

Schwingverhalten des Ferroelektret-Senders für Luftultraschall

Mate GAAL*, Jürgen BARTUSCH*, Maxim DASCHEWSKI*, Elmar DOHSE*, Enrico KÖPPE*, Matthias WEISE*, Wolfgang HILLGER**, Marc KREUTZBRUCK*

* BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung,
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin; mate.gaal@bam.de

** Ingenieur-Büro Dr. Hillger, Wilhelm-Raabe-Weg 13,
38110 Braunschweig, hillger@dr-hillger.de

Kurzfassung. Beim Bau von Ultraschallwandlern für luftgekoppelte Prüfung ist auf die Anpassung der akustischen Impedanz des Wandlers besonders zu achten. Die herkömmlichen Ultraschallwandler für luftgekoppelte Prüfung bestehen aus einer piezoelektrischen Keramik und mehreren Anpassschichten. Ihre Herstellung ist allerdings sehr anspruchsvoll. Daher wurden Ferroelektrete als piezoaktive Materialien für Wandler erprobt. Ferroelektrete sind zelluläre polarisierte Polymere, die ferroelektrische und piezoelektrische Eigenschaften aufweisen. Insbesondere polarisiertes zelluläres Polypropylen hat sich als gutes Wandlermaterial erwiesen. Durch seine außergewöhnlich niedrige akustische Impedanz von 0,028 MRayl lässt sich der Einbau einer Anpassschicht vermeiden. Wegen eines außergewöhnlich niedrigen Elastizitätsmoduls im MPa-Bereich kommt es zu einer erheblichen Dickenänderung des Ferroelektret-Senders durch die elektrostatische Anziehungskraft zwischen den Elektroden. Dieser Beitrag zur Dickenänderung wird als elektrostriktiver Effekt bezeichnet. Er wächst mit dem Quadrat der Anregungsspannung, so dass er für Spannungen über 1kV sogar größer ist als der piezoelektrische Effekt. Es wurden Luftultraschall-Sender und -Empfänger aus zellulärem Polypropylen entwickelt. In diesem Beitrag werden die Schwingungen des Senders vorgestellt. Sie wurden mittels Laser-Doppler-Vibrometrie in der Abhängigkeit von dem Anregungsimpuls mit Spannungen bis 2kV vermessen. Die Messergebnisse wurden mit einem einfachen physikalischen Model ausgewertet, mit dessen Hilfe die piezoelektrischen und elektrostriktiven Effekte auseinander gehalten werden. Es wurde ein effektiver Schalldruck über 140 dB direkt am Wandler gemessen.

1. Luftultraschall und Ferroelektret-Wandler

Luftgekoppelter Ultraschall wird für die Prüfung von Oberflächen angewendet, die durch die Anwendung von Koppelmittel beschädigt werden können [1,2]. Der größte potentielle Markt ist die Prüfung von Komponenten aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK), der



immer öfter in der Luftfahrtindustrie und künftig auch in der Autoindustrie eingesetzt wird [3]. Die größte Herausforderung für Luftultraschall ist die Anpassung der akustischen Impedanz der Wandler an die Luft. Typischerweise wird das durch Anpassschichten erreicht [4], allerdings haben sie viele Nachteile, z.B. die Anpassschichten verkleinern die Bandbreite, die Verklebung kann sich ablösen und es entstehen zusätzliche unerwünschte Schwingungsmoden.

Eine vielversprechende Alternative zu piezokeramischen Wandlern mit Anpassschichten sind Ferroelektret-Wandler, insbesondere Wandler aus zellulärem Polypropylen (zPP) [5-8]. Ferroelektrete sind polarisierte (und meist geladene) zelluläre Kunststoffe, die piezoelektrische und ferroelektrische Eigenschaften aufweisen. Die für zelluläre Materialien typisch kleine Schallgeschwindigkeit von 85 m/s und Dichte von 330 kg/m^3 ergeben für zPP eine sehr niedrige spezifische akustische Impedanz von 0,028 MRayl, sodass die Anwendung von Anpassschichten nicht notwendig ist.

