

Elektronisch fokussierbare Wandler für die Luftultraschallprüfung

Ralf STEINHAUSEN¹, Mario KIEL¹, Uwe ILLMANN¹, Christoph PIENTSCHKE¹,
Katrjn HAHN², Tino HÖHNDORF³, Uwe HEUERT³

¹ Forschungszentrum Ultraschall gGmbH, Halle (Saale)

² SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Halle (Saale)

³ Hochschule Merseburg (FH), Merseburg

Kurzfassung. Für die koppelmittelfreie Ultraschallprüfung im niederfrequenten Bereich werden Leistungsschallwandler verwendet, die üblicherweise eine Piezokeramikscheibe als aktives Element enthalten, deren Radialschwingung angeregt wird. Die Mittenfrequenz des Wandlers wird dabei durch den Durchmesser der Scheibe bestimmt. Damit sind auch die Nahfeldlänge und der Öffnungswinkel des Schallfeldes vorbestimmt. Mit der Verwendung von piezoelektrischen Keramik-Polymer-Kompositen kann diese geometrische Einschränkung überwunden werden, da bei ihnen eine Dickenschwingung angeregt werden kann. In dieser Arbeit werden strukturierte Elektrodenarrays genutzt, um das Schallfeld von Luftultraschallwandlern aktiv zu beeinflussen.

Es wurden zwei verschiedene Elektrodenkonfigurationen mit dem Design einer Fresnel-Zonenplatte entwickelt. Sie bestehen aus zwei Elektrodenringen, die um eine kreisförmige Zentralelektrode angeordnet sind. Diese Komposite mit Fresnel-Elektroden wurden zu 3-kanaligen Wandlern mit 400 kHz Mittenfrequenz weiterverarbeitet. Zur phasengenauen Ansteuerung wurde eine mehrkanalige digitale Sendeeinheit entwickelt, die freiprogrammierbare Pulssequenzen ab 150 ns Pulsbreite und bis zu 800 V bei 4,0 kW Pulsleistung ermöglicht.

Durch Schallfeldmessungen konnte gezeigt werden, dass sich durch eine entsprechende phasenversetzte Anregung der Elektroden eine Verkürzung der Nahfeldlänge und eine Verringerung des Schallbündeldurchmessers erreichen lässt. Die Fokussierung ermöglicht eine schärfere Abbildung bei der Materialprüfung. Des Weiteren führt die Verkürzung der Fokuslänge zu höheren Schallamplitude und zu einer Verkürzung der zurückgelegten Luftstrecke. Dies wirkt sich positiv auf das Signal-Rausch-Verhältnis aus. Ein Vergleich mit konventionellen unfokussierten Wandlern wurde an Klebeverbindungen und Verbundmaterialien durchgeführt.

Luftultraschallwandler senden wegen der benötigten großen Schallleistung ein relativ langes Wellenpaket aus. Hinzu kommt, dass die Ausschwingzeit des Empfängers den gemessenen Puls ebenfalls verlängert. Eine Verkürzung des gesendeten Ultraschallpulses kann durch die Verwendung spezieller Pulssequenzen bei der Anregung erreicht werden. So konnte das gemessene Signal am Empfänger bei gleicher Maximalamplitude auf unter 50% verkürzt werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Analyse der Pulslaufzeit im Rahmen einer einfachen aber robusten Blendenanalyse im A-Bild.

Einführung

Für die koppelmittelfreie Luftultraschallprüfung werden Leistungsschallwandler benötigt, die üblicherweise eine piezoelektrische Keramikscheibe als schwingungserzeugendes Element verwenden. Damit wird die Mittenfrequenz des Wandlers durch den Durchmesser der Keramikscheibe bestimmt. Die Obergrenze dieser Radialschwinger liegt bei ca. 300 kHz. Durch die Verwendung von Keramik-Polymer-Kompositen als Piezoelement kann dieser Nachteil aufgehoben werden, da die Komposite in guter Näherung als Kolbenschwinger betrachtet werden können. Neben dem nun beliebig wählbaren Wandlerdurchmesser erlaubt die Anregbarkeit dieser Schwingungsmode auch die lokale Anregung der Dickenschwingung, da die Piezostäbchen durch die Polymermatrix relativ gut mechanisch voneinander entkoppelt sind. Eine Übertragung der Gruppenstrahlertechnik mittels strukturierter Elektroden wäre möglich. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwieweit eine Fokussierung des Schallfeldes im Medium Luft mit einem einfachen Fresnel-Zonen-Wandler möglich ist.

