MEMS-Lautsprecher — Ein Paradigmenwechsel

Daniel Beer, Andrea Rusconi, Fabian Stoppel, Lutz Ehrig

Mit der steigenden Nachfrage für Kopfhörer-bezogene Audio-Wiedergabe sind auch die Anforderungen an die darin verwendeten Lautsprecher (Wandler) gestiegen. Kleiner, leichter und billiger sollen sie werden und bei dennoch großem Klang möglichst wenig elektrische Energie benötigen. Neben den zwei vorrangig eingesetzten Lautsprechertypen, nämlich dem elektrodynamischen und dem Balanced Armature (insbesondere Hörgeräte), werden zunehmend die sogenannten MEMS-Lautsprecher in Betracht gezogen. Wenngleich die Historie zeigt, dass bereits in den 90er-Jahren MEMS-Lautsprecherkonzepte existierten, so ist es erst in den Jahren 2018/2019 gelungen, überzeugende Demonstratoren bzw. fertige Produkte mit diesen auszustatten. Anhand von drei aktuellen MEMS-Lautsprecherkonzepten wird das große Potenzial dieser Technologie für die genannten Herausforderungen aufgezeigt.

MEMS loudspeakers — A paradigm shift

With the increasing demand for headphone-related audio reproduction, the requirements for the loudspeakers (transducers) have also increased. They should become smaller, lighter and cheaper, while requiring as little energy as possible to produce great sound. In addition to the two primarily used loudspeakers, namely the electrodynamic and balanced armature (especially hearing aids), so-called MEMS loudspeakers are being increasingly considered. Although history shows that MEMS loudspeaker concepts already existed in the 1990s, it was not until 2018/2019 that convincing demonstrators or finished products were equipped with them. Three current MEMS loudspeaker concepts are presented to demonstrate the great potential of this technology for the challenges mentioned above.

Einleitung (Daniel Beer)

Seit die ersten funktionsfähigen MEMS-Lautsprecher zur Charakterisierung am Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT eintrafen, ist dieser Technologiebereich ein wichtiges Thema in der Forschergruppe Elektroakustik in Ilmenau. Mit nunmehr vier Partnern aus Forschung und Industrie begleitet das Fraunhofer IDMT die Entwicklung dieser spannenden und zukunftsweisenden Technologie.

Da sich zunehmend Unternehmen mit der Entwicklung von MEMS-Lautsprechern befassen bzw. diese als Produkte auf den Markt bringen, beschreibt dieser Artikel drei ausgewählte aktuelle MEMS-Lautsprecherkonzepte.

Marktpotenzial Portable Audio

Ob Smartphones, Kopfhörer oder Hearables: Die weltweite Nachfrage nach portablen Audiogeräten ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen, und es besteht weiterhin ein hohes Wachstumspotenzial. Nach einer aktuellen Studie des Marktforschungsunternehmens GfK sind Kopfhörer und Headsets nach wie vor die größten Wachstumstreiber auf dem globalen Markt für Audiogeräte [1] und verzeichneten im Jahr 2018 – gegenüber dem Vorjahr – einen um fast 40 % gestiegenen weltweiten Gesamtumsatz auf rund 14 Milliarden Euro [2].

Die Funktionsvielfalt heutiger Geräte geht weit über grundlegende Anwendungen hinaus und wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen. Bestand bei Kopfhörern bisher bereits ein Mehrwert in der Integration von Bluetooth und Active Noise Canceling (ANC), so dreht sich die Entwicklung des zukünftigen Kopfhörers um Zusatzfunktionen wie Sprachbefehlssteuerung, selektives Hören (Smart ANC) und automatische Klangentzerrung. Zahlreiche Smartphone-Hersteller wie auch immer mehr Start-ups gehen in Ihren Entwicklungen noch einen Schritt weiter und bringen Kopfhörer mit weitaus mehr Funktionen als gewöhnliche Bluetooth-Kopfhörer auf den Markt. Diese sogenannten Hearables sind sprachgesteuert und bieten neben den klassischen Diensten, wie Telefonieren, Musikhören und ANC, auch Funktionen von heutigen Simultanübersetzern, Navigationssystemen und intelligenten persönlichen Assistenten (z. B. Alexa, Siri, Cortana). Auf dem weltweiten Markt der Wearables wird den Hearables in den kommenden Jahren ein starkes Wachstum prognostiziert. Allein im zweiten Quartal 2019 gehörten die Hearables mit einem Anteil von 46,9 % zu dem am schnellsten wachsenden Produktsegment im Wearable-Markt. In 2018 betrug dieser lediglich 24,8 % [3].

Wenngleich Hörgeräte nicht auf den ersten Blick in die Kategorie portabler Audiogeräte zählen, so stre-

ben die Hersteller auch hier eine Erweiterung der Funktionsvielfalt an. Dadurch soll zum einen dem Hörgeräteträger die Ankopplung bzw. Nutzung zusätzlicher Dienste ermöglicht und zum anderen die Attraktivität und damit die Nutzerakzeptanz – es ist eben nicht nur eine Hörhilfe als Prothese – gesteigert werden.

Die zunehmende Funktionalität und Miniaturisierung dieser Geräte stellen hinsichtlich der technischen Realisierung neue Herausforderungen an die Komponenten- und Systementwickler. Die einzelnen Komponenten müssen demnach in ihrer Größe reduziert bzw. ineinander integriert werden, ohne die Leistungsfähigkeit, wie etwa die Klangqualität und die Akkulaufzeit zu beeinträchtigen. Folglich müssen die aktiven Komponenten sehr viel effizienter arbeiten. Zudem verlangt der Markt nach Geräten, welche zum etablierten Preis der Vorgängermodelle den erweiterten Funktionsumfang bieten.

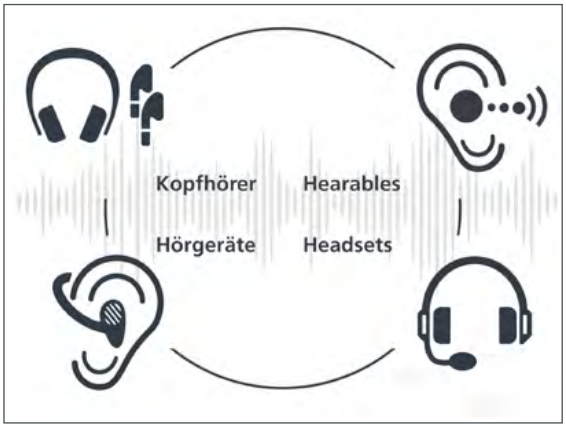


Abb. 1: Die vielversprechenden Einsatzbereiche für MEMS-Lautsprecher sind aus heutiger Sicht Kopfhörer, Hearables, Headsets und Hörgeräte, nach [4].

Elektroakustische Anforderungen an den Lautsprecher

Eine wesentliche Rolle spielen bei portablen Audiogeräten die elektroakustischen Komponenten Mikrofon, Lautsprecher und die zugehörige Signalverarbeitungseinheit. Der Lautsprecher eines In-Ohr-Kopfhörers muss im Ohr einen bestimmten Schalldruckpegel generieren. In Abb. 2 ist ein Ohrkanal skizziert, der links von einem In-Ohr-Kopfhörer und rechts vom Trommelfell abgeschlossen wird. Durch die Bewegung der Lautsprechermembran des In-Ohr-Kopfhörers wird Schall im Ohrkanal generiert. Unter der Annahme eines komplett vom In-Ohr-Kopfhörer verschlossenen Ohrkanals (1280 mm³ Volumen) skizziert Abb. 3 die erforderliche Membranauslenkung für einen bestimmten Schalldruckpegel. Die Größe der Lautsprechermembran

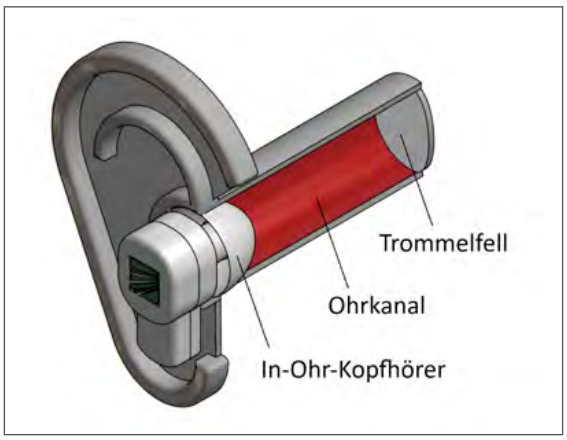
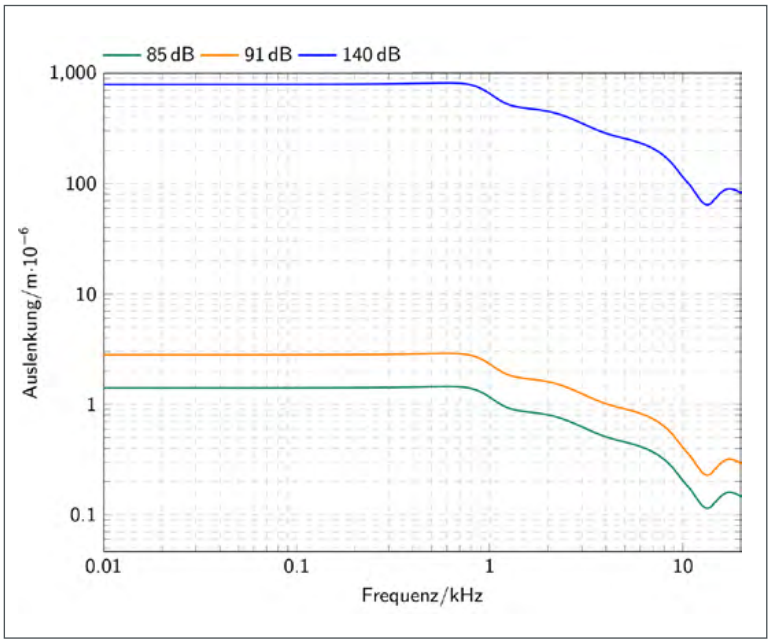


Abb. 2: Skizziertes Szenario eines Ohrkanals mit In-Ohr-Kopfhörer [5].

beträgt immer 10 mm².

Für einen Schalldruckpegel von 85 dB, im Frequenzbereich 10 Hz bis ca. 800 Hz, ist eine Membranauslenkung (kolbenförmig) von etwa 1,5 µm erforderlich. 91 dB werden mit ca. 3 µm und 140 dB mit ungefähr 800 µm erzielt. Gegenüber der erforderlichen Membranauslenkung eines Hifi-Lautsprechers sind diese Werte sehr klein. Der Kopfhörerlautsprecher profitiert von seiner unmittelbaren Nähe zum Trommelfell und der nahezu vollständigen Schallabstrahlung in den Ohrkanal. Bei einem Hifi-Lautsprecher ist der typische Hörabstand wesentlich größer und nur ein Bruchteil des Schalls erreicht den Ohrkanal. Neben dem Schalldruckpegel werden an einen Lautsprecher für Kopfhörer bzw. Hörgeräte

Abb. 3: Erforderliche Membranauslenkung (Kolbenmembran, 10 mm² Fläche) zum Erzeugung von 85 dB, 91 dB und 140 dB im geschlossenen Ohrkanal (1280 mm³ Volumen) [5].



Tab. 1: Mindestlautsprecheranforderungen in den Applikationen Kopfhörer/Hearable und Hörgerät, nach [6-10].

