

Phased-Array-Prüfköpfe für luftgekoppelte Ultraschallprüfung auf Basis von zellulären Kunststoffen

Mate GAAL¹, Daniel HUF SCHLÄGER¹, Dirk GOHLKE¹, Matthias WEISE¹,
Detlef ILSE², Wolfgang HILLGER³, Artur SZE WIECZEK²
¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM, Berlin
² Hillger NDT GmbH, Braunschweig
³ im Ruhestand, ehem. Hillger NDT GmbH, Braunschweig

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

Kurzfassung. Luftgekoppelte Ultraschallprüfung setzt sich immer häufiger gegen die konventionelle Ultraschallprüfung von Leichtbaukomponenten durch, und zwar in vielen Industriezweigen von der Holzindustrie bis zur Luftfahrt. Während die Phased-Array-Technik mittlerweile zu dem industriellen Standard im Bereich der Prüfung mit Ankopplung gehört, wird luftgekoppelte Ultraschallprüfung meist mit zwei Wandlern in Durchschallung durchgeführt. Deswegen werden Vorteile der Phased-Array-Technik wie beispielsweise elektronische Fokussierung oder Schwenkung des Einschallwinkels für luftgekoppelte Prüfung selten genutzt.

In diesem Beitrag werden die laufenden Arbeiten an der Entwicklung eines neuen Phased-Array-Geräts vorgestellt, mit dem Schwerpunkt an der Charakterisierung der Prüfköpfe und ihrer Schallfelder. Das Gerät besteht aus einem linearen Phased-Array-Prüfkopf, einer Sende- und einer Empfangseinheit. Die Hauptinnovation unserer Arbeit ist die Anwendung von zellulären Kunststoffen für den Bau eines Arrays, wobei der Sender mit Hochspannung von ca. 1500 V angeregt wird. Geladene zelluläre Polymere werden auch Ferroelektrite oder Piezoelektrite genannt. Sie weisen ein sehr niedriges Elastizitätsmodul und dadurch eine niedrige akustische Impedanz auf, so dass auf den Einbau von Anpassschichten verzichtet werden kann.

Eine sehr niedrige mechanische Kreuzkopplung bei Ferroelektriten ermöglicht eine unabhängige Anregung einzelner Elemente, was bei Piezokompositen deutlich schwieriger wäre. Die Entwicklung der Array-Prüfköpfe wurde durch Berechnungen des Schallfeldes unterstützt, die auf Punktquellensynthese basieren. Die beabsichtigte Anwendung von Phased-Array-Prüfköpfen und des Prüfsystems sind die Durchschallung mit Fokussierung, elektronischer Scan und die Schwenkung des Einschallwinkels zur Anregung von geführten Wellen, angewandt an carbonfaserverstärkten Kunststoffen und ähnlichen Materialien. Die Anwendung von geführten Wellen bietet die Perspektive, Bauteile mit einseitiger Zugänglichkeit zu prüfen.

1. Luftgekoppelte Phased-Arrays

Die ersten Anwendungen der luftgekoppelten Ultraschallprüfung (ACUT) waren in den 1970er. Seitdem fand ACUT den Weg in die industrielle Praxis [1]. Mittlerweile ist ACUT ein etabliertes Verfahren z.B. für die Prüfung von CFK-Platten und ähnlichen Materialien,



sowie Klebeverbindungen bei Stützstrukturen mit einer Gesamtdicke bis zu mehreren Millimetern. Mit der steigenden Bedeutung von Leichtbau besteht das größte Interesse an dieser Technologie in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, sowie in der Automobilindustrie. Im direkten Vergleich zur konventionellen Ultraschallprüfung mit Flüssigkeitsankopplung ist ACUT weniger invasiv und weist Vorteile insbesondere bei der Prüfung von wasserempfindlichen und porösen Materialien auf. Aus wirtschaftlicher Sicht wird auch der geringere Wartungsaufwand der Gerätetechnik zu den Vorteilen gezählt.

