

Luftgekoppelte Ultraschallwandler für zerstörungsfreie Prüfung

Mate Gaal¹, Daniel Hufschläger¹, Klaas Bente¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12205 Berlin, E-Mail: Mate.Gaal@bam.de, Daniel.Hufschlaeger@bam.de, Klaas.Bente@bam.de

Einleitung

Luftgekoppelte Ultraschallwandler werden für die Prüfung von wasserempfindlichen Bauteilen eingesetzt, insbesondere im Leichtbau, oder um den Wartungsaufwand zu reduzieren [1, 2]. Handelsübliche Luftultraschallwandler für zerstörungsfreie Prüfung bestehen aus Piezokompositen und Anpassschichten zur Verringerung des Impedanzsprungs zwischen den Piezokompositen und der Luft [3]. In diesem Beitrag werden Luftultraschall-Wandler vorgestellt, die auf anderen Materialien und physikalischen Prinzipien basieren.

Wandler mit mechanischer Resonanz

Mechanisch schwingende Luftultraschall-Wandler sind meist Piezokomposite mit Anpassschichten [3]. Andere Arten von Wandlern, wo eine mechanische Schwingung den Ultraschall erzeugt, sind kapazitive und piezoelektrische mikro-mechanisch bearbeitete Ultraschallwandler (im Englischen bezeichnet als CMUTs bzw. PMUTs). Da solche Sender einen sehr hohen Schalldruck erzeugen können, wurden sie auf ihre Eignung für Materialprüfung erprobt. Allerdings weisen sie in der Luft eine sehr geringe Bandbreite auf, was für Materialprüfung nachteilig ist [4, 5]. Wenn ihre Schwingung gedämpft wird, fällt ihre Empfindlichkeit weit unter die der handelsüblichen Wandler [6], so dass sie in der zerstörungsfreien Prüfung nicht eingesetzt werden.

Eine weitere Art von mechanisch schwingenden Wandlern beinhaltet eine Folie aus geladenem zellulärem Polymer, das wegen seiner ferroelektrischen und piezoelektrischen Eigenschaften auch Ferroelektret (FE) oder Piezoelektret genannt wird [7–9]. Die Struktur und die elastischen Eigenschaften von Ferroelektreten sind stark anisotrop, mit einer extrem kleinen Komponente des Elastizitätstensors in die Polarisationsrichtung c_{33} . Zelluläres Polypropylen (zPP) ist erhältlich in Folien mit einer Dicke von 50 bis 100 μm , mit einer akustischen Impedanz um $0,03 \times 10^6 \text{ Pa s/m}$, einer piezoelektrischen Konstante d_{33} um 200 pC/N und einer Mittenfrequenz zwischen 200 und 300 kHz. Die Elastizität in die Dickenrichtung c_{33} ist stark frequenzabhängig: Sie variiert zwischen 0,04 und 0,8 MPa für Frequenzen von 0,3 Hz bis 300 kHz [10, 11]. Ferroelektret-Wandler erreichen dabei ungefähr dieselbe Bandbreite wie handelsübliche Luftultraschall-Wandler, aber eine höhere Empfindlichkeit.

Die Dickenänderung eines FE-Senders kommt von zwei unterschiedlichen Effekten. Der erste ist die Anziehungskraft zwischen den Elektroden durch die elektrostatische Kraft und der zweite ist der piezoelektrische Effekt durch die Polarisierung des FEs [7, 8]. Beim FE-Empfänger gibt es ebenso den Piezoelektrischen Effekt, aber es gibt auch die Möglichkeit, die Empfindlichkeit des Empfängers durch die Anlegung einer zusätzlichen elektrischen Vorspannung zu

erhöhen. Die gemessene Spannung am Ausgang eines FE-Empfängers beträgt

$$\Delta V = (V_0 + V_{DC}) \frac{\Delta h}{h}, \quad [\text{V}] \quad (1)$$

bei einer Stauchung von $\Delta h/h$, einer internen Spannung durch die Polarisierung V_0 und einer zusätzlich angelegten Spannung V_{DC} . Die Anwendung der zusätzlichen Spannung erhöht die Empfindlichkeit dieser Wandler um ca. 15 dB [12, 13].