1. Kompositwandler mit Fresnel-Zonen

Als Ausgangsmaterial für die fokussierbaren Luftultraschallwandler wurden piezoelektrische Keramik-Polymer-Komposite der Firma SONOTEC aus Halle verwendet. Diese 1-3 Komposite werden im Dice-and-Fill-Verfahren aus einer PZT-Scheibe und einem Verguss-Polymer hergestellt. Die Kompositscheiben wurden auf eine Dicke von 3 mm geschliffen, um eine Mittenfrequenz des fertigen Wandlers von 400 kHz zu erreichen.

Die Elektroden wurden als Mehrschichtstruktur mittels thermischer Bedampfung aufgebracht. Dies gewährleistet eine hohe Haftfestigkeit sowohl auf der Keramik als auch auf der Polymermatrix und eine gute Leitfähigkeit. Das Schichtsystem schließt mit einer lötbaren und korrosionsfreien Schicht ab. Die Ringstruktur wurde mit Hilfe einer Bedampfungsmaske hergestellt. Die Anzahl der Ringe wurde deshalb zunächst auf drei festgelegt. Die Kontaktierung der inneren Ringe sollte ebenfalls nach außen geführt werden. Eine solche Bedampfungsmaske und die resultierenden Ringstrukturen sind in Abb. 1 zu sehen.



Abb. 1. Bedampfungsmaske und fertige Elektrodenstruktur auf PZT-Polymer-Komposit.

Bei einer Fresnel-Zonen-Struktur sind die Elektrodenflächen des inneren Kreises sowie der äußeren Ringe jeweils flächengleich. Dies gewährleistet eine gleichmäßige Flächenleistung bei der Abstrahlung der Schallwellen sowie eine gleichmäßige Empfindlichkeit der Empfangsflächen. Es wurden zwei Varianten hergestellt, die sich durch den Abstand der Ringe voneinander unterscheiden. Zum einen wurde ein konstanter Abstand gewählt, zum anderen wurde der Abstand so variiert, dass die nichtkontaktierten Flächen

zwischen den Ringen ebenfalls gleich groß sind. Ein signifikanter Unterschied bezüglich des Schallfeldes konnte im späteren Betrieb nicht festgestellt werden.

Die Rückseite des Komposits wurde mit einer vollflächigen Masselektrode versehen. Anschließend wurde die Kompositscheibe kontaktiert und in einem Luftschallwandler mit Dämpfungskörper und Anpassschicht verbaut. Der schematische Aufbau ist in Abb. 2 zu sehen. Die gemeinsame Masselektrode zeigt in Abstrahlrichtung zur Vorderseite des Wandlers. Der Durchmesser der Wandlerfläche beträgt 20 mm.

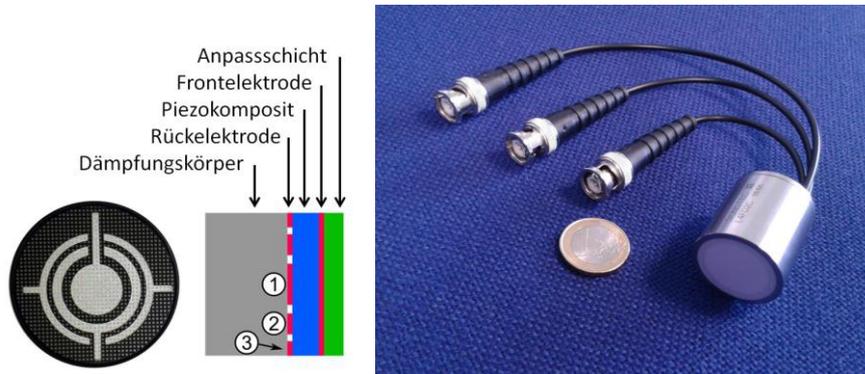


Abb. 2. Schematischer Aufbau des Luftschallwandlers (links), kompletter 3-Kanal-Wandler (rechts).

