

---

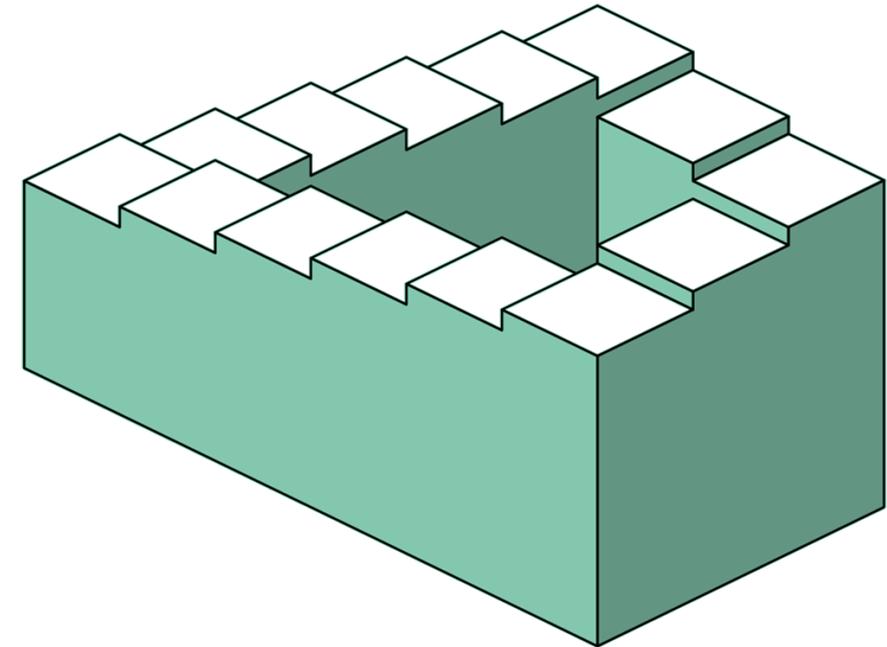
# LAUTSPRECHER IN MEMS-TECHNOLOGIE: KLEINSTLAUTSPRECHER FÜR MOBILE ANWENDUNGEN

Tobias Fritsch | Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologie IDMT

tobias.fritsch@idmt.fraunhofer.de

---

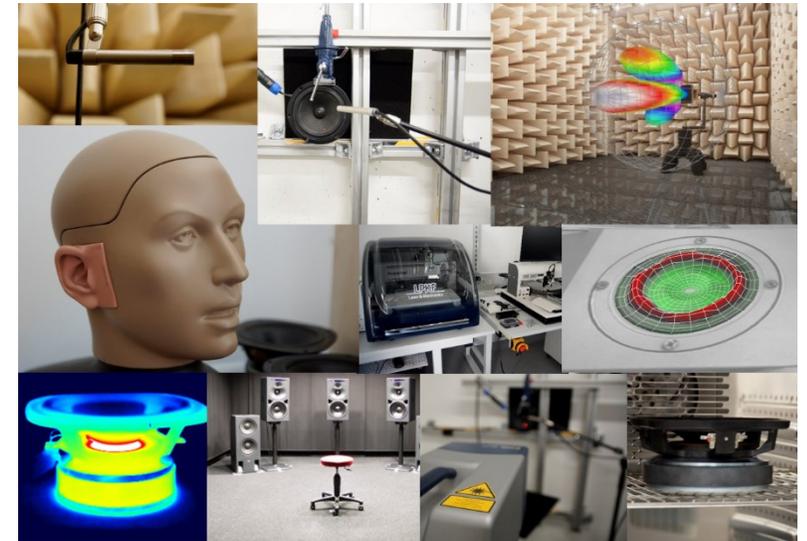
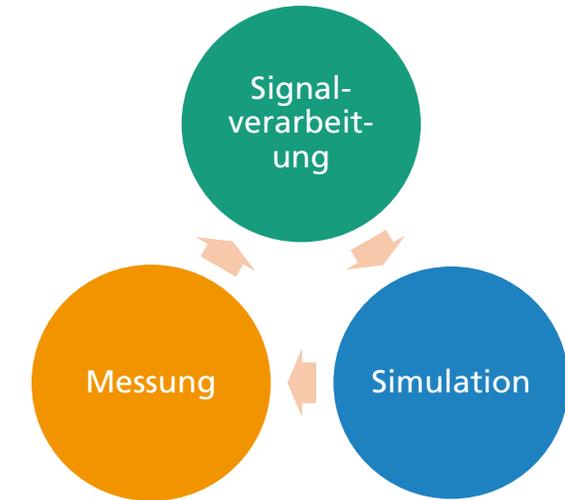
Messung von Schwingung an MEMS Lautsprechern  
durch den Silizium Deckelwafer hindurch