Ultraschallprüfung mit konventionellen Koppelmitteln wird oft mit Phased-Array-Technologie durchgeführt [2]. Phased-Array-Prüfköpfe bestehen aus mehreren kleineren Wandlern, die unabhängig gesteuert werden können. Dies ermöglicht eine Phasenverschiebung und somit Schwenkung und Fokussierung des Schallfelds. Trotzdem wurden luftgekoppelte Phased-Arrays selten in der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt [3, 4]. In diesem Beitrag wird ein neuentwickelter Phased-Array-Prüfkopf basierend auf Ferroelektriten vorgestellt. Dieser Prüfkopf ist ein Teil eines Phased-Array-Prüfsystems, der außerdem noch eine Sende- und eine Empfangseinheit beinhaltet.

2. Ferroelektretbasierte Phased-Arrays

2.1 Design von Ferroelektret-Phased-Arrays

Ferroelektrite (oder auch Piezoelektrite genannt) sind geladene zelluläre Polymere [5-7]. Sie weisen eine außerordentlich niedrige Steifigkeit von 1 MPa bei 250 kHz und eine entsprechend niedrige akustische Impedanz von ca. $0,03 \text{ Pa s/m}^3$ auf, so dass eine Anpassschicht, die bei marktüblichen ACUT-Wandlern eingesetzt wird, nicht notwendig ist [8]. Eine äußerst niedrige mechanische Querkopplung ermöglicht eine unabhängige Steuerung von benachbarten Elementen, selbst wenn das Array aus einem zusammenhängenden Stück Ferroelektret gebaut wird.

Im Folgenden wird der Aufbau eines Ferroelektret-Wandlers beschrieben. Ferroelektret-Folien basierend auf Polypropylen von Firma Emfit Ltd. wurden von einer Seite mittels Elektronenstrahlverdampfung mit einer 200 nm dicken Schicht Aluminium beschichtet. Diese wurden auf einen strukturierten Platinenträger aufgeklebt (Abbildung 1) [9]. An den Platinenträger sind vorher 32 Kupferelektroden angebracht worden, die den einzelnen Elementen entsprechen, wie in [10] vorgeschlagen. Die Neuerung in diesem Beitrag ist die Anwendung von Hochspannung (1,8 kV) für die Anregung des Arrays [11]. Damit wird ein deutlich höherer Schalldruck erzeugt und die Prüfung von Platten mit einer Dicke von mehreren Millimetern ermöglicht.

2.2 Sende- und Empfangseinheit

Es werden aktuell ein Hochspannungspulser für den Sender und ein mehrkanaliger Empfänger entwickelt, mit denen die Elemente des Arrays separat und unabhängig gesteuert werden können. Die wichtigsten Herausforderungen sind ein hoher Signal-Rausch-Abstand und die Kompatibilität mit dem vorhandenen Ultraschallgerät USPC 4000 AirTech der Hillger NDT GmbH. Um den Entwicklungsaufwand zu minimieren, wird zunächst an einem Array-System mit 8 Kanälen gearbeitet. Dies ermöglicht die Erkundung akustischer und elektronischer Randbedingungen für Funktionen wie Schwenken und Fokussieren des Schallfelds.

An der Sendeseite kann eine Zeitverzögerung zwischen 0 und $12 \mu\text{s}$ mit einer Auflösung von 20 ns eingestellt werden. Am Empfänger ermöglicht ein 8-kanaliger 20 MHz ADC eine Auflösung von 50 ns. Das gesamte Setup ermöglicht eine Pulsfolgefrequenz von 200 Hz.

