

Plasma-akustische Wechselwirkungen von Mikrohohlkathodenentladungen

Daniel Kotschate¹, Mate Gaal¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12205 Berlin, Deutschland, Email: daniel.kotschate@bam.de

Einleitung

Zur gezielten Erzeugung von akustischen Wellen im Ultraschallbereich existieren zahlreiche Möglichkeiten. Dabei handelt es sich bei den piezoelektrischen Wandlern um die bekannteste Methode und funktionieren über einen weiten Anwendungsbereich. Gerade für der hohe Impedanzsprung beim Grenzübergang von Wandlermaterial zu Transportmedium steht die größte Herausforderung dar. Als möglichen Lösungsansatz sind akustische Anpassschichten Stand der Technik. Jedoch sind diese nur für den schmalbandigen Einsatz geeignet und begrenzen somit die Bandbreite von Sender und Empfänger. Als mögliche alternative Methoden zur effizienteren Erzeugung haben sich akustische Wandler auf Basis von ferroelektrische Materialien [1, 2] und thermoakustischen Dünnschichtwandlern (TA) [3, 4] etabliert und eröffnen somit neue Anwendungsszenarien. Durch das Funktionsprinzip der TA-Wandler, erfolgt die Anregung resonanzfrei und ist somit erlaubt eine breitbandige akustische Anregung. Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Schallwellen stellen Gasentladungen dar, welche chemische Energie in kinetische Energie umwandeln. Dabei stellen Gasentladungen keine reinen thermoakustischen Wandler, sondern eine Kombination aus elektromechanischen und thermoakustischen Schallwandlern dar. Als Gasentladung oder Plasma wird der energetische Zustand der Materie bezeichnet, bei dem durch die hohe kinetische Energie der Teilchen ein Energieaustausch aufgrund von Kollisionen zur Erzeugung von freien Elektronen und Ionen und somit zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Gases führt. Beim Entladungsvorgang erfolgt eine Dichteänderung durch die Freisetzung von thermischer Energie und somit zu einer thermoakustischen Anregung des umgebenen Fluids. Eine Besonderheit der Gasentladungen stellen Atmosphärendruckentladungen wie bspw. Dielektrisch behinderte und Mikrohohlkathodenentladungen dar. Mikrohohlkathodenentladungen gehören zu den Mikroentladungen. Durch die geringe Entfernung zwischen Anode und Kathode ist es möglich gezielt filamentierte Entladungen mit geringen Durchmessern zu erzeugen. Um bei diesen Abständen eine Funkenentladung zu vermeiden, wird ähnlich wie bei der dielektrischen Barriereentladung [5, 6, 7] eine dielektrische Schicht zwischen den Elektroden angebracht. Entsprechend einer Hohlkathodenentladung sind Elektroden und Dielektrikum hohl. Somit wird durch die inhomogene Feldverteilung des erzeugten elektrischen Feldes eine Raumladungsdichte im Entladungskanal und somit die Energie dort gebündelt. Der dort vorherrschende Energieüberschuss führt wiederum zum Zünden der Entladung.

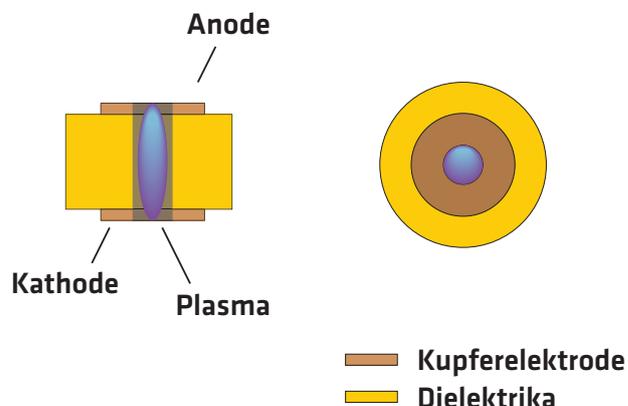


Abbildung 1: Schematische Darstellung der MHCD

Theoretische Beschreibung

Die Stromdichteverteilung innerhalb einer Mikrohohlkathodenentladung lässt sich anhand der *Bifurcation theory* direkt in eine Helmholtzverteilung überführen[8]. Somit lässt sich, ausgehend von der Helmholtz-Verteilung, die Stromdichte durch