Parameter	In-Ohr-Kopfhörer/ -Hearables	Hörgerät (klassisch)
Schalldruckpegel (max.)	≥ 110 dB (Ohrsimulator)	≥ 120 dB (Ohrsimulator)
Klirrfaktor (THD) @ max. SPL	< 1 %	< 5 %
Frequenzbereich (f_{Grenz} @ -20 dB)	20 Hz - 20 kHz	100 Hz - 6 kHz
Kennschalldruckpegel	105 dB/1 mW	105 dB/1 mW
Batterielebensdauer (System)	–	100 h (Zink-Luft-Batterie)
Akku-Betrieb (System mit Streaming)	4 h - 10 h	14 h
Versorgungsspannung	3,6 V (Lithium-Polymer)	3,6 V (Lithium-Polymer)
Größe	(Ø, H) 7 mm - 14 mm, 3 mm - 8 mm	(L×B×H) 9 mm x 6 mm × 3 mm
Gewicht	≤ 2 g	< 1 g
Elektronisch entzerrt/ geregelt	produktabhängig	nein
Preis	< 3 USD	< 5 USD

noch weitere Anforderungen gestellt. In Tab. 1 sind beispielhaft Mindestanforderungen für den jeweiligen Einsatzbereich aufgeführt. Die akustischen Parameter beziehen sich jeweils auf die Messung in einem Ohrsimulator, z.B. DIN EN 60318-4, der dem menschlichen Ohrkanal nachempfunden ist.

Für die meisten Kopfhörerapplikationen wird bisher der Lautsprecher mit elektrodynamischem Wandlerprinzip [11-14] eingesetzt. In Abb. 4 ist ein In-Ohr-Kopfhörer mit elektrodynamischen Lautsprecher zu sehen. Infolgedessen vornehmlichen Verwendung von elektrodynamischen Lautsprechern in Kopfhörern ist deren technische Reife und industrielle Fertigung über viele Jahre optimiert worden. Dies ermöglicht ein sehr gutes Preis-Leistungsverhältnis. Lediglich in den Bereichen Hörgerät und In-Ohr-Kopfhörer für Monitorzwecke wird bisher ein anderer Lautsprecher, nämlich der Balanced Armature Lautsprecher (BA-Lautsprecher) [13; 15-17], eingesetzt (Abb. 5). Er erfüllte bisher die Kombination aus Größe und Effizienz besser und sein höherer Preis ist in diesen Märkten weniger kritisch. Durch den anhaltenden Wunsch einer weiteren Miniaturisierung wird die Verwendung des elektrodynamischen, aber auch des BA-Lautsprechers infolge der Größe zunehmend schwierig. Es fehlt zunehmend der Einbauraum. Beim BA-Lautsprecher ergibt sich der notwendige Einbauraum allein durch seine Abmessungen. Er benötigt kein zusätzliches Gehäuse, da kein akustischer Kurzschluss stattfinden kann. Beim elektrodynamischen Lautsprecher braucht es hingegen ein zusätzliches Gehäuse, um den Kurzschluss zu verhindern. Demzufolge kommen zu den eigentlichen Lautsprecherabmessungen noch die des nötigen Gehäuses hinzu. Der damit geringere Platzbedarf des BA-Lautsprechers ist aber nur dann gegeben, wenn nur in einem schmalen Frequenzbereich Schall erzeugt werden muss. Zur Schallerzeugung über einen breiten Frequenzbereich, etwa zum Musikhören, ist die Kombination mehrerer BA-Lautsprecher nötig, da ihr Übertragungsverhalten zu schmalbandig ist. Je nach Anzahl ist so der gleiche Einbauraum wie der bei Verwendung eines elektrodynamischen Lautsprechers erforderlich. Je nach Anwendung gibt es bei der Anordnung der BA-Lautsprecher zueinander Freiheiten, die gegenüber dem elektrodynamischen Lautsprecher eine größere Designvielfalt des Einbauraumes ermöglichen.

Hinsichtlich der Kosten ist der elektrodynamische Lautsprecher i.d.R. deutlich preisgünstiger als der BA-Lautsprecher. Dies bedingt seine bevorzugte Verwendung in den aktuellen In-Ohr-Kopfhörern.

Abb. 4: Aktueller In-Ohr-Kopfhörer (Explosionszeichnung) [18] und vergrößert dargestellter elektrodynamischer Lautsprecher [5].

Abb. 5: Aktuelles Hörgerät [19] und vergrößert dargestellter BA-Lautsprecher [5].

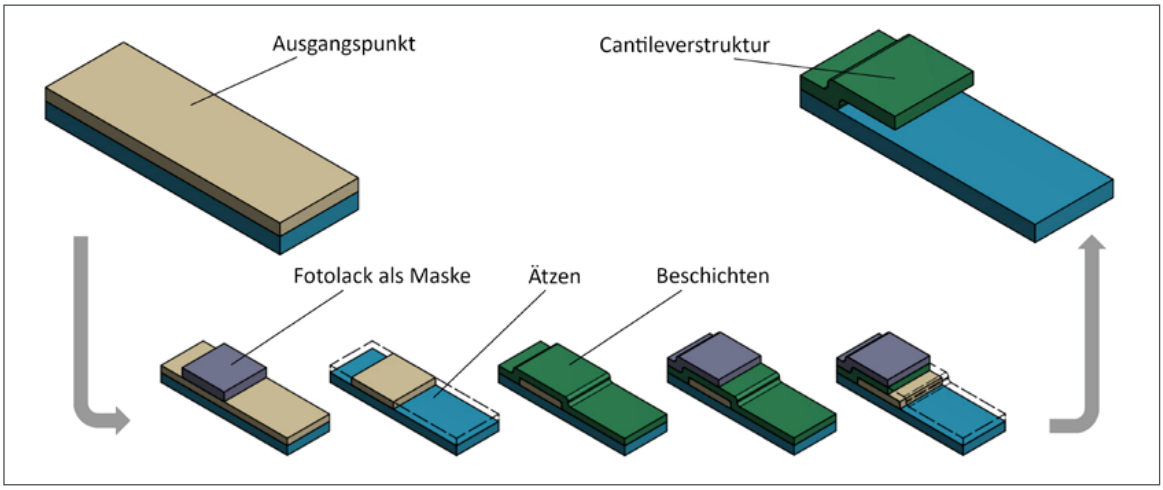


Abb. 6: Schematische Darstellung des schrittweisen Aufbaus, z.B. Belichtung Fotolackmaske, Ätzen, Bedampfen, einer Cantileverstruktur im MEMS-Fertigungsprozess [5].

Grundlagen MEMS-Technologie

Das Akronym MEMS steht für Micro-Electro-Mechanical-System und beschreibt miniaturisierte Systeme, welche sowohl elektrische als auch mechanische Funktionselemente umfassen und unter Berücksichtigung von Designaspekten und Technologien der Halbleiterindustrie gefertigt werden. Hierdurch können Strukturen im Submikrometerbereich mit hoher Wiederholgenauigkeit und mit hohem Durchsatzvolumen (Parallelverarbeitung, siehe unten) realisiert werden. Daraus ergibt sich eine sehr hohe Bauteilqualität zu einem attraktiven Preis.

Abhängig vom jeweils gewählten Prozess werden die Komponenten aus einer mehrschichtigen Struktur durch lokal wirkende additive und subtraktive Verfahren (z. B. Ätzen und Bedampfen) gebildet (Abb. 6).

Die Fertigung von MEMS-Chips findet in Reinräumen statt, um eine Kontamination der Chip-Oberflächen mit Partikeln zu unterbinden. Das Ausgangsmaterial für den Aufbau der MEMS sind zumeist runde Scheiben aus hochreinem Silizium, die sogenannten Wafer. Auf einem Wafer können viele Chips, z. B. je nach Applikation und erforderlicher Chipfläche mehrere Tausend, parallel hergestellt werden. Anzustreben ist, die Anzahl der Chips pro Wafer zu maximieren und die Anzahl der technologischen Prozessschritte zu reduzieren. Im Anschluss werden die Chips vereinzelt, ihre Komponenten elektrisch verbunden (gebondet) und mit einem Gehäuse versehen (Abb. 7). Die Prozessierung kompletter Wafer bietet somit nicht nur attraktive Fertigungskosten durch die Parallelverarbeitung, sondern ermöglicht in der Flexibilität der Wafer-Anzahl auch ein hohes Maß an Skalierbarkeit des Produktionsvolumens.

Neben der mechanischen Komponente kann – gemäß der Bezeichnung MEMS – im Gehäuse gleichzeitig auch die Signalverarbeitungseinheit in Form eines ASIC (Application Specific Integrated Circuit) untergebracht sein (Abb. 8). Mit der Integration von

Abb. 7: Schematische Darstellung der Fertigungsschritte eines MEMS-Bausteins vom nackten Wafer bis zum MEMS-Chip [5].

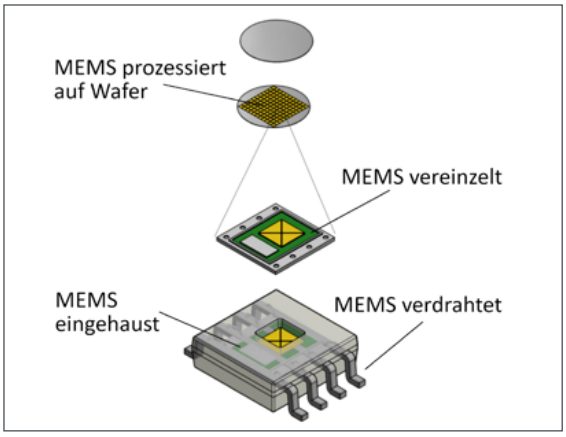
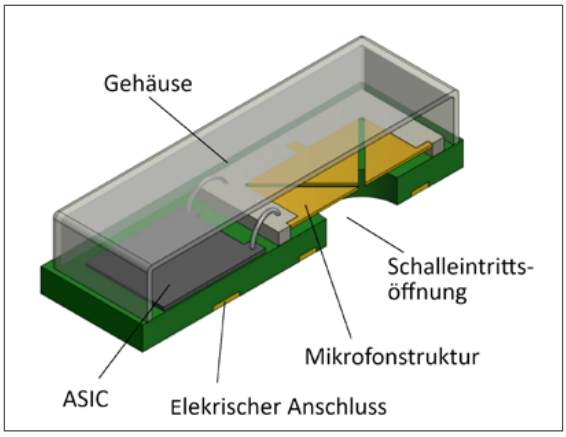


Abb. 8: Schematische Darstellung eines MEMS-Mikrofonchips mit der mechanischen Struktur des Mikrofons und dem ASIC in einem Gehäuse [5].



mehreren Funktionseinheiten in ein Bauteil bzw. Gehäuse reduzieren sich je nach Ausführungsform die energetischen Verluste als auch der erforderliche Einbauraum im späteren Endgerät.
Ausgeführt als SMD-Bausteine (Surface-mounted device, deutsch: oberflächenmontiertes Bauelement) kann der MEMS-Baustein durch vollautomatischer Bestückungslinien mit Lötöfen verbaut werden. Das reduziert zum einen Montagekosten und ermöglicht zum anderen ein sehr dichte Platinenbestückung, was ggf. den erforderlichen Einbauraum im Endgerät reduziert.
In unterschiedlichen Anwendungsbereichen haben sich MEMS-Komponenten, z. B. Beschleunigungssensoren für Airbags, bereits etabliert. Hinsichtlich akustischer Komponenten dominieren MEMS-Mikrofone seit dem Jahr 2014 den Anwendungsbereich portabler Audiogeräte, der bis dahin vom Elektretmikrofon bedient wurde [20]. Erste Designs für MEMS-Mikrofone entstanden aber bereits Anfang der 1980er Jahre [21; 22]. Dank der MEMS-Technologie konnte eine deutliche Reduzierung der Mikrofongröße und des Preises bei gleichzeitig verbesserter Leistungsfähigkeit, geringere Anfälligkeit, z.B. gegen Körperschall, erzielt werden. Heute decken MEMS-Mikrofone alle Mikrofonanwendungen in den Mobilgeräten ab.

