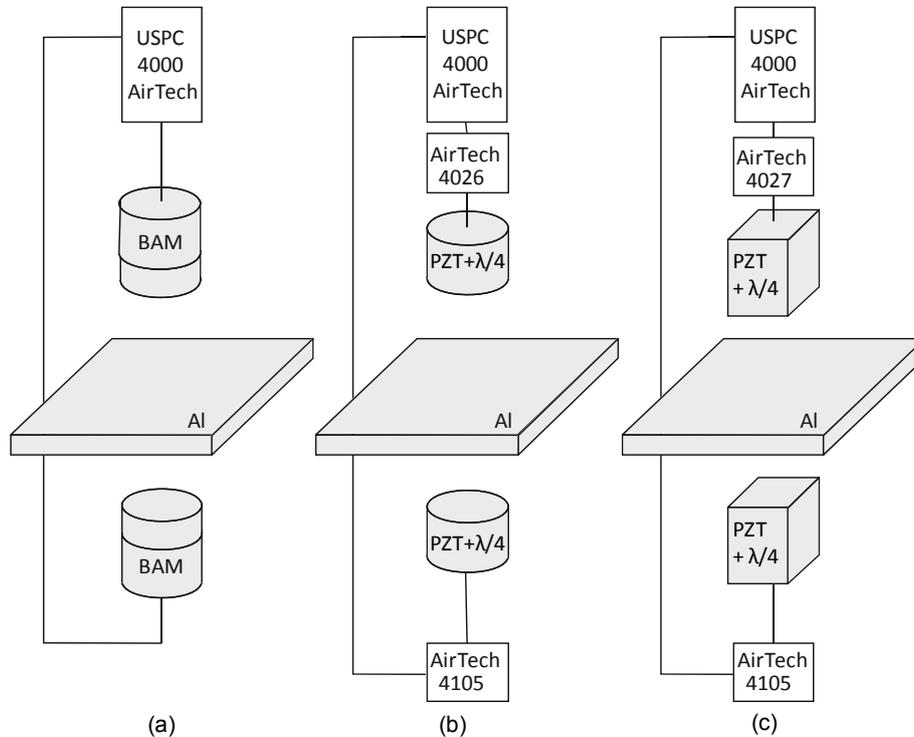


Abbildung 1. Aufbau für Messungen von Signal-Rausch-Abstand. (a) zPP-Wandler, (b) und (c) PZT-Wandler mit Anpassschichten. Jedes Wandlerpaar wurde über ein entsprechendes Anpassungsnetzwerk an das Ultraschallgerät USPC 4000 AirTech angeschlossen.

3. Messergebnisse

3.1 Signal-Rausch-Abstand

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der SNR-Messungen mit der Aluminium-Platte. Die Signale wurden auf den gleichen Rauschpegel normiert, damit der SNR deutlich wird. Der gemessene SNR war 24 dB für zPP-Wandler (a) und 13 bzw. 8 dB für die piezokeramischen Wandler (b) und (c). Der Unterschied zugunsten der zPP-Wandler ist also 11 und 16 dB gegenüber Wandler (b) bzw. (c). Als die Aluminium-Platte durch die 4 mm dicke Monolith-Platte ersetzt wurde, wurden die gleichen relativen Unterschiede gemessen.

3.2 C-Bilder von Testkörpern mit Faserverbundwerkstoffen

Die C-Bilder der Sandwich-Platte werden in der Abbildung 2 verglichen. Mit allen Wandlern konnte der Impact-Schaden deutlich erkannt werden. Allerdings ist das Bild mit dem zPP-Wandler deutlich weniger verrauscht, was auf den höheren SNR zurückzuführen ist. Auf dem unbeschädigten Teil der Sandwich-Platte sind kleinere Signalschwankungen bei der Messung mit dem Wandler (b) zu sehen. Diese Signalschwankungen kommen nicht von der hexagonalen Honigwaben-Struktur, die kleinere Maßen hat. Vielleicht stammt sie

vom variierenden Haftvermögen des Klebers, der die Schichten zusammenhält. Mit den anderen Wandlern ist diese Struktur nicht erkennbar, was möglicherweise auf den kleineren Fokusbereich des Wandlers (b) zurückzuführen ist.

