

Thermoakustische Gruppenstrahler: Theorie und Anwendungen

Daniel HUF SCHLÄGER¹, Dirk GOHLKE¹, Matthias WEISE¹, Klaas BENTE²,
Mate GAAL¹

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

² Health and Medical University (HMU), Potsdam

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

Kurzfassung. Bei der Prüfung von Werkstücken mit empfindlichen Oberflächen oder auch hydrophilen Werkstoffen sind traditionelle ultraschallbasierte zerstörungsfreie Prüfmethode n wie die Kontakttechnik oder die Tauchtechnik in vielen Anwendungsfällen aufgrund der Flüssigkeitsankopplung nicht anwendbar.

Die luft-gekoppelte Ultraschallprüfung umgeht diese Problematik und eröffnet neue Prüfzenarien. Derzeit werden zwei Varianten der Schallerzeugung als vielversprechend angesehen: ferroelektrische Folien und thermoakustische Dünnschichtwandler. Thermoakustische Wandler ermöglichen die resonanzfreie Erzeugung von Ultraschall und somit kurze zeitliche Impulse sowie eine sehr breitbandige Anregung. Durch die Verwendung von gekrümmten Substraten ist sowohl eine Herstellung von planaren als auch fokussierten Wandlern möglich.

Dieser Beitrag präsentiert die letzten Forschungsergebnisse im Bezug auf thermoakustischen Wandlern, welche derzeit in einen thermoakustischen Gruppenstrahler münden. Gruppenstrahler erlauben die simultane Änderung des Einschallwinkels, sowie die Verschiebung des Fokuspunktes während der Verwendung.

Durch die Verbindung beider Schlüsseltechnologien, der thermoakustischen Anregung und des Gruppenstrahlerprinzips, wird das Spektrum der klassischen ZFP-Anwendungen, sowie moderner Ansätze wie der Anregung von geführten Wellen oder der Strukturüberwachung erheblich erweitert und bereichert.

Dabei soll innerhalb dieses Beitrages auf die Modellierung des Schallfeldes, die elementweise Charakterisierung und verschiedene Anwendungsszenarien eingegangen werden.

1. Einführung

Die Erzeugung und das Detektieren von akustischen Wellen ist jeher ein interdisziplinär genutztes Werkzeug in zahlreichen Forschungsgebieten. Die vielseitigen Applikationen reichen dabei von der Aufnahme von Sprachsignalen und Musik, über die Detektion von Teilentladungen, der Lokalisierung von Inhomogenitäten, der Materialcharakterisierung und bis hin zur Charakterisierung von akustischen Quellen. Nichtsdestotrotz, jede Technologie besitzt ihre spezifischen Grenzen wie bspw. eine eingeschränkte Bandbreite oder aber ungenaue Materialkennwerte innerhalb des zugrundeliegenden physikalischen Modells auf. Daher haben sich im Laufe der Zeit verschiedene Lösungsansätze wie Kondensatormikrofone, thermographische Aufnahmen [1], optische Mikrofone [2] oder die akustische Partikelgeschwindigkeitsspektroskopie [3] erarbeitet, um bestenfalls diese Einschränkungen

zu umgehen. Ein weiterer Ansatz ist die Nutzung von Gasentladungen bzw. deren Wechselwirkung mit ihrer Umgebung. Diese plasma-akustischen Quellen können sowohl durch einen Volumenstrom [4] als auch aufgrund ihrer thermischen Interaktion [5] als akustische Quelle agieren.

1.1 Thermoakustische Sender

Bei thermoakustischen Sendern handelt es sich um Schallquellen, die in der Lage sind, sehr breitbandige akustische Signale zu erzeugen. Anders als bei den gebräuchlichen Dickenschwingern, handelt es sich bei thermoakustischen Quellen nicht um oszillierende Feder-Masse-Systeme, sondern das Ankopplungsmedium vor dem Wandler wird sehr schnell aufgeheizt. Diese schnelle Änderung in der Energie verursacht eine Dichteänderung im Gasvolumen und breitet sich weiter aus. Es existieren unterschiedliche Ansätze für die Realisierung von thermoakustischen Quellen wie bspw. frei hängende Leiter, gewebte Netze aus Graphen und Dünnschichtwandler. Der hier vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit Dünnschichtwandlern basierend auf Quarzglassubstraten mit einer Indium-Zink-Oxid (ITO) Beschichtung [6], [7]. Die Übertragungsfunktion der thermoakustischen Wandler hängt dabei im Wesentlichen von der aufgetragenen Schichtdicke, den thermischen Eigenschaften des Substrates und des Ausbreitungsmediums, sowie der Frequenz f ab und lässt sich dabei wie folgt modellieren