Mittlerweile gibt es FE-Wandler in verschiedenen Ausführungen. Die allerersten waren planare runde Wandler mit einer Mittenfrequenz um 250 kHz und einer relativen Bandbreite von ca. 20% [14, 15]. Mittlerweile werden zylindrisch [16] und sphärisch [17] fokussierte FE-Wandler gebaut. Sphärische Fokussierung erhöht den erzeugten Schallpegel von Wandlern mit Apertur 19 mm und bei einer Anregungsspannung von 1800 V auf über 140 dB [18]. Das Schallfeld dieser Wandler wurde mittels Impuls-Echo-Messungen aufgenommen, wobei eine Stange mit 6 mm Durchmesser als beweglicher Reflektor diente. Das aufgenommene C-Bild (Abb. 1) ermöglicht die Bestimmung des Fokusdurchmessers von 2,5 mm. Mit diesen Wandlern wurden Klebeverbindungen und Komposit-Platten in Durchschallung geprüft. Dabei konnten 1 mm große Einschlüsse in Bauteilen mit der Dicke von 5 bzw. 4 mm detektiert werden [19, 20]. Mit der Verklebung mehrerer FE-Schichten kann die Mittenfrequenz verringert werden [21, 22].

Die FE-Folie wird meistens auf eine Elektrode aufgeklebt, wobei die andere mit Elektronenstrahlverdampfung an die andere Seite angebracht wird. Durch die Strukturierung der ersten Elektrode können verschiedene Aperturen und Geometrien realisiert werden. So wurden Array-Wandler [23], aber auch Sendempfangs-Wandler [24] gebaut.

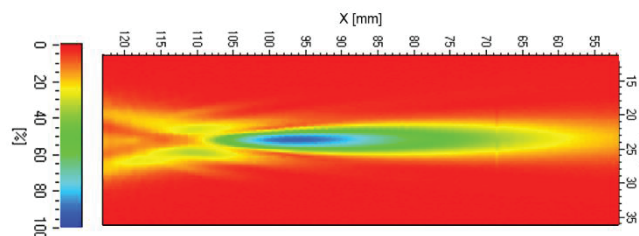


Abbildung 1: Schallfeld eines fokussierenden Ferroelektret-Wandlers aufgenommen mit Impuls-Echo-Technik mithilfe einer Reflexion von einer Stange. Die Position des Wandlers war $x = 125 \text{ mm}$. Die Farbe stellt die normierte Signalhöhe dar.

Thermoakustische Sender

Bei den thermoakustischen (TA) Sendern ist ein anderes physikalisches Prinzip der Erzeugung von Ultraschall am Werk: Der lokale Anstieg des Schalldrucks wird nicht durch Volumenarbeit, sondern durch Wärme generiert. Die bis heute am besten verstandenen thermoakustischen Sender bestehen aus einer dünnen leitfähigen Schicht mit zwei Elektroden und einem elektrisch und thermisch isolierenden Substrat. Die Temperatur der leitenden Schicht wächst durch Joule'sche Wärme und diese Wärme wird sowohl an das Substrat als auch an die Luft übertragen. Ein einfaches, aber umfassendes Modell für den generierten Schalldruck wurde von Daschweski et al. in 2013 beschrieben [25]. Laut diesem Modell gleicht der Anteil der Energie, der an die Luft übertragen wird und als Schallenergie gemessen werden kann

$$E_{\text{Luft}} = \frac{e_{\text{Luft}}}{e_{\text{Luft}} + e_{\text{Substrat}} + d_{\text{Film}} \cdot \rho_{\text{Film}} \cdot c_{p \text{ Film}} \cdot \sqrt{\omega_{\text{th}}}} \quad [\text{J}] \quad (2)$$

Hier sind e_{Substrat} und e_{Luft} die thermischen Effusivitäten der Luft und des Substratmaterials und d_{Film} , ρ_{Film} und $c_{p \text{ Film}}$ sind Dicke, Dichte bzw. thermische Kapazität der leitenden Schicht. Dieser Zusammenhang gilt nur, wenn das Substrat dicker ist als seine thermische Eindringtiefe. Die Kreisfrequenz ω_{th} entspricht der doppelten Kreisfrequenz der Anregungsspannung.