Alle drei Wandler konnten ohne Schwierigkeiten den Impact-Schaden im CFK-Monolith abbilden, was in der Abbildung 4 deutlich zu sehen ist. Anders war es mit Flachbodenbohrungen im gleichen Testkörper. Abbildung 5 zeigt deutlich, dass Wandler (a) und (b) erheblich mehr auflösen konnten, als Wandler (c). Mit Wandler (a) konnten Bohrungen mit Durchmessern 8, 6 und 4 mm aufgelöst werden, mit Wandler (b) auch noch die Bohrung mit 3 mm Durchmesser, während Wandler (c) nur die größte Bohrung detektieren konnte. Die Auflösung des Wandlers (b) ist besser als die vom Wandler (a), weil (b) einen kleineren Durchmesser hat (11 mm verglichen mit 18 mm), was einen kleineren Fokusbereich zur Folge hat. Auffällig ist ein Unterschied zwischen dem Wandler (a) und den anderen zwei Wandlern: An der Stelle der Bohrungen wird das Signal des Wandlers (a) kleiner, während das Signal der anderen zwei Wandler größer wird. Diese komplexen Interferenzmuster ließen sich nur mit Hilfe Simulationsrechnungen unter Berücksichtigung aller Randbedingungen erklären.

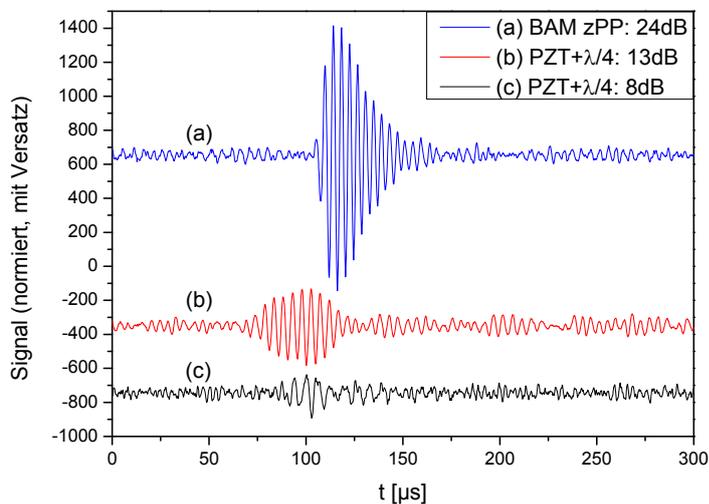


Abbildung 2. Signale von (a) zPP-Wandlern und (b,c) PZT-Wandlern mit Anpassschichten. Die Signale wurden auf den gleichen Rauschpegel normiert, um den SNR zu verdeutlichen: (a) 24 dB, (b) 13 dB und (c) 8 dB.

