

Array-Prüfköpfe für luftgekoppelte Ultraschallprüfung

Daniel HUF SCHLÄGER¹, Mate GAAL¹, Dirk GOHLKE¹, Matthias WEISE¹, Artur SZEWIECZEK², Wolfgang HILLGER² und Detlef ILSE²

¹Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

²Hillger NDT, Braunschweig

Kontakt E-Mail: daniel.hufschlaeger@bam.de

Kurzfassung: Seit Jahren stellt die luftgekoppelte Ultraschallprüfung eine etablierte Alternative zur konventionellen Prüfung von Leichtbaukomponenten aus den Bereichen Luft- und Raumfahrt sowie Automotive dar. Im Gegenteil zur flüssigkeitsgekoppelten Prüfung in Kontakt oder im Tauchbecken ist sie weniger invasiv und bietet daher zeitliche und finanzielle Anreize. Normalerweise wird die luftgekoppelte Prüfung mit Einzelelementschwingern in Durchschallung realisiert, wohingegen die Gruppenstrahlertechnik bereits Industriestandard im Bereich der Kontakttechnik darstellt. Die damit verbundenen Vorteile wie die aktive Fokussierung oder die gezielte Manipulation des Einschallwinkels zur Anregung von geführten Wellen finden im Bereich der luftgekoppelten Prüfung dabei noch wenig Anwendung.

Im Rahmen dieses Beitrags stellen wir die ersten Zwischenergebnisse des geförderten Projektes „PALUP – Phased- Array-Technik für Luftultraschall-Prüfungen“ vor. Ziel des Projektes ist die Entwicklung von Mehrelementschwingern auf Basis von zellulären Kunststoffen, die Entwicklung einer dedizierten Pulserstufe im Kilovoltbereich, sowie die nötige rauscharme messtechnische Auswertung jedes Einzelelements.

1 Einführung

Innerhalb der konventionellen Prüfung in Kontakttechnik sind Gruppenstrahlerprüfköpfe bereits sehr etabliert und verbreitet [1, 2]. Sie ermöglichen aufgrund ihrer elektronischen Ansteuerung eine sehr flexible Einsatzweise für komplexe Prüfzenarien. Gruppenstrahler erweisen sich aufgrund der elektronischen und Problemstellungen. Für die luftgekoppelte Ultraschallprüfung finden Gruppenstrahlerprüfköpfe nur sehr selten Anwendung [3, 4, 5], obwohl sie auch für unterschiedliche Prüfzenarien einen hohen Grad an Flexibilität aufbringen könnten.

Innerhalb dieses Beitrags werden die physikalischen und technischen Randbedingungen für den Entwurf eines Gruppenstrahlerprüfkopfs beleuchtet, welche im Rahmen des aktuell laufenden und durch die Projektträger Jülich geförderten Projektes „Phased- Array-Technik für Luftultraschall-Prüfungen“ (PALUP) erarbeitet wurden.



2 Physikalische Betrachtung und Randbedingungen

Um ein Einschallwinkel eines Schallfelds gezielt zu steuern, es zu fokussieren oder beide Aufgaben simultan zu realisieren bedarf es der Berechnung von Verzögerungszeiten für jedes einzelne Element. Die somit einhergehenden physikalischen Randbedingungen werden im Folgenden näher dargestellt. Entgegen der üblichen Vorgehensweise geschlitzte Piezokeramiken zu verwenden, wird ein anderer Ansatz verfolgt. Auf ein Substrat wird eine beschichtete ferroelektrische Folie im Ganzen auf ein Platinmaterial (printed circuit board, PCB) aufgebracht. Die eigentlichen Elemente werden durch Elektroden auf der Klebeseite der Platine gefertigt. Aufgrund der beschichteten Seite der Folie und den Elektroden bilden sich lokal unabhängige Plattenkondensatoren. Diese so erzeugten kapazitiven Elemente enthalten Folie und Klebeschicht als Dielektrikum. Verschiedene Wandlermaterialien neben Piezokeramiken finden in