Erste MEMS-Lautsprecher-Ansätze

In Bezug auf die benötigte Lautsprecherkomponente ist die MEMS-Technologie erst in den vergangenen Jahren verstärkt in die Betrachtung gezogen worden. Allerdings wird ähnlich der Entwicklungsgeschichte des MEMS-Mikrofons bereits seit vielen Jahre an Lautsprechern auf Basis der MEMS-Technologie geforscht. Der erste MEMS-Lautsprecher wurde nach Kenntnis der Autoren im Jahr 1994 von Lee et al. vorgestellt [23; 24]. Es handelt sich dabei um einen piezoelektrischen Biegeschwinger (Abb. 9). Das piezoelektrische Aktorelement stellt gleichzeitig die 2 mm × 2 mm große Lautsprechermembran dar. Sie ist einseitig geklemmt. Die anderen drei Seiten sind vom restlichen Substrat durch einen 10 µm großen Spalt getrennt. Durch diese mechanische Entkopplung kann die Membran weit ausgelenkt werden, ohne auf eine Materialstreckung angewiesen zu sein [25].
Der erzielte mittlere Schalldruckpegel, gemessen im Ohrsimulator (2 cm^3 Kupplervolumen), betrug etwa 75 dB bei 8 V_{pp}. Der Übertragungsbereich war sehr stark von Resonanzen (Pegelschwankungen zum Teil größer 40 dB) geprägt. Ausgehend von der in Tab. 1 gewählten Definition des Übertragungsbereiches (Grenzfrequenz bei -20 dB Pegelabfall gegenüber mittlerem Pegel) wurde deshalb kein geeignetes Übertragungsverhalten für Kopfhörer- bzw. Hörgeräteanwendungen erreicht. Über Korrekturmaßnahmen, wie sie bei aktuellen MEMS-Lautsprechern angewandt werden, z. B. elektronische Entzerrung, wird in [25] nicht berichtet.
In den Jahren 1996/1997 stellen Harradine et al. einen elektrodynamischen MEMS-Lautsprecher vor (Abb. 10) [27; 28]. An einer kreisrunden Membranscheibe, ca. 2,5 mm im Durchmesser, ist ein Permanentmagnet befestigt. Dieser interagiert mit einem Elektromagnet, gebildet durch eine stationäre Spule. Die Membran ist am Rand mit dem umliegenden Substrat verbunden. Allerdings weist diese Verbindung eine Vielzahl an Schlitzen auf. Diese dienten, wie bei Lee et al., einer möglichst weichen Aufhän-

Abb. 9: Schematische Darstellung des piezoelektrischen MEMS-Lautsprechers von Lee et al. aus dem Jahr 1994 in der Schnittansicht (links) und der Draufsicht (rechts) [26].

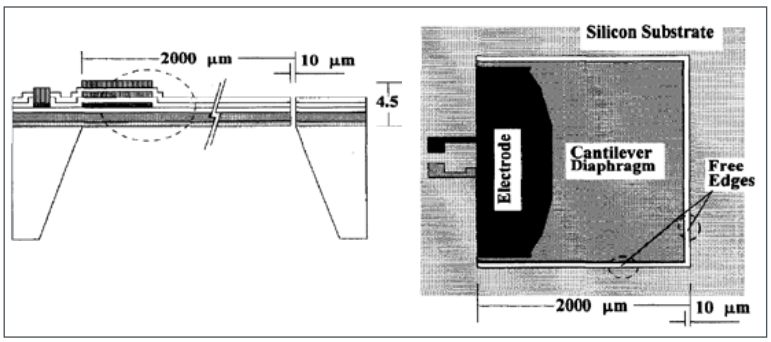
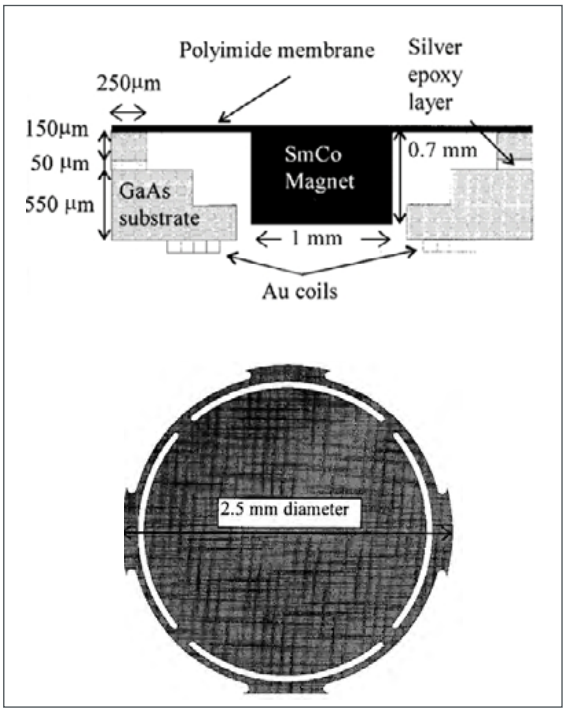


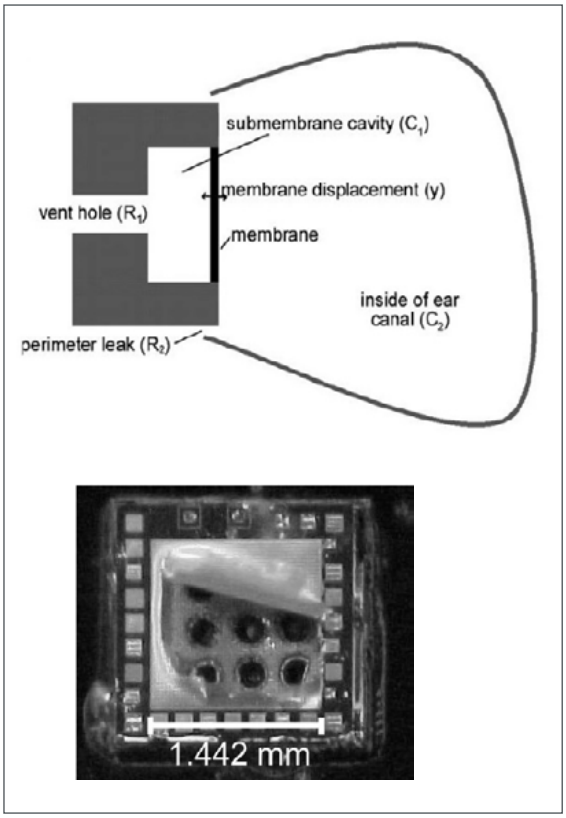
Abb. 10: Schematische Darstellung des elektrodynamischen MEMS-Lautsprechers von Harradine et al. aus dem Jahr 1997 in der Schnittansicht (oben) und in der Draufsicht (unten) [29].



gung. Der mittlere Schalldruckpegel, gemessen im Ohrsimulator (2 cm^3 Kupplervolumen), betrug ca. 45 dB. Aussagen zur Ansteuerspannung sind nicht aufgeführt. Der Schalldruckpegelverlauf war im Gegensatz zum Ansatz von Lee et al. nicht von resonanzverursachten Überhöhungen bzw. Einbrüchen dominiert. Dafür waren die erzielten 45 dB Schalldruckpegel so gering, dass diese Ausführungsform bei Weitem die Anforderungen an Lautsprecher für Kopfhörer bzw. Hörgeräte (Tab. 1) nicht erfüllt.

Im Jahre 1999 melden Loeb et al. einen elektrostatischen MEMS-Lautsprecher zum Patent an [30; 31]. Gegenüber den oben genannten MEMS-Lautsprechern wurde dieser digital angesteuert. Eine 1,4 mm große Membranelektrode bildete mit einer dahinter befindlichen Statorelektrode einen Elektrostaten (Abb. 11). Der Lautsprecher erreichte, gemessen im Ohrsimulator (2 cm^3 Kupplervolumen, DIN IEC 60711), einen mittleren Schalldruckpegel von etwa 75 dB bei 27 V_{PP} mit einer Bias-Spannung von 67 V_{DC}. Der Übertragungsbereich erstreckte sich von ca. 20 Hz bis 7 kHz. Trotz des damit geforderten Übertragungsbereiches für Hörgeräte (Tab. 1) ist die Lautsprecherausführung wegen des geringen Schalldruckpegels ungeeignet.

Abb. 11: Schematische Darstellung des elektrostatischen MEMS-Lautsprechers von Loeb et al. aus dem Jahr 1999 in der Schnittansicht (oben) und in der Draufsicht (unten) [32].



Aktuelle MEMS-Lautsprecher-Ansätze

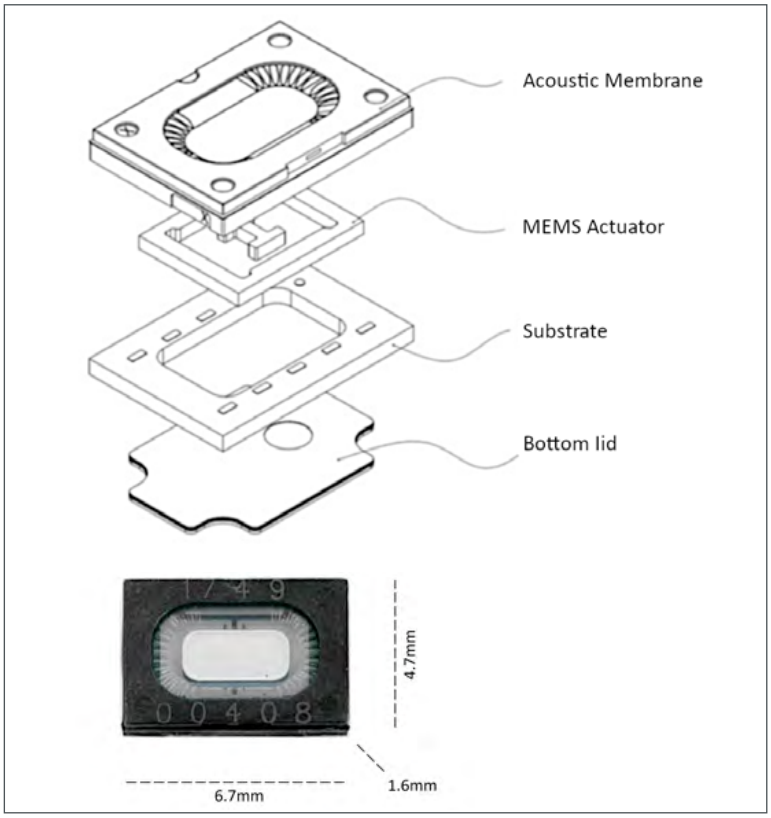
Die Recherche zu MEMS-Lautsprecheransätzen offenbart eine Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Patentschriften. Mit Blick auf den Markt wurden aber weitaus weniger Ansätze bis zur tatsächlichen Marktreife gebracht. Die drei nachfolgend dargestellten MEMS-Lautsprechertechnologie wurden ausgewählt, da ihr aktueller Entwicklungsstand durch veröffentlichte Leistungsparameter als auch öffentliche Technologiedemonstrationen nachgewiesen ist.