Zur Ansteuerung des Fresnel-Wandlers wurde eine 4-Kanal-Sendeeinheit entwickelt, deren Herzstück ein digitaler Leistungsverstärker ist. Jeder Kanal kann dabei einzeln phasengenau und zeitsynchron angesteuert werden. Bei einer maximalen Pulsleistung von 4,0 kW ist eine minimale Pulsbreite von 150 ns bei einer Spitzenspannung von 800 V realisierbar.

2. Schallfeldcharakterisierung

2.1. Experimenteller Aufbau

Analog zur bekannten Gruppenstrahlertechnik wird durch eine phasenversetzte Ansteuerung der Ringelektroden durch Interferenz der von den Ringen ausgesendeten Schallwellen das Schallfeld verändert. Die Amplitude der Anregungsspannung ist bei allen Kanälen gleich.

Das Schallfeld des Sendewandlers wurde mit der Kugelreflektor-Methode charakterisiert. Zusätzlich wurde mit einem scannenden Laser-Doppler-Vibrometer (sLDV) die Wandleroberfläche im Sendebetrieb sowie die Ausbreitung des Schallimpulses in Luft untersucht.

Bei der Kugelreflektor-Methode wurde eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 2,5 mm auf einer Ebene in der Schallausbreitungsrichtung gescannt. Die an der Kugeloberfläche reflektierte Schallwelle wurde mit einem zweiten 400 kHz-Wandler detektiert, der seitlich unter einem nahezu rechten Winkel zur Hauptachse des Sendewandlers mitgeführt wurde. Der gemessene Schallpegel ist somit auch eine Funktion des Detektorsystems Kugel-Empfangswandler. Um diesen Faktor konstant zu halten, befand sich der Empfangswandler in einer festen Position zur Kugel (Abb. 3.a).

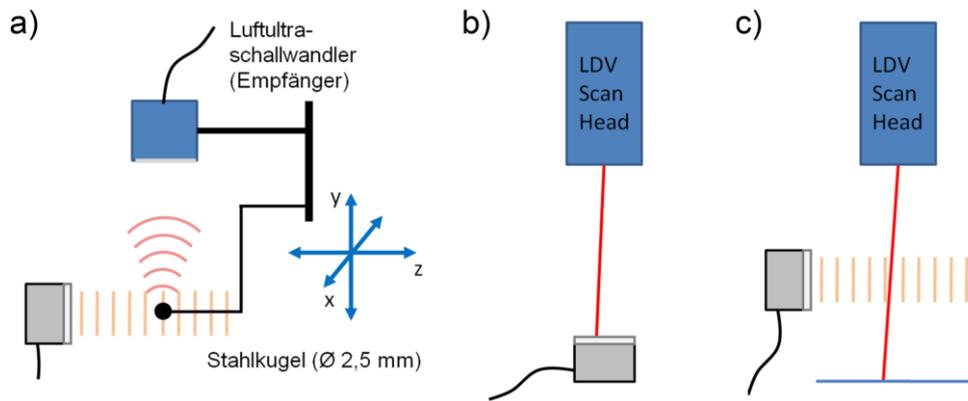


Abb. 3. Bestimmung der Schalldruckverteilung, schematisch: a) Messung mit Kugelreflektor, b) Messung der Geschwindigkeitsverteilung an der Wandleroberfläche, c) Refrakto-Vibrometrie.