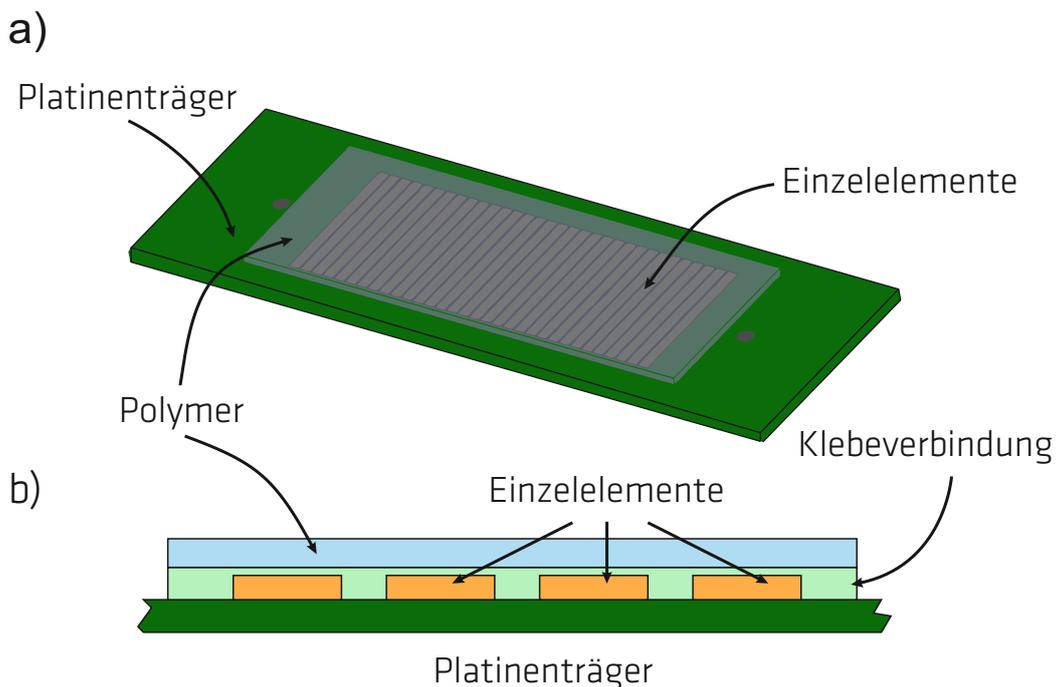
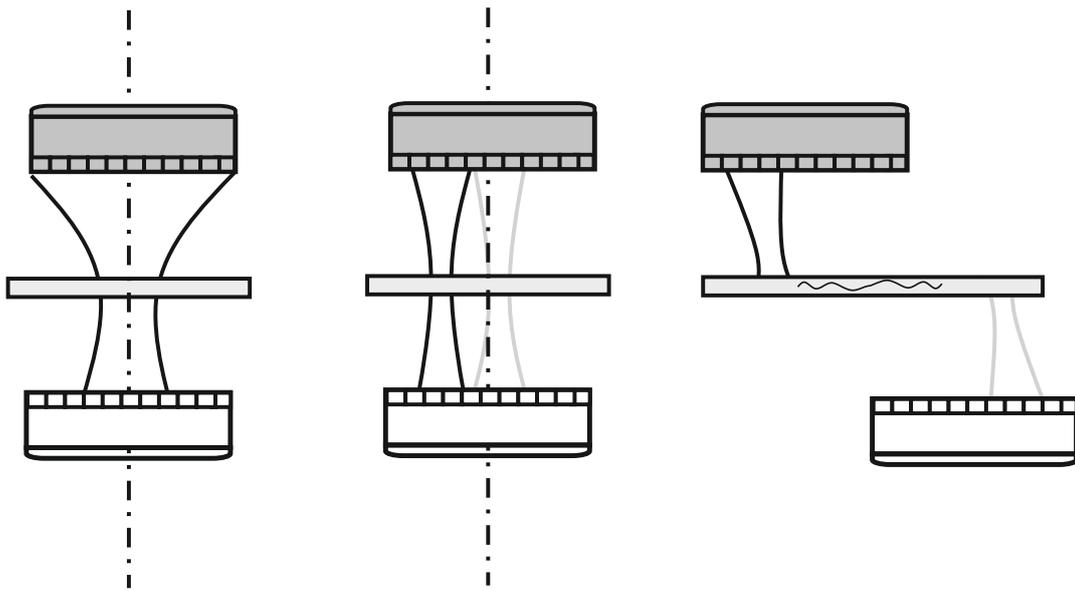


