

# Leistungsfähiger integrierter MEMS-In-Ear-Lautsprecher mit piezoelektrischem Antrieb

Fabian Stoppel<sup>1</sup>, Andreas Männchen<sup>2</sup>, Florian Niekief<sup>1</sup>, Daniel Beer<sup>2</sup>, Bernhard Wagner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ISIT, 25524 Itzehoe

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, 98693 Ilmenau

E-Mail: [fabian.stoppel@isit.fraunhofer.de](mailto:fabian.stoppel@isit.fraunhofer.de)

## Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein neuartiger MEMS-Lautsprecher für In-Ear-Anwendungen vorgestellt. Das piezoelektrisch angetriebene Bauteil ist so konzipiert, dass es ohne geschlossene Membran auskommt, wodurch die Leistungsfähigkeit, Effizienz, Herstell- und Miniaturisierbarkeit deutlich verbessert werden. Messungen an Prototypen mithilfe eines Ohrsimulators haben hohe Schalldruckpegel (SPL) von etwa 110 dB ergeben. Im Gegensatz zu herkömmlichen In-Ear-Lautsprechern können die hohen SPL-Werte bis 20 kHz gehalten werden, was mithilfe elektronischer Linearisierung zu einem außergewöhnlich flachen Frequenzgang führt. Darüber hinaus wurden eine hohe Energieeffizienz von bis zu 135 dB/mW sowie geringe gesamtharmonische Verzerrungen (THD) von weniger als 2 % im nahezu gesamten audio-akustischen Frequenzbereich beobachtet.

## Einleitung

Akustische mikroelektromechanische Systeme (MEMS) erfreuen sich in den letzten Jahren stark wachsendem Interesse. Nach der erfolgreichen Etablierung von MEMS-Mikrofonen als fortgeschrittene Lösung für mobile Anwendungen wird dem Bereich der MEMS-Lautsprecher immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Besonders interessant sind Lautsprecher für In-Ear-Anwendungen, bei denen Geräte aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik, z. B. Hearables oder kabellose Kopfhörer mit kleinsten Formfaktoren, bis hin zu medizinischen Geräten wie Hörgeräten mit hoher Wiedergabetreue reichen.

Bei In-Ear-Anwendungen werden dem zu verwendenden Lautsprecher bestimmte Besonderheiten auferlegt. Die Geometrie des Gerätes muss der Geometrie des menschlichen Ohrs folgen, was die maximalen Abmessungen des Lautsprechers einschränkt. Die Notwendigkeit großer Membranuslenkungen wird durch den Druckkammereffekt aufgrund des durch den Gehörgang definierten geschlossenen Volumens vermindert. Für einen Großteil der Anwendungsbereiche ist darüber hinaus die Leistungsaufnahme des Lautsprechers von besonderer Bedeutung, da sie die Akkulaufzeit erheblich beeinflusst.

Während herkömmliche elektrodynamische Lautsprecher hauptsächlich in preisgünstigeren Produkten eingesetzt werden, zielen Balanced-Armature-Lautsprecher vorwiegend auf In-Ear-Anwendungen mit hoher Wiedergabetreue sowie drahtlose Systeme ab. Ursprünglich für Hörgeräte entwickelt, zeichnen sich diese Lautsprecher durch eine höhere Energieeffizienz aus und sind in der Lage eine gute

akustische Leistung bei relativ kleinen Geräteabmessungen zu liefern. Aufgrund ihrer äußerst aufwendigen Herstellung sind Balanced-Armature-Lautsprecher jedoch hochpreisig und hinsichtlich einer weiteren Miniaturisierung begrenzt. Zudem ist der Wiedergabebereich begrenzt, was oftmals noch teurere und größere Mehrwege-Lautsprechersysteme erforderlich macht.