Die Vorteile von zPP haben zu dem Bau des ersten Ferroelektret-Ultraschallwandlers für zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) geführt [8-10]. Die elektrische Anpassung für den Sender bzw. Empfänger wurde in einen separaten Modul eingebaut (Abb. 1). Der Sender wird mit 2,5 kV Anregungsspannung getrieben [10,11]. So hohe Spannung würde einen marktüblichen piezokeramischen Prüfkopf durch Überhitzung beschädigen.

Beim zPP-Wandler treten zwei Effekte auf: der lineare piezoelektrische und der quadratische elektrostriktive [12-14]. Mit dem Begriff Elektrostriktion wird die elektrostatische Anziehungskraft zwischen den Elektroden des Wandlers bezeichnet. Für eine quasistatische Anregungsspannung V beträgt die Dickenänderung eines piezoelektrischen Wandlers

$$x_0 = d_{33}V + \alpha_{33}V^2, \quad (1)$$

wobei die piezoelektrische Konstante d_{33} als positiv definiert wird. Der erste Term entspricht dem piezoelektrischen und der zweite dem elektrostriktiven Effekt. Der Koeffizient $\alpha_{33} < 0$ ist mit dem Elastizitätsmodul C_{33} verbunden,

$$\alpha_{33} = \frac{-\varepsilon_r \varepsilon_0}{2C_{33}h}, \quad (2)$$

mit folgenden Parametern: ε_r ist die relative Dielektrizitätskonstante des zPP, die zwischen 1,1 und 1,2 liegt, ε_0 ist die Dielektrizitätskonstante des Vakuums und h ist die Foliendicke, zwischen 80 und 90 μm . Für negative Anregungsspannung wirken der piezoelektrische und elektrostriktive Effekt in die gleiche Richtung: sie ziehen die zPP-Folie zusammen. Diese Spannung wird im Betrieb benutzt. Für positive Spannung ist die Wirkung vom Piezoeffekt der Elektrostriktion entgegengesetzt. Während Elektrostriktion bei härteren Materialien wie Piezokompositen vernachlässigt werden kann, hat sie einen beträchtlichen Anteil an der Dickenänderung eines Ferroelektret-Wandlers. Die Elastizitätskonstante von zPP beträgt nämlich nur ungefähr 1 MPa, während sie beispielsweise für Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) 60 GPa beträgt. Schon bei einer Anregung von ca. 1 kV gleicht der elektrostriktive Anteil dem piezoelektrischen.

Luftgekoppelte zPP-Wandler wurden in Zusammenarbeit mit Ing.-Büro Dr. Hillger entwickelt (Abb. 1). Die 80 bis 90 μm dicke zPP-Folie wurde mittels Elektronenstrahlverdampfung mit 200 nm dicken Aluminium-Elektroden versehen und einseitig schallhart abgeschlossen. Durch die Schallgeschwindigkeit in Dickenrichtung im zPP von ca. 80 m/s ergibt sich eine Mittenfrequenz von ca. 250 kHz.

Die Messung von Materialkonstanten d_{33} und C_{33} von zPP ist mit erheblichem Aufwand verbunden, weil die üblichen Methoden für die Bestimmung von diesen

Parametern für deutlich härtere Materialien entwickelt wurden. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, die beiden Konstanten mittels Messungen des Schwingverhaltens zu bestimmen.



Abbildung 1. Luftultraschall-Prüfkopf mit einem Wandler aus zellulärem Polypropylen. Der Modulare Aufbau ermöglicht einen Austausch des Wandlers (links), mit der elektrischen Anpassung für den Sender oder Empfänger in dem anderen Modul (rechts).