Abbildung 1. Aufbau eines luftgekoppelten Gruppenstrahlers auf Basis eines zellulären Polymers. a) 3D Modell des Prototypen und b) schematischer Aufbau als Schnittdarstellung.

bei der Erzeugung von mechanischen Wellen Anwendung. In den letzten Jahren zeigten Ferroelektrite ein sehr großes Potential und zeigten, aufgrund ihrer guten akustischen Anpassung an das Koppelmedium Luft, sich als ebenbürtig im Vergleich zu herkömmlichen Wandlern mit aufgebrachtener $\lambda/4$ -Schicht. Neben dem bereits gut erprobten zellulären Polypropylen [6] eignen sich noch weitere Materialien wie Polyethylenterephthalat (PET) oder poröses und expandiertes Polytetrafluorethylen (PTFE / ePTFE), weisen aber große Herausforderungen hinsichtlich der Verfügbarkeit oder der Beschichtungstechnik auf. Das gebräuchlichste Prüfszenario bei der luftgekoppelten Ultraschallprüfung ist die Positionierung von Sender- und Empfängerprüfkopf in der Transmissionsanordnung. Die Hauptanforderung dieser Anordnung, an den entworfenen Gruppenstrahler, liegt in der flexiblen Ansteuerung des Fokuspunktes unter konstantem Abstand zum Prüfobjekt bzw. zum Empfängerprüfkopf. Eine weitere Möglichkeit zur



a) Transmission b) Elektronischer Scan c) Geführte Wellen

Abbildung 2. Anwendungsbeispiele der luftgekoppelten Ultraschallprüfung. a) Transmissionsanordnung, b) Elektronischer Scan und c) Anregung von Geführten Wellen.

Optimierung der Prüfzeiten stellt der elektronische Scan mit Einzelementen bzw. Elementgruppen dar. Dabei werden die einzelnen Verfährwege bei der maschinellen Positionierung des Gruppenstrahlers reduziert. Ein weiteres vielversprechendes Anwendungsgebiet ist die gezielte Anregung von geführten Wellen mittels Gruppenstrahlers. Um gezielt den Einschallwinkel der Gesamtanordnung zu steuern, müssen naturgemäß alle Elemente einzeln und phasenverschoben angesteuert werden. Die Berechnung der notwendigen Phasenverschiebung $\Delta\tau$ erfolgt [7] unter Verwendung von Gleichung (1),

$$\Delta\tau = \frac{p}{c} \sin(\theta_s), \quad (1)$$

wobei p den Elementpitch, c die Schallgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium und θ_s den Einschallwinkel abbilden. Erfordert es die Applikation, den Einschallwinkel und den Fokusabstand simultan elektronisch zu steuern, lassen sich die Verzögerungszeiten [7] nach

$$\tau_n = \frac{F}{c} \left(\left[1 + \left(\frac{\bar{N}p}{F} \right)^2 + \frac{2\bar{N}p}{F} \sin \theta_s \right]^{1/2} - \left[1 + \left(\frac{(n - \bar{N}p)}{F} \right)^2 - \frac{2(n - \bar{N})p}{F} \sin \theta_s \right]^{1/2} \right), \quad (2)$$

berechnen. Dabei stellen F die gewünschte Krümmung, n den Index des aktuellen Elements und $\bar{N} = \frac{(N-1)}{2}$ den Indexierungsoffset dar. Der im Rahmen des Projektes zu realisierende

Pulser soll zunächst auf eine maximale Anzahl von acht Elementen begrenzt werden. Dabei spielen sowohl akustische Aspekte als auch Randbedingungen der Sendestufe eine entscheidende Rolle. Die bekannteste akustische Randbedingung ist das Auftreten von Gitterkeulen (engl. *grating lobes*). Gitterkeulen treten bei Pitchgrößen (Elementbreite + Elementzwischenraum) nahe und oberhalb der Wellenlänge im Propagationsmedium auf (siehe Abb. 3). Das Verhältnis zwischen Elementpitch p und Wellenlänge lässt sich mit der folgenden Gleichung abschätzen.