In der Standardanwendung des sLDV wird mit einer hohen Ortsauflösung die Geschwindigkeitsverteilung der schwingenden Wandleroberfläche bestimmt. An Luftultraschallwandlern kann diese Messung bei cw-, Burst- oder Impulsanregung ohne großen Aufwand durchgeführt werden (Abb. 3.b). In einer abgewandelten Messmethode wurde nach dem Prinzip der Refrakto-Vibrometrie die Ausbreitung des Luftultraschallimpulses erfasst und visualisiert. Der Laserstrahl scannt dabei das Schallfeld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die zeitliche Änderung des Luftdrucks infolge der Schallwelle führt zu einer Änderung des Brechungsindex und damit zu einer Laufzeitänderung, die vom Vibrometer detektiert wird (Abb. 3.c) [1].

Qualitativ liefern beide Messverfahren qualitativ ähnliche Ergebnisse, wie im Folgenden dargestellt wird. Während beim Kugelreflektor eine punktweise Abtastung des Schallfeldes möglich ist, liefert das Laser-Vibrometer einen über den Laufweg integrierten Wert. Man erhält damit eine Projektion des 3-dimensionalen Schalldruckverteilung. Der große Vorteil liegt bei der Refrakto-Vibrometrie in der schnellen Erfassung und der Möglichkeit, den zeitlichen Verlauf der Schalldruckverteilung zu erfassen.

2.2 Ergebnisse der Schallfeldcharakterisierung

In Abb. 4 sind die Ergebnisse der Kugelreflektor- und der sLDV-Messung gegenübergestellt. Dabei ist im oberen Bild jeweils der unfokussierte Wandler dargestellt, bei dem alle drei Kanäle mit dem gleichen Anregungssignal ohne Phasenversatz angesteuert wurden. Das Schallfeld ist vergleichbar mit einem vollflächig kontaktierten Kompositwandler. Das unfokussierte Schallfeld weist dabei alle Merkmale des Schallfeldes eines Kolbenschwingers, einschließlich der Nebenmaxima, auf. Die Nahfeldlänge beträgt ca. 60 mm und die Schallbündelbreite im Bereich des natürlichen Fokus liegt bei ca. 10 mm (6 dB-Bereich).

Das elektronisch fokussierte Schallfeld ist stärker gebündelt und das Druckmaximum liegt im Bereich des Nahfeldes. Der 6-dB-Bereich hat nur noch eine Breite von ca. 6 mm. Allerdings sind auch weiterhin Nebenkeulen zu erkennen, deren Intensitätsamplitude aber deutlich unter der 6 dB-Grenze liegen, welche bei dem gewählten Farbcode weiß erscheint. Eine deutliche Reduzierung dieser Nebenkeulen kann voraussichtlich mit einer Erhöhung der Ringzahl erreicht werden.

