

Piezoelktret-Sender für Luftultraschall

Joachim Hillenbrand und Gerhard M. Sessler

Institut für Nachrichtentechnik, TU Darmstadt, 64283 Darmstadt, E-Mail: j.hillenbrand@nt.tu-darmstadt.de

Einleitung

Die d_{33} -Konstanten von Piezoelktreten (Ferroelktreten) können durch Anlegen externer Gleichspannungen signifikant vergrößert werden. Für typische Piezoelktretfolien aus Polypropylen (PP) erhält man für eine externe Spannung von 1000 V etwa eine Verdoppelung der d_{33} auf bis zu 750 pC/N [1]. Durch Stapelung derartiger Folien konnten effektive d_{33} -Konstanten bis zu 1500 pC/N erzielt werden. Mit den Folien wurden unterschiedliche Ultraschallschall-Sender gebaut, die im Folgenden vorgestellt werden.

Piezoelktrete mit externer Vorspannung

Nach der Koronaaufladung von Piezoelktreten und deren beidseitiger Metallisierung erfolgt i. Allg. ein Stromfluss, d. h. eine Ladungskompensation, zwischen den Elektroden, der die elektrischen Felder in den internen Hohlräumen verkleinert. Dadurch werden auch die d_{33} -Konstanten der Folien verkleinert. Durch Anlegen einer externen Spannung an die beiden Folienelektroden kann die angesprochene Ladungskompensation teilweise oder vollständig rückgängig gemacht werden oder sogar deren Polarität umgekehrt werden. Auf diese Weise können die d_{33} -Konstanten der Folien deutlich vergrößert werden. Man kann zeigen, dass die d_{33} -Konstante in einen internen d_{33}^i und einen externen Anteil d_{33}^e aufgespalten werden kann

$$d_{33} = d_{33}^i + d_{33}^e = \frac{\epsilon_0 \bar{\epsilon} V_i}{Yt} + \frac{\epsilon_0 \bar{\epsilon} V_e}{Yt}, \quad (1)$$

wobei V_i und V_e der internen Elktretspannung bzw. der extern angelegten Spannung entsprechen und $\bar{\epsilon}$ die gemittelte Dielektrizitätszahl, Y der E-Modul und t die Dicke der Piezoelktretfolie ist.

Gestapelte Piezoelktretfolien

In einem Folienstapel addieren sich die Dickenänderungen der einzelnen Folien zu einer Gesamtauslenkung der Stapeloberfläche, sofern eine Seite des Stapels festgehalten wird und sofern an jeder Einzelfolie die gleiche Vorspannung und die gleiche Signalspannung anliegt. Man kann dies formal in einer effektiven d_{33} -Konstante des Stapels, bestehend aus n Folienschichten, zusammenfassen und dann in Verbindung mit Gl. (1) schreiben:

$$d_{33}^{\text{effektiv}} = (d_{33}^i + d_{33}^e)n. \quad (2)$$

Schalldruck der Piezoelktret-Sender

Für einen kreisrunden Kolbenstrahler mit Radius R kann gezeigt werden [2], dass der Schalldruck p auf der Hauptachse im Abstand r quadratisch mit der Kreisfrequenz ω ansteigt und proportional zur Auslenkung des Kolbens ist.

Für Piezoelktretfolien-Stapel, die beim Anlegen einer Signalspannung V kolbenförmig ausgelenkt werden, gilt daher