$$A_{TA}(f) = Q_{in,th} \frac{\alpha_{Sub}}{\alpha_{Sub} + \alpha_{Gas} + d_{Film} \rho_{Film} c_{p,Film} \sqrt{2\pi f}}, \quad (1)$$

wobei $Q_{in,th}$ die eingebrachte thermische Energie, α_{Sub} und α_{Gas} sind die thermischen Effusivitäten für das genutzte Substrate und das Ausbreitungsmedium. Die Eigenschaften (Filmdicke d_{Film} , die Dichte ρ_{Film} and the spezifische Wärmekapazität $c_{p,Film}$) der Beschichtung wirken sich dabei stark auf den resultierenden Frequenzgang aus. Für eine rechteckförmige Anregung ergibt sich eine frequenzabhängige Übertragungsfunktion [8]

$$p_{TA}(f) = \frac{\sin(\pi f t_{th})}{\pi f} \times \left| \frac{U_{in,el}^2 S_{Film}}{\kappa_{Film} l_{Film}} t_{th} f_{prf} \right| \times \frac{\alpha_{Sub}}{\alpha_{Sub} + \alpha_{Gas} + d_{Film} \rho_{Film} c_{p,Film} \sqrt{2\pi f}} \times \frac{3}{2\pi} \left(\frac{f}{c_0} \right)^3, \quad (2)$$

1.2 Thermoakustische Gruppenstrahler

Bei Gruppenstrahlern (engl. phased-array) handelt es sich im Wesentlichen um konventionelle Einschwingersysteme, welche entweder in einer Richtung als lineare Strahlergruppe oder in zwei Richtungen als Matrixarray realisiert werden können. Der entscheidende Unterschied zum konventionellen Wandler ist die gezielte Ansteuerung eines jeden Elementes. Das ermöglicht die Nutzung von essenziellen Funktionen wie bspw. der elektronischen Fokussierung oder dem elektronischem Winkelschwenk mit einer höheren Flexibilität als bei den passiven Methoden (bspw. Linsen, geformte Aperturen oder Vorlaufkeilen). Typische Anwendung für Gruppenstrahler sind dabei die klassische Durchschallung, der elektronische Scan und Anordnungen in denen gezielt geführte Wellen in Festkörpern angeregt werden sollen. Da der thermokaustische Effekt nicht reziprok arbeitet, sind diese Art von Quellen nicht in der Lage akustische Wellen zu detektieren. Daher wurde für die Detektion der akustischen Wellen ein Lasermikrofon der Firma Xarion (ETA

450 Ultra) eingesetzt, welches ebenfalls nahezu breitbandig ist und einen Frequenzbereich von 10 Hz bis 2 MHz abdeckt. Dabei hängt die Performanz von Gruppenstrahlern signifikant von Elementpitch (Elementbreite + Spaltbreite) und der geforderten Wellenlänge ab.

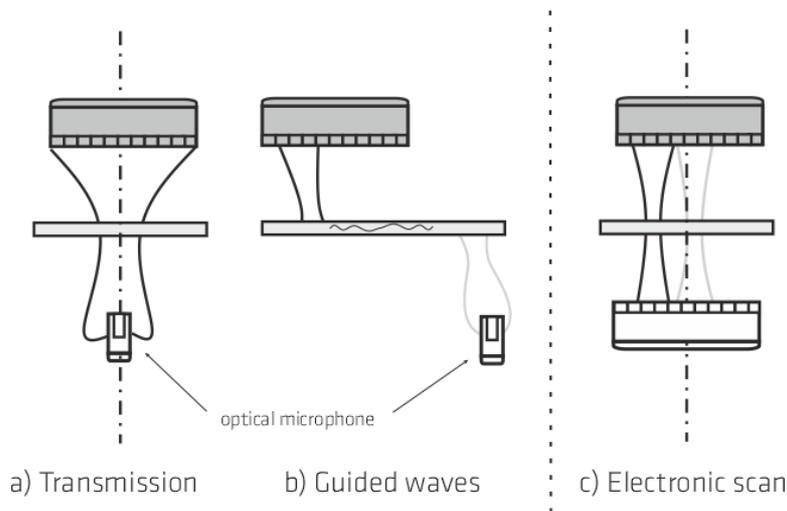


Abb 1. Mögliche Prüfzenarien für thermoakustische Array-Sender (a, b) mit Verwendung von einem optischen Mikrofon und c) von einem Phased-Array-Empfänger basierend auf Ferroelekturen.

