

## CMOS-kompatibler MEMS-Lautsprecher für Im-Ohr-Anwendungen

Holger Conrad<sup>1</sup>, Lutz Ehrig<sup>1</sup>, Bert Kaiser<sup>1</sup>, Hermann Schenk<sup>1</sup>, David Schuffenhauer<sup>1</sup>, Michael Stolz<sup>1</sup>,  
Matthieu Gaudet<sup>1,2</sup> und Harald Schenk<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), 01109 Dresden,  
E-Mail: Holger.Conrad@ipms.fraunhofer.de

<sup>2</sup> Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl Mikro- und Nanosysteme, 03046  
Cottbus; E-Mail: Harald.Schenk@ipms.fraunhofer.de

### Einleitung und Motivation

Der beeindruckende Erfolg von MEMS-Mikrofonen ist vor allem auf den Einsatz der CMOS-Technologie zurückzuführen. Diese Technologie ermöglicht eine kompaktere Bauweise gegenüber Vorgängertechnologien, eine hohe Skalierbarkeit der Produktion und somit geringe Stückkosten. Innerhalb weniger Jahre wurden konventionelle Mikrofontechnologien in einer Vielzahl von Anwendungen durch CMOS-basierte MEMS-Mikrofone abgelöst. Eine ähnliche Entwicklung ist im Bereich Mikrolautsprecher in den kommenden Jahren zu erwarten.

In diesem Beitrag wird ein neuartiges Konzept eines Mikrolautsprechers auf Basis elektrostatischer MEMS-Biegeaktoren vorgestellt. Erstmals wird keine Membran sondern das Wafervolumen zur Schallerzeugung genutzt. Die Ausführung in CMOS-Technologie ermöglicht die monolithische Integration weiterer funktioneller Baugruppen wie Verstärkerschaltung, digitaler Signalprozessoren oder zusätzlicher Sensorelemente.

Durch die hohe Integrationsdichte, die hohe Effizienz und die geringe Baugröße ist der Ansatz prädestiniert für Im-Ohr-Anwendungen wie Hearables, Hörgeräte, In-Ear-Monitoringsysteme und Kopfhörer.

### Elektrostatischer MEMS-Biegeaktoren (NED)

Konventionelle elektrostatische Antriebe erfordern hohe elektrische Steuerspannungen aufgrund der großen Elektrodenabstände. Eine Verringerung der Steuerspannung kann nur durch eine Verringerung der Elektrodenabstände erfolgen. Der Abstand zwischen den Elektroden kann jedoch nicht beliebig verringert werden, da die Lage 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 bietet hingegen den wesentlichen Vorteil durch die Nutzung lithographischer Prozesse sowie von Opferschichttechniken vergleichsweise sehr kleine Elektrodenabstände realisieren zu können. Die dabei entstehenden sehr großen Kräfte elektrostatischer Felder können durch ein entsprechendes mikromechanisches Design zur Anregung von Biegeschwingungen genutzt werden.

Ein solcher am Fraunhofer IPMS entwickelter elektrostatischer „Nano e-drive“ (NED) Biegeaktor ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Aktor besteht aus einem leifähigen Balken (graue Struktur in Abbildung 1), einer oberen Elektrode (grüne Struktur in Abbildung 1) und elektrisch isolierenden Abstandshaltern (engl.: spacer; blaue Struktur in Abbildung 1).

Beim Anlegen einer elektrischen Steuerspannung  $V$  entsteht zwischen den beiden Elektroden ein elektrostatisches Feld  $E$ . Durch die elektrostatische Anziehung entsteht 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 Fall (Abbildung 1) erfolgt die Krümmung nach unten für Topographiewinkel der oberen Elektrode kleiner als  $45^\circ$ .

Werden nun die Spacer zwischen den Topographiespitzen des Balkens und den Topographiespitzen der oberen Elektrode verschoben, d.h. wird die im Querschnitt dargestellte Geometrie des Aktors variiert, erfolgt die aktiv steuerbare Krümmung des Biegeaktors nach oben. Eine Mischung beider Konfigurationen bzw. die wechselseitige Anordnung auf beiden Seiten eines Balkens kann zur Ausbildung aktiv steuerbaren, S-förmigen Biegelinien verwendet werden. Der Vorteil solcher Biegeaktoren ist eine von Null verschiedene Auslenkung für beidseitig eingespannte Biegeaktoren, wie sie in Abbildung 2 dargestellt sind.