<u>USound (Andrea Rusconi)</u>

– Funktionsprinzip –

Die USound GmbH bietet seit dem Jahr 2019 MEMS-Lautsprecher auf dem Markt an. Das Konzept beruht auf einer piezoelektrischen MEMS-Aktorik, auf welche in einem zusätzlichen Verarbeitungsschritt eine Polymer-Lautsprechermembran, ähnlich der eines Smartphone-Lautsprechers, aufgebracht wird (Abb. 12). Aus diesem Grund handelt es sich nicht um einen reinen MEMS-Lautsprecher, sondern um einen Hybridansatz. Der Gedanke hinter dieser Kombination ist die Maximierung der Membrangröße, ohne die MEMS-Komponente (Chip) und damit die Kosten zu vergrößern. Die piezoelektrische Aktorik, aufgebaut aus mehreren Bie-

Abb. 12: Schematische Darstellung der Hauptbestandteile des USound-Lautsprechers (oben), Foto eines USound-Lautsprechers in der Draufsicht (unten) [33].



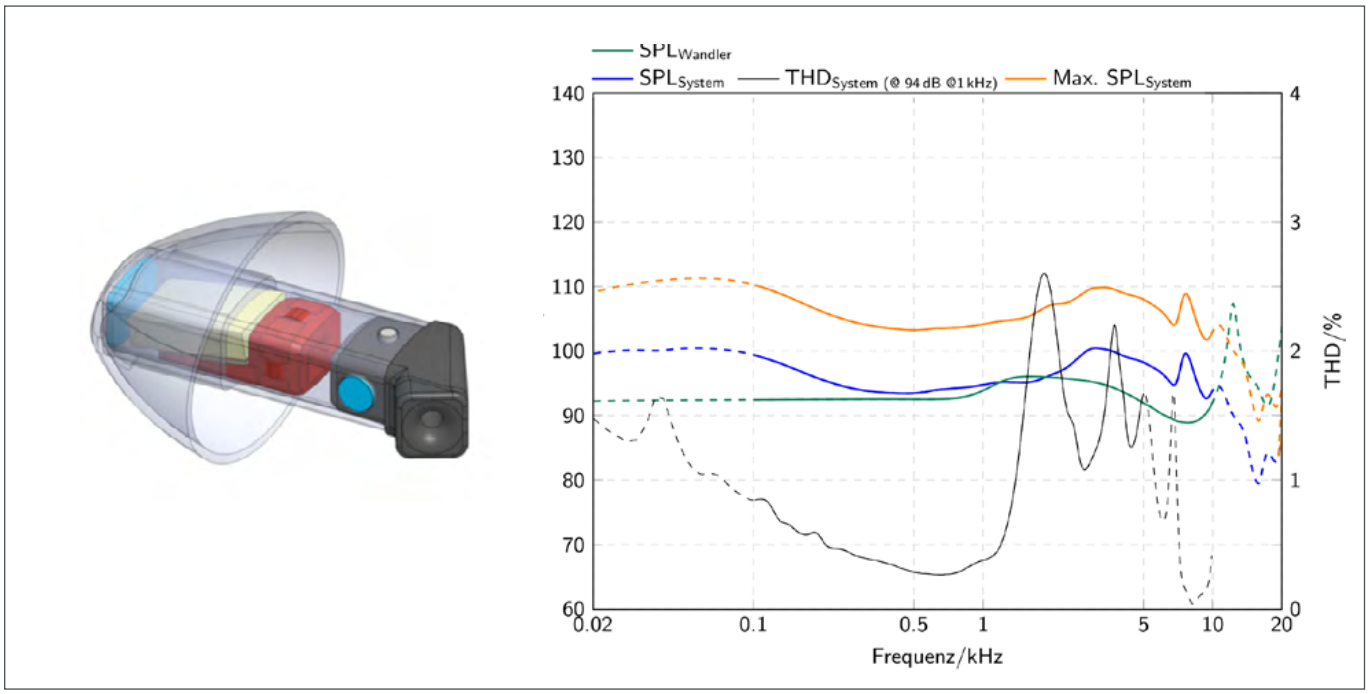
geaktoren, besteht aus dem Material PZT (Blei-Zirkonat-Titanat). In der Gruppe der piezoelektrischen Materialien weist dieses eine hohe Energiedichte auf und bietet damit das Potenzial sowohl die Kraft- als auch die Auslenkungsanforderungen für einen Lautsprecher zu erfüllen. Beim Anlegen eines Lautsprechersignals kommt es zur kolbenförmigen Auslenkung der Lautsprechermembran, aus der Ebene heraus. Entsprechend der verschobenen Luftmenge entsteht Schall. Der MEMS-Lautsprecher ist 4,7 mm × 6,7 mm groß und 1,6 mm dick.
In Abb. 13 (rechts) ist der Amplitudenfrequenzgang des MEMS-Lautsprechers (SPLWandler), gemessen in einem Ohrsimulator (DIN EN 60318-4), dargestellt. Die Grundresonanz des Lautsprechers liegt bei ca. 2.8 kHz und wird passiv bedämpft.

– Anwendungsszenario In-Ohr-Kopfhörer –
In Abb. 13 (links) ist ein In-Ohr-Kopfhörer, basierend auf dem MEMS-Lautsprecher, dargestellt. Mit nur einem MEMS-Lautsprecher wird der gesamte Hörfrequenzbereich abgedeckt (Abb. 13 (rechts), SPLSystem). Als Zielkurve wird eine Empfehlung von Sean Olive [34] verwendet, welche auf die Hörgewohnheiten des Durchschnittshörers angepasst ist. Mittels akustischem Design und Lautsprecheransteuerung wird diese Zielkurve gut nachgebildet. Der Klirrfaktor für einen Schalldruckpegel von 94 dB/1 kHz liegt unterhalb von 4 kHz unter 1 %. Oberhalb von 4 kHz tretenden Klirrfaktor-Spitzen von mehr als 1 % auf. Diese werden durch Subharmonische der Lautsprecherresonanzen verursacht. Durch eine entsprechende Signalverarbeitung und ein angepasstes Schallführungsdesign sind diese reduzierbar. Der maximale Schalldruckpegel des Systems (Max. SPL_{System}) liegt für 1 kHz bei 104 dB. Die erforderliche Bias-Spannung liegt bei 15 V_{DC} und die Signalspannung bei 30 V_{PP} .

– Ausblick –
Durch den hybriden Aufbau soll die verwendete Silizium-Fläche weiter verringert werden. Hilfreich ist die Verwendung der Mehrschicht-Piezo-Technologie. Diese Maßnahmen sollen die Kosten weiter senken.

Fraunhofer ISIT (Fabian Stoppel)
– Funktionsprinzip –
Der MEMS-Lautsprecheransatz des Fraunhofer-Institutes für Siliziumtechnologie ISIT basiert auf mehreren piezoelektrischen Biegeaktoren, die an einem umlaufenden Chiprahmen aus Silizium (Si) eingespannt sind. Die einzelnen Aktoren sind durch schmale Entkopplungsschlitze mechanisch voneinander getrennt und bilden zusammen die akustisch aktive Fläche. Jeder Aktor besteht aus einer dünnen Polysilizium-Schicht (poly-Si), auf der eine piezoelektrische PZT-Dünnschicht zwischen

Abb. 13: Schematische Darstellung eines In-Ohr-Kopfhörer der Fa. USound, basierend auf einem MEMS-Lautsprecher (links), Verlauf des Schalldruckpegels und des Klirrfaktors des USound-In-Ohr-Kopfhörers (rechts), der gestrichelte Kurvenbereich liegt außerhalb des definierten Arbeitsbereiches des verwendeten Ohrsimulators. Für die Max. SPL-Kurven wurde der MEMS-Lautsprecher mit 15 V_{AC} und 15 V_{PP} betrieben [33].



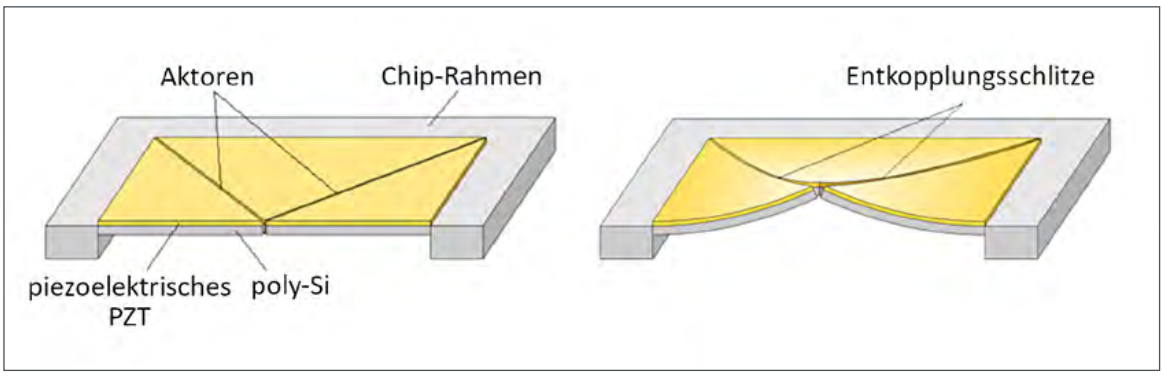


Abb. 14: Schematische Darstellung des MEMS-Lautsprecherkonzepts mit Membranelementen in ruhendem (links) bzw. ausgelenktem Zustand (rechts) in der Schnittansicht [35].

zwei Treiberelektroden eingebettet ist. Der Aktor ist vollständig mittels industriell verfügbarer Standard-MEMS-Technologie herstellbar.