2. Versuchsaufbau

2.1 Vermessung der Wandleroberfläche

In dem ersten Versuch wurde die Schwingung der ganzen Oberfläche des Wandlers nach einer Anregung mit 1 kV vermessen. Der Messkopf OFV-505 des Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) von Fa. Polytec wurde mittels eines Manipulators mit einem Spurenabstand und Messpunkt Abstand von 0,2 mm betrieben. In jedem Punkt wurden 20 Messungen aufgenommen und gemittelt, um das Rauschen zu verkleinern. Die Pulslänge wurde wie im ersten Versuch an die Mittenfrequenz des Wandlers angepasst und betrug 2 μ s. Zum Vergleich wurde auch die Schwingung des LUS-Prüfkopfes NCT200-D25-P150 von Firma Ultran vermessen. Dieser marktübliche Prüfkopf mit einem piezokeramischen Wandler und mit Anpassschichten hat einen Durchmesser 25 mm und eine Mittenfrequenz 200 kHz.

2.2 Punktmessungen

In dem zweiten Versuch wurde die Auslenkung eines Punktes an der Oberfläche des Wandlers in Abhängigkeit von der Anregungsspannung untersucht. Der Wandler wurde mit Rechteckimpulsen von 2 μ s angeregt, wodurch die Pulslänge an die Mittenfrequenz der Wandler angepasst wurde. Die Anregungsspannung wurde zwischen -2 kV und +2,3 kV variiert. Die Schwingungen der Senderoberfläche wurden mittels Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) in einem Punkt in der Mitte des Wandlers vermessen.

3. Messergebnisse

3.1 Vermessung der Wandleroberfläche

Die Ergebnisse der Vermessungen der Wandleroberflächen zeigen deutlich eine reine Dickenschwingung des zPP-Wandlers (Abb. 2). Bei der Schwingung des Wandlers

NCT200-D25-P150 kommen auch andere Moden zum Vorschein (Abb. 3). Diese anderen Moden sind an den Bildern als wellenartige Strukturen zu erkennen, wobei solche regelmäßige Strukturen beim zPP-Wandler fehlen. Die Quermoden bei piezokeramischen Wandlern treten vor allem wegen der ähnlichen Größe von Dicke und Breite dieser Wandler auf. Bei zPP-Wandlern ist das Verhältniss zwischen Durchmesser und Dicke ca. 200 und die elastischen Eigenschaften in der Querrichtung unterscheiden sich stark von denen in die Dickenrichtung, so dass die Quermoden praktisch nicht auftreten. Die zufällig verteilten Schwankungen beim zPP (Abb. 2) können der Inhomogenität der piezoelektrischen Konstante d_{33} und der Mittenfrequenz entlang des Wandlers zugeschrieben werden, was von der Inhomogenität der Zellenstruktur stammt. Die Schwankungen der Mittenfrequenz sind erwünscht, weil sie die Bandbreite des erzeugten Schallpulses erhöhen. Auf den Abbildungen 2 und 3 ist die Schnelle dargestellt, weil die Schnellenmessung bei Frequenzen über ca. 100 kHz einen besseren Störsignalabstand aufweist, als die Wegmessung.

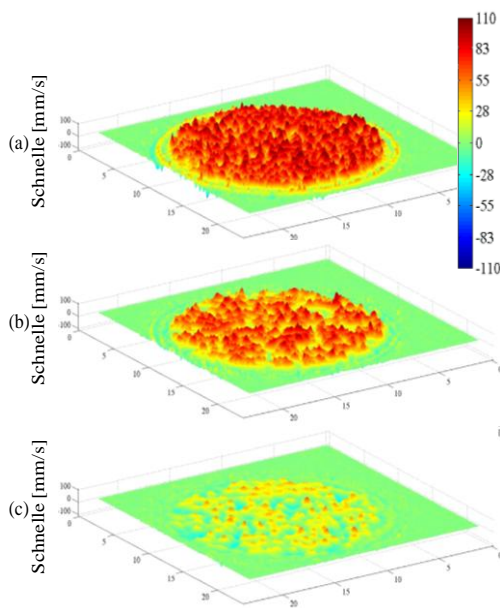


Abbildung 2. Vermessung der Schnelle an der Oberfläche eines zPP-Wandlers nach ungefähr (a) 2, (b) 3 und (c) 5 Perioden.