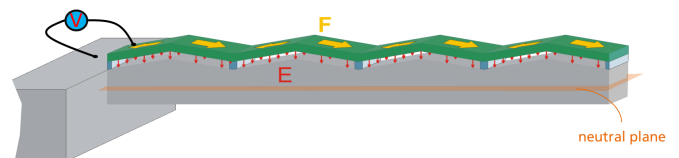


Abbildung 1: Elektrostatischer Biegeaktor „Nano e-drive“ (NED): Das Anlegen einer elektrischen Spannung  $V$  zwischen zwei Elektroden führt zu einem elektrischen Feld  $E$  und zu einer Kraft  $F$ , welche – aufgrund der Topographie der oberen Elektrode – zu einer Krümmung des Balkens führt.

Durch die beschriebene Aktor-Technologie können hohe elektrostatische Kräfte innerhalb sehr kleiner Elektroden-spalte für große Auslenkungen bei einer geringen Steuer-spannung nutzbar gemacht werden. Es werden Auslenkungen erreicht, die ein Vielfaches des Abstandes der Elektroden betragen [1].

Die Bewegungsrichtung der Aktoren relativ zur Ausdehnung der Wafer- bzw. Chip-Oberfläche kann „out-of-plane“, d.h. senkrecht zur Wafer-Ebene und damit vertikal (s. Abbildung 1), oder „in-plane“, d.h. parallel zur Wafer-Ebene und damit lateral erfolgen. NED-Aktoren für die Bewegung parallel der Wafer-Ebene werden im nachfolgend vorge-stellten Konzept für Mikrolautsprecher verwendet.

### NED für akustische Anwendungen

Für akustische Anwendungen wird der NED-Aktor lateral ausgelenkt, d.h. in der Chip-Ebene (siehe Abbildung 2). Das bietet den Vorteil, dass das Volumen des Chips genutzt werden kann und das durch die Auslenkung des Aktors verdrängte Luftvolumen mit der eingesetzten Wafer-Dicke skaliert. Die Fläche des Chips – der wesentliche Faktor der Stückkosten – kann vergleichsweise klein sein.

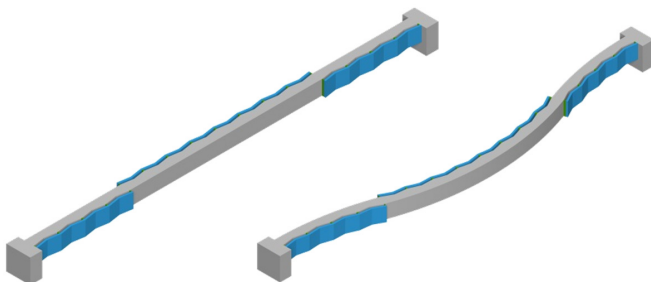
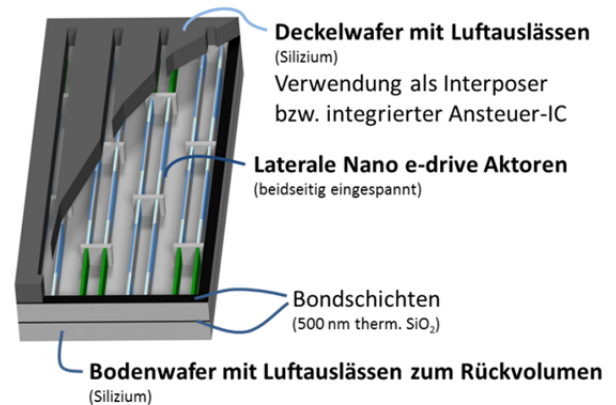


Abbildung 2: Beidseitig eingespannte NED-Aktor mit einer S-förmigen Biegelinie für die Auslenkung in der Chip-Ebene in Ruhelage (links) sowie im ausgelenkten Zustand (rechts).