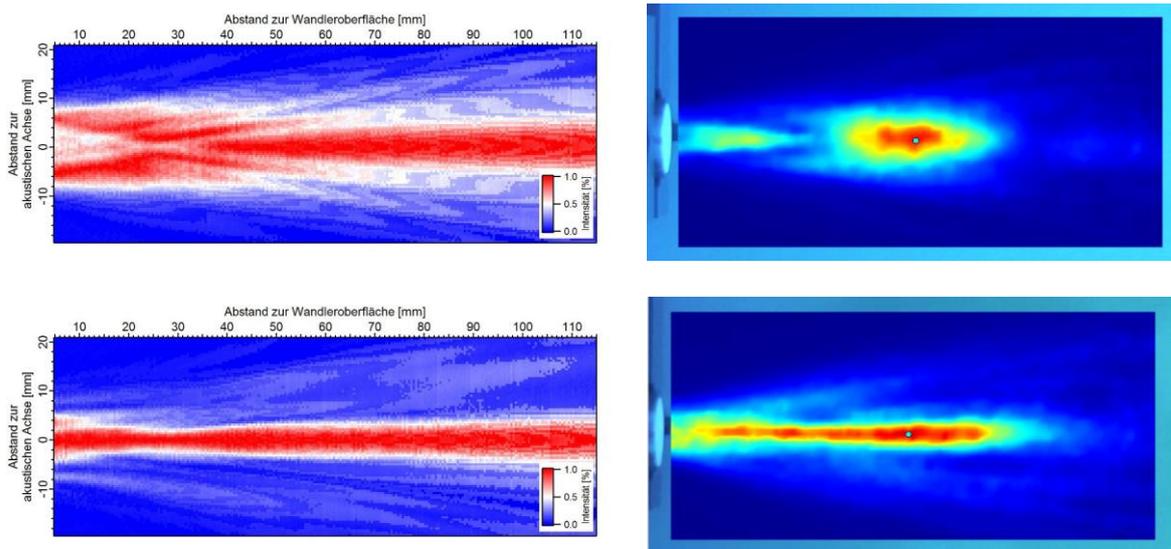


Abb. 4. Charakterisierung des Schallfeldes mit Kugelreflektor (links) und Refrakto-Vibrometrie (rechts); Vergleich von unfokussierter (oben) und fokussierter (unten) Anregung.

Zusätzlich wurde mit dem Laservibrometer die Oberfläche des Wandlers während des Sendevorgangs abgetastet. Dabei wurde festgestellt, dass sich die im Piezokomposit ortsabhängig unterschiedlich angeregten Schwingungen auch an der Oberfläche der Anpassschicht nachweisen lassen. Die mit dem sLDV erfasste transiente Geschwindigkeitsverteilung auf der Wandleroberfläche stellt sich im Fall der gleichphasigen Anregung als typische Bewegungsform eines Kolbenschwingers dar (Abb. 5). Für den Fall der phasenversetzten Anregung sind im zeitlichen Verlauf die konzentrischen Auslenkungen erkennbar, die von außen nach innen wandern. In beiden Fällen lassen sich in den animierten zeitlichen Abläufen Bereich mit verminderter Geschwindigkeitsamplitude erkennen, die durch die Geometrie der Elektrodenstruktur hervorgerufen werden. Die maximalen Geschwindigkeiten liegen Bereich von ± 1 m/s.

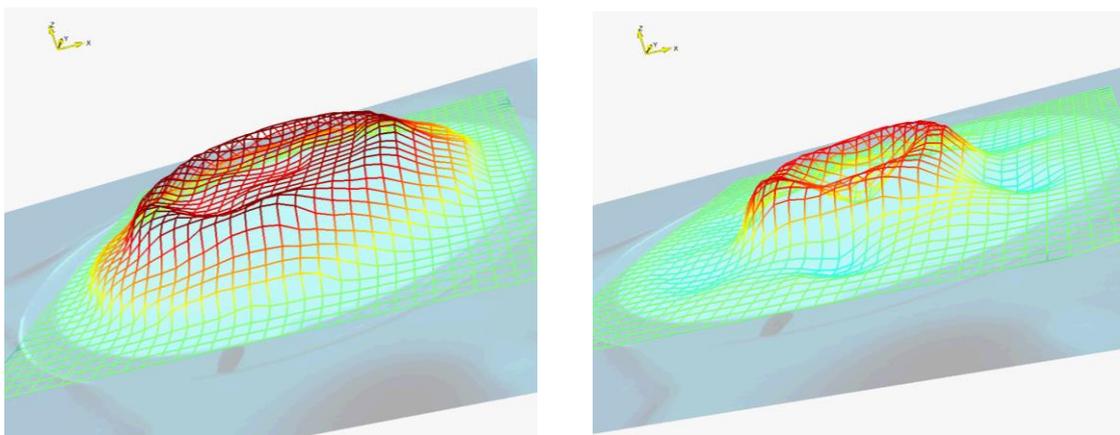


Abb. 5. Momentaufnahme der Geschwindigkeitsverteilung auf der Oberfläche des unfokussierten Wandlers (links) und des fokussierten Wandlers (rechts).

3. Ergebnisse an Prüfkörpern

Es wurde ein PMMA-Prüfkörper mit Sacklochbohrungen verwendet, um die Auswirkungen der elektronischen Fokussierung auf das Prüfprozess zu testen. Der Prüfkörper hat eine Dicke von 9 mm, die Durchmesser der Bohrungen betragen 1; 1,5; 2; 5 und 10 mm (Abb. 6).