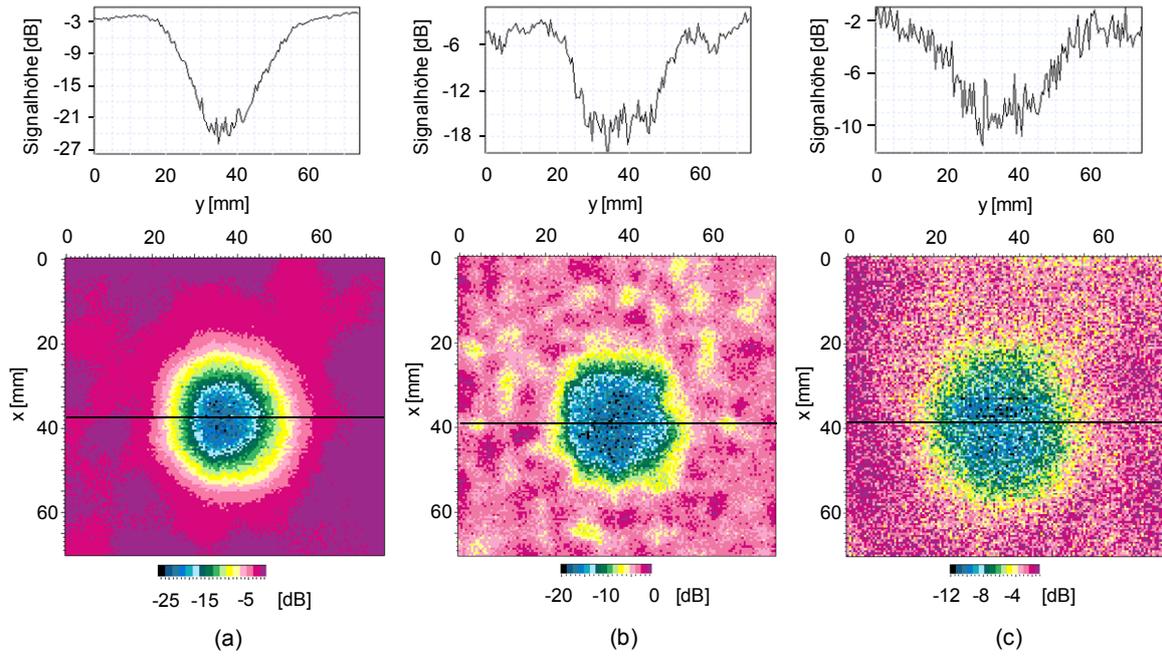


Abbildung 3. C-Bilder des Impact-Schadens in der Sandwich-Platte mit (a) zPP-Wandlern und (b,c) PZT-Wandlern mit Anpassschichten. Das Diagramm oben zeigt ein ausgewähltes Profil des jeweiligen C-Bildes unten.

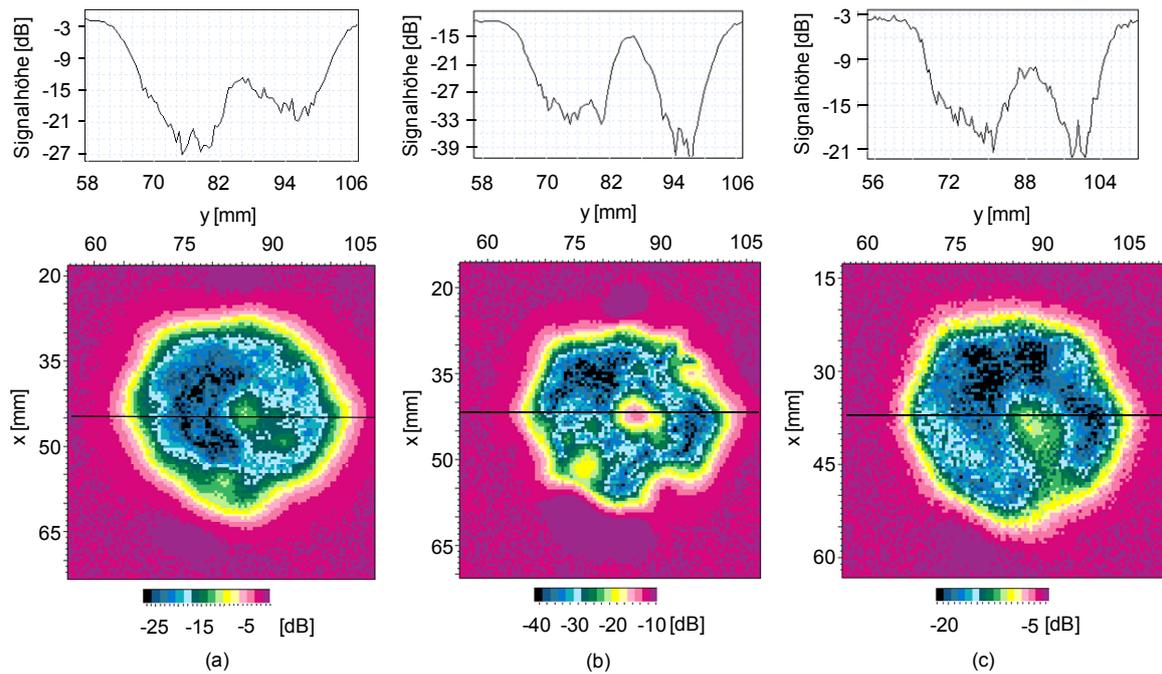


Abbildung 4. C-Bilder des Impact-Schadens im Monolith-CFK mit (a) zPP-Wandlern und (b,c) PZT-Wandlern mit Anpassschichten. Das Diagramm oben zeigt ein ausgewähltes Profil des jeweiligen C-Bildes unten.