Thermoakustische Sender wurden auch in der zerstörungsfreien Prüfung angewendet. Beispiele umfassen die Durchschallung einer Platte aus carbonfaser-verstärktem Kunststoff (CFK) [26], Charakterisierung von schmalbandigen Luftultraschall-Empfängern [27] sowie Durchschallung einer additiv gefertigten Struktur mit Honigwabe [28]. Heutige Forschung richtet sich auf verschiedene Wandlerkonstruktionen, Produktionsprozesse und Materialien, immer mit dem Ziel, den Schalldruck zu erhöhen. Aktuell kann ein Schalldruck von 130 dB wiederholbar und ohne Zerstörung des Wandlers erreicht werden. Die große relative Bandbreite von über 100% wird als der größte Vorteil von thermoakustischen Wandlern hervorgehoben (Abb. 2).

Da thermoakustische Wandler akustische Signale nicht aufnehmen können, werden breitbandige Empfänger benötigt. Die Laser-Vibrometrie liefert zwar die gewünschte Bandbreite, aber es wird nach preiswerteren Alternativen gesucht. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines Fabry-Pérot-Interferometers [29]. Allerdings ist die Empfindlichkeit der verfügbaren Geräte gemessen am Signal-Rausch-Abstand immer noch deutlich niedriger als die von handelsüblichen Luftultraschall-Wandlern, so dass sie selten für luftgekoppelte Prüfung eingesetzt werden [30]. Dennoch weisen sie die Vorteile der großen Bandbreite und der hohen Ortsauflösung auf.

Plasmaakustische Sender

Vergleichsweise neu ist die gezielte Erzeugung von akustischen Wellen im Hör- und Ultraschallbereich durch Gasentladungen unter Atmosphärendruck. Die Wechselwirkungen einer Gasentladung mit ihrer näheren Umgebung sind sehr komplex. Die akustischen Wellen entstehen durch den thermoakustischen Effekt und durch die Volumenströme

von Ionen. Die thermoakustische Interaktion ist in der Regel die dominante bei der Schallwellenerzeugung und resultiert aus den Reibungsverlusten der sich bewegenden Elektronen im Plasma. Das Atmosphärendruckplasma wird durch elastische, inelastische und super-elastische Zusammenstöße von Ladungsträgern und neutralen Atomen und Molekülen charakterisiert. Außer der elektrischen Funken- und der Corona-Entladung gibt es jedoch, weitere Entladungen, die als akustische Quellen vielversprechend sind. Vor allem sind die dielektrische Barriere-Entladung und Mikrohohlkathoden-Entladung. Bei diesen wird eine dielektrische Schicht zwischen den Elektroden verwendet.

Dielektrische Barriere-Entladung (DBE)

Die dielektrische Barriere-Entladung (DBE) stellt eine Form der Atmosphärendruckentladung dar und ermöglicht viele Industrieanwendungen, wie z.B. Dekontamination von Wasser, Oberflächenmodifikation oder als Ionenquelle [32], [33]. Die akustischen Effekte dieser Entladungen wurden dabei nur selten untersucht. Mit der DBE ist die Erzeugung von schmalbandigen akustischen Wellen möglich, so dass sie sich diese als plasma-akustische Lautsprecher eignen. Dabei werden die Variationen der Plasmadichte im Frequenzbereich des Ultraschalls verwendet, um die akustische Information im Ultraschallbereich zu erzeugen. Diese akustische Information wird dabei als Einhüllende des Entladungsstroms während des Entladungsprozesses aufgeprägt. Die Schallemissionen dieser akustischen Quellen hängen unter anderem von der Elektrodengeometrie ab [34]. Ein Beispiel für die Elektrodenanordnung ist in der Abb. 3 zu sehen. Ein homogenes und diffuses Plasma generiert weniger Verzerrungen, erreicht somit eine höhere Bandbreite und einen höheren Schallpegel.

Der Schalldruck bei einer sinusförmigen Anregung von Plasma ist proportional zu

$$\Delta p \propto \frac{\mu_e n_e E_0^2}{2} (1 - \cos(2\omega t)) + z_\alpha \mu_\alpha E_0 \sin(\omega t). \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

Dabei ist E_0 elektrische Feldstärke, $\mu_{e,\alpha}$ Mobilität von Elektronen bzw. Ionen, z_α Atomzahl und n_e die räumliche Verteilung der Elektronen. Der erste Term beschreibt die thermale Interaktion durch die Reibung der Elektronen und der zweite die Kraft, die sich auf die Ionen auswirkt [34].