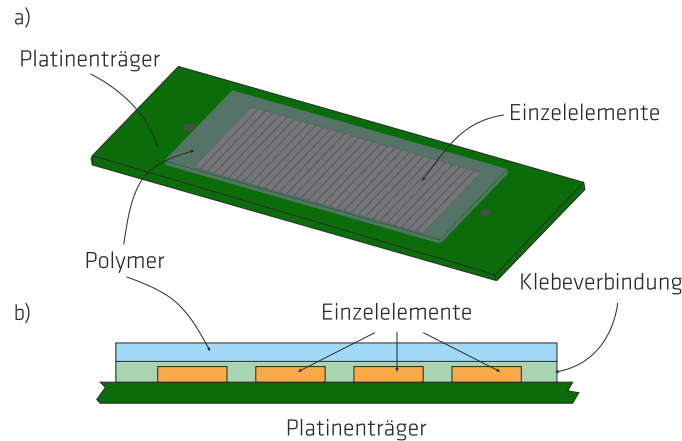


Abbildung 1. Phased-Array-Demonstrator basierend auf zellulärem Polypropylen [9].

2.3 Geometrische Parameter des Demonstrators

Für eine praxisrelevante Bestimmung der geometrischen Parameter des Demonstrators werden drei Prüf Szenarien in Betracht gezogen. Der üblichste Aufbau bei ACUT ist Durchschallung. Die wichtigste Anforderung an die Arrays ist dabei die Flexibilität bei der Kontrolle des Fokuspunktes. Das zweite Szenario ist elektronisches Scannen. Dieses erfordert eine Kontrolle der aktiven Gruppe von Elementen sowohl beim Senden als auch beim Empfangen. Das Ziel ist die Scanzeit zu optimieren, indem die Bewegungen des Manipulators minimiert werden. Die dritte mögliche Anwendung ist die Kontrolle des Einschallwinkels zur Anregung und Detektion von geführten Wellen. Diese Szenarien dienen zur Orientierung bei der Bestimmung von geometrischen Parametern eines Arrays.

Der prominenteste akustische Effekt ist die Formung von Nebenkeulen, die dann entstehen, wenn der Pitch (Elementbreite + Abstand zwischen den Elementen) gleich oder größer ist als die akustische Wellenlänge im Medium. Genauer gesagt, gilt diese Bedingung für einen Schwenkwinkel von 0° . Allgemein lautet die Bedingung für die Vermeidung von Nebenkeulen

$$p \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_s}, \quad (1)$$

mit p für den Pitch, λ für die Wellenlänge in der Luft und θ_s für den Schwenkwinkel der Hauptkeule. Die Entstehung von Nebenkeulen für Pitches bis 3λ wird in der Abbildung 2 dargestellt [9, 12]. Für Ferroelektrite basierend auf zellulärem Polypropylen ist die typische Mittenfrequenz ca. 250 kHz mit Variationen bis 50 kHz, was einer Wellenlänge von ungefähr 1,4 mm entspricht. Idealerweise wäre der Pitch kleiner als 1,4 mm. Allerdings hat ein kleiner Pitch auch Nachteile: einzelne Elemente haben eine sehr kleine elektrische Impedanz, und die Anzahl der benötigten Kanäle wächst. In der Suche nach einem Kompromiss sind schwächere Nebenkeulen tolerierbar, wenn sie die Prüfung nicht stören. Deswegen wurden für den Demonstrator eine Elementbreite von 1,4 und Abstand von 0,2 mm gewählt, woraus sich ein Pitch von 1,6 mm ergibt. Die Formung von Nebenkeulen wurde in einer Simulation überprüft, basierend auf Punktquellensynthese [12]. Die Ergebnisse (Abbildung 3a) unterstützen die Hypothese, dass die Nebenkeulen sich auf die Prüfung nicht auswirken würden, was noch experimentell bestätigt werden muss.