Abb. 6. PMMA-Prüfkörper mit Sacklochbohrungen.

Im Prüfbetrieb wurde auch auf der Empfangsseite ein Fresnel-Wandler gleicher Bauweise verwendet. Die Signale der einzelnen Kanäle wurden dabei einzeln verstärkt und als komplettes A-Bild aufgezeichnet. An der eingezeichneten Linie in Abb. 7 erkennt man sehr gut die relative Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Elektroden. Im Post-Processing wurden die Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Elektrodenringen bezüglich der inneren Elektrode bestimmt und die A-Bilder um diesen Wert verschoben. Danach wurde über eine Amplitudenbewertung mittels einer Blende das C-Bild berechnet. Die Aufnahme der drei Signale und die Datenrückrechnung wird zukünftig simultan erfolgen und dann auch schon online während der Messung zu Verfügung steht.

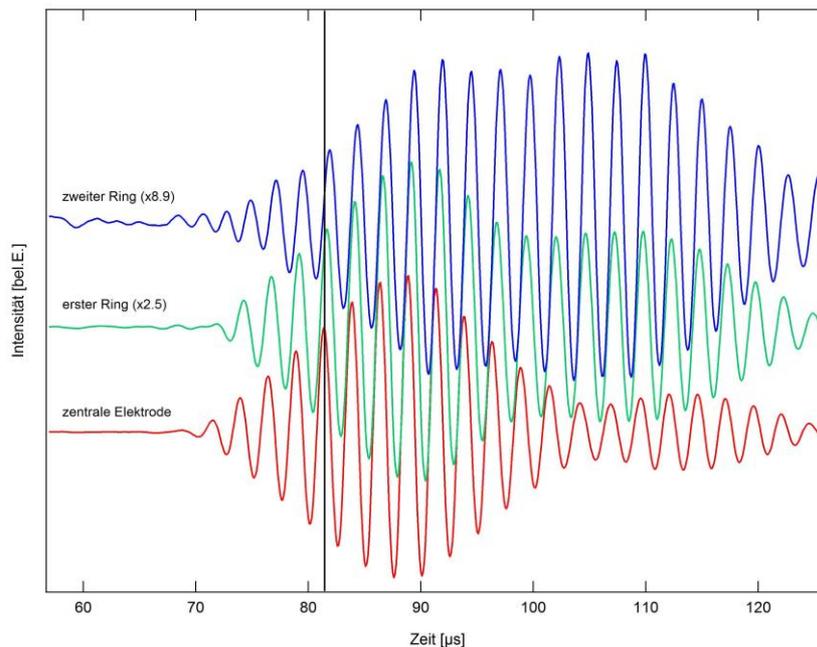


Abb. 7. A-Bilder der drei Empfangskanäle des Fresnel-Wandlers vor der Phasenanpassung.

In Abb. 8 ist ein Ausschnitt aus dem C-Bild dargestellt, das mit dem 400 kHz-Wandler im unfokussierten Modus aufgezeichnet wurde. Die Durchmesser der beiden großen Bohrungen liegen im Bereich des halben Schallbündeldurchmesser und sind damit deutlich

zu erkennen. Die Intensität des transmittierten Schalls nimmt im Inneren der Bohrung ab. Hier ist zwar die Materialdicke des PMMA geringer. Allerdings trifft der Schall am gekrümmten Boden der Sacklochbohrung nicht mehr senkrecht auf die Oberfläche was zu einer Reduzierung der transmittierten Schallintensität am Empfänger führt.

Im unteren Teil der Abb. 8 ist die Schallintensität entlang einer Linie durch die Mittelpunkte der Kreise dargestellt. Hier erkennt man, dass auch die kleineren Bohrungen noch deutlich Signale über dem Rauschlevel liefern. Die Messung mit elektronisch fokussiertem Wandler und mehrkanaligem Empfang liefert deutlich schärfere Peaks, insbesondere bei den kleineren Durchmessern.

