

Zwei-Wege-Lautsprecher basierend auf MEMS-Technologie

Andreas Männchen¹, Fabian Stoppel², Daniel Beer¹,
Florian Niekief², Johannes Nowak¹, Bernhard Wagner²

¹ Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, 98693 Ilmenau, Deutschland

² Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ISIT, 25524 Itzehoe, Deutschland

Kontakt-E-Mail: andreas.maennchen@idmt.fraunhofer.de

Einleitung

In den letzten Jahren haben sich Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) in Form von MEMS-Mikrofonen als kleine und kostengünstige akustische Sensoren in vielen Anwendungsbereichen, wie zum Beispiel bei Mobilgeräten, auf dem Markt durchgesetzt. Damit einhergehend ist auch das Interesse an Lautsprechern auf Basis von MEMS-Technologien gewachsen, die den Anforderungen der Schallwiedergabe in Ohrnähe (1 cm bis 50 cm Abstand) gerecht werden. Entsprechend wurden bereits einige Studien zu elektrodynamischen [1] und piezoelektrischen MEMS-Lautsprechern für Nah-Ohr-Anwendungen [2, 3, 4] veröffentlicht. Dieser Beitrag stellt einen neuartigen Zwei-Wege-Miniaturlautsprecher auf Basis von MEMS-Schallwandlern vor, der für die breitbandige Klangwiedergabe insbesondere in Ohrnähe geeignet ist.

Piezoelektrische MEMS-Lautsprecher

Die in diesem Beitrag für den Aufbau des Zwei-Wege-Systems verwendeten MEMS-Lautsprecher sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Sie bestehen je-

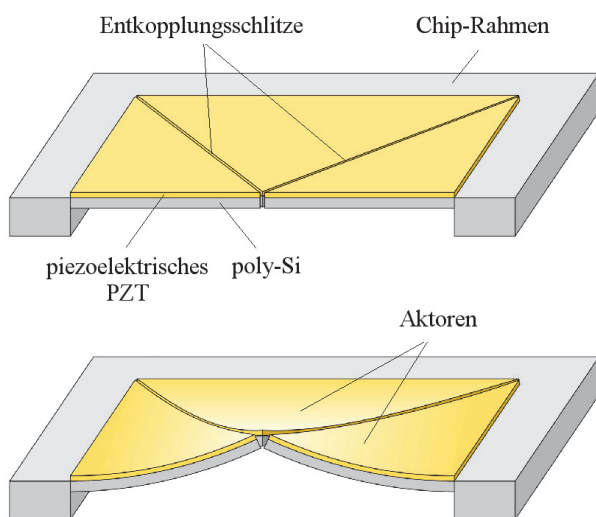


Abbildung 1: Schematische Darstellung des MEMS-Lautsprecherchips in ruhendem (oben) und ausgelenktem (unten) Zustand.

weils aus einem Array vier gleicher dreieckiger, einseitig eingespannter piezoelektrischer Biegeaktoren. Als piezoelektrisch aktives Material dient dabei eine PZT-Dünnschicht, während polykristallines Silicium (poly-Si)

als passives Material fungiert. Die Aktoren bilden gleichzeitig die aktive Strahlerfläche, also die akustische Membran. Sie sind durch kleinstmögliche Schlitze voneinander strukturell entkoppelt. Mit der gewählten Breite der Entkopplungsschlitze von weniger als $9\ \mu\text{m}$ finden im relevanten Frequenzbereich aufgrund viskoser Eigenschaften der Luft keine Ausgleichsströmungen zwischen Vorder- und Rückseite durch die Schlitze statt, sodass die Aktoren eine akustisch geschlossene Membranfläche bilden. Weitere Details zum Funktionsprinzip sowie dem MEMS-Herstellungsprozess werden in [5] erläutert.

Zwei-Wege-Konzept

Das Design der piezoelektrischen MEMS-Lautsprecher erlaubt es, die mechanische Resonanzfrequenz durch die Größe der Aktoren sowie die Schichtdicke der poly-Si-Schicht anzupassen. Es ist daher möglich, MEMS-Schallwandler herzustellen, die für bestimmte Frequenzbereiche ausgelegt sind, und diese in Mehr-Wege-Systemen zu kombinieren, um einen breiten Übertragungsfrequenzbereich zu erzielen. Wie in Abbildung 2 gezeigt, wurden hier zwei MEMS-Schallwandler mit unterschiedlich großer aktiver Fläche, ein Woofer und ein Tweeter, in einem 3D-gedruckten Smartphone-Gehäuse verbaut. Die beiden Wandler wurden zudem



Abbildung 2: MEMS-Woofer und -Tweeter im Einbauzustand in einem 3D-gedruckten Smartphone-Gehäuse.

mit einer entsprechenden Signalverarbeitung angesteuert. Die Komponenten des Zwei-Wege-Lautsprechers werden im Folgenden genauer erläutert.

