

# Einsatz von Luftultraschall-Sensoren mit geringer akustischer Impedanz

Mate Gaal<sup>1</sup>, Joachim Döring<sup>1</sup>, Jürgen Bartusch<sup>1</sup>, Gerhard Brekow<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin, E-Mail: [mate.gaal@bam.de](mailto:mate.gaal@bam.de)

## Einleitung

Neben den typischen Anwendungsgebieten des Luftultraschalls – der Abstandsmessung, der Objektortung und -erkennung und dem Bau der parametrischen Lautsprecher – wird er auch für zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) eingesetzt [1][2]. Vor allem sind die Frequenzen von 20 kHz bis 1 MHz für technische Anwendungen relevant, weil höhere Frequenzen eine höhere Dämpfung im Material und in der Luft aufweisen.

In der ZfP stellen Luftspalte im Schallweg ausgezeichnete Reflektoren dar. Deswegen nutzt die klassische ZfP mit Ultraschall Flüssigkeiten als Koppelmedium zwischen dem Wandler und dem Prüfkörper. Allerdings kann das Koppelmedium für manche Prüfkörper unerwünscht oder schädlich sein. Für die Prüfung von Gegenständen mit empfindlicher Oberfläche ist deswegen Luftultraschall besonders geeignet. Er wird bei porösen Materialien, faserverstärkten Kunststoffen, korrosionsempfindlichen Oberflächen und bei hygienisch problematischen Produkten in der Textil- und Nahrungsmittelindustrie verwendet.

Die größte Schwierigkeit bei Luftschallsensoren ist die Impedanzanpassung, sowohl der elektrischen als auch der akustischen Impedanz. Große Sprünge der akustischen Impedanz sind zwischen dem Wandler und der Luft, sowie zwischen dem zu prüfenden Gegenstand und der Luft zu finden. Der Impedanzunterschied zwischen Metallen und der Luft verursacht eine Verminderung des Signals von bis zu 120 dB, 60 an jeder Mediengrenze.

In diesem Artikel werden verschiedene Methoden der Anpassung der akustischen Impedanz bei Luftschallsensoren vorgestellt. Zuerst werden die Wirkungsprinzipien der Anpassschichten bei piezoelektrischen Dickenschwingern beschrieben, dann die Verwendung von hohem Luftdruck, kapazitive Wandler und schließlich Wandler aus Polypropylen-Schaumfolie. Anschließend werden andere wichtige Größen für die Charakterisierung von luftgekoppelten Sensoren vorgestellt: der Kopplungsfaktor und die FOM („figure of merit“), die die Energieübertragung beschreiben.

## Luftschallsensoren

### Anpassschichten bei piezoelektrischen Wandlern

Die Fehlanpassung zwischen dem Wandler und der Luft wird bei Wandlern aus piezoelektrischen Materialien durch die Anwendung von Anpassschichten teilweise behoben [1]. Die Anpassschichten haben eine Dicke von  $\lambda/4$  und eine akustische Impedanz zwischen den Impedanzen der Luft und des Wandlmaterials. Deswegen werden sie auch  $\lambda/4$ -Schichten genannt. Für eine vollständige akustische Transparenz sind zwei Bedingungen erforderlich: das Signal muss sinusförmig sein und die Impedanz der Anpassschicht muss genau der geometrischen Mitte zwischen den zwei anzupas-

senden Impedanzen gleichkommen. In Wirklichkeit ist keine von diesen Bedingungen erfüllt, so dass keine ideale Impedanzanpassung stattfindet. Ein Nachteil der  $\lambda/4$ -Schichten ist ihre filterähnliche Wirkung, wodurch Signale schmalbandiger (länger) werden, was für eine genaue zeitliche Auflösung nachteilig ist.

### Erhöhung des Luftdrucks

Für die Anwendung von Luftschall in der zerstörungsfreien Prüfung ist auch die Anpassung an den zu prüfenden Gegenstand wichtig. Die 60dB-Verluste an der Grenze zwischen der Luft und dem Prüfgegenstand können durch die Erhöhung des Luftdrucks und dadurch der Luftdichte vermindert werden. Ein Druckluft-Gleitschuh wurde speziell für diese Anwendung entwickelt [3][4]. Durch einen Druck von 10 bar wurde bei der Durchschallung eines Testkörpers eine 100-fache Erhöhung (40 dB) der Signalamplitude am Empfänger erreicht. Die entstehenden Luftverwirbelungen führten allerdings zur erheblichen Störung des Luftschallfeldes, so dass diese Methode doch keinen Erfolg brachte.