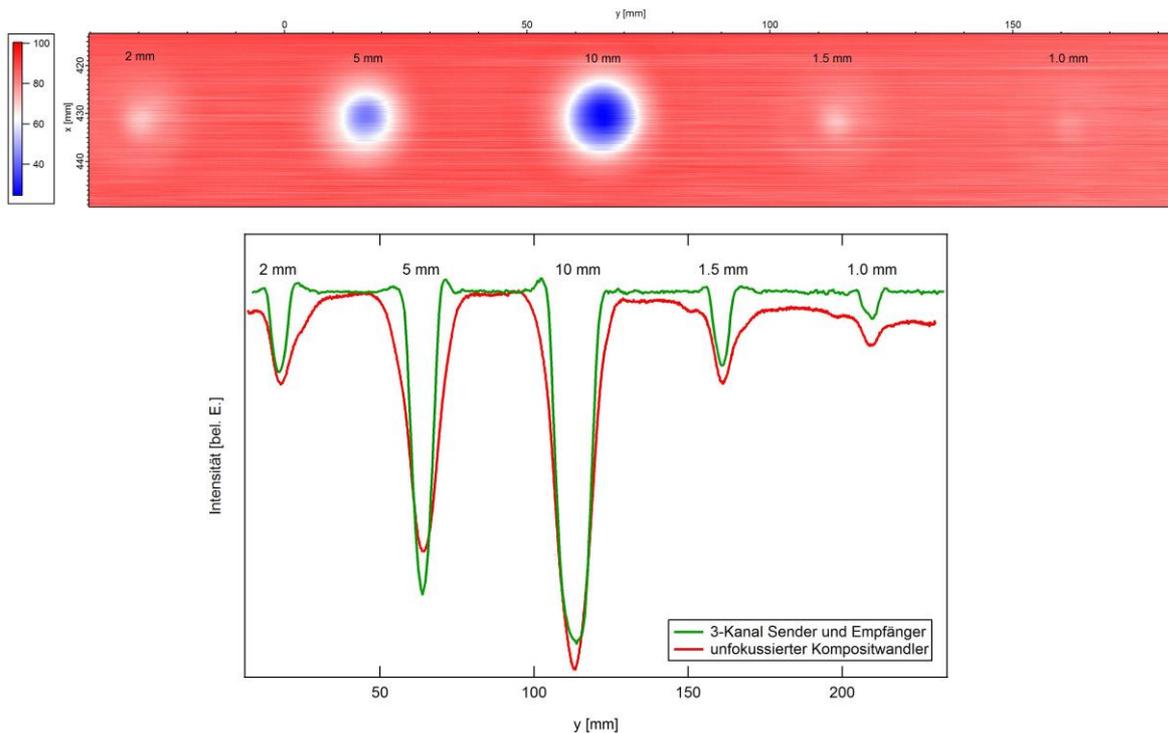


Abb. 8. C-Bild des PMMA-Probekörpers mit Sacklochbohrungen (oben); Schallintensität entlang einer Linie durch die Mittelpunkte der Bohrungen (unten)

Der kleinere Schallbündeldurchmesser im fokussierten Modus führt zu einer schärferen Abbildung im C-Bild (Abb. 9). Die scheinbare Größe der Bohrung, gemessen an der Breite der relativen Intensitätsabnahme im Bohrungsbereich (hier als weiße Farbcodierung), wird dabei ebenfalls geringer.