$$p = \frac{1}{2r} \rho_0 R^2 \omega^2 d_{33}^{\text{effektiv}} V. \quad (3)$$

Aufbau der Piezoelktret-Sender

Die Verwendung von Piezoelktretfolien ermöglicht den Aufbau sehr einfacher Ultraschallsender [3]. Sie bestehen aus einer, im Vergleich zu den Folien, schweren Grundplatte, die die Folienauslenkung und die Abstrahlung in Rückwärtsrichtung nahezu unterbindet (s. Abbildung 1). Ein länglicher Piezoelktretfolien-Streifen, der (mehrfach) auf sich zurückgefaltet wird stellt die richtige Polung von Gleich- und Wechselspannung automatisch sicher. Die beiden Spannungen werden über einen Widerstand und einen Kondensator zugeführt. Eine feste Verklebung auf der Grundplatte und zwischen den Folienschichten ist für die optimale Abstrahlung des Wandlers wichtig. Da Piezoelktretfolien ca. 50 % Luft enthalten und damit vergleichsweise leicht sind, hat die Art der Verklebung (dünner und leichter Sekundenkleber oder schweres doppelseitiges Klebeband) wegen der zusätzlichen Masse einen Einfluss auf die Resonanzen des Folienstapels und des Ultraschall-Senders.

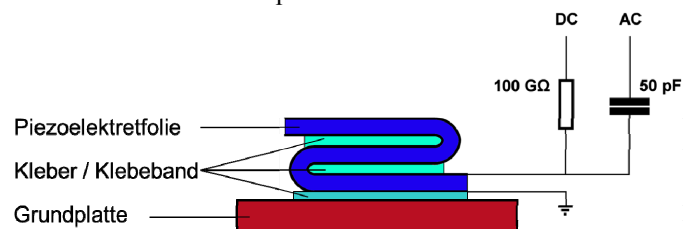


Abbildung 1: Schematische Zeichnung eines Piezoelktret-Senders mit einem Folienstapel bestehend aus drei Folienschichten. Der Stapel wurde durch Falten und Verkleben eines länglichen Piezoelktret-Folienstreifens hergestellt.

Alle untersuchten Piezoelktret-Sender, die im Folgenden vorgestellt werden, haben eine aktive Wandlerfläche von 1,8 cm² und wurden mit einer effektiven Wechselspannung von 46 V am Folienstapel (entspricht 100 V am Kondensator) und Gleichspannungen bis zu 1000 V angesteuert.

Messungen mit den Piezoelktret-Sendern

Interferometrische Messungen

Wie bereits angesprochen, wird die Abstrahlung der Piezoelktret-Sender durch die Auslenkung an der Foliens- bzw. Stapeloberfläche bestimmt, die wiederum direkt mit der Signalspannung und der effektiven Piezokonstante des Stapels d_{33}^{effektiv} zusammenhängt. Daher wurden auf allen untersuchten Piezoelktret-Sendern auch interferometrische Messungen durchgeführt [3].

In Abbildung 2 sind Messungen an einem Einfoliensender gezeigt, der mit unterschiedlichen Gleichspannungen (-500, 0, 250, 500, 750, 1000 V) betrieben wurde. Der Frequenzgang der 0 V Messung liegt in der logarithmischen Darstellung der Abbildung relativ genau in der Mitte zwischen der -500 V Messung und der 1000 V Messung: Externe 1000 V verdoppeln also die effektiven Piezokonstanten während -500 V sie halbieren. Daraus folgt nach Gl. (1) für die interne Elektretspannung $V_i = 1000$ V. Der leichte Abfall der Schwingungsamplituden bzw. der Piezokonstanten zu höheren Frequenz hin und die Resonanzfrequenz bei ca. 180 kHz sind typisch für Piezoelektretfolien aus PP.

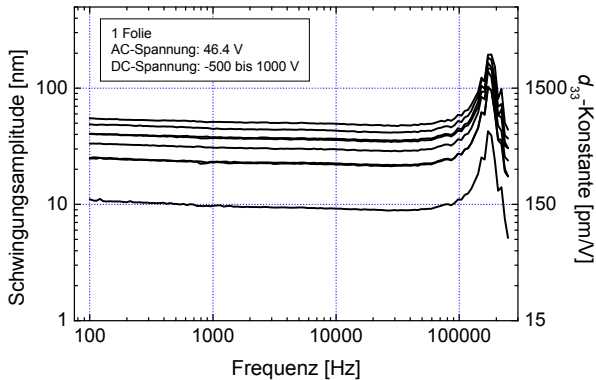


Abbildung 2: Frequenzgänge der Schwingungsamplituden und d_{33} -Konstanten einer einzelnen Piezoelektretfolie. Die Messungen wurden interferometrisch auf einem Piezoelektret-Sender durchgeführt, an dem unterschiedliche Gleichspannungen von -500 bis 1000 V anlagen.