Polytec Anwenderkonferenz 01.12.2020

[14]

- Signalverarbeitung für Lautsprecher
  - Klangoptimierung & Verzerrungsreduktion
  - Schutz vor thermischer und mechanischer Überlastung
- Simulation
  - Modelle für modellbasierte & adaptive Signalverarbeitung
- Messungen
  - Parameter für Simulation bestimmen
  - Modelle verifizieren
- Aufbau von Prototypen (Signalprozessor + Verstärkerelektronik)



---

# MEMS LAUTSPRECHER-EXKURS

Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme

---

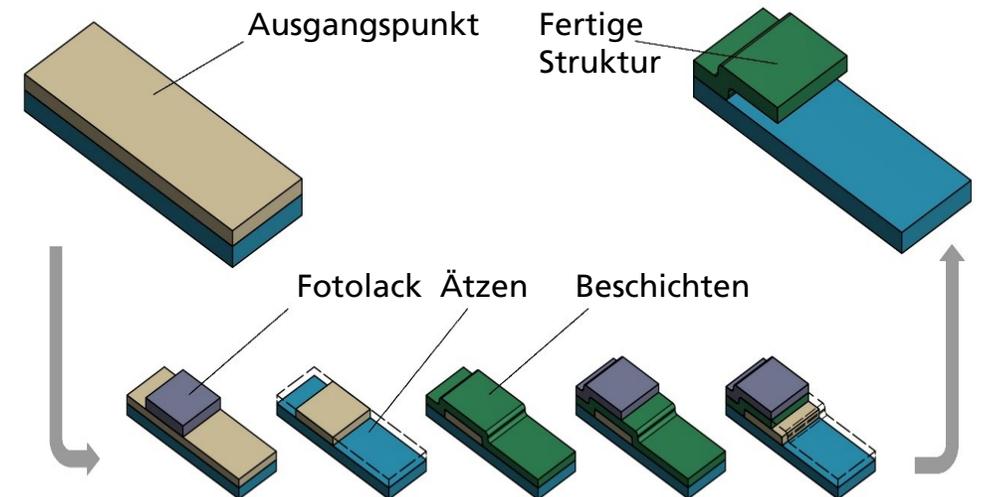


[15]

# MEMS Lautsprecher

## MEMS Fertigung – Ein Prozess aus der Halbleiterindustrie

- MEMS -> Mikro Elektro Mechanisches System
  - Kombination von mechanischen Bauteilen und Ansteuerelektronik auf Siliziumscheibe (Wafer)
  - Fertigungsprozess aus der Halbleiterindustrie
  - Struktur wird aus Siliziumwafer herausgeätzt
- Für große Produktionsvolumina geeignet
- Preisvorteil gegenüber herkömmlichen Lautsprechern