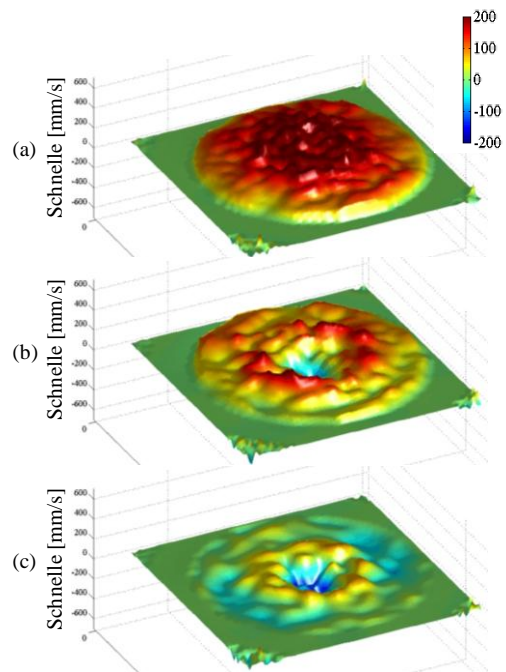


Abbildung 3. Vermessung der Schnelle an der Oberfläche des piezokeramischen Wandlers mit Anpassschichten NCT200-D25-P150 nach ungefähr (a) 2, (b) 3 und (c) 5 Perioden.

3.2 Punktmessungen

Die Messung der Auslenkung in einem Punkt an der Wandleroberfläche ergab ein regelmäßiges Signal mit einem gleichmäßigen Abfall, unabhängig von der Anregungsspannung (Abb. 4). Bei piezokeramischen Wandlern mit Anpassschichten fällt das Signal nicht so gleichmäßig, was die Zeitauflösung erschwert (Abb. 5). Außer den Quermoden können auch die Reflexionen an nichtideal verklebten Anpassschichten dieses Nachschwingen verursachen. Mit einer Anregungsspannung von -2 kV wurde eine Auslenkung von ca. $1 \mu\text{m}$ gemessen, was einer Dehnung von ca. $0,01$ entspricht. Diese Schwingung ergibt einen effektiven Schalldruck von 145dB direkt vor dem Wandler.

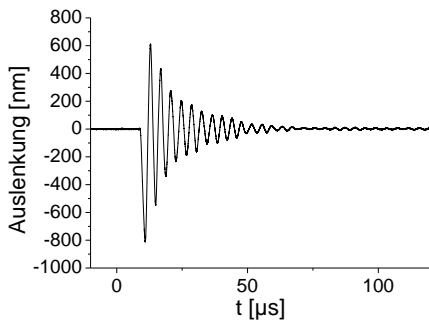


Abbildung 4. Auslenkung eines zPP-Wandlers bei einer Anregung von $-1,91\text{kV}$.

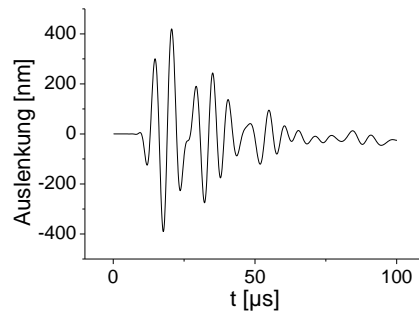


Abbildung 5. Auslenkung des piezokeramischen Wandlers mit Anpassschichten NCT200-D25-P150 bei einer Anregung von 300 V .