Alle Messungen in der letzten Abbildung wurden an der exakt gleichen Stelle auf der Folie durchgeführt. Zur Bestimmung der örtlichen Variation wurden daher Messungen entlang einer Geraden durchgeführt, die jeweils 1 mm voneinander getrennt waren. Die 17 Frequenzgänge dieser Messungen sind in Abbildung 3(a) gezeigt, die daraus ermittelten Resonanzfrequenzen und d_{33} -Konstanten in Abbildung 3(b) dargestellt.

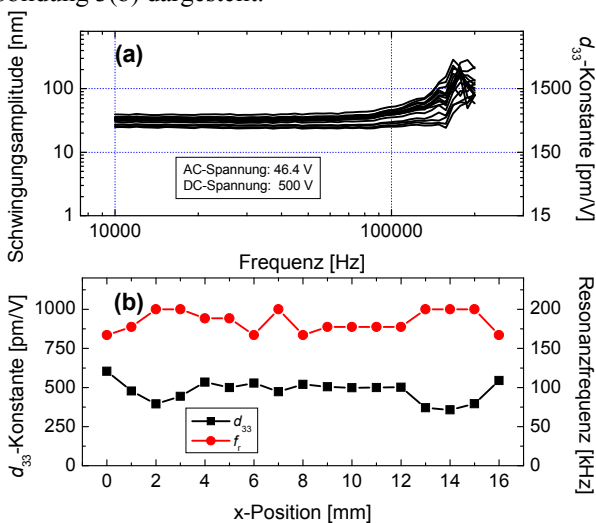


Abbildung 3: Frequenzgänge der Schwingungsamplituden und der d_{33} -Konstanten gemessen an 17 verschiedenen Stellen auf einem Piezoelektret-Sender mit einer Folie (a). Aus den 17 Frequenzgängen bestimmte Resonanzfrequenzen und d_{33} -Konstanten (b).

Es fällt auf, dass die vorhandenen Variationen von Piezokonstante und Resonanzfrequenz im Wesentlichen gegenläufig sind, was wiederum auf eine Variation des E-Moduls bei relativ konstanter Aufladung hindeutet. Messungen an Mehrfoliensendern zeigen, dass die angesprochenen örtlichen Variationen in gestapelten Wandlern kleiner sind, insbesondere in solchen, die mit doppelseitigem Klebeband verklebt wurden. Dies führt dann zu Ultraschallsendern mit höherer Resonanzüberhöhung bzw. geringerer Bandbreite.

Beispiele für interferometrische Messungen an zwei 3-Folien-Sendern sind in der Abbildung 4(a) (Folien mit Sekundenkleber verklebt) und in Abbildung 4(b) (Folien mit doppelseitigem Klebeband verklebt) zu sehen.

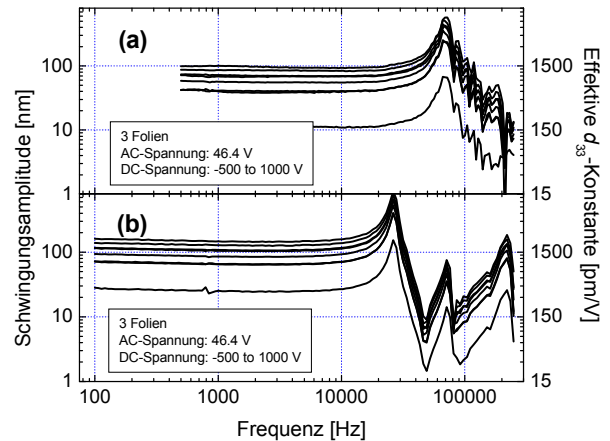


Abbildung 4: Interferometrisch, auf einem 3-Folien-Piezoelektret-Sender bestimmte Frequenzgänge der Schwingungsamplituden und der effektiven d_{33} -Konstanten. Der Sender wurde mit verschiedenen Gleichspannungen von -500 bis 1000 V und einer effektiven Wechselspannung von 46 V betrieben. Die Folien wurden mit Sekundenkleber (a) oder mit doppelseitigem Klebeband (b) verklebt.