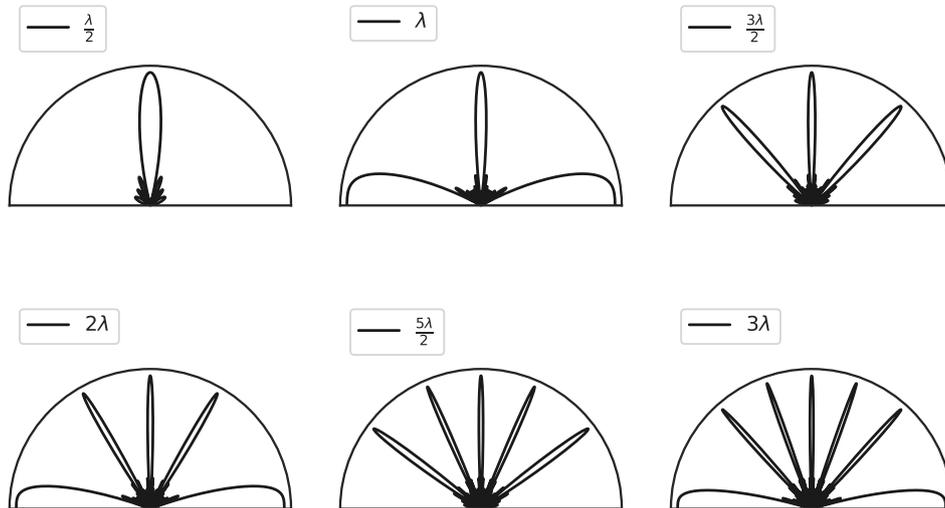


Abbildung 3. Gitterkeulen für Vielfache der Wellenlänge in Luft. Berechnet für $N = 8$ Elemente, $f = 250 \text{ kHz}$ und $c = 343 \text{ m/s}$.

chung abschätzen.

$$p \leq \frac{\lambda}{1 + \sin(\theta)}, \quad (3)$$

wobei λ die Wellenlänge im Ausbreitungsmedium und θ_s der gewünschte Einschallwinkel sind. Ist dieses Verhältnis erfüllt, können Gitterkeulen erfolgreich vermieden werden. Für die üblichen Applikationen (bspw. die Prüfung von Metallen in Kontakttechnik) ergibt sich eine Wellenlänge von $1,5 \text{ mm}$ ($c = 6000 \text{ m/s}$ und $f = 4 \text{ MHz}$). Ähnliche Abmessungen $1,3 \text{ mm}$ ($c = 343 \text{ m/s}$ und $f = 250 \text{ kHz}$) ergeben sich ebenfalls, wenn sich die emittierte Welle in Luft ausbreiten soll. Wie in Abb. 3 zu entnehmen ist, lässt sich der Einfluss von Gitterkeulen bis $3\lambda/2$ für einen Winkelbereich von $\pm 45^\circ$ theoretisch nahezu vernachlässigen.

3 Schallfeldberechnung

Zur Berechnung der resultierenden Schallfelder wurde die zweidimensionale Punktquellensynthese angewendet. Da die einzelnen Elemente Rechteckschwinger darstellen, sind diese auch einfach zu diskretisieren. Dabei wurde ein Gruppenstrahler bestehend aus acht Elementen und einem Einschallwinkel von 10° unter Variation des Elementabstandes berechnet. Die Ortsauflösung für die folgenden Simulationen betrug $\frac{\lambda}{10}$ ($\approx 140 \mu\text{m}$).