4. Model

In unserem Versuch wird der Ultraschallwandler mit einem Rechteckimpuls angeregt, dessen Länge $1/2f_m$ an die Mittenfrequenz f_m angepasst wurde, wie das in der Praxis üblich ist. Die daraus entstandene Auslenkung der Wandler-Oberfläche kann in erster Annäherung als gedämpfter harmonischer Oszillator beschrieben werden [15]. Während die Anregungsspannung V eingeschaltet ist, schwingt dieser Oszillator um sein neues Gleichgewicht x_0 gegeben durch (1), allerdings nicht lange, weil die Spannung schon nach einer halben Periode ausgeschaltet wird. Danach kehrt er in sein altes Gleichgewicht zurück, wieder als gedämpfter harmonischer Oszillator (Abb. 6).

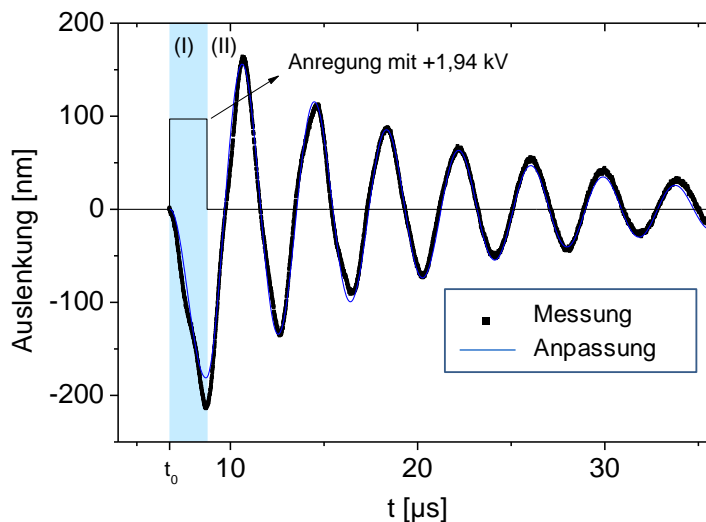


Abbildung 6. Schwingung eines zPP-Wandlers nach der Anregung mit einem Rechteckimpuls.

Bei einer stufenartigen Kraftänderung kann die Auslenkung eines harmonischen Oszillators bei einer verhältnismäßig kleinen Dämpfung als eine gedämpfte Kosinusfunktion approximiert werden. Wegen der unterschiedlichen Randbedingungen unterscheiden sich die Lösungen in zwei Zeitbereichen: (I) während der Anregung und (II) nach der Anregung:

$$\Delta l_I(t) = x_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}} \cos \omega_0(t-t_0) \right) \quad (3)$$

$$\Delta l_{II}(t) = -x_0 \cdot \left(1 + e^{\frac{\pi}{\omega_0 \tau}} \right) \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \cos \omega_0(t-t_0) \quad (4)$$

Die gemessene Auslenkung $\Delta l(t)$ wurde für jede Anregungsspannung mittels nichtlinearer Regressionsanalyse mit dieser Anpassungsfunktion verglichen. Dabei wurden alle Variablen außer t als Anpassungsparameter behandelt, sodass für jede Anregungsspannung ein Wert von x_0 ermittelt wurde. Das Ergebnis dieser Anpassung wird beispielweise für $V = +1,94$ kV in der Abb. 6 dargestellt.

Eine Verbesserung der Anpassung wird mit der Berücksichtigung von höheren Harmonischen erreicht (Abb. 7), allerdings nur für Anregungsspannungen $V > 0$, wo der piezoelektrische und der elektrostriktive Effekt entgegengesetzte Wirkung haben. Wegen des schallharten Abschlusses treten nur die ungeraden Harmonischen auf. Wenn nur die erste und die dritte Harmonische berücksichtigt werden, nimmt die Anpassungsfunktion diese Form an:

$$\Delta l_I(t) = \sum_{n=1,3} x_{0n} \cdot \left(1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_n}} \cos n\omega_0(t-t_0) \right) \quad (5)$$

$$\Delta l_{II}(t) = -\sum_{n=1,3} x_{0n} \cdot \left(1 + e^{\frac{\pi}{\omega_0 \tau_n}} \right) \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_n}} \cos n\omega_0(t-t_0) \quad (6)$$

Die Verbesserung der Anpassung ist besonders in der ersten Schwingungsperiode sichtbar, weil höhere Harmonische stärker gedämpft werden.