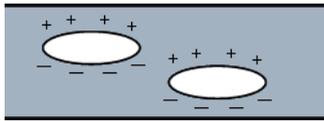
### Kapazitive Wandler

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von kapazitiven Wandlern (CMUTs, capacitive micromachined ultrasonic transducers) [1]. Im Wesentlichen funktionieren sie wie Kondensatormikrofone, wobei eine Leiterplatte und eine auf sie angebrachte dünne Membrane einen Kondensator bilden. Sie werden sowohl als Sender als auch als Empfänger verwendet. Die Spannung, bei der die Membrane auf die Leiterplatte fällt, wird Kollapsspannung genannt. Die CMUTs werden mit einer Spannung möglichst dicht an der Kollapsspannung getrieben, um die Effizienz der Energieübertragung zu maximieren. Wegen der geringen Steifigkeit der Membrane ist die Impedanzanpassung an die Luft sehr gut, aber wegen der durch die Kollapsspannung vorhandenen Begrenzung der Anregungsspannung können sie im Frequenzbereich bis 1 MHz nicht so hohe Empfindlichkeit erreichen, wie die Sensoren mit piezoelektrischen Wandlern.

### Poröses Polypropylen

In den letzten Jahren hat sich poröses Polypropylen (pPP) als geeignetes Material für Luftschallwandler erwiesen [5][6][7][8]. Die Zellen dieses Polymerschaums werden durch eine Gleichspannungs-Koronaaufladung polarisiert. Durch die erzeugte Polarisierung (Abbildung 1) nimmt dieses Material piezoelektrische Eigenschaften an.

Die spezifische akustische Impedanz des pPP wird als Produkt seiner Dichte (ca. 330 kg/m<sup>3</sup>) und der Schallgeschwindigkeit in der Schwingungsrichtung (ca. 80 m/s) berechnet. Sie beträgt ungefähr 0,020 bis 0,028 Mrayl, was deutlich kleiner ist, als bei anderen piezoelektrischen Materialien, vgl. Tabelle 1.



**Abbildung 1:** Zellularem Polypropylen, schematische Darstellung der Polarisierung.

**Tabelle 1:** Die wichtigsten Parameter für verschiedene Wandlmaterialien: PZT-Keramik (Bleizirkoniumtitanat), Verbundwerkstoff PZT+Polymer, PVDF (Polyvinylidenfluorid) und pPP (poröses Polypropylen)

	PZT-Keramik	Verbundwerkstoff (PZT mit Polymer)	PVDF	pPP
Z [Mrayl] akustische Impedanz	25-37*	6,5*	3,9*	0,020 bis 0,028**
k Kopplungs-faktor	0,35 bis 0,55*	0,65*	0,11 bis 0,15*	0,06 bis 0,12**
FOM [10 <sup>4</sup> Mrayl <sup>-2</sup> ] figure of merit	ca. 0,06	42	0,19	200 bis 2000
*aus der Literatur, **eigene Messungen				

### Andere bedeutende Wandlerparameter

Die FOM (figure of merit) beschreibt die Energieübertragung auf der ganzen Strecke zwischen dem Sender und dem Empfänger in der Luft [2] und damit auch die Eignung eines Wandlmaterials für Luftschall. Sie wird als

$$FOM = 10^4 \frac{k^4}{Z^2} \quad [10^4 \text{ Mrayl}^{-2}] \quad (1)$$

definiert, wobei  $Z$  die spezifische akustische Impedanz und  $k$  den Kopplungsfaktor bezeichnen. Das Quadrat des Kopplungsfaktors beschreibt den Anteil der elektrischen Energie, der in die mechanische umgewandelt wird [9].