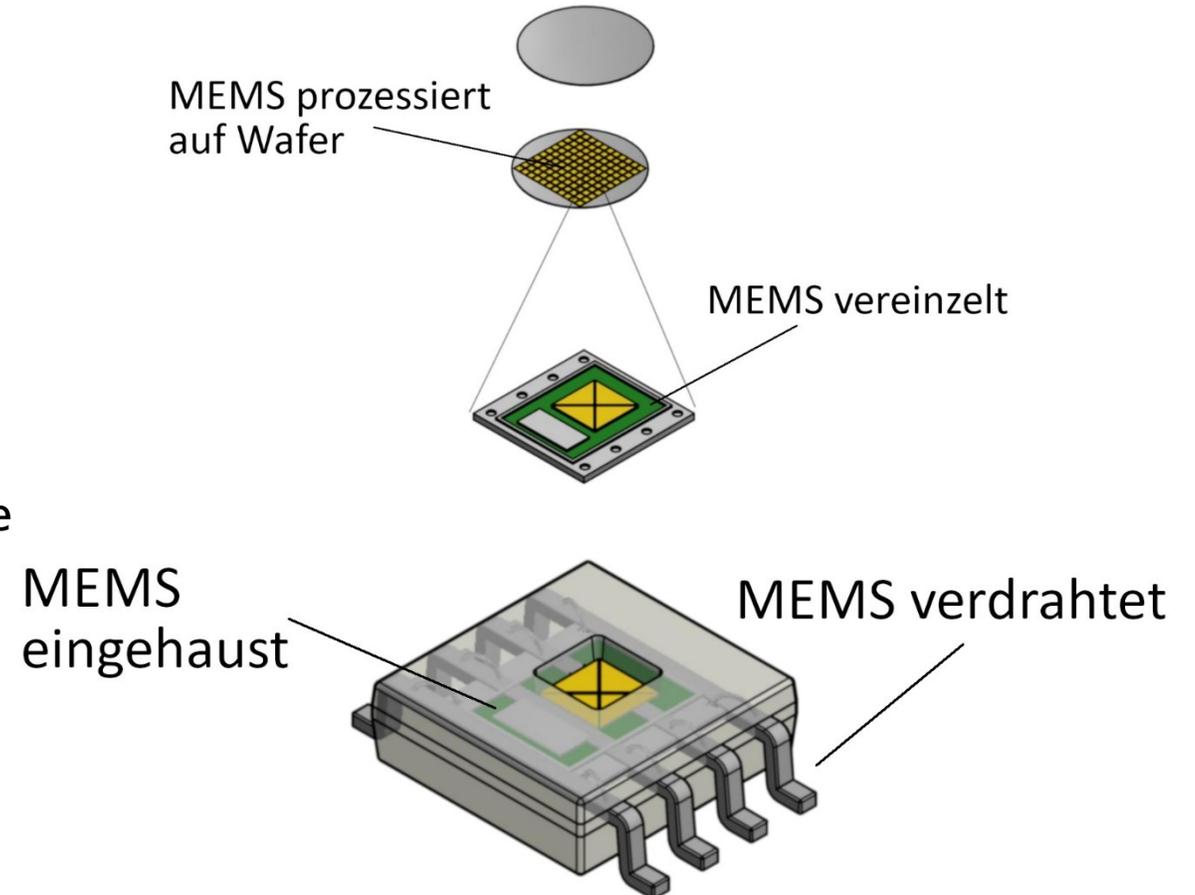


[1]

# MEMS Lautsprecher

## MEMS Fertigung – Ein Prozess aus der Halbleiterindustrie

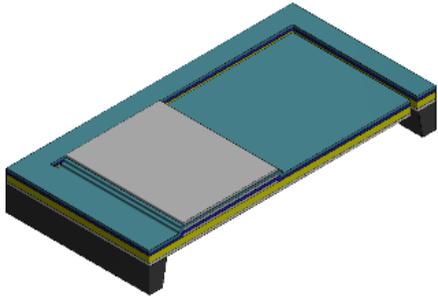
- Platzsparende Integration durch Kombination von:
  - Aktorik
  - Sensorik
  - Ansteuerelektronik
- Automatisierte Verarbeitung bis auf die Platine
  - z.B. Reflow Lötverfahren möglich



[1]