Aufgrund dieser Einschränkungen und der oben genannten Besonderheiten von In-Ear-Anwendungen gelten MEMS-basierte In-Ear-Lautsprecher als sehr attraktiv. In der Literatur werden eine Reihe von Konzepten vorgestellt, die auf unterschiedlichen Antriebsprinzipien beruhen. Dazu zählen elektrodynamische Konzepte, bei denen entweder ein an einer Polymermembran befestigter Dauermagnet durch eine Spule [1] oder eine Spule auf einer Polymermembran gegen einen Dauermagneten [2-5] ausgelenkt wird. Weitere Konzepte verwenden piezoelektrische [6] oder magnetostruktive [7] Materialien um bimorphe Strukturen auszuformen. Bei piezoelektrischen Antrieben wird die piezoelektrische Schicht durch eine elektrische Spannung direkt angetrieben, während die Anregung bei magnetostruktiven Ansätzen über das Magnetfeld einer Spule erfolgt.

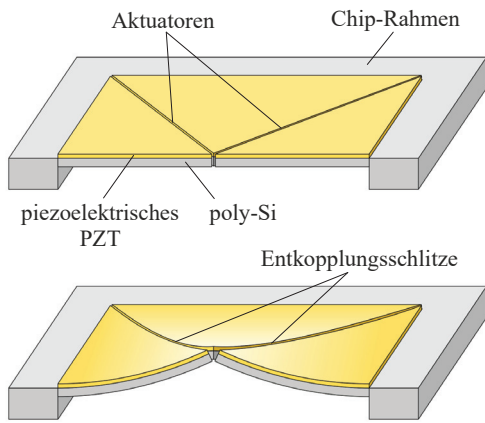
Trotz dieser Aktivitäten konnten sich MEMS-Lautsprecher noch nicht in kommerziellen Produkten etablieren, da mehrere Faktoren den Markteintritt erschweren. Hierzu zählen u. a. die oftmals zu geringe akustische Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz sowie die hohen Herstellungskosten für Konzepte, die auf einer hybriden Integration von Membranen und Magneten beruhen.

In dieser Arbeit wird daher ein integrierter piezoelektrischer Ein-Wege-MEMS-Lautsprecher für In-Ear-Anwendungen vorgestellt, der die oben genannten Probleme durch ein vollständig MEMS-kompatibles Konzept ohne geschlossene Membran [8-9] löst.

## Design-Konzept

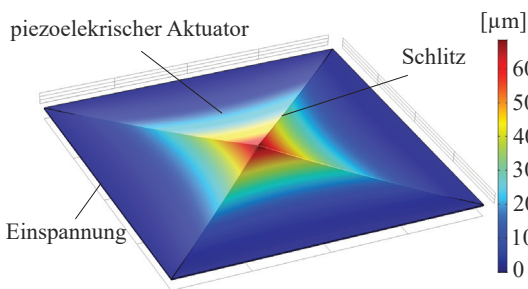
Der vorgestellte MEMS-Lautsprecher basiert auf vier dreiecksförmigen piezoelektrischen Biegeaktoren, die an einem umlaufenden Chiprahmen aus Silizium (Si) eingespannt sind. Die einzelnen Aktuatoren sind durch schmale Entkopplungs-Schlitze mechanisch voneinander getrennt und bilden zusammen die akustisch aktive Fläche. Jeder Aktor besteht aus einer passiven 15 µm dicken Polysilizium-Schicht (poly-Si), auf der 2 µm dickes piezoelektrisches PZT zwischen zwei Treiberelektroden eingebettet ist (Abbildung 1).

Durch Anlegen einer Spannung an die Treiberelektroden führen die Aktoren eine Biegebewegung aus der Ebene



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des MEMS-Lautsprecherkonzepts im nicht-ausgelenkten (oben) und ausgelenkten Zustand (unten).

aus, die die angrenzende Luft verdrängt. Da die einzelnen Antriebe mechanisch voneinander entkoppelt sind, können hohe Auslenkungen und Kräfte realisiert werden. So werden selbst bei einer steifen Aktuator-Auslenkung und einer aktiven Fläche von  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  Auslenkungen von mehr als  $60 \text{ }\mu\text{m}$  bei  $20 \text{ V}$  Antriebsspannung erreicht (Abbildung 2).