MEMS-Woofers

Der Woofer besitzt eine aktive Fläche von 10 mm x 10 mm und eine poly-Si-Schichtdicke von 15 μm . Im Einbauzustand mit einem experimentell bestimmten Rückvolumen von 3 ml führen diese Parameter zu einer Grundresonanzfrequenz von 1,3 kHz. Die nächsthöhere Resonanz liegt zwischen 5 kHz und 6 kHz. Da der abgestrahlte Schalldruckpegel (engl. Sound Pressure Level, SPL) unterhalb der Grundresonanzfrequenz und oberhalb der zweiten Resonanzfrequenz steil abfällt, kann der nutzbare Übertragungsbereich mit ca. 700 Hz bis 7 kHz abgeschätzt werden. Abbildung 3 offenbart einen ungleichmäßigen Frequenzgang, der später mittels der Signalverarbeitung flacher gestaltet wird. Der mit einer

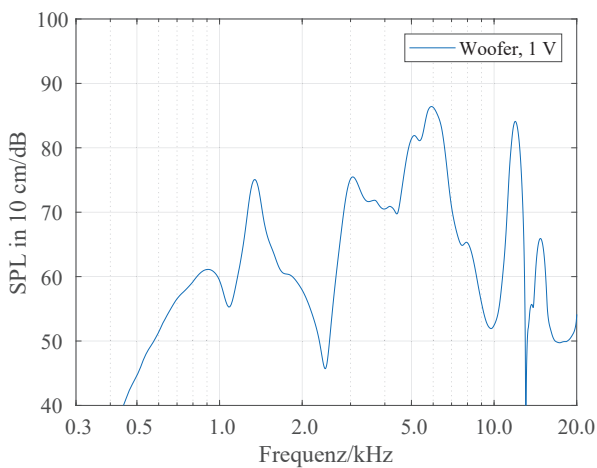


Abbildung 3: SPL des Woofers in einem Abstand von 10 cm bei einer maximalen Spannungsamplitude von 1 V. Glättung 1/6 Oktave.

Spannungsamplitude von 4 V erreichte maximale kurzzeitige SPL in 10 cm Entfernung beträgt mehr als 100 dB.

MEMS-Tweeter

Beim Tweeter ist die aktive Fläche 6 mm x 6 mm groß und die poly-Si-Schicht ebenfalls von 15 μm dick. Obwohl das minimale Rückvolumen für den Tweeter experimentell auf 1 ml bestimmt wurde, stellt das Smartphone-Gehäuse dennoch 3 ml zur Verfügung. All dies führt zu einer Grundresonanzfrequenz von 3,9 kHz mit der nächsthöheren Resonanz bei 16,4 kHz. Der nutzbare Übertragungsbereich kann analog zum Woofer mit ca. 2 kHz bis 18 kHz abgeschätzt werden. Der Frequenzgang des Tweeters ist in Abbildung 4 zu sehen. Auch hier kommt später die Signalverarbeitung zum Einsatz, um einen gleichmäßigen Frequenzgang herzustellen. Der mit einer Spannungsamplitude von 4 V erreichte maximale kurzzeitige SPL in 10 cm Entfernung beträgt auch beim Tweeter mehr als 100 dB. Weitere Details zur mechanischen und akustischen Charakterisierung eines MEMS-Tweeters finden sich in [4].

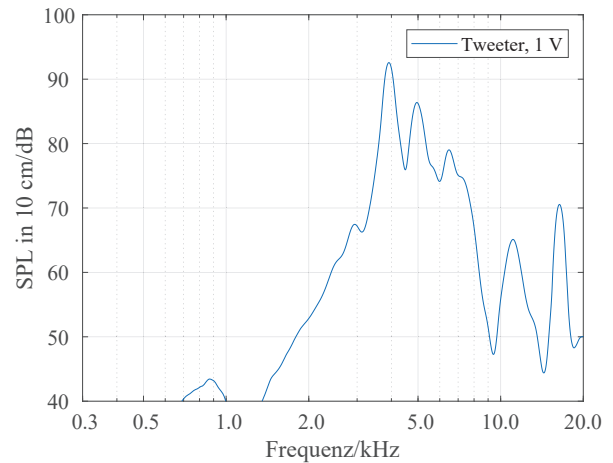


Abbildung 4: SPL des Tweeters in einem Abstand von 10 cm bei einer maximalen Spannungsamplitude von 1 V. Glättung 1/6 Oktave.