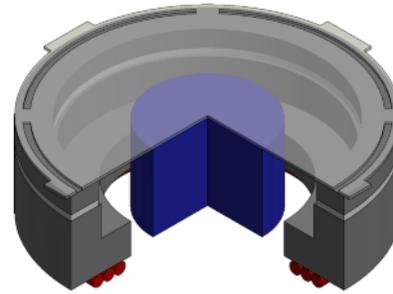
# MEMS Lautsprecher

## Ansätze aus der Literatur (Auswahl)



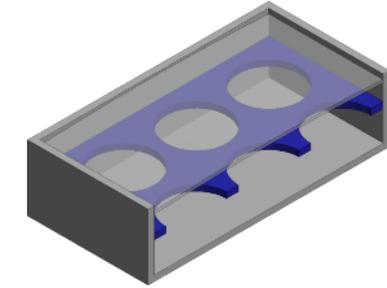
Piezoelektrisch  
Lee et al. (1994)<sup>[2]</sup>

- Erster uns bekannter MEMS Lautsprecher
- Konzipiert als Mikrofon und Lautsprecher



Elektrodynamisch  
Haradine et al. (1997)<sup>[3]</sup>

- Bewegter Magnet, fixierte Spule

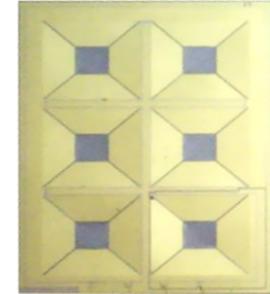
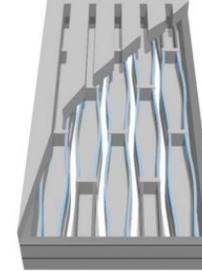
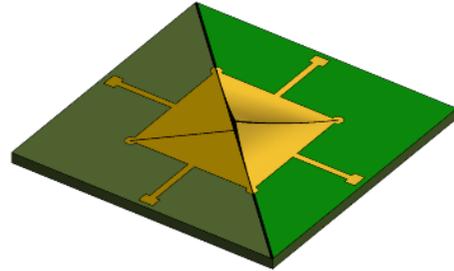
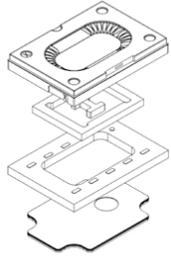


Elektrostatisch  
Neumann & Gabriel (2002)<sup>[4]</sup>

- Membran aus Polyamid mit eingeschlossener Serpentinstruktur

# MEMS Lautsprecher

## Aktuelle Ansätze (Auswahl)



### USound [5] Piezoelektrisch

- Erster kommerzieller MEMS-Lautsprecher
- Aktuell am Markt erhältlich
- MEMS Antrieb mit Folienmembran (Hybrid)

### Fraunhofer ISIT [6] Piezoelektrisch

- $\mu\text{m}$  Schlitze trennen Aktoren
- Mechanisch frei
- Akustisch eine Membran

### Arioso Systems [7] Fraunhofer IPMS Elektrostatisch

- NED
- In-Plane-Bewegung
- Später mehr dazu

### xMEMS [8] Piezoelektrisch

- Plant Markteintritt
- Wenig bekannt

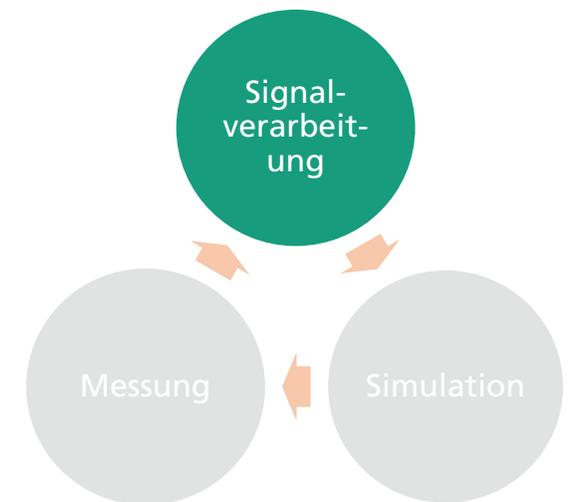
---

# SIGNALVERARBEITUNG FÜR LAUTSPRECHER

## Modellbasierte Klangsteuerung und Verzerrungsreduktion

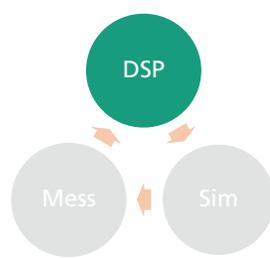
---

Warum ist Signalverarbeitung für MEMS Lautsprecher wichtig?