Bei einer quasistatischen Anregung wäre die Dickenänderung gleich $x_{01} + x_{03}$, so dass Gleichung (1) korrigiert werden muss:

$$x_{01} + x_{03} = d_{33}V + \alpha_{33}V^2. \quad (7)$$

Der Zusammenhang von Anregungsspannung und quasistatischer Dickenänderung wird in der Abb. 8 gezeigt. Mit diesem Modell können mittels einer weiteren Regressionsanalyse und mithilfe Gleichung (2) die Materialparameter d_{33} und C_{33} ermittelt werden. Die Regressionsanalyse ergab die folgenden Werte: $d_{33} = (87 \pm 1)$ pC/N und $C_{33} = (0.8 \pm 0.1)$ MPa.

5. Diskussion und Schlussfolgerung

Es wurde ein physikalisches Modell basierend auf dem erzwungenen gedämpften harmonischen Oszillator für die Schwingungen eines Ferroelektret-Wandlers aufgestellt. Dieses Modell wurde mittels Laservibrometrie-Messungen bestätigt. Die Messungen haben gezeigt, dass Ferroelektret-Wandler reine Dickenschwinger sind, während piezokeramische Wandler mit Anpassschichten ein viel komplexeres Schwingverhalten aufweisen. Das Modell ist ein Beitrag für unser Verständnis des Schwingverhaltens des Ferroelektret-Wandlers und ein wichtiger Schritt für die Berechnung seines Schallfeldes.

Die ermittelten Werte für die Materialparameter des zPP-Wandlers d_{33} und C_{33} sind vergleichbar mit den Werten bekannt aus der Literatur: 90 bis 250 pC/N für d_{33} und 0,5 bis 2 MPa für C_{33} . Durch die Inhomogenität der zellulären Struktur entsteht eine Inhomogenität der Materialparameter, sodass beispielsweise d_{33} vom Punkt zu Punkt bis ca. $\pm 10\%$ schwankt [12]. Deswegen gelten die ermittelten Werte nicht für den ganzen Wandler, sondern nur für den Punkt, an dem es gemessen wurde.

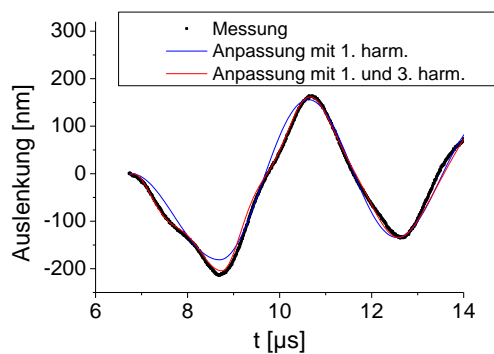


Abbildung 7. Verbesserung der Anpassung mit Berücksichtigung der dritten Harmonischen.

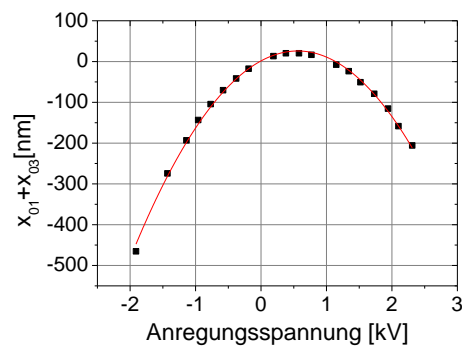


Abbildung 8. Quasistatische Dickenänderung des zPP-Wandlers als Funktion der Anregungsspannung.