Die Aktoren sind so angeordnet, dass das Luftvolumen zwischen zwei Aktoren verringert bzw. vergrößert wird und über Auslassöffnungen im Deckel- und Boden-Wafer eine Schallabgabe an die Umgebung realisiert werden kann (s. Abbildung 3). Ebenso sind Auslassöffnungen in der NED-Aktorebene möglich, wodurch ein Stapeln mehrerer Chips oder die Integration zusätzlicher elektronischer Baugruppen wie Spannungsversorgung, Verstärker, digitaler Signalprozessor oder zusätzliche Sensoren auf dem Deckel- bzw. Boden-Wafer realisierbar sind. Anwendungsspezifische Frequenzgänge können durch die Gruppierung von Aktoren unterschiedlicher Längen und somit verschiedener Resonanzfrequenzen erzielt werden.

#### A) Nicht ausgelenkter Zustand



#### B) Ausgelenkter Zustand

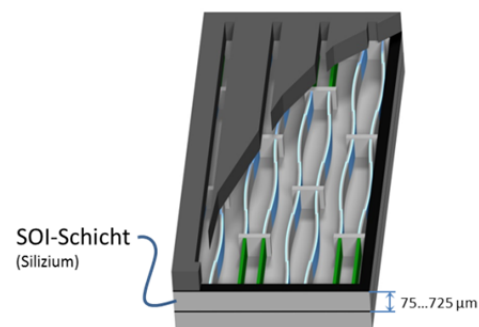


Abbildung 3: Prinzipdarstellung beidseitig eingespannter lateraler, paarweise angeordneter NED-Aktoren in Ruhelage (A) und im ausgelenkten Zustand (B).

### Erste Teststrukturen

Erste Teststrukturen wurden mithilfe von Fertigungsverfahren der Mikrosystemtechnik in Silizium-basierten Waferverfahren hergestellt. Hier wurde die Funktionselemente (Aktoren und Luftkammern) durch tiefe Trockenätzung in „Silicon-on-Insulator“ (SOI) Wafer-substraten geätzt. Eine genaue Darstellung der Technologie sowie die realisierten und charakterisierten Einzelwandler werden in Folgeveröffentlichungen detailliert gegeben.

Eine erste Teststruktur mit beidseitig eingespannten Aktoren unterschiedlicher Länge ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Aktoren weisen in Abhängigkeit zu ihrer Länge Resonanzfrequenzen zwischen ca. 1 kHz und 25 kHz auf.

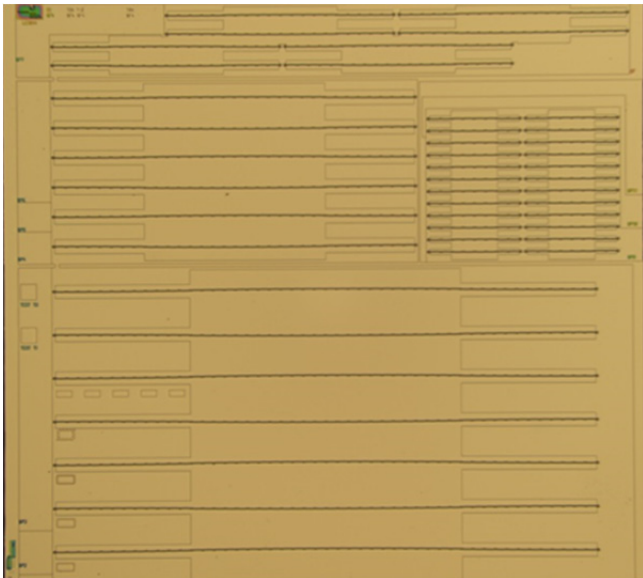


Abbildung 4: Teststruktur mit einer Kantenlänge von 10 mm. Abgebildet sind sieben lange Aktoren (untere Hälfte), sechs bzw. acht Aktoren mittlerer Länge (linke obere Hälfte und oben) und 24 kurze Ultraschall-Aktoren (rechte obere Hälfte).

Die Aktoren sind geometrisch so gestaltet, dass zwei benachbarter Aktoren sich gegenphasig bewegen und somit das zwischen ihnen befindliche Luftvolumen verdrängen. Das eingesetzte Prinzip ist damit ähnlich dem des Air-Motion-Transformers [2]. Um den akustischen Kurzschluss zu vermeiden wird die Teststruktur aus Abbildung 4 mit einem Deckel-Wafer versehen (siehe Abbildung 5), welcher entsprechend der Lage der Aktoren angeordnete Luftauslässe enthält. Die Teststrukturen wurden auf einer Leiterplatte aufgeklebt und mithilfe eines Drahtbondverfahrens kontaktiert (Abbildung 6). An den Teststrukturen konnten erstmalig elektrische und akustische Grundfunktionalitäten nachgewiesen werden.