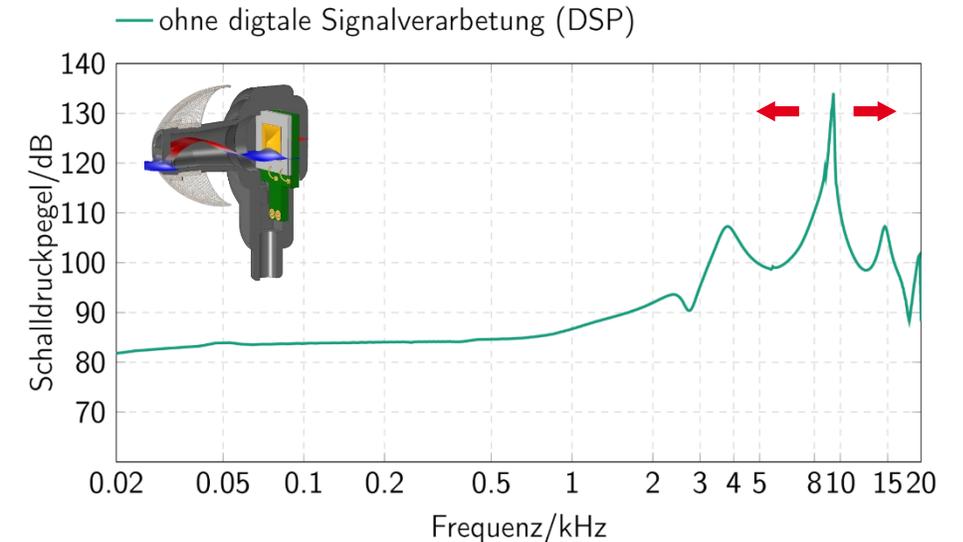


# Signalverarbeitung für Lautsprecher

## Modellbasierte Klangverbesserung und Verzerrungsreduktion



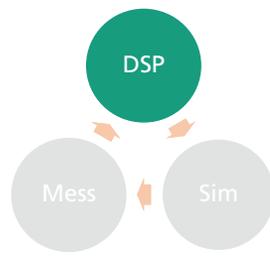
- In-Ohr Kopfhöreremonstrator mit 4x4mm MEMS Lautsprecher
- Starke Resonanzüberhöhung bei ~9 kHz laut Messung
- Für Musikgenuss ungeeignet
- Filter notwendig
  - Kein akustischer Filter mit nötiger Güte
    - Digitaler Filter
- Bei Änderung der Resonanzfrequenz
  - Filter wird nutzlos
- Adaptive Signalverarbeitung notwendig!