Die dynamische Messung mit einem Rechteckimpuls, kombiniert mit einer Regressionsanalyse der Schwingung, ist eine neue Methode für die Bestimmung der Materialparameter d_{33} und C_{33} . Diese Materialparameter ermittelt mit verschiedenen Messmethoden können sich stark unterscheiden. Das liegt an dem verwendeten Frequenzbereich und Spannung. Da Polymerschäume viskoelastische Eigenschaften aufweisen, ist ihre Elastizitätskonstante von der Frequenz und von der Spannung abhängig [16]. Bei Frequenzen im hörbaren Bereich ist die Elastizitätskonstante deutlich kleiner als im Bereich von unserem Interesse, um die Mittenfrequenz von 250 kHz. Die in diesem Beitrag dargestellte Methode für die Bestimmung der Materialparameter hat den Vorteil gegenüber anderen Methoden, dass die Versuchsbedingungen (Frequenz und Anregungsspannung) ähnlich sind, wie bei dem praktischen Einsatz für Luftultraschall-Prüfung.

6. Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Finanzierung aus dem MNPQ-Programm vom BMWi ermöglicht. Die Autoren bedanken sich bei Herrn Mateusz Grzeszkowski (BAM) für die Steuerung des Laservibrometers und bei Herrn Joachim Döring (BAM) für anregende Diskussionen.

Referenzen

- [1] M. C. Bhardwaj, "Non-Destructive Evaluation: Introduction of Non-Contact Ultrasound", in *Encyclopedia of Smart Materials*, edited by M. Schwartz, John Wiley & Sons, New York, 2001, pp. 690-714.
- [2] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, 5. Auflage, Springer, 1986.
- [3] W. Hillger, F. Meier, R. Henrich, *NDT.net* **7**, No. 10 (2002).
- [4] G. S. Kino, *Acoustic Waves*, Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [5] M. Paajanen, J. Lekkala, K. Kirjavainen, "ElectroMechanical Film (EMFi) – a new multipurpose electret material", *Sensors and Actuators* **84**, pp. 95-102 (1999).
- [6] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, G. M. Sessler, „Ferroelectrets: soft electroactive foams for transducers“, *Phys. Today* **57**, pp. 37-43 (2004).
- [7] M. Wegener, R. Gerhard-Multhaupt, M. Dansachmüller, R. Schwödiauer, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, M. Paajanen, H. Minkinen, J. Raukola, „Controlled inflation of voids in cellular polymer ferroelectrets: Optimizing electromechanical transducer properties“, *Appl. Phys. Lett.* **84** (3), pp. 392-394 (2004).

- [8] V. Bovtun, J. Döring, M. Wegener, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, V. Borisov, "Air-coupled ultrasonic applications of ferroelectrets", *Ferroelectrics* 370, No 1, pp. 11-17 (2008).
- [9] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, Y. Yakymenko, „Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers“, *Appl. Phys. A* **88**, pp. 737-743 (2007).
- [10] J. Döring, V. Bovtun, J. Bartusch, A. Erhard, M. Kreutzbruck, Y. Yakymenko, „Nonlinear electromechanical response of the ferroelectret ultrasonic transducers“, *Appl. Phys. A* **100**(2), pp. 479-485 (2010).
- [11] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, M. Gaal, A. Erhard, M. Kreutzbruck, Y. Yakymenko, „Enhanced electromechanical response of ferroelectret ultrasonic transducers under high voltage excitation“, *Advances in Applied Ceramics* **112** (2013).
- [12] G. M. Sessler, J. Hillenbrand, "Electromechanical response of cellular electret films", *Appl. Phys. Lett.* **75** (21), pp. 3405-3407 (1999).
- [13] R. Kressmann, "Linear and nonlinear piezoelectric response of charged cellular polypropylene", *J. Appl. Phys.* 90 (7) pp. 3489-3496 (2001).
- [14] J. Hillenbrand und G. M. Sessler, "DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric d33-coefficients", *J. Appl. Phys.* **103**, 074103 (2008).
- [15] J. L. Ealo, F. Seco, A. R. Jimenez, "Broadband EMFi-based transducers for ultrasonic air applications", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 55 (4), pp. 919-929 (2008)
- [16] L. J. Gibson, M. F. Ashby, *Cellular solids: Structure and properties*, University Press, Cambridge (1997)