Dabei kann der notwendige Pitch durch Gleichung (3) zu mindestens für die Winkeleinschallung für eine Abschätzung genutzt werden.

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

2. Dabei beischreibt p den Elementpitch, λ die akustische Wellenlänge und θ_s den geforderten Einschallwinkel. Diese Abschätzung garantiert die Vermeidung von Gitterkeulen (engl. grating lobes), welche durch die geometrischen Abmessungen des Gruppenstrahlers erzeugt werden. Da es sich jedoch bei dem vorgestellten thermoakustischen Gruppenstrahler um eine breitbandige Quelle handelt, wurde die beiden experimentellen Untersuchungen entweder von der Mittenfrequenz des Empfängers oder von der am stärksten angeregten Frequenzkomponente ausgegangen um Elementgröße und Spaltbreite festzulegen. Experimentelle Durchführung, Prototypen und Versuchsaufbauten

Es wurden zwei unterschiedliche Arten von Prüfköpfen miteinander verglichen: 1) Einzelement-Wandler mit rechteckiger sphärisch gekrümmter Apertur (mit unterschiedlicher Schichtdicke der aufgetragenen ITO-Schicht) und 2) ein planarer Lineararray mit acht Elementen. Für die Einzelementwandler wurden bereits erste Ergebnisse vorgestellt [8]. Abbildung 2 zeigt einen der ersten Prototypen des Lineararrays, welches aus acht Einzelementen mit Widerstandswerten um 50Ω aufweisen. Da der thermoakustische Effekt elektrische Leistung in Schalldruck umwandelt, besteht der Prüfkopf selbst aus drei nacheinander gelagerten Stufen: 1) Verzögerungseinheit, 2) Pulserzeugung und 3) Leistungsstufe. Alle drei Stufen sind direkt in das Prüfkopfgehäuse integriert und ermöglichen somit einen hohen Freiheitsgrad und hohe Flexibilität.

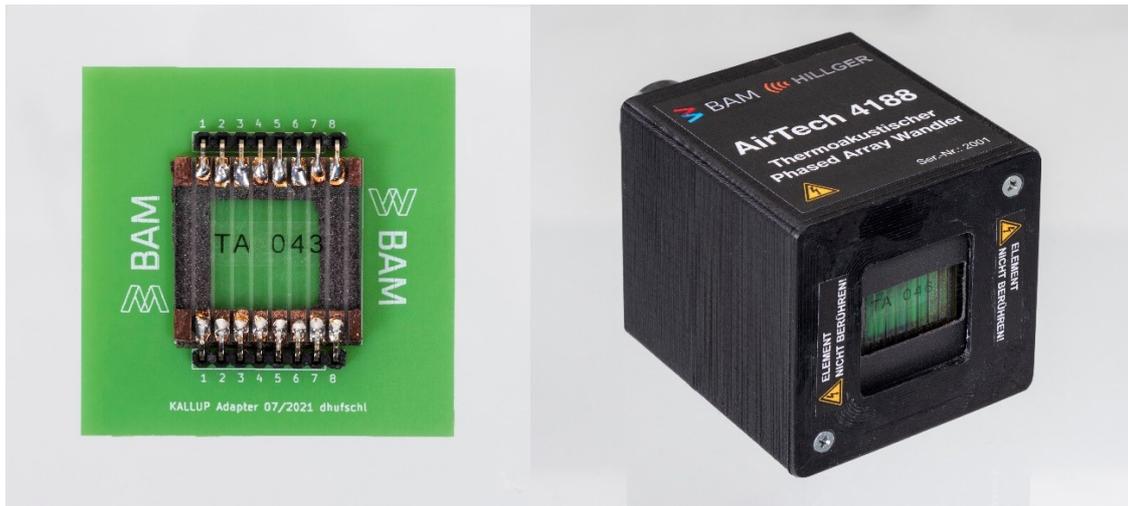


Abb 2. a) Thermoakustischer Gruppenstrahler mit acht Elementen ohne Gehäuse und Verzögerungsstufe. b) Kompletter Gruppenstrahler (mit Leistungsstufe, Pulserzeugung und Verzögerungsstufe) für acht Elemente.