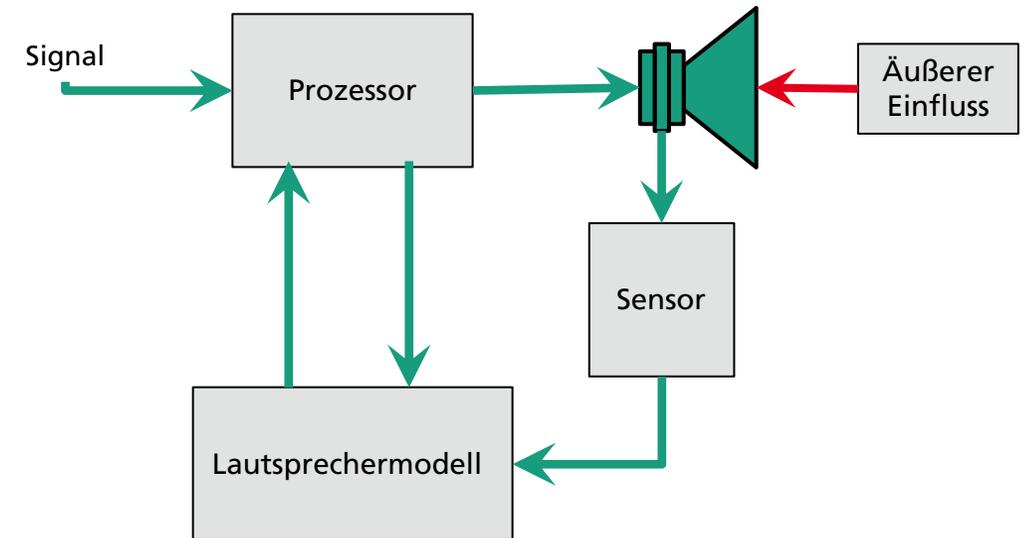
Gemessen in einem High-Res Ohrsimulator nach IEC60318-4

# Signalverarbeitung für Lautsprecher

## Modellbasierte Klangverbesserung und Verzerrungsreduktion

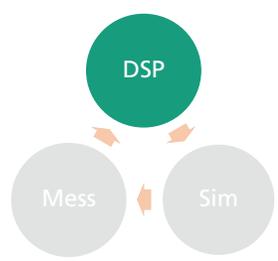


- IDMT: modellbasierter und adaptiver Ansatz
- Filterparameter: Berechnung aus Model
- Nachregelung des Modelles
- Überwachung des Lautsprechers mit Sensor
  - z.B. Strom & Spannung
- Stabilität gegen äußere Einflüsse

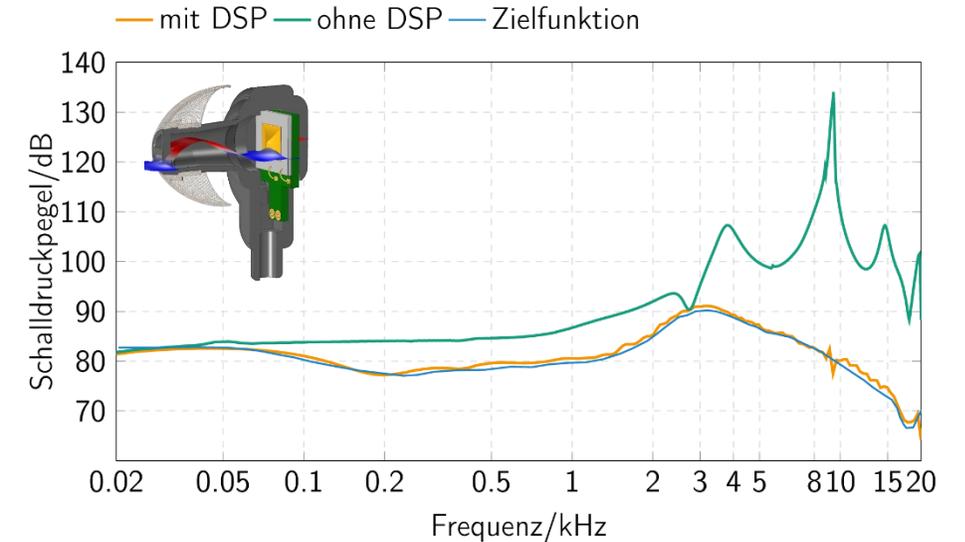


# Signalverarbeitung für Lautsprecher

## Modellbasierte Klangverbesserung und Verzerrungsreduktion



- Modellbasierte Signalverarbeitung
- Resonanzfrequenz wird unterdrückt
- Erfolgreiche Anpassung an Zielfunktion