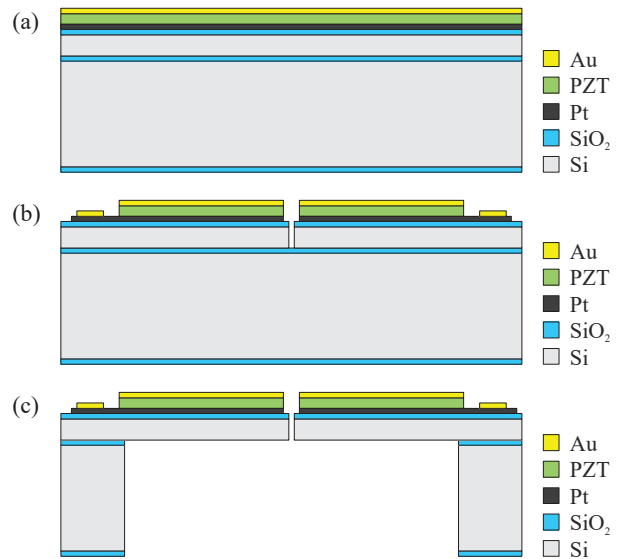
**Abbildung 2:** Simulierte Auslenkung bei statischer Anregung mit  $20 \text{ V}$  Antriebsspannung.

Da die Aktuatoren lediglich durch sehr enge Schlitze getrennt sind, entstehen entlang der inneren Spalt-Flächen hohe viskose Verluste. FEM-Simulationen zeigen, dass der parasitäre Luftstrom durch die Schlitze bei Spaltbreiten unter  $5 \text{ }\mu\text{m}$  vernachlässigbar ist [8]. Dadurch verhalten sich die mechanisch getrennten Aktoren akustisch wie eine geschlossene Membran, während die überlegene mechanische Leistungsfähigkeit der entkoppelten Struktur erhalten bleibt. Dies ermöglicht einen höheren elektromechanischen Wirkungsgrad, ein hohes Maß an Linearität sowie eine kosteneffiziente Fertigung, da keine zusätzliche flexible Membran integriert werden muss. Um parasitären Eigenmoden im audio-akustischen Bereich entgegenzuwirken und eine hohe Wiedergabebandbreite von mehr als  $20 \text{ kHz}$  zu erreichen, ist die untere Eigenmode auf eine hohe Frequenz von etwa  $8 \text{ kHz}$  ausgelegt.

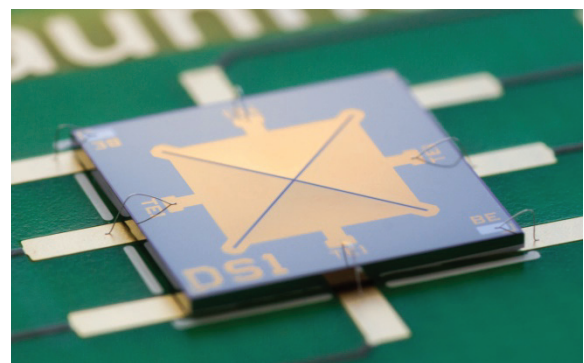
### Herstellung

Mithilfe der Silizium-MEMS-Technologie wurden Lautsprecher auf Basis des beschriebenen Konzepts hergestellt (Abbildung 3). Zunächst wurde eine polierte  $15 \text{ }\mu\text{m}$  dicke poly-Si-Schicht auf einem oxidierten  $200 \text{ mm}$  Si-Substrat realisiert. Nach Abscheidung einer zusätzlichen Silizium-