Die FOM für die pPP-Folie liegt deutlich höher als für andere Materialien (Tabelle 1). Bei Keramikwandlern wird die Energieübertragung durch die Anwendung von Anpassschichten erheblich verbessert. Allerdings kann auch der Wert von 200 für die FOM des pPP durch Hochspannungsanregung erhöht werden. Die in der Tabelle 1 aufgeführten Werte für  $Z$  und  $k^2$  von pPP wurden nämlich für kleinere Spannungen gemessen. Bei einer Anregung von 3 kV tritt aber ein starker elektrostrikativer Effekt an dem Sender auf [8][10]. Messungen haben gezeigt, dass bei hoher Spannung die FOM für die ganze Messstrecke Sender-Empfänger sechzehnfach erhöht werden kann.

Mit pPP-Wandlern und mit Hochspannungsanregung ist es möglich, einen Signal-Rausch-Abstand zu erreichen, der mit dem der angepassten Keramikwandler vergleichbar ist, was auch experimentell bestätigt wurde. Mehrere Paare von Keramikwandlern mit Anpassschichten wurden mit einem Paar

pPP-Wandler an einer Durchschallung einer 3 mm dicken Aluminiumplatte verglichen. Der höchste Signal-Rausch-Abstand unter den Keramikwandlern wurde mit Sensoren Ultran NCT 200 erreicht. Mit pPP-Wandlern war der Signal-Rausch-Abstand um 11 dB höher.

Ein großer Vorteil der Sensoren mit pPP-Folien wäre ihr niedriger Preis, weil sich die aufwändige Herstellung von Anpassschichten erübrigt. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Erzeugung eines breitbandigen Impulses. Bezüglich der Sicherheit ist die Hochspannungsanregung von pPP-Folien nicht bedenklich, weil sich die Impulse in der Größenordnung 1  $\mu$ s befinden.

### Schlussfolgerungen

Die niedrige akustische Impedanz des pPP ist sein größter Vorteil im Vergleich mit anderen Wandlmaterialien, die für Luftschallsensoren verwendet werden. Sein Nachteil ist der kleine Kopplungsfaktor. Wenn mit Hochspannung betrieben, haben pPP-Wandler eine Empfindlichkeit, die mit der der herkömmlichen Wandler mit Anpassschichten ähnlich ist. Modifizierungen der pPP-Folie bieten Möglichkeiten für die Veränderung der Bandbreite. Ein weiterer Vorteil der pPP-Wandler ist ihre einfache und preiswerte Bauweise. Alle diese Faktoren deuten auf das große Potenzial des pPP für den Bau von luftgekoppelten Wandler.

### Literatur

- [1] Lerch, R.; Sessler, G; Wolf, D.: Technische Akustik. Springer-Verlag, Berlin, 2009
- [2] Döring, J.; Bovtun, V.; Bartusch, J.; Erhard, A.: Eigenschaften von Polypropylen- und PVDF-Folien für Luftschall-Anwendungen. DACH-Jahrestagung 2004
- [3] Gräfe, B.: Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile. Dissertation an der TU Berlin, 2008
- [4] Gebhardt, W.: Einsatz von luftgekoppelten Ultraschall-Leistungswandlern in der Zfp. DGZfP-Jahrestagung, Celle, 1999
- [5] Bauer, S.; Gerhard-Multhaupt, R.; Sessler, G.: Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers. Physics Today, Volume 57, Issue 2, pp. 37-44 (2004)
- [6] Bovtun, V.; Döring, J.; Bartusch, J.; Beck, U.; Erhard, A.; Yakymenko, Y.: Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers. Appl. Phys. A. Vol. 88 (2007), pp. 737-743
- [7] Bovtun, V.; Döring, J.; Wegener, M.; Bartusch, J.; Beck, U.; Erhard, A.; Borisov, V.: Air-coupled ultrasonic applications of ferroelectrets. Ferroelectrics 370 (2008), pp. 11-17
- [8] Döring, J.; Bovtun, V.; Bartusch, J.; Erhard, A.; Kreutzbruck, M.; Yakymenko, Y.: Nonlinear electromechanical response of the ferroelectret ultrasonic transducers. Veröffentlichung ist angenommen und folgt in Appl. Phys. A (2010)
- [9] Ikeda, T.: Fundamentals of piezoelectricity. Oxford University Press, 1990
- [10] Hillebrand, J.; Sessler, G. M.: DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric  $d_{33}$ -coefficients. J. Appl. Phys. Vol. 103, Issue 7 (2008), pp. 074103-074103-7