Für die Inbetriebnahme der Prototypenwandler wurden erste Messungen für die zwei avisierten Hauptapplikationen a) Durchschallung und b) für die Anregung von geführten Wellen durchgeführt.

3. Ergebnisse

Abb. 3 zeigt B-Bild und Zeitsignal bei der Durchschallung einer 3 mm starken Platte aus Acrylglas. Die angelegte Spannung betrug 500 V und alle Elemente wurden unverzögert mit Rechteckimpulsen mit einer Dauer von 500 ns und einer Pulsfolgefrequenz von 50 Hz angesteuert. Die resultierende Gesamtleistung beträgt dabei 1 W.

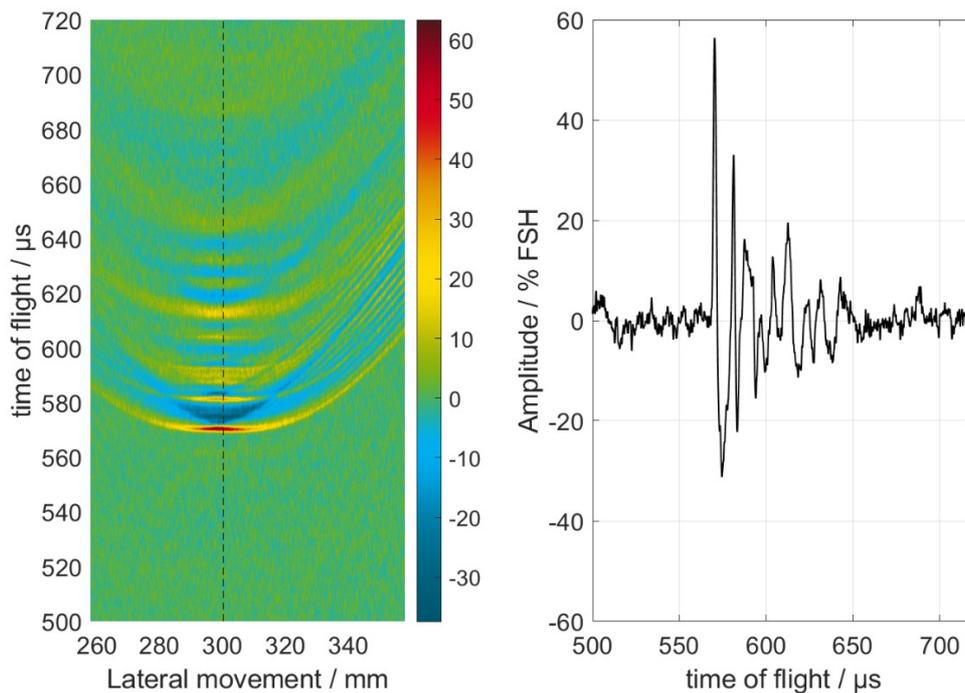


Abb 3. Ergebnisbilder einer Prüfung in der Durchschallungsanordnung und unter Nutzung des thermoakustischen Gruppenstrahlers (acht aktive Elemente) und einem optischen Mikrofon als Empfänger. Durchschallt wurde eine Acrylglasplatte mit einer Dicke von 3 mm.

Durch die erfolgreichen Ergebnisse bei der Durchschallung, untersucht wird die Gesamtperformance der Sendestufe bei der Winkeleinschallung, der elektronischen Fokussierung und der Anregung von geführten Wellen. Abbildung 4 zeigt ein resultierendes B-Bild der erfolgreichen Anregung von geführten Wellen. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass zwei Moden, die A_0 - und die S_0 -Mode angeregt werden konnten, da sich die Wellenfront auf der linken Seite langsamer als auf der rechten Seite ausbreitet.