Abb. 14 veranschaulicht das Konzept anhand eines Lautsprecher-Designs mit vier dreieckigen Aktoren. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die Treiberelektroden kontrahiert die piezoelektrische Dünnschicht. In der Folge führen die Aktoren eine Biegebewegung aus der Ebene aus, die die angrenzende Luft in Bewegung versetzt. Aufgrund der hohen Energiedichte des piezoelektrischen Antriebs sowie der Tatsache, dass die einzelnen Aktoren mechanisch voneinander entkoppelt sind, können hohe Auslenkungen und Kräfte realisiert werden. Da die Aktoren lediglich durch enge Schlitze voneinander getrennt sind, entstehen entlang der inneren Spaltflächen viskose Verluste. Simulationen zeigen, dass der parasitäre Luftstrom durch die Schlitze bei Spaltbreiten unterhalb von 5 µm vernachlässigbar ist. Dadurch verhalten sich die mechanisch getrennten Aktoren akustisch wie eine geschlossene Membran, während die Vorteile der mechanischen Entkopplung erhalten

MBBM
MÜLLER-BBM GROUP

Beratung | Dienstleistungen | Produkte

Besuchen Sie uns auf der DAGA 2020 an **Stand 27**

Kompetenz in Akustik und Schwingungen

Schallschutz | Sound Design | Raum- und Bauakustik | Messtechnik | Bauphysik | Forschung
Industrieakustik | Lärmbekämpfung | Messungen | Schwingungsreduktion
Psychoakustik | Prüfeinrichtungen | Medientechnik | Strukturdynamik | Schallschutzsysteme

Messung | Analyse | Lösung | Innovation

www.mbbm.de

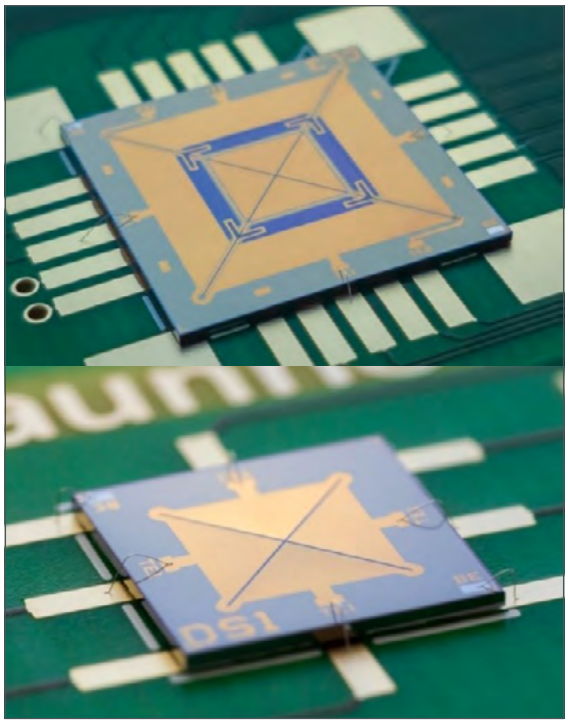


Abb. 15: Integrierte MEMS-Lautsprecher aufgebaut auf Testplatinen: Koaxialer Zwei-Wege-MEMS-Lautsprecher für Freifeld-Anwendungen (oben) [36]; MEMS-Lautsprecher für In-Ohr-Anwendungen (unten) [35].

bleiben. Dies ermöglicht eine kosteneffiziente Fertigung, da keine zusätzliche flexible Membran integriert werden muss.
Abweichend von Abb. 14 können die MEMS-Lautsprecher unterschiedliche Aktorgeometrien und

Abb. 17: Schalldruckpegelfrequenzgang des MEMS-basierten In-Ohr-Kopfhörers bei unterschiedlicher elektrischer Ansteuerung (1 V_{DC}/2 V_{PP} bzw. 10 V_{DC}/20 V_{PP} (a), Klirrfaktorverlauf (b), gemessen jeweils in einem DIN EN 60318-4 High-Res Ohrsimulator, nach [38].

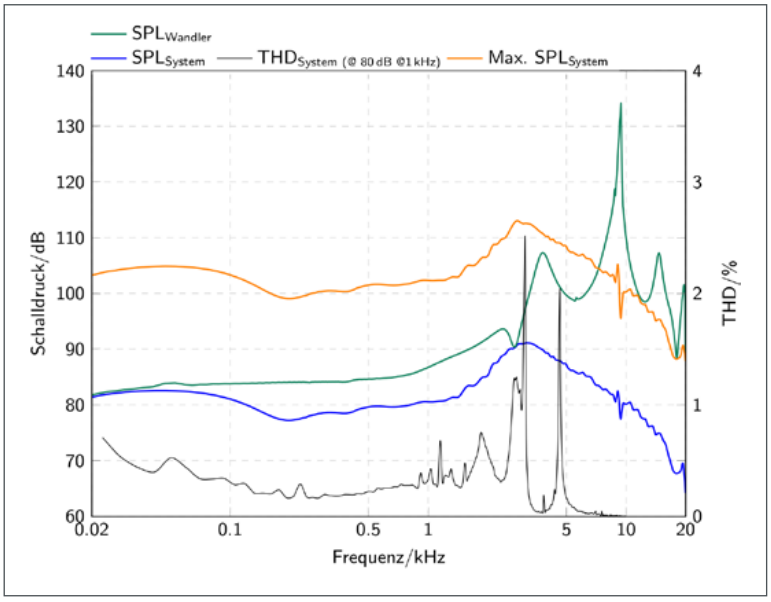


Abb. 16: 3D-gedruckter In-Ohr-Kopfhörerdemonstrator mit integriertem MEMS-Lautsprecher [37].

anordnungen aufweisen. Darüber hinaus lassen sich z.B. mehrere für unterschiedliche Frequenzbereiche optimierte Schallwandler auf einem Chip anordnen oder miteinander gekoppelt kaskadieren (Abb. 15 (oben)). Durch Skalierung der aktiven Fläche können ferner verschiedene Anwendungsbereiche adressiert werden, wobei der Fokus auf den Gebieten In-Ohr und Nah-Ohr liegt.

– Anwendungsszenario-In-Ohr-Kopfhörer –

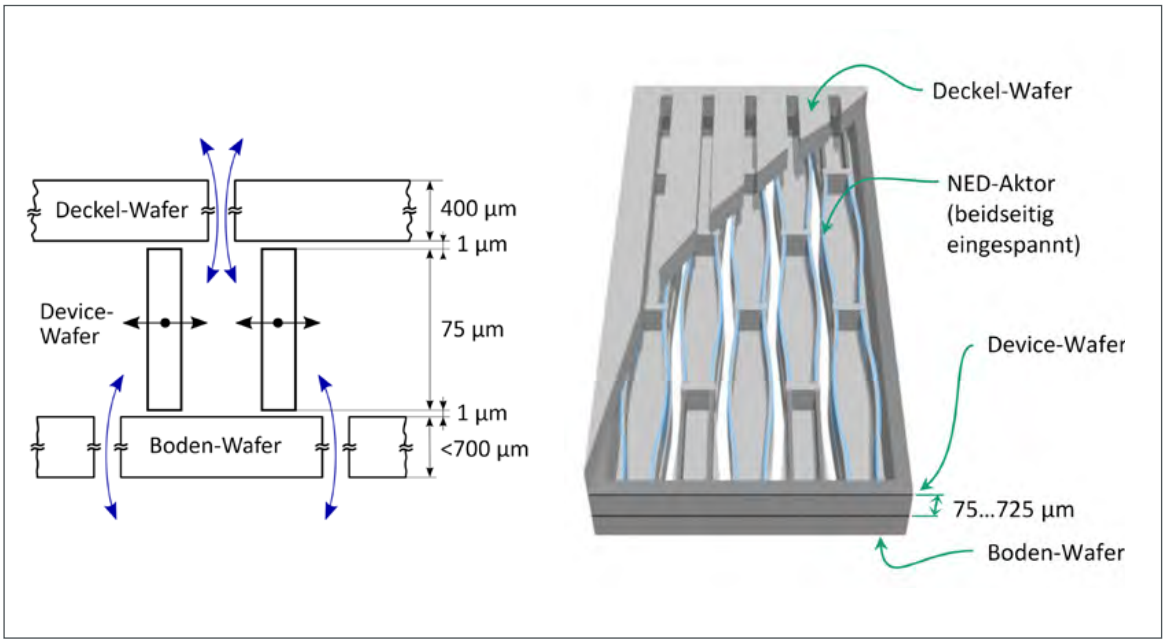
Im Folgenden wird exemplarisch ein MEMS-Lautsprecher-Typ für In-Ohr-Kopfhöreranwendungen betrachtet, der über eine aktive Fläche von 4 mm × 4 mm verfügt und in Abb. 15 (unten) dargestellt ist. Die Dicken der poly-Si- und der PZT-Schicht betragen 15 µm bzw. 2 µm. Um parasitäre Eigenmoden im hörbaren Frequenzbereich zu unterbinden und eine hohe Wiedergabebandbreite zu ermöglichen, verfügen die Aktoren über eine vergleichsweise hohe Resonanzfrequenz von etwa 9,5 kHz (Abb. 17, SPLWandler). Abb. 16 veranschaulicht einen für Demonstrationszwecke vom Fraunhofer IDMT und Fraunhofer ISIT konzipierten In-Ohr-Kopfhörer. In jedem Hörer arbeitet ein MEMS-Lautsprecher, der auf einer Platine aufgebaut ist.
Der Kopfhörer wird über eine vom Fraunhofer IDMT entwickelte Ansteuerungselektronik, bestehend aus einem FIR-Filter sowie einer auf kapazitive Lasten ausgelegten Verstärkereinheit angetrieben. Abb. 17 veranschaulicht, dass bei einer Bias-Spannung von 10 V_{DC} und einer Signalspannung von 10 V_{PP} bei 1 kHz ein Schalldruck von 102 dB erzielt wird (Max. SPL_{System}). Über den FIR-Filter wird der angestrebte Zielfrequenzgang eingestellt, welcher im vorliegenden Fall auf den Untersuchungen von Olive et al. [34] beruht. Der Klirrfaktor des Kopfhörers für einen Schalldruckpegel von 80 dB bei 1 kHz liegt unter 1 %. Gemessen wurde mit einem Ohrsimulator nach DIN EN 60138-4 mit künstlicher Ohrmuschel

(Typ 3.3 nach ITU-REC-P.57). Der Ohrsimulator hat gegenüber der Norm einen erweiterten Frequenzbereich bis 20 kHz.

– Ausblick –
Die Weiterentwicklungen umfassen ein überarbeitetes MEMS-Design sowie einen linearen Antrieb auf Basis des neuen piezoelektrischen Materials Aluminiumscandiumnitrid (AlScN). Die Untersuchungen legen nahe, dass sich auf diese Weise bei gleicher aktiver Fläche 12 dB höhere Schalldruckpegel, eine höhere Energieeffizienz sowie reduzierte Verzerrungen realisieren lassen.

Fraunhofer IPMS/Arioso Systems (Lutz Ehrig)
– Funktionsprinzip –
Wie bereits erwähnt, skalieren die Herstellungskosten für MEMS-Bauelemente im Wesentlichen mit der erforderlichen Chip-Fläche, so dass diese minimiert werden muss. Die am Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS in Dresden entwickelte Technologie nutzt daher das Volumen eines Silizium-Chips zur Schallerzeugung. Der MEMS-Lautsprecher besteht aus einem mehrschichtigen Aufbau mit einer zentralen Device-Schicht, die zwischen einem Boden- und einem Deckel-Wafer liegt. Der Aufbau ist in Abb. 18 (links) schematisch dargestellt. Die Device-Schicht besteht aus lateral auslenkbaren Balken. Diese Balken können bspw. paarweise angeordnet sein und werden in Abhängigkeit von einer angelegten elektrischen Spannung gegenphasig verkrümmt. Dadurch wird das Volumen zwischen den Balken verändert und durch versetzt angeordnete Öffnungen im Deckel- bzw. Bodenwafer wird die Luft aus der Device-Schicht herausgedrückt bzw. hineingesogen [39].
Der Volumenstrom wird durch eine Vielzahl dieser Balkenpaare auf einem Chip erzeugt. In Abb. 18 (rechts) ist ein MEMS-Lautsprecher nach diesem Konzept schematisch dargestellt. Neben der Optimierung der Anordnung zur Erhöhung des genutzten Volumens kann auch die Dicke der Device-Schicht vergrößert werden, um eine größere Volumenverschiebung bei konstanter Chip-Fläche zu erhalten.
Konventionelle elektrostatische Antriebe erfordern hohe elektrische Steuerspannungen aufgrund großer Elektrodenabstände. Eine Verringerung der Steuerspannung kann durch eine Verringerung der Elektrodenabstände erfolgen. Der Abstand zwischen den Elektroden kann jedoch nicht beliebig verringert werden, da der Abstand der Elektroden die Amplitude der Aktorauslenkung begrenzt und somit im Falle eines Lautsprechers dessen erreichbaren Volumenstrom und den Dynamikumfang beschränkt.
Eine Ausführung in MEMS-Bauweise ermöglicht durch die Nutzung lithographischer Prozesse sowie von Opferschichttechniken die Realisierung sehr kleiner Elektrodenspalte. Die dabei entstehenden sehr großen Kräfte bei gleichzeitig moderaten elektrischen Spannungen können durch ein entsprechendes mikromechanisches Design zur Anregung von Biegeschwingungen genutzt werden.