Auffallend sind die im Falle der Verklebung mit dem schweren Klebeband niedrigeren dafür aber ausgeprägteren Resonanzen. Insbesondere sind auch Antiresonanzen und Harmonische deutlich zu erkennen.

Akustische Messungen

Die akustischen Messungen wurden mit einem 1/8"-Mikrofon B&K 4138 und einem B&K 2669 Vorverstärker auf der Hauptachse in einem Abstand von 60 mm durchgeführt [3]. Schalldruckmessungen für einen 1-Folien-Sender sind in Abbildung 5 dargestellt. Auch die Schalldruckmessungen wurden für die sechs bereits angegebenen Gleichspannungen -500, 0, 250, 500, 750 und 1000 V bei einer Signalspannung von 46 V durchgeführt. Man erkennt für alle sechs Frequenzgänge den ω^2 -Anstieg und eine gute Übereinstimmung der gestrichelten Geraden, die für 0 V nach Gl. (3) berechnet wurde, mit der gemessenen (schwarzen) 0 V Kurve.

In den Abbildungen 6 und 7 sind Frequenzgänge von Schalldruckmessungen an zwei unterschiedlichen 3-Folien-Piezoelektret-Sendern zu sehen, wobei der für Abbildung 6 benutzte Sender auf mit doppelseitigem Klebeband verklebten Folien beruht, während für die Verklebung des zweiten Senders Sekundenkleber verwendet wurde. In Abbildung 6

erkennt man die relative scharfe, bei ca. 28 kHz liegende Resonanz ebenso wie die Antiresonanz bei ca. 46 kHz, während die viel breitere und viel schwächer ausgebildete Resonanz des Senders in Abbildung 7 im Bereich um 70 kHz liegt.

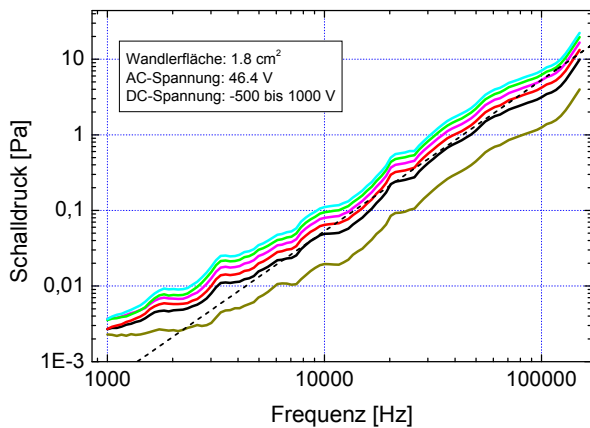


Abbildung 5: Axialer Schalldruck im Abstand von 60 mm eines Piezoelektret-Senders mit einer Folie. Der Sender wurde mit verschiedenen Gleichspannungen von -500 bis 1000 V und einer effektiven Wechselspannung von 46 V betrieben.