$$\frac{d^2}{dx^2}\mathbf{j} + \frac{d^2}{dy^2}\mathbf{j} - k^2\mathbf{j} = 0 \quad (1)$$

beschreiben. Wobei \mathbf{j} die Stromdichte im Entladungskanal und k den Wellenvektor darstellen. Ein Lösungsansatz unter Nutzung der Neumann Randbedingung ergibt sich für die Dichteverteilung des Stroms zu

$$\mathbf{j} = J_n \left(x_{n,m} \frac{r}{a} \right) \times \cos(n\phi) \times \exp(-jk_z z) \quad \text{und} \quad (2)$$

wird durch J_n als korrespondierende Besselfunktion n -ter Ordnung, $x_{n,m}$ ihrer Nullstelle und a den Radius des Entladungskanals beschrieben. Durch die Nutzung dieses Separationsansatzes lassen sich die Eigenfrequenzen der Stromdichte anhand der geometrischen Randbedingungen des Kanals beschreiben und führen unter Nutzung der Dispersionsbedingung zur Wellenzahl k in z -Richtung.

$$k_z^2 = k^2 - \left(\frac{x_{n,m}}{a} \right)^2 \quad (3)$$

Die Lösung ist als verlustlose Kreismembran in der Akustik bekannt, als welches das im Kanal erzeugte Plasma ebenfalls angenommen wird und ergibt sich zu

$$f_{n,m} = \frac{v}{2\pi a} \times J_{n,m}, \quad (4)$$

dabei beschreiben v die Auslenkungsgeschwindigkeit der Membran, a deren Radius und $J_{n,m}$ die Nullstellen der

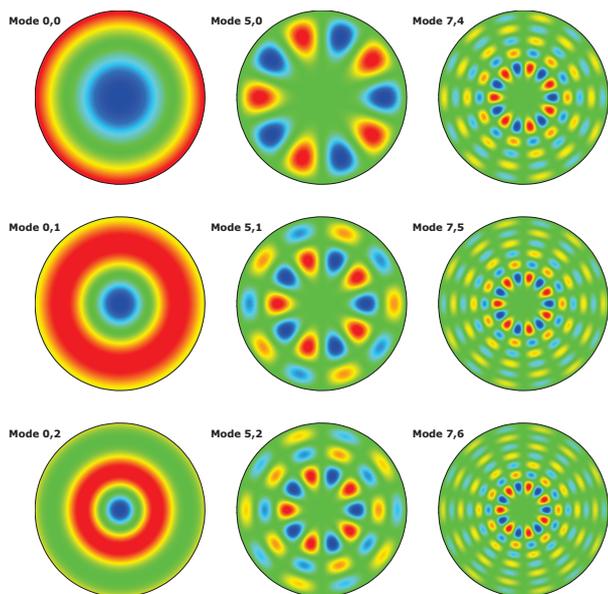


Abbildung 2: Stromdichteverteilungen in einer Mikrohohlkathode nach [8].

dazugehörigen Besselfunktion. Wie beschrieben handelt es sich bei der plasmaakustischen Wechselwirkung um eine Überlagerung von elektromechanischen und thermoakustischen Komponenten. Durch ihre nahezu identische Masse und ihre höhere Rekombinationsdauer, erfahren die im Gaskanal generierten Ionen eine Beschleunigung durch das anliegende Feld und verändern infolge dessen ihre Geschwindigkeit. Eine hinreichend genaue Näherung [9] erlaubt die Schätzung der Ionengeschwindigkeit durch

$$v_{ion} \propto \mathbf{A} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho_0}} \times \frac{\Delta U_{HV}}{d_g}, \quad (5)$$