dioxid-Schicht ( $\text{SiO}_2$ ) wurde Platin (Pt) als unteres Elektrodenmaterial aufgedampft. Hierauf folgte das Sputtern einer piezoelektrischen Dünnschicht aus  $2 \text{ }\mu\text{m}$  PZT mit hohen  $e_{31,r}$ -Koeffizienten von bis zu  $18 \text{ C/m}^2$ . Nach der Realisierung einer oberen Elektrode aus Gold (Au) wurde der Aktuatorstapel, bestehend aus zwei Elektroden und der PZT-Schicht, mittels Nass- und Trockenätzverfahren strukturiert. Anschließend wurden die Entkopplungsschlitze mittels reaktivem Ionenätzen (RIE) und reaktivem Iontiefenätzen (DRIE) im  $\text{SiO}_2$  und poly-Si definiert. Zur Verringerung der Bauteildicke wurde der Wafer dann auf  $400 \text{ }\mu\text{m}$  gedünnt, bevor die Aktoren schließlich mittels DRIE von der Waferrückseite freigestellt wurden.



**Abbildung 3:** Vereinfachter Fertigungsablauf der MEMS-Lautsprecher: Abscheidung aller Funktionsschichten (a); Strukturierung der piezoelektrischen PZT-Schicht, der Elektroden und der poly-Si-Schicht (b); Freistellung von der Waferrückseite (c).



**Abbildung 4:** Foto eines MEMS-Lautsprecher-Prototyps aufgebaut auf einer Charakterisierungs-Leiterplatte.

Nach der Chip-Vereinzelung mittels Wafer-Sägen wurden die Lautsprecher-Prototypen auf Leiterplatte aufgebaut (Abbildung 4), um eine akustische und mechanische Charakterisierung zu ermöglichen. Abbildung 5 zeigt eine mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) aufgenommene Vergrößerung des zentralen Aktuator-Bereichs mit Entkopplungsschlitzen von  $9 \text{ }\mu\text{m}$  Breite.

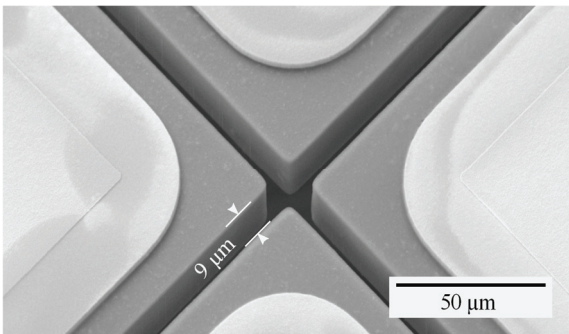


Abbildung 5: REM-Aufnahme des zentralen Aktuator-Bereichs.

## Akustische Charakterisierung

Um die akustische Leistungsfähigkeit des In-Ear-MEMS-Lautsprechers zu charakterisieren, wurden verschiedene elektroakustische Messungen durchgeführt. Hierzu gehören Messungen des SPL, THD und der elektroakustischen Empfindlichkeit.

Bei allen Messungen wurde der MEMS-Lautsprecher an einen GRAS RA0401 Ohrsimulator montiert, der die akustische Impedanz des menschlichen Gehörgangs für Frequenzen zwischen 100 Hz und 20 kHz gemäß IEC 60318-4 exakt modelliert. Rückseitig wurde der Lautsprecher zudem mit einem akustischen Rückvolumen von 0,23 ml versehen. Der Ohrsimulator wurde mit einem Microtech Gefell MV 203 Vorverstärker und einem MN 925 Netzteil kombiniert um SPL-Messungen zu ermöglichen. Die Eingangsspannung für den MEMS-Lautsprecher wurde von einem PiezoDrive PX200-Verstärker geliefert, der Eingangssignale von einem PC mit einem Steinberg UR22 USB-Audio-Interface erhielt. Während der SPL- und THD-Messungen wurden die Spannungs- und Schalldruckwerte mit einem Polytec PSV-A-010 Frontend aufgezeichnet. Zudem wurde ein PicoScope 4262 während der elektrischen Leistungsmessung zur Erfassung von Spannung und Strom eingesetzt.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der SPL-Messung für drei verschiedene Eingangssignale. Die schwarze Kurve zeigt die SPL-Werte, die mit einem exponentiellen Sinus-Sweep mit 1 V Amplitude erreicht wurden. Der SPL liegt oberhalb von 20 Hz und 4,7 kHz bei über 81 dB bzw. 100 dB und weist eine schmale Resonanz mit 138 dB bei 8,3 kHz auf. Die blaue Kurve in Abbildung 6 zeigt den SPL für einen exponentiellen Sinus-Sweep mit 1 V Maximalamplitude und einem angewandten Equalizer-Filter (EQ-Filter), mit dem ein flacher Frequenzgang erzeugt wurde. Die entsprechende Filterübertragungsfunktion ist in Abbildung 7 dargestellt.