Signalverarbeitung

Das Signalverarbeitungskonzept für den Zwei-Wege-Lautsprecher wird in Abbildung 5 in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Das Eingangssignal wird zunächst

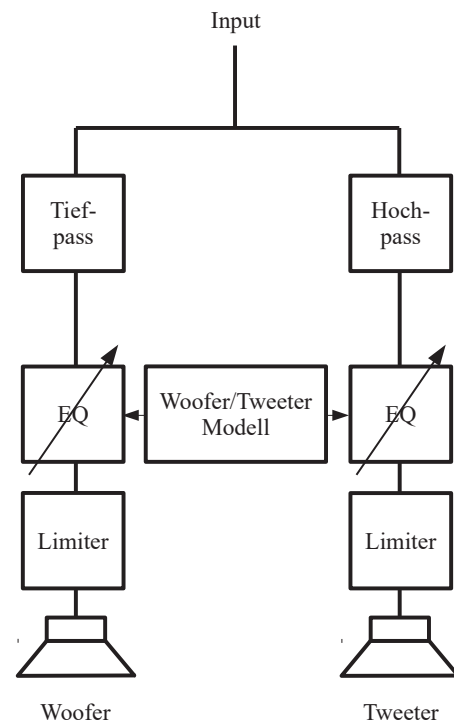


Abbildung 5: Signalfussdiagramm für die beim Zwei-Wege-Lautsprecher verwendete Signalverarbeitung.

durch eine aktive Frequenzweiche mit einer Trennfrequenz von 2 kHz in einen tieffrequenten und hochfrequenten Anteil aufgespalten. Hierbei ist besonders auf das Phasenverhältnis der zwei piezoelektrischen Wandler zu achten. Beide Signale werden dann mittels eines Entzerrungsfilters (EQ) so abgewandelt, dass der Frequenzgang im Schalldruck einer vorgegebenen Zielfunktion an-

genähert wird. Die EQs werden im dargelegten Signalverarbeitungskonzept jeweils durch ein elektroakustisches Modell für den entsprechenden MEMS-Schallwandler optimiert. Beim aktuellen Zwei-Wege-System wurden die Filter jedoch anhand der SPL-Messungen erstellt. Das letzte Glied in der Signalverarbeitungskette stellt in beiden Pfaden ein Limiter dar, der den MEMS-Lautsprecher vor zu hoher Eingangsspannung schützt. Ein entsprechender modellbasierter Limiter kann den MEMS-Schallwandler darüber hinaus vor zu hohen mechanischen Auslenkungen schützen.

Messtechnische Charakterisierung

Um zu untersuchen, ob der Zwei-Wege-Lautsprecher in Kombination mit der Signalverarbeitung für Nah-Ohr-Anwendungen geeignet ist, wurde das System hinsichtlich des abgestrahlten Schalldrucks charakterisiert. Der dafür verwendete Messaufbau und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

Messaufbau

Der komplett aufgebaute Zwei-Wege-Lautsprecher wurde unter Freifeldbedingungen in einem reflexionsarmen Raum der Klasse 1 gemäß ISO 3745 Anhang A (untere Grenzfrequenz 63 Hz) vermessen. Als Messmikrofon diente die hochempfindliche Kapsel MK 102.1 in Kombination mit dem Vorverstärker MV 203 der Fa. Microtech Gefell. Das Messmikrofon wurde senkrecht und zentriert in einem Abstand von 36 cm über dem Smartphone-Gehäuse positioniert. Die Schalldruckwerte wurden später auf einen Abstand von 10 cm umgerechnet. Gemessen wurde mit einem WinMF-System der Fa. Four Audio, wobei die Ansteuerung der piezoelektrischen MEMS-Wandler mit einer Kombination aus selbst aufgebauten Schaltungen und einem PiezoDrive MX200 Verstärkermodul erfolgte. Frequenz-Sweeps mit exponentiell ansteigender Frequenz bei verschiedenen Spannungsamplituden sowie mit und ohne EQ dienten als Anregungssignale.

Messergebnisse

Der vom MEMS-Woofer und -Tweeter erzeugte SPL in einem Abstand von 10 cm für eine maximale Spannungsamplitude von 4 V (EQ aktiv) ist in Abbildung 6 für den Frequenzbereich von 300 Hz bis 20 kHz dargestellt. Der maximale SPL von 85 dB wird bei ca. 870 Hz erzielt. Mit einer Grenzfrequenzdefinition von -10 dB, in Anlehnung an DIN EN 60268-5, erstreckt sich der Übertragungsbereich von ca. 500 Hz bis 8 kHz. Oberhalb dieser Frequenz strahlt der Zwei-Wege-Lautsprecher Schall noch mit 60 dB bis 70 dB ab. Vergleichsmessungen mit offenem Gehäuse weisen darauf hin, dass die Einbrüche im Frequenzgang oberhalb von 8 kHz durch den Gehäuse-Einbau hervorgerufen werden.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Zwei-Wege-Lautsprecher mit MEMS-Schallwandlern vorgestellt. Das System besteht aus einem Woofer mit 10 mm x 10 mm und einem Tweeter