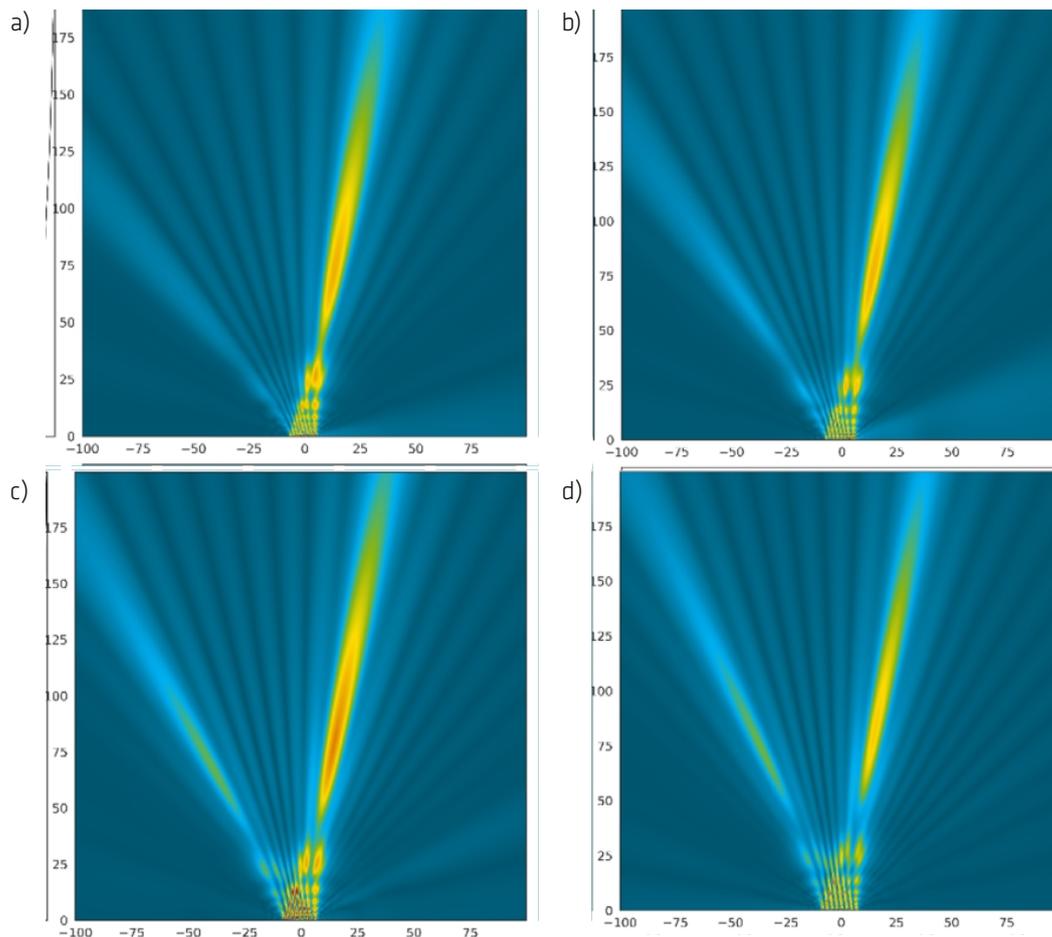


Abbildung 4. Einfluss der Elementzwischenräume auf die Erzeugung von Gitterkeulen. Elementzwischenräume zwischen 200 und 800 μm : a) 200 μm , b) 400 μm , c) 600 μm und d) 800 μm . Mit $N = 8$, $l = 20 \text{ mm}$, $b = 1,4 \text{ mm}$.

Abbildung 4 zeigt die Auswirkung der Elementzwischenräume auf das resultierende Schallfeld. Mit zunehmendem Abstand, nimmt der Einfluss der Gitterkeulen zu. Um die Randbedingungen hinsichtlich zeitlicher Auflösung und maximaler Verzögerungszeit bestimmen zu können, wurden die Verzögerungszeiten nach Gleichung (2) berechnet.

Abbildung 5 zeigt deutlich den Einfluss der Schrägeinschallung mit zusätzlicher Fokussierung. Ebenfalls zeigt Abb. 5 anschaulich, dass die Verzögerung des Einzelements und der Grad der Krümmung proportional zueinander sind.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag zeigt die aktuellen Aktivitäten zur Realisierung eines Gruppenstrahlers zur luftgekoppelten Ultraschallprüfung auf Basis eines Polymers. Es wurden die Randbedingungen, sowie die Zielstellung des Projektes präsentiert und der Weg zum Entwurf des eigentlichen Wandlers, mit samt den technischen Randbedingungen aufgezeigt.

In Folgebeiträgen soll perspektivisch die Fertigung sowie die Charakterisierung der Prototypen, sowie der Vergleich zwischen den hier gezeigten theoretischen Annahmen folgen.