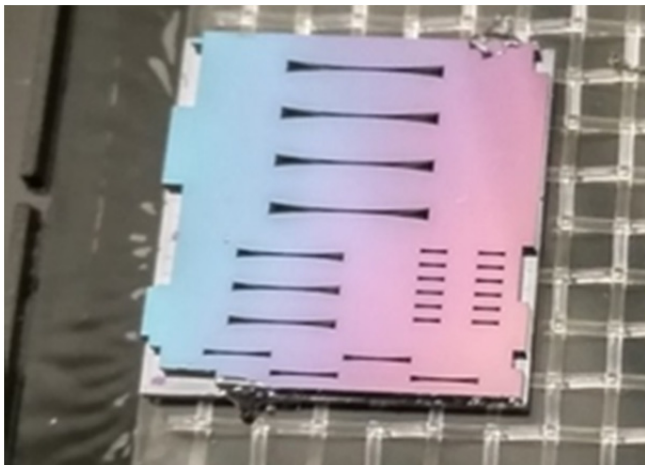


Abbildung 5: Teststruktur mit Deckelchip, welcher mehrere Luftauslassöffnungen enthält

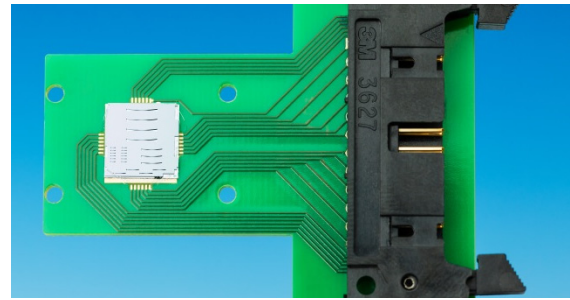


Abbildung 6: Auf Platine aufgebauter Teststruktur, welche mit Drahtbondverfahren kontaktiert wurde.

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine völlig neue Klasse von elektrostatischen MEMS-Mikrolautsprechern vorgestellt, die für Im-Ohr-Anwendungen wie Hearables, Hörgeräte und Kopfhörer ideale Eigenschaften haben. Ein wesentlicher Vorteil ist die Nutzung des Chip-Volumens mittels lateraler Biegeaktorik und damit eine geringe Chip-Fläche und niedrige Stückkosten. Der Einsatz einer klassischen Membran entfällt. Der Audio-Frequenzbereich des MEMS-Mikrolautsprechers kann durch das geometrische Design der Aktoren quasi beliebig und bis hin zu sehr hohen Frequenzen eingestellt werden. Aufgrund der gruppenweise gegenphasigen Bewegung der Biege wandler werden vibrationsfreie Schallgeber möglich. Bei der seitlichen Anordnung von Lufteinlässen und -auslässen können mehrere Chips gestapelt und Elektronik zur Ansteuerung sowie weitere MEMS-Sensorik monolithisch integriert werden. Der elektrostatischen Antrieb weist eine sehr gute EMV-Verträglichkeit ohne magnetische Streufelder auf. Mikrolautsprecher auf der Basis des vorgestellten Konzeptes können in CMOS-Technologie mit hoher Präzision kostengünstig realisiert werden. Die Ausführung der MEMS-Mikrolautsprecher in CMOS-Technologie erfüllt zudem die Anforderungen der RoHS-Richtlinie der EU. Zur Erreichung der Marktreife in etwa in 4 Jahren werden derzeit erhebliche Entwicklungsanstrengungen unternommen und Vermarktungskonzepte unter Einbeziehung geeigneter Investoren entwickelt.

## Danksagung

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.

## Literatur

- [1] Conrad, H. et al: A small-gap electrostatic micro-actuator for large deflections. Nature Communications 6, Art.No.: 10078 (2015)
- [2] Borwick, J.: Loudspeaker and Headphone Handbook. 3<sup>rd</sup> Edition, Focal Press, Oxford, 2001