Bei einem gefilterten Spannungssignal mit 1 V Maximalamplitude deckt der Wiedergabebereich des In-Ear-MEMS-Lautsprechers die gesamte Audiobandbreite von 20 Hz bis 20 kHz (-6 dB Grenzfrequenz) ab und erreicht einen Schalldruckpegel von bis zu 86 dB. Unter Berücksichtigung des 85 dB(A) Grenzwertes für Dauerschallpegel, definiert in der EU-Norm EN 63268-1, zeigt der Lautsprecher bereits bei 1 V eine für viele Anwendungen ausreichende Leistungsfähigkeit.

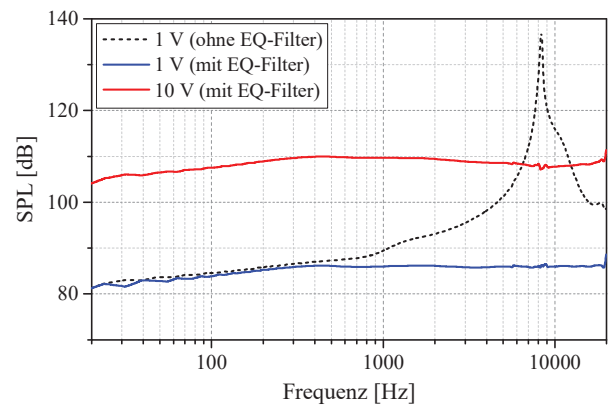


Abbildung 6: SPL gemessen in einem IEC 60318-4 Ohr-Simulator bei 1 V (ohne EQ-Filter), 1 V (mit EQ-Filter) und 10 V (mit EQ-Filter).

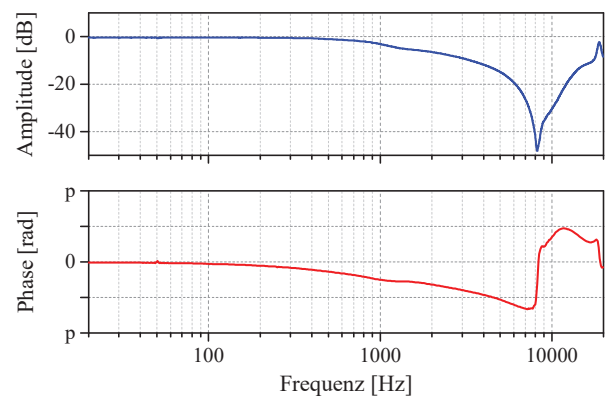
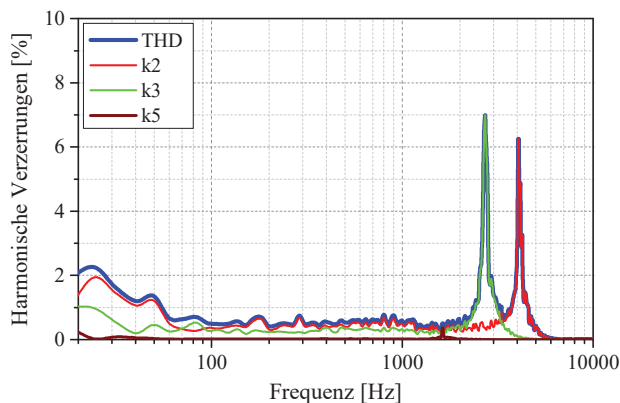


Abbildung 7: Amplituden- (oben) und Phasengang (unten) des EQ-Filters.