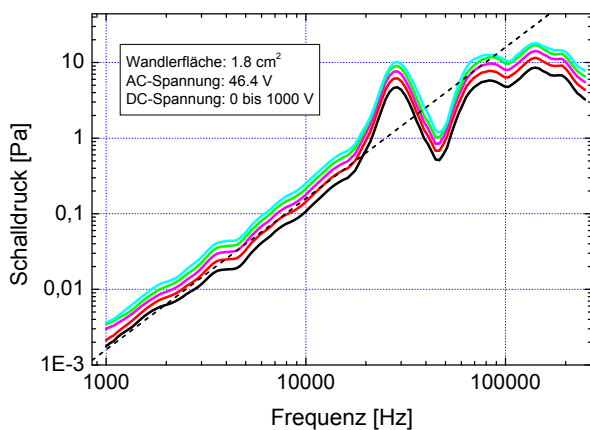


Abbildung 6: Axialer Schalldruck im Abstand von 60 mm eines 3-Folien-Piezoelektret-Senders, dessen Folien mit doppelseitigem Klebeband verklebt wurden. Der Sender wurde mit verschiedenen Gleichspannungen von 0 bis 1000 V und einer effektiven Wechselspannung von 46 V betrieben.

Zusammenfassung

Die d_{33} -Konstanten von Piezoelekturen können durch Anlegen einer externen Gleichspannung deutlich vergrößert werden. Folienstapel aus n derartigen Folien zeigen an der Stapeloberfläche die n -fache Auslenkung und damit eine um den Faktor n vergrößerte effektive d_{33} -Konstante.

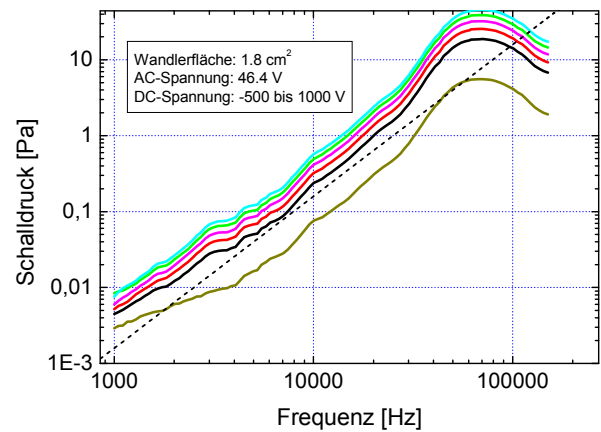


Abbildung 7: Axialer Schalldruck im Abstand von 60 mm eines 3-Folien-Piezoelektret-Senders, dessen Folien mit Sekundenkleber verklebt wurden. Der Sender wurde mit verschiedenen Gleichspannungen von -500 bis 1000 V und einer effektiven Wechselspannung von 46 V betrieben.

Basierend auf diesen gestapelten und gleichspannungsverstärkten Piezoelektret-Folien wurden Ultraschallsender aufgebaut und akustisch und interferometrisch vermessen. Mit einem Einfoliensender wurden in einem Abstand von 60 mm oberhalb von 100 kHz Schalldrücke von mehr als 10 Pa gemessen. Interferometrische Messungen auf der Folienoberfläche ergaben eine Resonanzfrequenz von 180 kHz und unterhalb der Resonanz eine effektive d_{33} -Konstante von ca. 750 pC/N. Für Sender mit zwei und drei Folienschichten ergaben sich unterhalb der Resonanz effektive d_{33} -Konstanten von bis zu 1500 pC/N und, abhängig von der Art und Masse der Klebeschicht, Resonanzfrequenzen von 30 bis 110 kHz und maximale Schalldrücke von bis zu 50 Pa, was Empfindlichkeiten von ca. 1 Pa/V entspricht, ca. viermal höher als bei früheren Piezoelektret-Sendern.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] J. Hillenbrand und G. M. Sessler, "DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric d_{33} -coefficients", *J. Appl. Phys.* **103**, 074103 (2008).
- [2] G. M. Sessler und J. Hillenbrand, "Figure of merit of piezoelectret transducers for pulse-echo or transmit-receive systems for airborne ultrasound", *Appl. Phys. Lett.* **103**, 122904 (2013).
- [3] J. Hillenbrand und G. M. Sessler, "DC-Biased Piezoelectret Film Transducers for Airborne Ultrasound", *Ferroelectrics* **472**, 77-89 (2014).