Abb. 18: Schematische Darstellung des Querschnitts eines Balkenpaares und den Öffnungen im Boden- und Deckel-Wafer (links); Schematische Darstellung eines MEMS-Lautsprecher-Chips mit einer Vielzahl von beidseitig eingespannten Aktoren (blau) und einem Boden- und Deckel-Wafer mit versetzt angeordneten Öffnungsschlitzen. Die Aktoren sind im ausgelenkten Zustand dargestellt (rechts) [40].



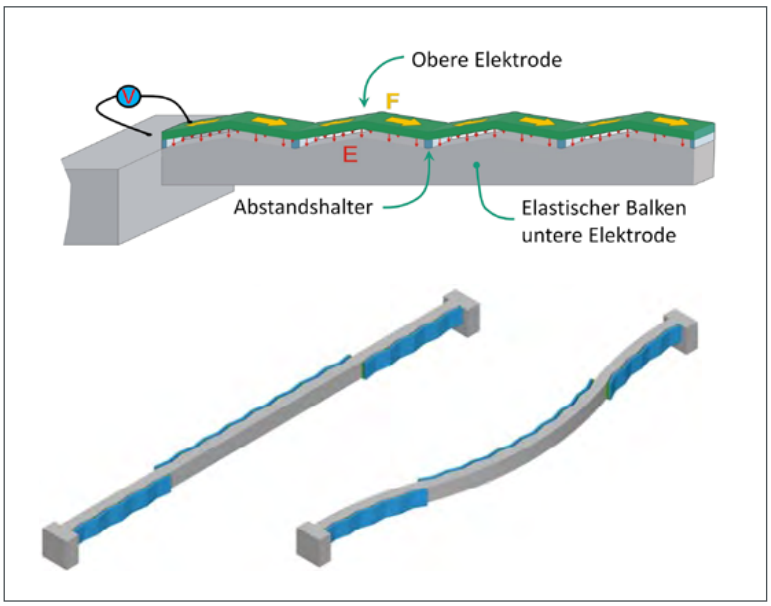


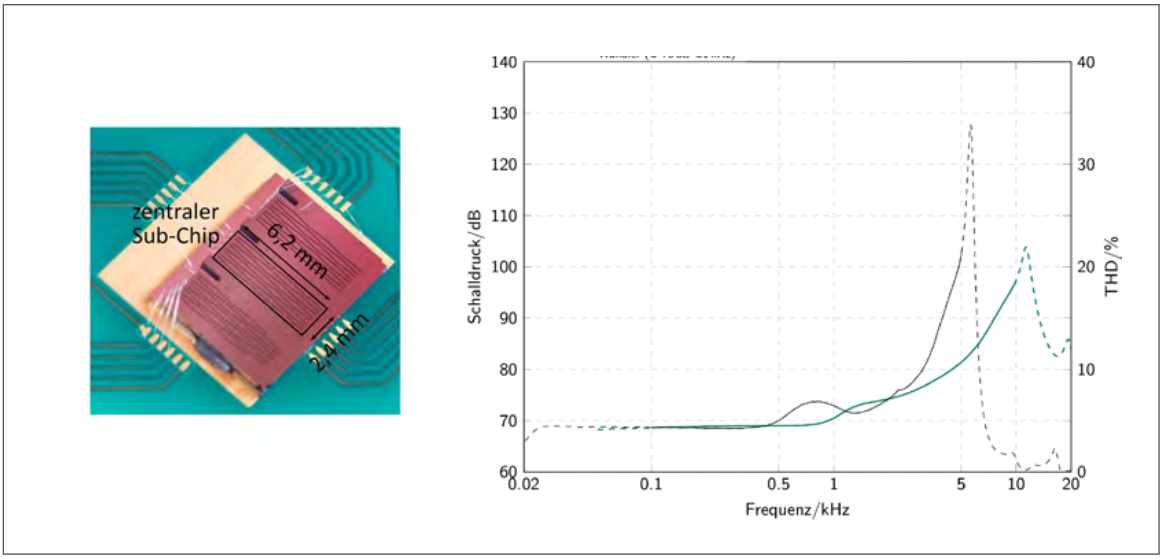
Abb. 19: Elektrostatischer Biegeaktor „Nanoscopic Electrostatic Drive" (NED): Das Anlegen einer elektrischen Spannung V zwischen zwei Elektroden führt zu einem elektrischen Feld E und zu einer Kraft F, welche – aufgrund der Topographie der oberen Elektrode – zu einer Krümmung des Balkens führt (oben); Schematische Darstellung eines beidseitig eingespannte NED-Aktor mit einer S-förmigen Biegelinie für die Auslenkung in der Chip-Ebene in Ruhelage (links) sowie im ausgelenkten Zustand (rechts) (unten) [40].

Ein solcher am Fraunhofer IPMS entwickelter elektrostatischer „Nanoscopic Electrostatic Drive"- Biegeaktor (NED) ist in Abb. 20 dargestellt. Der Aktor besteht aus einem leitfähigen, elastischen Balken (untere Elektrode, graue Struktur in Abb. 19), einer oberen Elektrode (grüne Struktur) und elektrisch isolierenden Abstandshaltern (blaue Struktur).
Beim Anlegen einer elektrischen Spannung V entsteht zwischen den beiden Elektroden ein elektrostatisches Feld E. Durch die elektrostatische Anziehung folgt aufgrund der Topologie der oberen Elektrode eine Kraft F, die zu einer Krümmung des Balkens führt. Mit anderen Worten versucht die flächig wirkende Kraft F die Oberfläche des Balkens zu verlängern, was in einer Auslenkung der Balkenstruktur analog des bimorphen Prinzips resultiert. Im dargestellten Beispiel (Abb. 19 (oben)) erfolgt die Krümmung nach unten (Krümmungsradiusmittelpunkt ggü. der grünen Elektrode).
Durch die beschriebene Aktor-Technologie können hohe elektrostatische Kräfte innerhalb sehr kleiner Elektrodenspalte für große Auslenkungen bei einer geringen elektrischen Spannung nutzbar gemacht werden. Es werden Auslenkungen erreicht, die ein Vielfaches des Abstandes der Elektroden betragen [41].

– Akustische Validierung eines Test-Chips –

Ein erster für die Audiowiedergabe ausgelegter MEMS-Lautsprechertest-Chip ist in Abb. 20 (links) dargestellt. Der Chip enthält drei Sub-Chips mit einer Größe von jeweils 6,2 mm × 2,4 mm. Die Sub-Chips bestehen aus jeweils 14 Balkenpaaren mit einer Länge von 2200 µm und sieben Paaren mit einer Länge von 1100 µm. Alle Balken haben eine Höhe entsprechend der Dicke des Device-Wafers von 75 µm. In der Abbildung ist der Chip-Deckel mit den

Abb. 20: Teststruktur eines MEMS-Lautsprechers, basierend auf dem NED-Aktorprinzip, mit drei Sub-Chips mit einer Fläche von jeweils 6,2 mm × 2,4 mm (links); Verlauf des Schalldruckpegels und des Klirrfaktors (THD) des mittleren Sub-Chips bei 40 V_{DC} und 10 V_{PP}, gemessen mit einem Ohrsimulator auf der Bezugsebene nach DIN EN 60318-4 (rechts), der gestrichelte Kurvenbereich liegt außerhalb des definierten Arbeitsbereiches des verwendeten Ohrsimulators [40].



schlitzförmigen Öffnungen zu erkennen. Die elektrische Verbindung zwischen Platine und Chip erfolgte mittels Drahtbondung.
Für akustische Messungen wurde die Rückseite des Test-Chips durch eine Öffnung in der Trägerplatine an die Referenzebene eines Ohrsimulators (DIN EN 60318-4) angekoppelt, während die Vorderseite des Chips frei blieb. Der zentrale Sub-Chip wurde mit einer Signalspannung von 10 V_{PP} und einer Bias-Spannung von 40 V_{DC} angesteuert.
Die Ergebnisse der Messung des Schalldruckpegels und des Klirrfaktors (Total Harmonic Distortion, THD) sind in Abb. 20 (rechts) dargestellt. Der Frequenzgang des Schalldruckpegels wird von den akustischen Eigenschaften des Ohrsimulators dominiert und zeigt eine oberhalb von 1 kHz ansteigende Kurve und die $\lambda/2$-Resonanz des Ohrsimulators bei 11,3 kHz. Die Resonanzfrequenz des Test-Chips liegt bei ca. 9 kHz und ist als kleine Auswölbung in der dargestellten Kurve sichtbar. Bei 1 kHz liegt der Schalldruckpegel bei ca. 71 dB. Der Frequenzgang des THD korreliert mit der Kurve des Schalldruckpegels bei doppelter Frequenz, d.h. die zweite Harmonische dominiert. Die Ursache dafür liegt im quadratischen Zusammenhang zwischen der Signalspannung und der Auslenkung der Balken [42]. Im Bereich des Plateaus unterhalb von 1 kHz liegt der THD bei ca. 4 % [43].

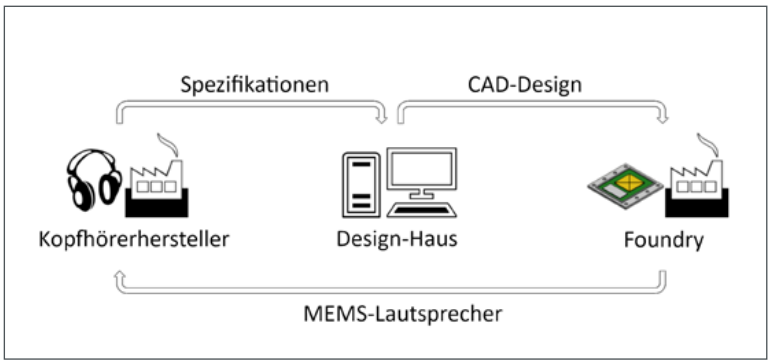
– Ausblick –
Zukünftige Entwicklungen konzentrieren sich auf eine Erhöhung des Schalldruckpegels und eine Verbesserung der linearen Wiedergabeeigenschaften. Dafür werden derzeit Balken-Designs untersucht, die eine symmetrische elektrostatische Aktuierung (push-pull) und aufgrund einer optimierter Anordnung der Aktoren eine höhere Packungsdichte erlauben. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen werden der Gegenstand zukünftiger Veröffentlichungen sein. Die Kommerzialisierung der am Fraunhofer IPMS entwickelten NED-Lautsprechertechnologie erfolgt durch die Ausgründung Arioso Systems.