wobei ϵ_0 die Permittivität des Vakuums, ρ_0 die Dichte des umliegenden Gases, U_{HV} die angelegte Hochspannung und d_g den Abstand von Anode und Kathode beschreiben. Der Skalierungsfaktor \mathbf{A} beschreibt dabei einen von der Anordnung abhängigen Wert für die Berücksichtigung des inhomogenen elektrischen Feldes und der entstehenden Raumladungszone [9, 10]. Durch die Verknüpfung von Gleichung (4) und Gleichung (5) lassen sich die resultierenden Eigenfrequenzen, hervorgerufen durch die Gasentladung mit

$$\begin{aligned} f_{n,m} &= \frac{v_{ion}}{2\pi a} \times J_n \\ &= \mathbf{A} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\rho_0}} \times \frac{\Delta U_{HV}}{d_g} \times \frac{J_n}{2\pi a}, \end{aligned} \quad (6)$$

theoretisch abschätzen.

Experimentelle Validierung

Um die akustischen Eigenschaften der Entladung breitbandig untersuchen zu können, wurde der Ansatz zur resonanzfreien Detektion von Luftschall [4] verwendet. Dabei erfasst ein Laserdopplervibrometer die Auslenkung

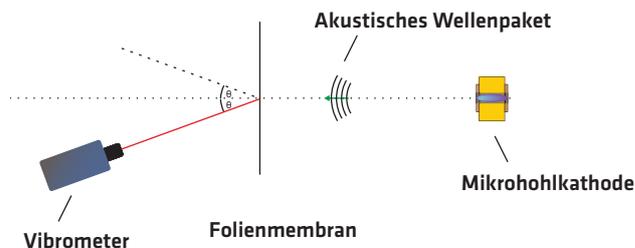


Abbildung 3: Experimenteller Versuchsaufbau für die resonanzfreie Bestimmung der akustischen Eigenschaften der Mikrohohlkathodenentladungen.

einer dünnen Membran und erlaubt somit unter Berücksichtigung der akustischen Impedanz der Luft die Berechnung des emittierten Schalldrucks $\Delta p = \Delta v \times Z_0$. Bei Verwendung einer hinreichend dünnen Membran, lässt sich deren Einfluss im Frequenzbereich berücksichtigen. Dabei ist der Versuchsaufbau in Abb. 3 dargestellt und besteht aus der zu untersuchenden Entladung, einer Membran und dem Laserdopplervibrometer. Die Datenaufnahme erfolgt dabei durch eine PC-Datenerfassungskarte in MATLAB. Die entsprechende Rekonstruktion des Schalldrucks erfolgt durch die Gewichtung des Auslenkungssignals im Frequenzbereich. Unter Nutzung der mechanischen Parameter der Folienmembran (Dicke d und Masse m_{Folie}) und Berücksichtigung der akustischen Impedanz des Übertragungsmediums Z_0 folgt

$$p(\omega) = Z_{Luft} \times \frac{v_{Folie}}{\cos \theta} \left(1 - i \frac{\omega}{2Z_{Luft}} \cdot m_{Folie} \cdot d \right). \quad (7)$$

Untersucht wurde die akustische Emission der Mikrohohlkathodenentladung für eine Dicke von 1,6 mm der dielektrischen Schicht und einen Radius r von 500 μm . Nach Gleichung (6) ruft diese Schichtdicke eine Änderung der resultierenden elektrischen Feldstärke hervor und hat somit eine Änderung der auftretenden akustischen Eigenfrequenzen zur Folge. Somit erfolgt eine Anregung der in den Tabelle 1 tabellierten Frequenzen.

Tabelle 1: Exemplarisch berechnet Eigenfrequenzen in kHz einer Mikrohohlkathodenentladung mit den Parametern: $U_{HV} = 4 \text{ kV}$, Elektrodenabstand $d_g = 1,6 \text{ mm}$, Radius $a = 500 \mu\text{m}$ and $A \approx 3, 2$.