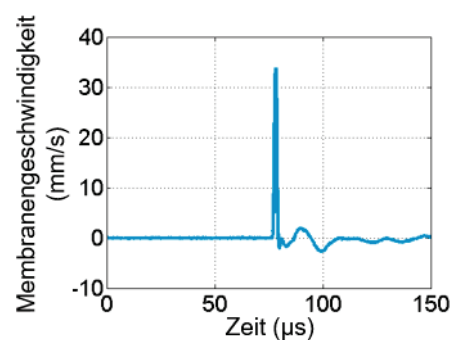


Abbildung 2: Ultraschallsignal eines thermoakustischen Wandlers gemessen mit Laser-Doppler-Vibrometer an einer dünnen Membran im Fokus des Schallfelds.

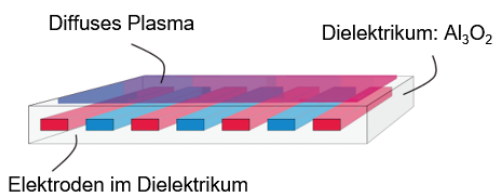


Abbildung 3: Plasma-akustische Quelle mit einer koplaren diffusen dielektrisch behinderten Entladung.

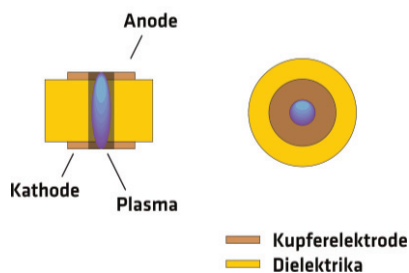


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Mikrohohlkathoden-Entladung. Plasma wird im Hohlraum zwischen den Elektroden gezündet.

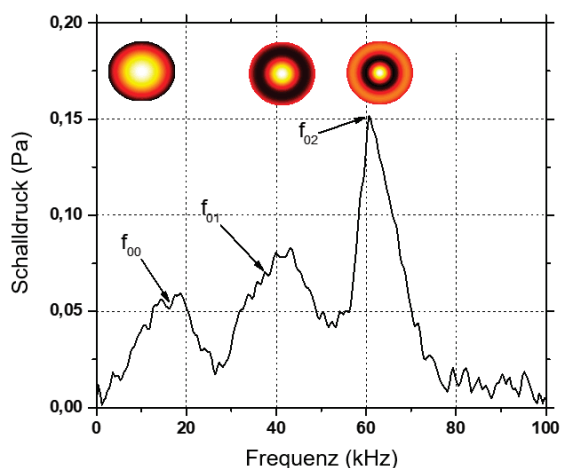


Abbildung 5: Berechnete Stromdichtenverteilung in einer Mikrohohlkathoden-Entladung (oben) und die gemessenen dazugehörigen Eigenfrequenzen im Spektrum der akustischen Emission.

Mikrohohlkathoden-Entladung (MHKE)

Mikrohohlkathoden-Entladung (MHKE) ist eine Entladung beim niedrigen oder atmosphärischen Luftdruck 1 mm^3 . Plasma entsteht dabei in dem kleinen Hohlraum (Größenordnung 1 mm^3) zwischen den Elektroden (Abb. 4). Wegen des begrenzten Volumens ist die Stromdichtenverteilung voraussahbar und sie entspricht der Lösung der Helmholtz-Gleichung (Abb. 5) [35, 36]. Diese Stromdichte kommt von einem Ionenfluss, der einen Druck auf die umliegende Luft ausübt und damit eine Schallwelle erzeugt. Im Umkehrschluss können wir die akustische Emission verwenden, um den Stromfluss im Plasma einzuschätzen [37]. Die Resonanzfrequenzen von akustischen Emissionen betragen

$$f_{n,m} = A \frac{J_{n,m}}{2\pi r} \times \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho_0}} \times E, \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

wobei r das Entladungsradius, $J_{n,m}$ Lösungen der Bessel-Funktion, ϵ_0 Permittivität des Vakuums, ρ_0 Dichte des Gases und E das angelegte elektrische Feld bedeuten. Der geometrieabhängige Skalierungsparameter A rechnet den Einfluss der Inhomogenität des elektrischen Feldes an. Nur die Frequenzen mit $n = 0$ können akustisch gemessen werden (Abb. 5). Bisher wurden Schalldrücke bis $137 \text{ dB}_{\text{SPL}}$ erreicht. Daher zeigen sich MHKE als vielversprechende Quellen von breitbandigen luftgekoppelten Ultraschall-signalen für den Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung sowie als Referenzquellen.