Ausblick (Daniel Beer)

Die Leistungsparameter aktueller MEMS-Lautsprecherkonzepte lassen einen deutlichen Technologiefortschritt gegenüber den ersten MEMS-Lautsprecherkonzepten erkennen. Verglichen mit den elektroakustischen Anforderungen (Tab. 1) in den Anwendungsbereich In-Ohr-Kopfhörer bzw. Hearable sowie Hörgerät und Headset weisen sie das Potenzial auf, diese zukünftig zu erfüllen.
Für Nah-Ohr-Anwendungen, z.B. den Receiver-Lautsprecher eines Smartphones (Hörabstand ≤10 cm), als auch Freifeldanwendungen (Hörabstand größer 10 cm) sind weitere Entwicklungsarbeiten nötig [36; 44]. Aufgrund der größeren Hörentfernung und der weniger gezielten Schallabstrahlung in den Gehörgang muss mehr Luft verschoben werden, um am Trommelfell den gleichen Schalldruckpegel wie beim Hören mit einem Kopfhörer zu erreichen.

Wertschöpfungskette
Ergänzend zu den weiteren Arbeiten am jeweiligen MEMS-Lautsprecherkonzept ist die Etablierung der notwendigen Design- und Fertigungsprozesskette erforderlich. Dies bedeutet in Anlehnung an moderne Konzepte der Halbleiterfertigung eine unterteilte Wertschöpfungskette, in der spezialisierte Fertigungspartner unter Nutzung ihrer bestehenden Infrastruktur kostengünstig die Fertigung der MEMS-Lautsprecher realisieren. Hierbei werden die akustischen und elektrischen Eigenschaften sowie die Einbaumaße des MEMS-Wandlers durch den Lautsprecherentwickler bzw. Produkthersteller, z.B. Kopfhörerhersteller, spezifiziert. Typischerweise übernimmt dann ein so genanntes Design-Haus die akustische, mechanische und elektrische Konstruktion des Lautsprecherelementes. Hierfür werden neben spezieller Entwurfs- und Simulationssoftware spezielle Fähigkeiten und Erfahrungen benötig. Das so entstandene Design wird als CAD-Datei an den eigentlichen MEMS-Fertigungspartner übergeben (Abb. 21).
Die kostengünstige und hochqualitative MEMS-Fertigung bedingt eine komplexe Infrastruktur. Diese besteht im Wesentlichen aus Reinräumen, in denen mittels moderner Fertigungsanlagen mehrere hundert Teilschritte als eine für die entsprechende MEMS-Komponente speziell entwickelte Gesamttechnologie realisiert wird. Für diese Technologien werden neben den Silizium-Wafern weitere spezielle Materialen verwendet. Die Prozessüberwachung mit hochgenauer Messtechnik ist hierbei Garant für eine reproduzierbare hohe Fertigungsqualität. Derartige Ausstattungen besitzen sogenannte Wafer-Found-

Abb. 21: Schematische Darstellung der erwarteten Wertschöpfungskette für MEMS-Lautsprecher am Beispiel „Kopfhörer" [5].

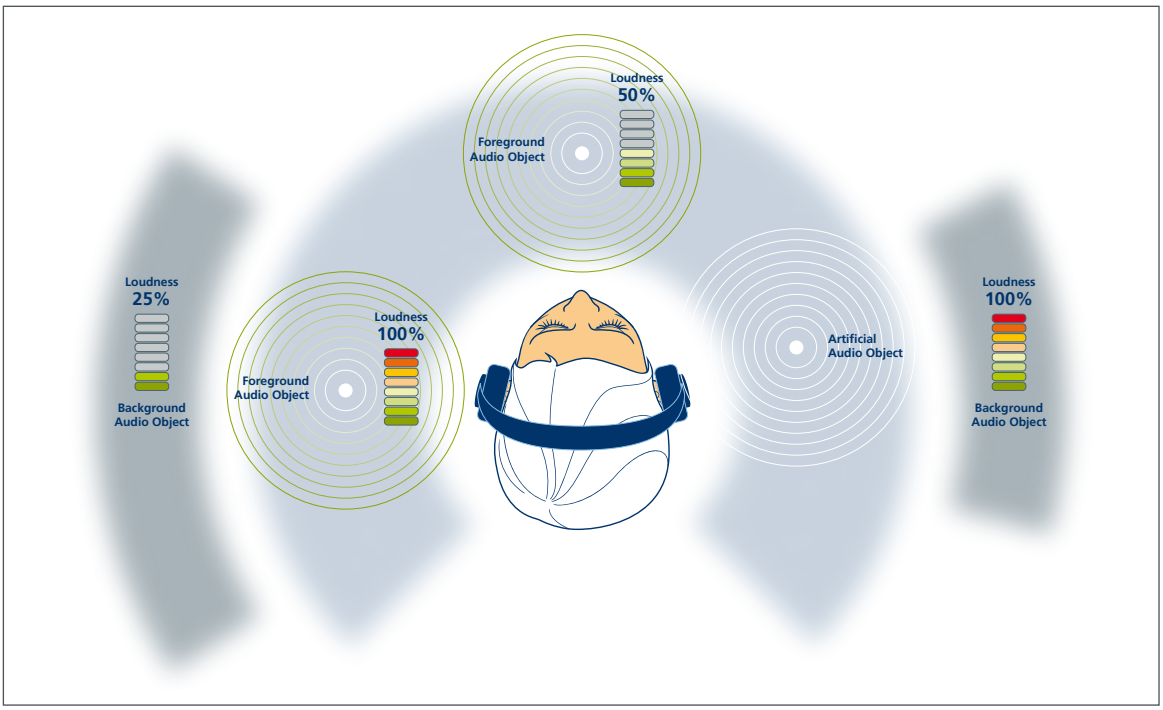


ries, die sich auf solche MEMS-Fertigungsverfahren spezialisiert haben. Allerdings ist es typischerweise nicht möglich, derartige Fertigungslinien mit einem einzelnen MEMS-Produkt sinnvoll auszulasten, auch nicht mit den in Zukunft zu erwartenden hohen Stückzahlen von MEMS-Lautsprechern. Daher werden die Anlagen in unterschiedlichen technologischen Abläufen für die Herstellung unterschiedlicher MEMS-Komponenten eingesetzt. Somit wird eine hohe und gleichmäßige Auslastung der investitions- und betriebskostenintensiven Fertigungsstätten erreicht, was letztlich zu einer kostengünstigen Fertigung der einzelnen MEMS-Komponente führt. Vor der eigentlichen Fertigung kommt jedoch der Wafer-Foundry zunächst die Aufgabe der Entwicklung einer sicher und reproduzierbar durchzuführbaren Fertigungstechnologie zu. Diese erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Design-Haus, um sicherzustellen, dass der MEMS-Wandler die Spezifikation des Lautsprecherherstellers umfassend erfüllt. Für klassische MEMS-Produkte, wie z.B. Mikrofone oder Inertialsensoren, wird zur Realisierung des Aufbaus, der Verbindungs- und Integrationstechnologie noch ein weiterer Partner, das so genannte Assembly-House, benötigt. Da jedoch für die MEMS-Lautsprecher für In-Ohr- oder Nah-Ohr-Anwendungen die geringe Baugröße ein wichtiges Anwendungskriterium ist, wird erwartet, dass zukünftig bereits im Wafer-Prozess die Elektronikintegration, die Realisierung des akustischen Volumens sowie der Kontaktierungs- und Einbauschnittstellen für das finale Produkt erfolgt (Wafer Level Assembly und Packaging). Damit wäre ein Assembly-House als Partner nicht mehr nötig, was zudem eine schnellere und kostengünstigere Fertigung ermöglicht.
Aufgrund der geteilten Wertschöpfungskette aus spezialisierten Partnern ist für die Kopfhörerhersteller zukünftig eine Partnerschaft erforderlich, in der sie weiterhin die Vorgaben, ggf. auch die grundlegenden Wandlerdesigns entwickeln, man aber dann für den CAD-Entwurf ein Design-Haus und insbesondere für die die Fertigung die Foundry braucht (Abb. 21). Ein derart kooperatives Vorgehen hat sich im Bereich der Hörgeräte auch ohne den MEMS-Lautsprecher über viele Jahre bewährt. Hier werden die BA-Lautsprecher schon immer durch die Hörgerätehersteller von spezialisierten Wandlerherstellern aufgekauft.

Der Kopfhörer von übermorgen

Gegenüber dem heutigen Technologiestand kennzeichnet den Kopfhörer der Zukunft ein deutlich größerer Applikationsumfang. Im Zusammenhang mit aktuellen Hearable-Konzepten klingt dies bereits an. Der Kopfhörer dient dann als Interface oder gar als vollständiger Smartphone-Ersatz und wird wie ein Hörgerät nahezu den ganzen Tag getragen. Mit

Abb. 22: Schematische Darstellung eines Anwendungsszenarios für den Kopfhörer der Zukunft, der mittels selektivem Hören dem Nutzer das aktive Gestalten der wahrgenommenen akustischen Umgebung ermöglicht. So können beispielsweise bestimmte Schallquellen unterdrückt (Umgebungslärm) und andere (Gesprächspartner) hervorgehoben werden. Zusätzlich ist die Anreicherung der wahrgenommenen realen akustischen Umgebung mit weiteren virtuellen Schallquellen (z. B. weitere Gesprächspartner über Konferenzschaltung) möglich [45].



Hilfe integrierter Sensoren kann er beispielsweise die akustische Umgebung des Nutzers analysieren und Maßnahmen zur Optimierung des Wiedergabesignals ableiten. Denkbar hilfreich ist dies z. B. bei einem Gespräch in lärmender Umgebung. Durch die Analyse können einzelne Schallquellen gezielt entfernt (Umgebungslärm) bzw. hervorgehoben (Gesprächspartner) werden (Abb. 22). Darüber hinaus können in Zukunft mit Ansätzen der Augmented oder Mixed Reality auch virtuelle Quellen in die wahrgenommene Umgebung eingefügt werden. Diese könnten beispielsweise Interface-Funktionen für das Smartphone übernehmen und eine aktive Nutzung von Apps erlauben, ohne wichtige akustische Informationen aus der eigentlichen Umgebung zu verpassen. Im visuellen Bereich ist es heute schon üblich, dass beispielsweise fremdsprachige Schrift in Echtzeit durch die gewünschte Sprache ersetzt wird. Dies soll zukünftig auch akustisch möglich sein, so dass Gesprächspartner sich trotz unterschiedlicher Sprache verbal unterhalten können. Dem Nutzer bietet sich somit künftig die Möglichkeit, seine wahrgenommene akustische Umgebung aktiv zu gestalten und somit eine eigene Personalized Auditory Reality zu erschaffen (Abb. 22).

Sowohl die Sensoren und Lautsprecher als auch die neuen Applikationen erfordern intelligente und leistungsfähige Signalverarbeitungseinheiten. Dank der MEMS-Technologie sind diese in die mechanischen Strukturen integrierbar. Dies spart Einbauraum und ermöglicht energieeffizientere Signalführungen, so dass trotz des größeren Funktionsumfangs zukünftige Kopfhörer nicht unhandlich groß und energiehungrig sind.