Index	0	1	2	3
0	16,6	26,5	35,5	44,1
1	38,1	48,4	58,1	67,4
2	59,8	70,3	80,2	89,9
3	81,4	92,0	102,2	112,0

Zusammenfassung

Mikrohohlkathodenentladungen (MHCD) stellen Konzept zur Erzeugung akustischer Wellen basierend auf Erkenntnissen der Entladungsphysik dar. Innerhalb dieses Beitrags konnte der theoretische Zusammenhang zwi-

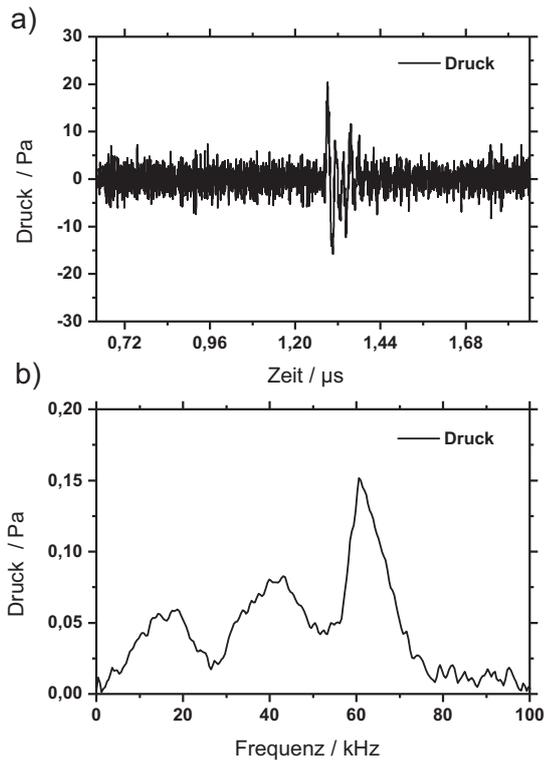


Abbildung 4: Mit dem LDV auf genommenes Zeitsignal a) in 430 mm Entfernung und b) das rekonstruierte Spektrum.

schen Entladungsphysik und akustischer Emission hergeleitet und experimentell validiert werden. Während der Versuche konnten Schalldruckpegel von 140 dB ($p_{ref} = 20 \times 10^{-6}$ Pa) wiederholbar erreicht werden.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei Frau Silke Gennecher und Dr. rer. nat. Klaas Bente für die Unterstützung bei der experimentalen Durchführung im Zusammenhang mit dem Laser-Doppler-Vibrometer bedanken.

Literatur

- [1] Mate Gaal, Viktor Bovtun, Wolfgang Stark, Anton Erhard, Yuriy Yakymenko, and Marc Kreutzbruck. Viscoelastic properties of cellular polypropylene ferroelectrets. *J. Appl. Phys.*, 119(12):125101, mar 2016.
- [2] Mate Gaal and Daniel Kotschate. New technologies for air - coupled ultrasonic transducers. In *Proceeding 12th Eur. Conf. Non-destructive Test.*, number 1, pages 1–9, 2018.
- [3] Klaas Bente, Daniel Kotschate, Saskia Wendland, and Mate Gaal. The thermoacoustic effect and its application in air-coupled testing of composite structures. *10th Int. Symp. NDT Aerosp.*, 2018.
- [4] Maxim Daschewski, Marc Kreutzbruck, Jens Prager, Elmar Dohse, Mate Gaal, and Andrea Harrer. Re-

sonanzfreie Messung und Anregung von Ultraschall. *tm - Tech. Mess.*, 82(3):156–166, jan 2015.

- [5] Daniel Kotschate, Mate Gaal, and Holger Kersten. Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Plasmalautsprechern auf Basis einer dielektrischen gehemnten Oberflächenentladung (SDBD). *Tagungsband der 44. Jahrestagung für Akust. (DAGA 2018)*, pages 555–558, 2018.
- [6] Ulrich Kogelschatz. Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chem. Plasma Process.*, 23(1):1–46, may 2003.
- [7] Ronny Brandenburg. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 26(5):053001, mar 2017.
- [8] 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):422–425, may 2007.
- [9] Yu Zhang, Lijuan Liu, Yang Chen, and Jiting Ouyang. Characteristics of ionic wind in needle-to-ring corona discharge. *J. Electrostat.*, 74:15–20, apr 2015.
- [10] Andreas Küchler. *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. VDI-Buch. Springer, 2005.