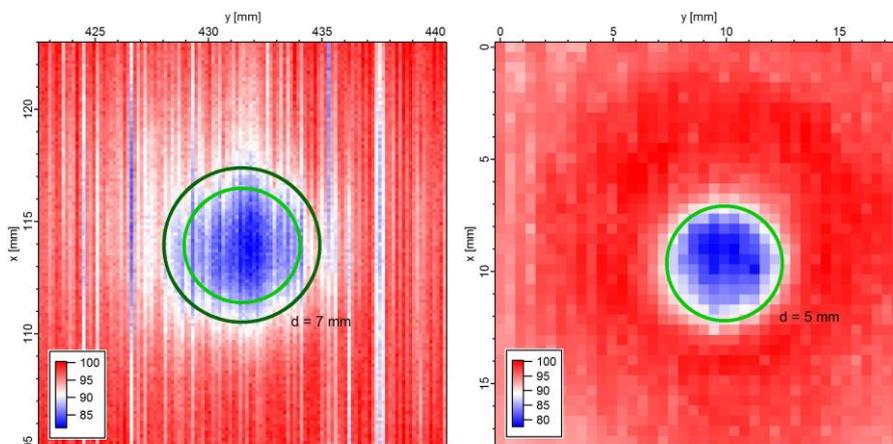


Abb. 9. C-Bild der 1,5 mm Sacklochbohrung mit unfokussiertem Wandler (links) und elektronisch fokussiertem Wandler (rechts).

4. Verbesserung des Ausschwingverhaltens

Das Potential von mehrkanaligen Kompositwandlern besteht auch in der aktiven Reduzierung des Ausschwingverhaltens. Luftultraschallwandler werden typischerweise mit einem Burst aus 5-10 Pulsen auf die maximale Amplitude angeregt. Je nach Bedämpfung des Wandlers ist ein längeres Ausschwingen zu beobachten (grüne Kurve in Abb. 10). Durch eine gegenphasige Anregung der äußeren Ringe nach dem Erreichen des Maximums kann der Kompositwandler zu einem deutlich schnelleren Ausschwingen gebracht werden. Die Ausschwingzeit konnte so um mehr als die Hälfte verringert werden. Dies ermöglicht eine verbesserte Analyse der Pulslaufzeit im Rahmen einer einfachen aber robusten Blendenanalyse im A-Bild.

Inwiefern sich eine solche Anregung noch optimieren lässt, müssen weitere Untersuchungen zeigen. Unklar ist auch, ob eine gegenphasige Anregung des Wandlers bei nominell maximaler Auslenkung zu einer drastischen Reduzierung der Lebensdauer führt. In den bisherigen Test jedoch konnte keine Abnahme der Schallleistung beobachtet werden.

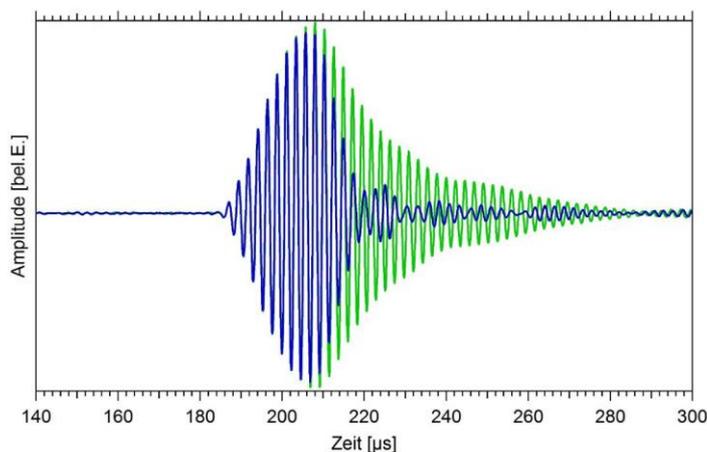


Abb. 10. Ausschwingverhalten eines 400 kHz-Kompositwandlers (grün) und mit einer aktiven Schwingungsdämpfung durch Gegenpulse auf die äußeren Elektrodenringe (blau).

Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen der FuE-Förderung des Ministeriums für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt gefördert.

Wir danken Herrn Prof. Klaus-Vitold Jenderka von der Hochschule Merseburg für die Unterstützung bei den Messungen mit der scannenden Laser-Doppler-Vibrometrie.

Referenzen

[1] K.-V. Jenderka, R. Steinhausen, A. Kopp, C. Pientschke, M. Kiel: Möglichkeiten zur räumlichen und zeitlichen Charakterisierung von Ultraschallfeldern in Luft mit scannender Laser-Doppler-Vibrometrie, Fortschritte der Akustik - DAGA 2015, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2015, 1086-1089, ISBN: 978-3-939296-08-9