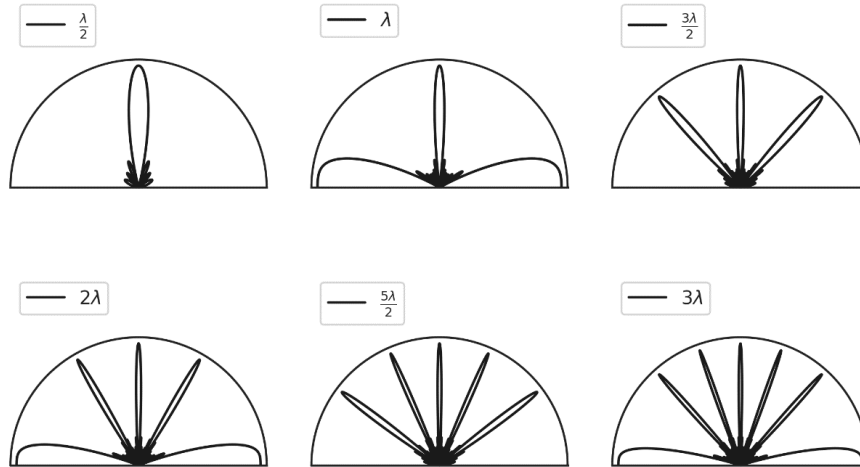


Abbildung 2. Hauptkeule und Nebenkeulen für Pitches zwischen $\lambda/2$ und 3λ , berechnet mittels Punktquellensynthese [9, 12].

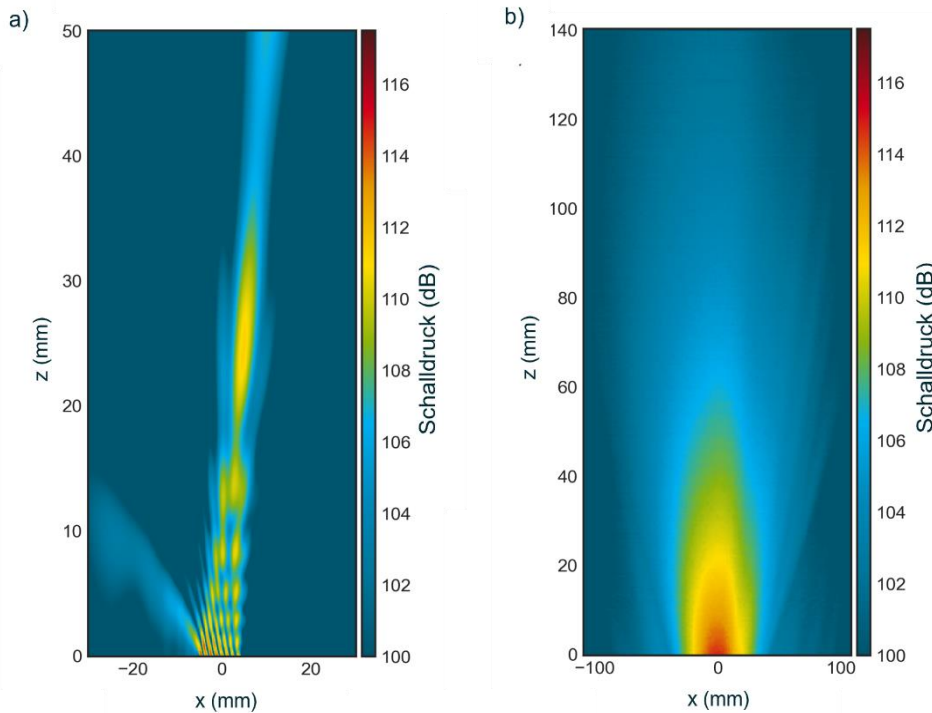


Abbildung 3.(a) Simulation des Schallfelds von einem Array mit 8 Elementen, mit dem Pitch von 1,6 mm und Schwenkwinkel 10° . (b) Messung des Schallfelds eines einzelnen Elements mit 1,4 mm Breite, gemessen mit einem optischen Mikrofon.