Schlussfolgerungen

Hier wurden neue Arten von luftgekoppelten Ultraschallwandlern vorgestellt. Ferroelektret-Wandler erreichen in Durchschallung einen höheren Signal-Rausch-Abstand als marktübliche Wandler. Thermoakustische und plasma-basierte Sender erreichen etwas kleinere Schalldrücke, so dass ihre Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung begrenzt ist. Deshalb wird derzeit an der Erhöhung der Effizienz der thermoakustischen und plasma-basierten Emission gearbeitet. Eine andere mögliche Forschungsrichtung wäre die Kontrolle der Bandbreite der Emissionen von Mikrohohlkathoden. Der größte Vorteil von thermo-akustischen und plasma-basierten Sendern ist ihre große Bandbreite, die neue Anwendungen in der berührungslosen Ultraschallspektroskopie öffnet.

Literatur

- [1] D. E. Chimenti, Review of air-coupled ultrasonic materials characterization, *Ultrasonics*, 54, 7, 2014, 1804–1816.
- [2] M. C. Remillieux, B. E. Anderson, T. J. Ulrich, P.-Y. Le Bas, M. R. Haberman, and J. Zhu, Review of air-coupled transduction for nondestructive testing and evaluation, *Acoust. Today*, 10, 3, 2011, 36–45.
- [3] T. E. G. Alvarez-Arenas and L. Diez, Novel impedance matching materials and strategies for air-coupled piezoelectric transducers, in 2013 IEEE SENSORS, 2013, 1–4.
- [4] S. T. Hansen, F. L. Degertekin, and B. T. Khuri-Yakub, Micromachined ultrasonic transducers for air-coupled nondestructive evaluation, in *Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, and Aerospace Hardware III*, 1999, 3586, 310–318.
- [5] J. Jung, W. Lee, W. Kang, E. Shin, J. Ryu, and H. Choi, Review of piezoelectric micromachined ultrasonic transducers and their applications, *J. Micromechanics Microengineering*, 27, 11, 2017, 113001.
- [6] A. Octavio Manzanares and F. Montero de Espinosa, Air-coupled MUMPs capacitive micromachined ultrasonic transducers with resonant cavities, *Ultrasonics*, 52, 4, 2012, 482–489.
- [7] G. M. Sessler and J. Hillenbrand, Electromechanical response of cellular electret films, *Appl. Phys. Lett.*, 75, 21, 1999, 3405–3407.
- [8] M. Paaajanen, J. Leikkala, and K. Kirjavainen, ElectroMechanical Film (EMFi) - a new multipurpose electret material, *Sensors Actuators, A Phys.*, 84, 1,