Wird die Ansteuerspannung unter Beibehaltung des EQ-Filters auf 10 V erhöht, erreicht der In-Ear-MEMS-Lautsprecher einen maximalen Schalldruckpegel von 110 dB und deckt mit seinem Wiedergabebereich den gesamten audioakustischen Frequenzbereich ab. Entsprechend übertrifft der MEMS-Lautsprecher bereits im Prototypenstadium die typischen SPL-Anforderungen für In-Ear-Anwendungen in der Unterhaltungselektronik und bietet Leistungsreserven für Anwendungsfälle mit höheren SPL-Anforderungen.

Um den Wirkungsgrad des Lautsprechers zu bewerten, wurde die elektroakustische Empfindlichkeit bei 10 V (mit EQ-Filter) aus den Ergebnissen von SPL- und elektrischen Leistungsmessungen berechnet. Über nahezu den kompletten Frequenzbereich liegt die Empfindlichkeit bei mehr als 105 dB/mW mit Spitzenwerten von bis zu 135 dB/mW. Obwohl diese Ergebnisse bereits eine gute Energieeffizienz aufzeigen, sei darauf verwiesen, dass weitere signifikante Verbesserungen bei der Energieeffizienz sowohl durch Anpassungen im MEMS-Design als auch durch die Verwendung verlustärmerer piezoelektrischer Materialien wie AlScN erzielt werden können.

Zur Beurteilung der Klangqualität des In-Ear-Lautsprechers wurden THD-Messungen durchgeführt, wobei das THD nach IEEE 519 2014 berechnet wurde. Die Messergebnisse für ein gefiltertes 1 V Eingangssignal (entspricht ca. 85 dB SPL) sind in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8:** Harmonische Verzerrungen bei 1 V Amplitude mit EQ-Filter (entspricht ca. 85 dB SPL).

Insgesamt sind die harmonischen Verzerrungen niedrig, bleiben unter 1 % im Frequenzbereich zwischen 60 Hz und 2,2 kHz und nähern sich bei Frequenzen über 5 kHz dem Null-Wert an. Der MEMS-Lautsprecher weist jedoch harmonische Verzerrungen von bis zu 7 % bei den Subharmonischen der Resonanzfrequenz auf. Betrachtet man Abbildung 8, so zeigen die Kurven für die durch die zweite Harmonische (k2, rot) und dritte Harmonische (k3, grün) verursachte Verzerrung, dass das System bei subharmonischer Anregung mit 2,7 kHz oder 4,1 kHz stark in seiner Resonanz bei 8,3 kHz angeregt wird. Diesem nicht-linearen Verhalten wird in Zukunft durch einen geeigneten adaptiven Regelalgorithmus entgegengewirkt. Darüber hinaus wird die nächste Generation von Lautsprechern eine erhöhte Dämpfung aufweisen, wodurch die unerwünschte Anregung durch Subharmonische direkt reduziert wird.

## Zusammenfassung und Ausblick

Ein leistungsstarker und voll integrierter piezoelektrischer MEMS-Lautsprecher für In-Ear-Anwendungen wurde entwickelt und präsentiert. Messungen an ersten Prototypen mit einem Ohrsimulator haben eine bemerkenswerte akustische Leistungsfähigkeit in Bezug auf SPL, Wiedergabebandbreite, THD und elektroakustische Empfindlichkeit ergeben.