2.4 Schallfeldmessungen

Zwei Array-Demonstratoren mit 32 Elementen wurden gebaut und das Schallfeld jedes einzelnen Elements wurde gemessen. Die Elemente waren 1,4 mm breit, der Pitch war 1,6 mm und die Elementlänge war 20 mm. Die Messungen wurden basierend auf der neuen Richtlinie zur Charakterisierung von ACUT-Wandlern durchgeführt [13]. Als Empfänger wurde das optische Mikrofon Eta 450 Ultra von Xarion GmbH verwendet. Abbildung 3b

zeigt ein C-Scan an einem Element in der Ebene senkrecht zur Elementlänge (wie in Abb. 2 und 3a). Ein Anregungspuls mit 1,5 kV und 1,73 μs wurde verwendet.

Das resultierende Bild zeigt eine sehr breite Divergenz, wie erwartet für ein Element mit einer Breite vergleichbar mit der Wellenlänge. Diese Messungen sollten an allen Elementen durchgeführt und verglichen werden. Insbesondere wird die Variation zwischen den Elementen untersucht, die durch verschiedene Produktionsparameter entstehen kann (z.B. Verklebung, Beschichtung usw.). Aus dieser Messung wurde beim Abstand von 10 mm das A-Bild extrahiert (Abbildung 4). Der gemessene Schalldruck von 13 Pa entspricht 116 dB SPL (sound pressure level). Das ist ein vielversprechendes Ergebnis, weil sich in Betrieb Wellen von verschiedenen Elementen im Fokus addieren und damit einen deutlich höheren Schalldruck erreichen. Dieses Bild zeigt deutlich einen Vorteil von Ferroelektreten im Vergleich mit Piezokomposit-Wandlern, nämlich geringe Nachschwingung des Wandlers. Das ist auch auf dem Spektrum zu sehen, das ein eindeutig ausgeprägtes Maximum hat, das der Dickenschwingung des Ferroelektrets entspricht.

3. Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag präsentierte die letzten Entwicklungen im Bereich luftgekoppelte Phased-Array-Wandler basierend auf Ferroelektreten. Dabei wurden zunächst Simulationen des Schallfeldes des ganzen Arrays und Schallfeldmessungen an einzelnen Elementen realisiert und deuten auf einen möglichen erfolgreichen praktischen Einsatz von Ferroelektret-Arrays in ACUT. Naturgemäß werden weitere, detailliertere Versuche zeigen, ob diese Wandler für ihren Einsatz in der ACUT industriell Einsatz finden können. In der nächsten Projektphase werden Array-Wandler mit der Sende- und Empfangseinheit erprobt. Die Variation zwischen den Elementen sowie die mechanische Kreuzkopplung werden untersucht, indem mechanische und elektrische Antwort von benachbarten Elementen untersucht werden. Darüber hinaus werden Schallfeldmessungen für die Evaluierung der Schwenkung und Fokussierung notwendig.

Der Einsatz von Phased-Array-Technologie verspricht eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von ACUT. Phased-Arrays ermöglichen die elektronische Steuerung des Schallfeldes. Insbesondere das Schwenken und das Fokussieren des Schallstrahls sowie elektronisches Scannen sind von großem Interesse. Durch die elektronische Einstellung des Schwenkwinkels wird unter anderem die kontaktfreie Anregung und Detektion von geführten Wellen und damit Prüfung von Bauteilen mit einer einseitigen Zugänglichkeit erleichtert.