- 2000, 95–102.
- [9] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, and G. M. Sessler, Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers, *Phys. Today*, 57, 2, 2004, 37–43.
- [10] J. Hillenbrand and G. M. Sessler, DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric d33-coefficients, *J. Appl. Phys.*, 103, 7, 2008, 074103.
- [11] M. Gaal, V. Bovtun, W. Stark, A. Erhard, Y. Yakymenko, and M. Kreutzbruck, Viscoelastic properties of cellular polypropylene ferroelectrets, *J. Appl. Phys.*, 119, 12, 2016, 125101.
- [12] M. Gaal, R. Caldeira, J. Bartusch, and M. Kupnik, Air-Coupled Ultrasonic Ferroelectret Receiver with Additional DC Voltage, in *Euroensors 2017*, 2017, 1, 4, 362.
- [13] M. Gaal, R. Caldeira, J. Bartusch, and M. Kupnik, Air-Coupled Ultrasonic Ferroelectret Receiver with Additional Bias Voltage, *Submitt. to IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 2019.
- [14] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, and Y. Yakymenko, Air-coupled ultrasonic transducers based on cellular polypropylene ferroelectret films, *Ferroelectrics*, 353, 1, part 3, 2007, 186–192.
- [15] V. Bovtun, J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, and Y. Yakymenko, Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, 88, 4, 2007, 737–743.
- [16] J. L. Ealo et al., Customizable field airborne ultrasonic transducers based on electromechanical film, *Proc. - IEEE Ultrason. Symp.*, 2008, 879–882.
- [17] J. L. Ealo, F. Seco, and A. R. Jimenez, Broadband EMFi-based transducers for ultrasonic air applications, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 55, 4, 2008, 919–929.
- [18] M. Gaal, J. Bartusch, E. Dohse, F. Schadow, and E. Köppe, Focusing of ferroelectret air-coupled ultrasound transducers, in *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1706, 080001.
- [19] 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 *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1581 33, 471–478.
- [20] M. Gaal, J. Bartusch, E. Dohse, F. Schadow, and E. Köppe, Focusing of ferroelectret air-coupled ultrasound transducers, in *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1706, 080001.
- [21] M. Wegener, S. Bergweiler, W. Wirges, A. Pucher, E. Tuncer, and R. Gerhard-Multhaupt, Piezoelectric two-layer stacks of cellular polypropylene ferroelectrets: Transducer response at audio and ultrasound frequencies, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 52, 9, 2005, 1601–1605.
- [22] J. L. Ealo, J. C. Prieto, and F. Seco, Dynamic response estimation of multilayer ferroelectret-based transducers using lumped-element electromechanical models, *Proc. - IEEE Ultrason. Symp.*, 2009.
- [23] J. F. Pazos-Ospina, J. L. Ealo, and J. Camacho, New dual-focalization ferroelectret-based array for air-coupled ultrasonic inspection of textiles, *NDT E Int.*, 74, 2015, 50–57.
- [24] M. Gaal and D. Kotschate, New technologies for air-coupled ultrasonic transducers, in *Proceeding of the 12th European Conference of Non-destructive Testing*, 2018.
- [25] M. Daschewski, R. Boehm, J. Prager, M. Kreutzbruck, and A. Harrer, Physics of thermo-acoustic sound generation, *J. Appl. Phys.*, 114, 11, 2013.
- [26] M. Daschewski, M. Kreutzbruck, J. Prager, E. Dohse, M. Gaal, and A. Harrer, Resonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall, *Tech. Mess.*, 82, 3, 2015, 156–166.
- [27] K. Bente, J. Oeff, and M. Gaal, Quantitative, zeiteffiziente, winkel- und frequenz aufgelöste Analyse von Elektretwandlern im Hör- und Ultraschallbereich, in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2019*, 2019, 748–750.
- [28] K. Bente, D. Kotschate, S. Wendland, and M. Gaal, The thermoacoustic effect and its application in air-coupled testing of composite structures, *10th Int. Symp. NDT Aerosp.*, 2018, 1–8.
- [29] B. Fischer, Optical microphone hears ultrasound, *Nat. Phot.*, 10, 2016, 356–358.
- [30] J. Grager, D. Kotschate, J. Gamper, M. Gaal, and K. Pinkert, Advances in air-coupled ultrasonic testing combining an optical microphone with novel transmitter concepts, in *Proceeding of the 12th European Conference of Non-destructive Testing*, 2018, 1–10.
- [31] M. Kalms, S. Hellmers, and R. B. Bergmann, Laser-generated ultrasound with liquid crystal on silicon (LCoS) technology in the thermoelastic regime, *Nondestruct. Charact. Compos. Mater. Aerosp. Eng. Civ. Infrastructure, Homel. Secur.* 2012, 2012, 83470N.
- [32] U. Kogelschatz, Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications, *Plasma Chem. Plasma Process.*, 23, 1, 2003, 1–46.
- [33] R. Brandenburg, Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 26, 5, 2017, 053001.
- [34] D. Kotschate, M. Gaal, and H. Kersten, Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Plasmalautsprechern auf Basis einer dielektrischen gehemmten Oberflächenentladung (SDBD), *Tagungsband der 44. Jahrestagung für Akust. (DAGA 2018)*, 2018, 555–558.
- [35] K. H. Schoenbach, M. Moselhy, and W. Shi, Self-organization in cathode boundary layer microdischarges, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 13, 1, 2004, 177–185.
- [36] M. S. Benilov, Comment on “Self-organization in cathode boundary layer discharges in xenon” and “Self-organization in cathode boundary layer microdischarges,” *Plasma Sources Sci. Technol.*, 16, 2, 2007, 422–425.
- [37] D. Kotschate, M. Gaal, and H. Kersten, Acoustic emission by self-organising effects of micro-hollow cathode discharges, *Appl. Phys. Lett.*, 112, 15, 2018, 154102.