Durch die mechanisch entkoppelte Bauweise ohne geschlossene Membran werden hohe SPL-Werte von ca. 110 dB im Bereich von 20 Hz bis 20 kHz erreicht, welches die Wiedergabebandbreite typischer elektrodynamischer und Balanced-Armature-Lautsprecher übertrifft. Gleichzeitig verfügen die MEMS-Lautsprecher über einen sehr flachen Frequenzgang, der durch eine linearisierte Ansteuerung realisiert wurde. Bezüglich der Wiedergabequalität zeichnen sich die Lautsprecher durch niedrige Harmonische Verzerrungen von weniger als 2 % für die meisten Frequenzen aus. Elektroakustische Empfindlichkeitsmessungen haben zudem eine hohe Energieeffizienz aufgezeigt, die sich in Empfindlichkeitswerten von über 105 dB/mW im nahezu gesamten hörbaren Frequenzbereich äußert.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine vielversprechende Leistungsfähigkeit, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass ca. 1 V Amplitude ausreicht, um SPL-Anforderungen typischer In-Ear Consumer-Anwendungen zu erfüllen. Darüber hinaus zeichnen sich die Lautsprecher durch eine exzellente Herstellbarkeit mit Standard-MEMS-Prozessen

aus, welches eine kosteneffiziente Serienfertigung ermöglicht.

Laufende Entwicklungen deuten darauf hin, dass weitere signifikante Verbesserungen bezüglich der akustischen Leistungsfähigkeit sowie der Bauteilgröße möglich sind und in naher Zukunft erwartet werden können. Die Weiterentwicklungen umfassen unter anderem ein überarbeitetes MEMS-Design mit reduzierter Baugröße, eine erhöhte Dämpfung sowie eine verbesserte akustische Trennung. Zudem wird bleifreies AlScN als piezoelektrisches Material integriert, das eine noch höhere Energieeffizienz, Linearität sowie volle CMOS-Kompatibilität bietet. Davon abgesehen wird derzeit ein adaptiver Regelalgorithmus entwickelt, der eine weitere Reduzierung von THD- und Intermodulationsverzerrungen ermöglicht.

## Literatur

- [1] M. A. Harradine, T. S. Birch, J. C. Stevens, C. Shearwood. "A micro-machined loudspeaker for the hearing impaired", in Digest Tech. Papers Transducers'97 Conference, Chicago, June 16-19, 1997, pp. 429-432.
- [2] M.-C. Cheng, W.-S. Huang, S. R.-S. Huang, "A silicon microspeaker for hearing instruments", J. Micromech. Microeng., vol. 14, pp. 859-866, 2004.
- [3] S.-S. Je, F. Rivas, R. E. Diaz, J. Kwon, J. Kim, B. Bakaloglu, S. Kiaei, J. Chae, "A compact and low-cost MEMS loudspeaker for digital hearing aids", IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst., vol. 3, pp. 348-358, 2009.
- [4] Y. C. Chen, Y. T. Cheng, "A low-power milliwatt electromagnetic microspeaker using a PDMS membrane for hearing aids applications", in Proc. 24th Int. Conf. MEMS, Cancun, January 23-27, 2011, pp. 1213-1216.
- [5] B. Y. Majlis, G. Sugandi, M. M. Noor, "Compact electrodynamic MEMS-speaker", in Proc. Semiconductor Technology International Conference, Shanghai, March 12-13, 2017.
- [6] S. S. Lee, R. P. Ried, R. M. White, "Piezoelectric cantilever microphone and microspeaker", J. Microelectromech. Syst., vol. 5, pp. 238-242, 1996.
- [7] T. S. Albach, P. Horn, A. Sutor, R. Lerch, "Sound generation using a magnetostrictive microactuator", J. Appl. Phys., vol. 109, 07E510, 2011.
- [8] F. Stoppel, C. Eisermann, S. Gu-Stoppel, D. Kaden, T. Giese, B. Wagner, "Novel membrane-less two-way MEMS loudspeaker based on piezoelectric dual-concentric actuators", in Digest Tech. Papers Transducers'17 Conference, Kaohsiung, June 18-22, 2017, pp. 2047-2050.
- [9] A. Männchen, D. Beer, F. Niekil, J. Nowak, F. Stoppel, B. Wagner, "Analysis of the mechanical vibration and acoustic behavior of a piezoelectric MEMS microspeaker", in Proc. 143rd Int. Conv. Audio Eng. Soc., New York, October 18-21, 2017.