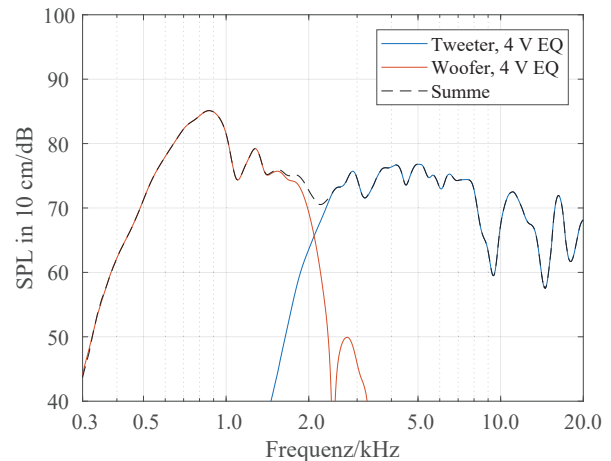


Abbildung 6: SPL von Woofer und Tweeter in einem Abstand von 10 cm bei einer maximalen Spannungsamplitude von 4 V mit EQ. Glättung 1/6 Oktave.

mit 6 mm x 6 mm aktiver Fläche, die mit einer dedizierten Signalverarbeitung angesteuert werden. Die mit dem Zwei-Wege-System erzielten Schalldruckpegelwerte von bis zu 85 dB in 10 cm Abstand zeigen, dass die MEMS-Technologie eine attraktive Basis für den Lautsprecher der Zukunft darstellt. Weitere Forschungsarbeiten sind nötig, um MEMS-Lautsprecher künftig optimal auf die breitbandige Nah-Ohr-Anwendung abzustimmen. Systeme wie der hier vorgestellte MEMS-Lautsprecher können dann unter anderem in Mobilgeräten wie Smartphones und Tablets Anwendung finden.

Ausblick

Um die MEMS-Lautsprecher weiter für die Nah-Ohr-Anwendung optimieren zu können, werden in zukünftigen Untersuchungen der unterschiedlichen MEMS-Schallwandler auch Betrachtungen des Wirkungsgrads sowie der Nichtlinearitäten bei der Schallwiedergabe erfolgen. Es ist darüber hinaus von Interesse, das Zwei-Wege-System kleiner zu gestalten. Ansätze für eine koaxiale Integration von Woofer und Tweeter auf einem Chip wurden in [6] bereits vorgestellt. Die kleinen und flachen MEMS-Wandler bieten sich zudem für die Konstruktion von Lautsprecher-Arrays an, beispielsweise für Beamforming-Anwendungen.

Neuartige Designs für die MEMS-Lautsprecher sollen zu höheren Schalldruckpegeln bzw. kleineren Baugrößen führen. Weitere Arbeiten befassen sich mit dem Einsatz von AlScN als piezoelektrisches Material. Dadurch sollen die Effizienz, die Linearität und die erzielbaren Schalldruckpegel der MEMS-Lautsprecher gesteigert werden. Außerdem wird die Signalverarbeitung weiterentwickelt, sodass mittels einer adaptiven modellbasierten Ansteuerung harmonische Verzerrungen und Intermodulationsverzerrungen gesenkt werden können. Eine solche Signalverarbeitung erlaubt zudem den optimalen Schutz des Wandlers durch Limiter, sodass die MEMS-Lautsprecher ihr hohes Potential optimal ausreizen können.

Literatur

- [1] Lemarquand, G. et al.: MEMS electrodynamic loudspeakers for mobile phones. *Applied Acoustics*, 73(4), 379–385, 2012.
- [2] Ko, S. C. et al.: Micromachined piezoelectric membrane acoustic device. *Sensors and Actuators, A* 103, 130–134, 2003.
- [3] Yi, H. S. et al.: Micromachined Piezoelectric Microspeaker. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(6A), 3836–3841, 2005.
- [4] Männchen, A. et al.: Analysis of the mechanical vibration and acoustic behavior of a piezoelectric MEMS microspeaker. *Audio Engineering Society Convention* 143, 2017.
- [5] Stoppel, F. et al.: New Integrated Full-Range MEMS Speaker for In-Ear Applications. *31st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2018*.
- [6] Stoppel, F. et al.: Novel Type of MEMS Loudspeaker Featuring Membrane-Less Two-Way Sound Generation. *Audio Engineering Society Convention* 143, 2017.