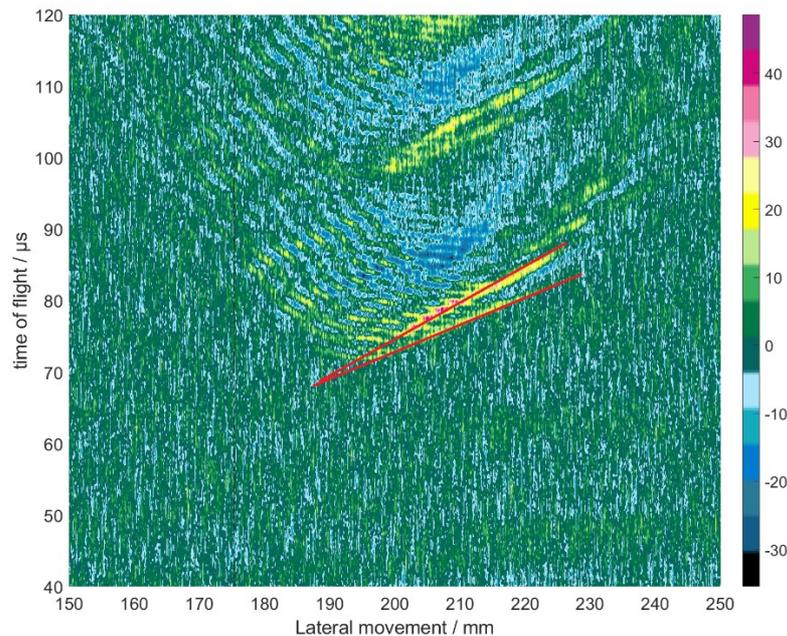


Abb 4. Anregung von geführten Wellen in einer PVC-Platte mit drei Millimeter Materialstärke. Die Anregung erfolgte mit einem thermoakustischem Gruppenstrahler unter Nutzung eines Einschallwinkels von 12 Grad bzw. den korrespondierenden Verzögerungszeiten.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag präsentierten wir einen neuen Ansatz zur Realisierung von breitbandigen Gruppenstrahlern für die luftgekoppelte Ultraschallprüfung. Die gezeigten Wandler basieren dabei auf dem thermoakustischen Effekt. Weiterhin wurde ihre Performanz bezüglich ausgewählter Anwendungen für Gruppenstrahler gezeigt.

Die Beschichtungsqualität, sowie die Optimierung des gewählten Substrates werden Gegenstand weiter Beiträge sein.

Referenzen

- [1] K. Melde, T. Qiu, und P. Fischer, „Fast spatial scanning of 3D ultrasound fields via thermography“, *Appl. Phys. Lett.*, Bd. 113, Nr. 13, S. 133503–133503, Sep. 2018, doi: 10.1063/1.5046834.
- [2] B. Fischer, „Optical microphone hears ultrasound“, *Nat. Photonics*, Bd. 10, Nr. 6, S. 356–358, Juni 2016, doi: 10.1038/nphoton.2016.95.
- [3] Q. Leclère und B. Laulagnet, „Particle velocity field measurement using an ultra-light membrane“, *Appl. Acoust.*, Bd. 69, Nr. 4, S. 302–310, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.apacoust.2006.11.009.
- [4] M. Liess, „A two dimensional ionic anemometer for very low flow rates“, *Sens. Actuators Phys.*, Bd. 276, S. 111–117, Juni 2018, doi: 10.1016/j.sna.2018.04.015.

- [5] O. Bölke, D. A. Lacoste, und J. P. Moeck, „Low-frequency sound generation by modulated repetitively pulsed nanosecond plasma discharges“, *J. Phys. Appl. Phys.*, Bd. 51, Nr. 30, S. 305203–305203, Aug. 2018, doi: 10.1088/1361-6463/aacc93.
- [6] M. Daschewski, M. Kreutzbruck, J. Prager, E. Dohse, M. Gaal, und A. Harrer, „Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall“, *Tm - Tech. Mess.*, Bd. 82, Nr. 3, S. 156–166, Jan. 2015, doi: 10.1515/teme-2014-0020.
- [7] M. Daschewski, „Thermophony in real gases Theory and applications“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/index/index/searchtype/simple/query/%2A%3A%2A/browsing/true/doctypenfq/doctoralthesis/start/0/rows/10/facetNumber_author_facet/all/author_facetfq/Daschewski%2C+Maxim/docId/9886
- [8] D. Hufschläger, M. Gaal, und M. Ahmadzadeh, „Simulation und Vermessung von thermoakustischen Schallquellen“, in *DGZfP-Jahrestagung*, Koblenz, 2022, S. 7.