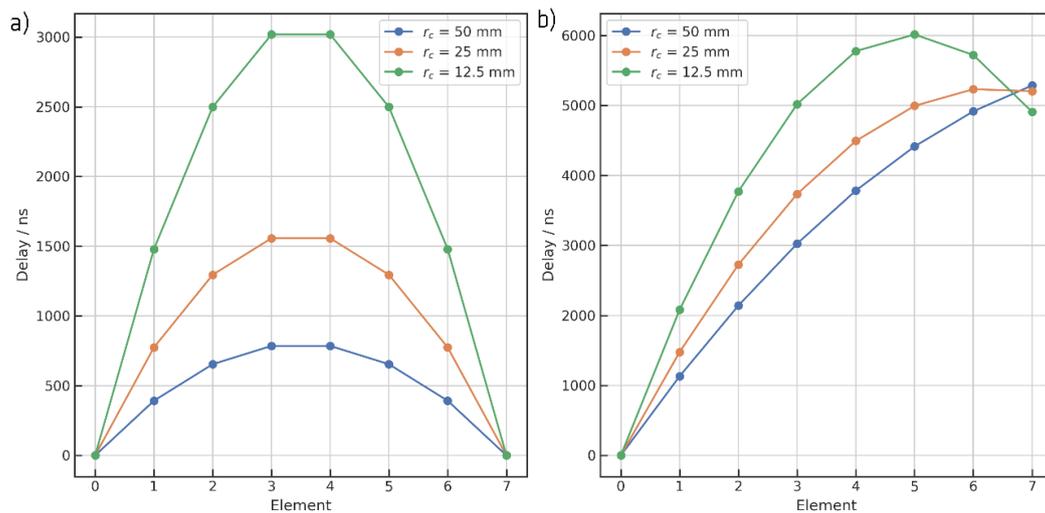


Abbildung 5. Die Verzögerungszeiten für a) Fokussierung des Schallfeld für drei verschiedene Krümmungsradien und b) simultane Fokussierung mit einem Einschallwinkel von 10° .

5 Danksagung

Die Autoren möchten sich für die finanzielle Unterstützung Technologietransferprogramm Leichtbau bedanken. Das Projekt „Phased- Array-Technik für Luftultraschall-Prüfungen“ (PALUP, Vorhaben 03LB1001A) und die somit vorgestellten Arbeiten wurden im Themenfeld „Leichtbau,“ unterstützt und erarbeitet.

Literatur

- [1] Bruce W. Drinkwater and Paul D. Wilcox. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review. *NDT and E International*, 39(7):525–541, 2006.
- [2] André Lamarre. Improved Inspection of Composite Wind Turbine Blades with Accessible Advanced Ultrasonic Phased Array Technology. *15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT2017)*, Singapore, pages 1–8, 2017.
- [3] J. F. Pazos-Ospina, F. Quiceno, Joao L. Ealo, H. Ruben Dario Muelas, and J. Camacho. Focalization of acoustic vortices using phased array systems. *Physics Procedia*, 70:183–186, 2015.
- [4] Asier Marzo, Tom Corkett, and Bruce W. Drinkwater. Ultraino: An Open Phased-Array System for Narrowband Airborne Ultrasound Transmission. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 65(1):102–111, 2018.
- [5] Axel Jager, Dominik Grobkurth, Matthias Rutsch, Alexander Unger, Rene Golinske, Han Wang, Steve Dixon, Klaus Hofmann, and Mario Kupnik. Air-coupled 40-kHz ultrasonic 2D-phased array based on a 3D-printed waveguide structure. In *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS*, pages 1–1. IEEE, 2017.

- [6] Mate Gaal, Viktor Bovtun, Wolfgang Stark, Anton Erhard, Yuriy Yakymenko, and Marc Kreuzbruck. Viscoelastic properties of cellular polypropylene ferroelectrets. *Journal of Applied Physics*, 119(12):125101, mar 2016.
- [7] L. Azar, Y. Shi, and S. C. Wooh. Beam focusing behavior of linear phased arrays. *NDT and E International*, 33(3):189–198, apr 2000.