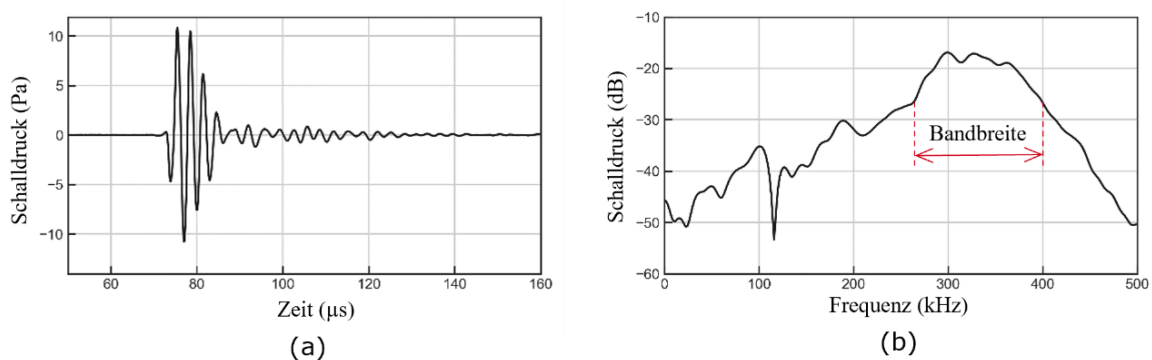


Abbildung 4. (a) A-Scan eines einzelnen Elements und (b) sein Spektrum, gemessen beim Abstand 10 mm. Angedeutet ist die 10-dB-Bandbreite.

Referenzen

- [1] D. E. Chimenti, "Review of air-coupled ultrasonic materials characterization," *Ultrasonics*, vol. 54, no. 7, pp. 1804-1816, 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2014.02.006.
- [2] B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox, "Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review," *NDT & E International*, vol. 39, no. 7, pp. 525-541, 2006, doi: 10.1016/j.ndteint.2006.03.006.
- [3] J. F. Pazos-Ospina, J. L. Ealo, and J. Camacho, "New dual-focalization ferroelectret-based array for air-coupled ultrasonic inspection of textiles," *NDT and E International*, vol. 74, pp. 50-57, 2015, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.04.007.
- [4] A. Marzo, T. Corkett, and B. W. Drinkwater, "Ultraino: An Open Phased-Array System for Narrowband Airborne Ultrasound Transmission," *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 65, no. 1, pp. 102-111, Jan 2018, doi: 10.1109/TUFFC.2017.2769399.
- [5] M. Paajanen, J. Leikkala, and K. Kirjavainen, "ElectroMechanical Film (EMFi) - a new multipurpose electret material," *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 84, no. 1, pp. 95-102, 2000, doi: 10.1016/S0924-4247(99)00269-1.
- [6] R. Kressmann, G. M. Sessler, and P. Günther, "Space-charge electrets," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 3, no. 5, pp. 607-623, 1996, doi: 10.1109/94.544184.
- [7] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, and G. M. Sessler, "Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers," *Physics Today*, vol. 57, no. 2, pp. 37-43, 2004, doi: 10.1063/1.1688068.
- [8] M. Gaal, V. Bovtun, W. Stark, A. Erhard, Y. Yakymenko, and M. Kreutzbruck, "Viscoelastic properties of cellular polypropylene ferroelectrets," *Journal of Applied Physics*, vol. 119, no. 12, pp. 125101-125101, 2016, doi: 10.1063/1.4944798.
- [9] D. Hufschläger *et al.*, "Array-Prüfköpfe für luftgekoppelte Ultraschallprüfung," presented at the DGZfP-Jahrestagung, Kassel, 23-25 May 2022, 2022.
- [10] J. Ealo, J. Camacho, F. Seco, and C. Fritsch, "Ultrasonic air-coupled inspection of textile materials using ferroelectret-based phased arrays," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation QNDE*, 2009, vol. 1211, no. 933, doi: 10.1063/1.3362529.
- [11] M. Gaal, J. Bartusch, E. Dohse, M. Kreutzbruck, and J. Amos, "Air-coupled ultrasonic testing of metal adhesively bonded joints using cellular polypropylene transducers," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation QNDE*, 2013, vol. 1581 no. 33, pp. 471-478, doi: 10.1063/1.4864857.
- [12] M. Gaal *et al.*, "Phased array probes for air-coupled ultrasonic testing based on cellular polymer," presented at the 13th European Conference for Nondestructive Testing, Lissabon, 3-7 July, 2023.
- [13] M. Gaal *et al.*, "Guideline US 08 Characterization and verification of air-coupled ultrasonic probes," ed: DGZfP, 2022.