Danksagung

Daniel Beer dankt:

- den Herren Andrea Rusconi, Fabian Stoppel, Lutz Ehrig für die Zuarbeit zu den vorgestellten MEMS-Lautsprecherkonzepten
- den IDMT-Kollegen Katrin Pursche, Claudia Heinze, Tobias Fritsch, Jan Kueller, Georg Fischer für Zuarbeit, Korrekturlesen, Grafikerstellung in allen Bereichen
- der Sonova Holding AG und der Audifon GmbH & Co. KG für die Unterstützung bei der Ausarbeitung der Lautsprechermindestanforderungen für Hörgeräte
- der Beyerdynamic GmbH & Co. KG und der Sennheiser GmbH & Co. KG für die Unterstützung bei der Ausarbeitung der Lautsprechermindestanforderungen für Kopfhörer
- Herrn Tilman Koch für die Unterstützung bei der Ausarbeitung der Lautsprechermindestanforderungen für Kopfhörer
- Herrn Prof. Steffen Strehle/TU-Ilmenau für die Unterstützung bei der Darlegung der MEMS-Technologiegrundlagen
- Herrn Prof. Roy Knechtel/Hochschule Schmalkalden für die Unterstützung bei der Darlegung der Wertschöpfungskette für MEMS-Lautsprecher in der Anwendung Kopfhörer
- Frau Annika Neidhardt/TU-Ilmenau für die Unterstützung bei der Darlegung erweiterten Funktionsvielfalt des Kopfhörers von Übermorgen
- Frau Evelin Baumer und Herrn Prof. Detlef Krahé/Redaktion des Akustik-Journals der DEGA für die tolle Zusammenarbeit

Das Fraunhofer ISIT und das Fraunhofer IDMT danken:

Der vorgestellte MEMS-Lautsprecher des Fraunhofer ISIT wurde mit dem Fraunhofer IDMT im Projekt „SmartSpeaker - Smarte MEMS-Lautsprecher für mobile Anwendungen“ entwickelt und durch die Fraunhofer-Gesellschaft in der Fördermaßnahme „WISA-Wirtschaftsorientierte Strategische Allianzen“ gefördert.

Das Fraunhofer IPMS dankt:

Die hier gezeigten Arbeiten wurden im Projekt „MEMSound“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung - VIP+“ unter dem Förderkennzeichen 03VP01800 gefördert.

Das Fraunhofer IPMS, die Arioso-Systems GmbH und das Fraunhofer IDMT danken:

Den Reifegrad der Technologie zu erhöhen und NED-basierte MEMS-Lautsprecher marktfähig zu machen ist Ziel des Projektes „Hipersound“. Das Projekt wird von der Fraunhofer-Stiftung gefördert.

Literatur

[1] *https://www.gfk.com/de/insights/press-release/globaler-audiomarkt-setzt-wachstumskurs-fort/* (letzter Aufruf: 04.12.2019)

[2] *https://www.gfk.com/de/insights/press-release/globaler-markt-fuer-unterhaltungselektronik-weiterhin-im-aufwaertstrend/* (letzter Aufruf: 04.12.2019)

[3] *https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS45488019* (letzter Aufruf: 04.12.2019)

[4] © istockphoto.com/diverse Künstler

[5] © Fraunhofer IDMT (Abb. 2-8, Abb. 21), Abb. 7: LIU, CHANG, FOUNDATIONS OF MEMS, 2nd Ed., ©2012. Reprinted by permission of Pearson Education, Inc., New York, New

York.
[6] Hartmut Richter, persönliche Korrespondenz, Audifon GmbH & Co. KG, Kölleda, 26.11.2019, Korrespondenz mit Daniel Beer, Fraunhofer IDMT, Ilmenau
[7] Erwin Kuipers, persönliche Korrespondenz, Sonova Holding AG, Stäfa/Schweiz, 26.11.2019, Korrespondenz mit Daniel Beer, Fraunhofer IDMT, Ilmenau
[8] Roland Jacques, persönliche Korrespondenz, Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, Wedemark-Wennebostel, 27.11.2019, Korrespondenz mit Daniel Beer, Fraunhofer IDMT, Ilmenau
[9] Oliver Schaal, Sebastian Haberzettl, persönliche Korrespondenz, beyerdynamic GmbH & Co. KG, Heilbron, 06.12.2019, Korrespondenz mit Daniel Beer, Fraunhofer IDMT, Ilmenau
[10] Tilman Koch, persönliche Korrespondenz, Hamburg, 27.11.2019, Korrespondenz mit Daniel Beer, Fraunhofer IDMT, Ilmenau
[11] Siemens, E. W.: Magneto-Electric Apparatus., Patentschrift US 149797, Anmeldedatum: 20.01.1874
[12] Cuttriss, C.; Redding, J.: Telephone., Patentschrift US 242816, Anmeldedatum: 28.11.1877
[13] Siemens, E. W.; Halske, J. G.: Telephone und Rufapparate mit magnetischer Gleichgewichtslage der schwingenden Theile., Patentschrift DE2355A, Erteilungsdatum: 14.12.1877
[14] Rice, C. W.; Kellogg, E. W.: Notes on the Development of a New Type of Hornless Loudspeaker., Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Volume 44, pages 461 - 480, Jan. 1925, DOI: 10.1109/TAIEE.1925.5061127
[15] Watson, T. A.: Magneto-Telephone., Patentschrift US 266567, Anmeldedatum: 17.04.1880
[16] Capps, F.: Telephone., Patentschrift US 441396, Anmeldedatum: 07.04.1890
[17] Baldwin, N.: Telephone-Receiver., Patentschrift US 905781, Anmeldedatum: 29.01.1908
[18] © beyerdynamic GmbH & Co. KG, Heilbronn, Freigabe: 06.12.2019, Sebastian Haberzettl
[19] © Audifon GmbH & Co. KG, Kölleda, Freigabe: 06.12.2019, *https://www.kind.com/globalassets/downloads-bilder/hdo-ex-hoerer-300-dpi.tif*
[20] Acoustic MEMS and Audio Solutions – From Technologies to Markets 2017 Report, Yolé Développement, May 2017
[21] Royer, M.; Holmen, J. O.; Wurm, M. A.; Aadland, O. S; Glenn, M.: ZnO On Si Integrated Acoustic Sensor, Sensors and Actuators, Volume 4, 1983
[22] Royer, M.: Piezoelectric Pressure Sensor., Patentschrift: US 4,445,384, Anmeldedatum: 30.03.1982
[23] Lee, S. S.; Ried, R. P., and White, R. M.: Piezoelectric Cantilever Microphone and Microspeaker, Solid-State Sensor and Actuator Workshop Hilton Head, Soth Carolina, June 13-16, 1994
[24] Lee, S. S.; White, R. M.; Pisano, A. P.: Cantilever Pressure Transducer, Patent: US5,633,552, Filed: 10.06.1994, Priority: 04.06.1993 (US7229493A)
[25] Lee, S. S.; Ried, R. P. Ried; White, R. M.: Piezoelectric Cantilever Microphone and Microspeaker, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 5, No. 4, December 1996
[26] © [1996] IEEE. Reprinted, with permission, from [Lee, S. S.; Ried, R. P. Ried; White, R. M.: Piezoelectric Cantilever Microphone and Microspeaker, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 5, No. 4, December 1996]
[27] Harradine, M. A.; Birch, T. S.; Stevens, J. C.; Shearwood, C.: A Micro-Machined Loudspeaker for the Hearing Impaired, 1997 International Conference on solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997
[28] Shearwood, C.; Harradine M. A.; Birch, T. S.; Stevens, J. C.: Applications of Polyimide Membranes to MEMS Technology, Microelectronic Engineering, Volume 30, Issues 1-4, January 1996, Pages 547-550
[29] © [1997] IEEE. Reprinted, with permission, from [Harradine, M. A.; Birch, T. S.; Stevens, J. C.; Shearwood, C.: A Micro-Machined Loudspeaker for the Hearing Impaired, 1997 International Conference on solid-State Sensors and Actuators, Chicago, June 16-19, 1997.]
[30] Loeb, W. A.; Neumann, J. J.; Gabriel, K, J.: MEMS Digital-to-Acoustic Transducer With Error Cancellation, Patent: US20050013455 A1, Field: 13.09.1999, Priority: 13.09.1999
[31] Neumann, J. J.; Gabriel, K. J.: CMOS-MEMS Membrane for Audio-Frequency Acoustic Actuation, Sensors and Actuators, Volume 95, Issues 2-3, January 2002, Pages 175-182
[32] © [2002] Elsevier. Reprinted, with permission, from [Neumann, J. J.; Gabriel, K. J.: CMOS-MEMS Membrane for Audio-Frequency Acoustic Actuation, Sensors and Actuators, Volume 95, Issues 2-3, January 2002, Pages 175-182]
[33] © USound GmbH
[34] Olive, S.; Welti, T.: "Factors That Influence Listeners' Preferred Bass and Treble Levels in Headphones," in Audio Engineering Society Convention 139, 2015
[35] F. Stoppel, A. Männchen, F. Niekiel, D. Beer, T. Giese, and B. Wagner, 'New integrated full-range MEMS speaker for in-ear applications', in

2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2018, pp. 1068–1071.
[36] Stoppel, F.; Niekiel, F.; Giese, T.; Gu-Stoppel, S.; Männchen, A.; Nowak, J.; Beer, D.; Wagner, B.: Novel Type of MEMS Loudspeaker Featuring Membrane-Less Two-Way Sound Generation, presented at the Audio Engineering Society Convention 143, 2017.
[37] © Fraunhofer ISIT
[38] Männchen, A.; Stoppel, F.; Brocks, T.; Niekiel, F.; Beer, D.; Wagner, B.: Design and electro-acoustic analysis of a piezoelectric MEMS in-ear headphone, 2019 AES International Conference on Headphone Technology, August 2019
[39] Kaiser, B.; Langa, S.; Ehrig, L.; Stolz, M.; Schenk, H.; Conrad, H.; Schenk, H.; Schimmanz, K.; Schuffenhauer, D.: Concept and proof for an all-silicon MEMS micro speaker utilizing air chambers. Microsyst Nanoeng 5, 43 (2019) doi:10.1038/s41378-019-0095-9
[40] © Fraunhofer IPMS
[41] Conrad, H.; Schenk, H.; Kaiser, B.; Langa, S.; Gaudet, K.; Schimmanz, K.; Stolz, M.: A small-gap electrostatic micro-actuator for large deflections. Nat Commun 6, 10078 (2015) doi:10.1038/ncomms10078
[42] Ehrig, L.; Wall, F.; Schenk, H.A.G.; Langa, S.; Melnikov, A.; Stolz, M.; Kaiser, B.; Conrad, H.; Schenk, H.: Electrostatic all silicon MEMS speakers for in-ear audio applications – acoustic measurements and modelling approach. Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (2019)
[43] Ehrig, L.; Kaiser, B.; Schenk, H.; Stolz, M.; Langa, S.; Conrad, H.; Männchen , A.; Brocks, T.: Acoustic Validation of Electrostatic All-Silicon MEMS-Speakers. 2019 AES International Conference on Headphone Technology, August 2019
[44] Männchen, A.; Stoppel, F.; Beer, D.; Niekiel, F.; Nowak, J.; Wagner, B.: Zwei-Wege-Lautsprecher basierend auf MEMS-Technologie. In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2018, 44. Jahrestagung für Akustik, München, S. 901-904
[45] © Technische Universität Ilmenau/Institut für Medientechnik ■

Daniel Beer
Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT, Ilmenau

Andrea Rusconi
USound GmbH

Fabian Stoppel
Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ISIT, Itzehoe

Lutz Ehrig
Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS, Arioso Systems GmbH , Dresden

Schallschutz- und Akustiklösungen weltweit

iac acoustics
making the world a quieter place

für Medizin und Gesundheit, Testeinrichtungen für die Industrie, Gebäudeakustik, Studios

deutschland@iac-gmbh.de
www.iac-gmbh.de