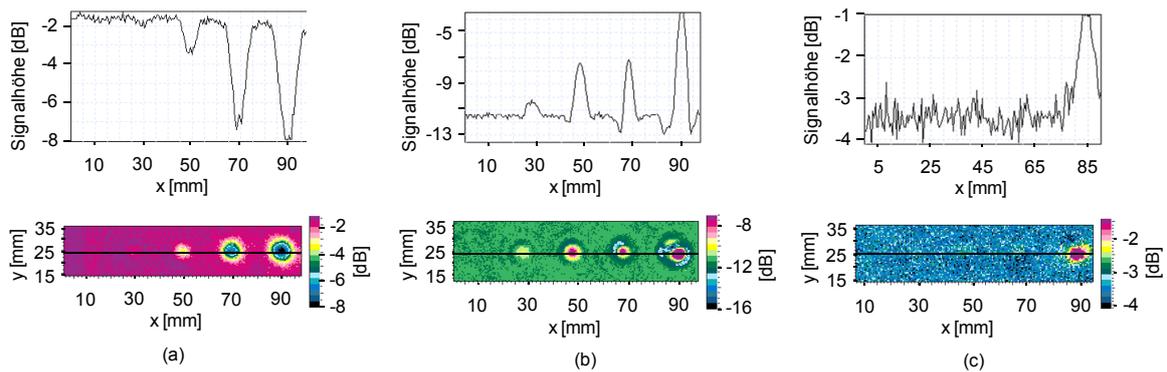


Abbildung 5. C-Bilder der Flachbodenbohrungen im Monolith-CFK mit (a) zPP-Wandlern und (b,c) PZT-Wandlern mit Anpassschichten. Das Diagramm oben zeigt ein ausgewähltes Profil des jeweiligen C-Bildes unten.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Wandler aus zellulärem Polypropylen (zPP) wurden mit marktüblichen piezokeramischen Wandlern mit Anpassschichten verglichen. Der Signal-Rausch-Abstand (SNR) der zPP-Wandler war 11 dB und 16 dB höher als der SNR von zwei piezokeramischen Wandlern mit einer ähnlichen Geometrie und Mittenfrequenz. C-Bilder einer Sandwich-Platte und einer CFK-Platte mit Impact-Schäden und Flachbodenbohrungen wurden aufgenommen. Sie belegen die Anwendbarkeit von zPP-Wandlern in der zerstörungsfreien Prüfung und verdeutlichen die Vorteile ihres hervorragenden SNR.

Die laterale Auflösung der zPP-Wandler kann durch kleinere Durchmesser oder durch Fokussierung verbessert werden. Die Mittenfrequenz kann mit angemessener Verklebung mehrerer zPP-Schichten beeinflusst werden. Diese Möglichkeiten deuten auf eine vielversprechende Zukunft von Ferroelektret-Wandlern für Luftultraschallprüfung.

4. Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Finanzierung aus dem MNPQ-Programm vom BMWi ermöglicht. Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dr. U. Beck und M. Weise (BAM) für die Elektrodenbeschichtung, bei Herrn E. Köppe (BAM) für die Änderungen am elektronischen Anpassungsnetzwerk sowie am Gehäuse und bei Herrn C. Lappöhn (BAM) für technische Hilfe.

Referenzen

- [1] M. C. Bhardwaj, "Non-Destructive Evaluation: Introduction of Non-Contact Ultrasound", in *Encyclopedia of Smart Materials*, Herausgeber M. Schwartz, John Wiley & Sons, New York, 2001, S. 690-714
- [2] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer-Verlag, 1986
- [3] W. Hillger, F. Meier and R. Henrich, *NDT.net* 7(10) (2002)
- [4] G. S. Kino, *Acoustic Waves*, Prentice-Hall, New Jersey, 1993
- [5] M. Paajanen, J. Leikkala und K. Kirjavainen, *Sensors and Actuators* 84, S. 95-102 (1999)
- [6] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt und G. M. Sessler, *Phys. Today* 57, S. 37-43 (2004).
- [7] M. Wegener, R. Gerhard-Multhaupt, M. Dansachmüller, R. Schwödiauer, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, M. Paajanen, H. Minkinen, und J. Raukola, *Appl. Phys. Lett.* 84, S. 392-394 (2004)
- [8] V. Bovtun, J. Döring, M. Wegener, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard und V. Borisov, *Ferroelectrics* 370(1), S. 11-17 (2008)

- [9] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, Y. Yakymenko, *Appl. Phys. A* 88, S. 737-743 (2007)
- [10] J. Döring, V. Bovtun, J. Bartusch, A. Erhard, M. Kreutzbruck, Y. Yakymenko, *Appl. Phys. A* 100(2), S. 479-485 (2010)
- [11] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, M. Gaal, A. Erhard, M. Kreutzbruck, Y. Yakymenko, *Advances in Applied Ceramics* 111 (2012)
- [12] G. M. Sessler und J. Hillenbrand, *Appl. Phys. Lett.* 75 (21), S. 3405-3407 (1999)
- [13] R. Kressmann, *J. Appl. Phys.* 90 (7) S. 3489-3496 (2001)
- [14] J. Hillenbrand und G. M. Sessler, *J. Appl. Phys.* 103, 074103 (2008)