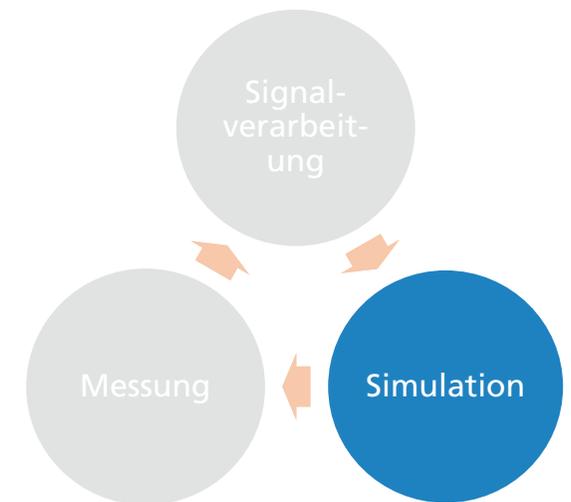


Gemessen in einem High-Res Ohrsimulator nach IEC60318-4

# MODELLIERUNG VON LAUTSPRECHERN

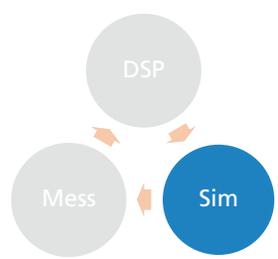
## Grundlage für modellbasierte Signalverarbeitung

- Sehr gute Modelle notwendig (Berücksichtigen äußere Einflüsse)
  - Simulation mit Konzentrierter Elemente Methode (Lumped Elements Method -> LEM)
  - Simulation mittels Finiter Elemente Methode (FEM)
- Ziel: Einfache Modelle, die auf günstigen Signalprozessoren implementierbar sind



# Modellierung von Lautsprechern

## Der „klassische Weg“ – Das einfache Konzentrierte-Elemente-Modell

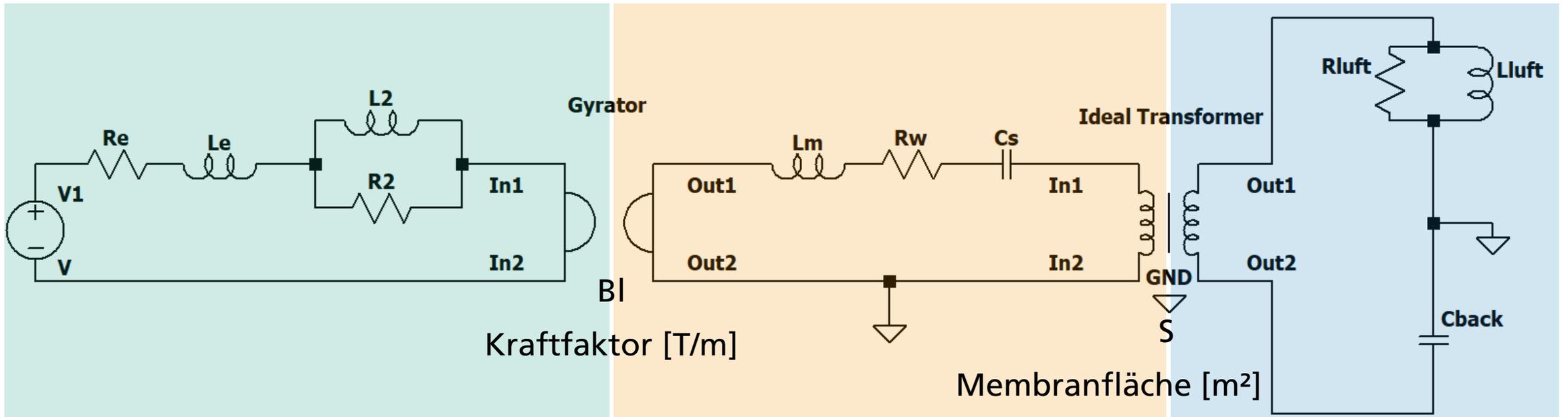


Beispiel: Elektrodynamischer Lautsprecher in geschlossenem Gehäuse

elektrisch

mechanisch

akustisch



Schwingspule

Induktivität + Wirbelströme

Membran

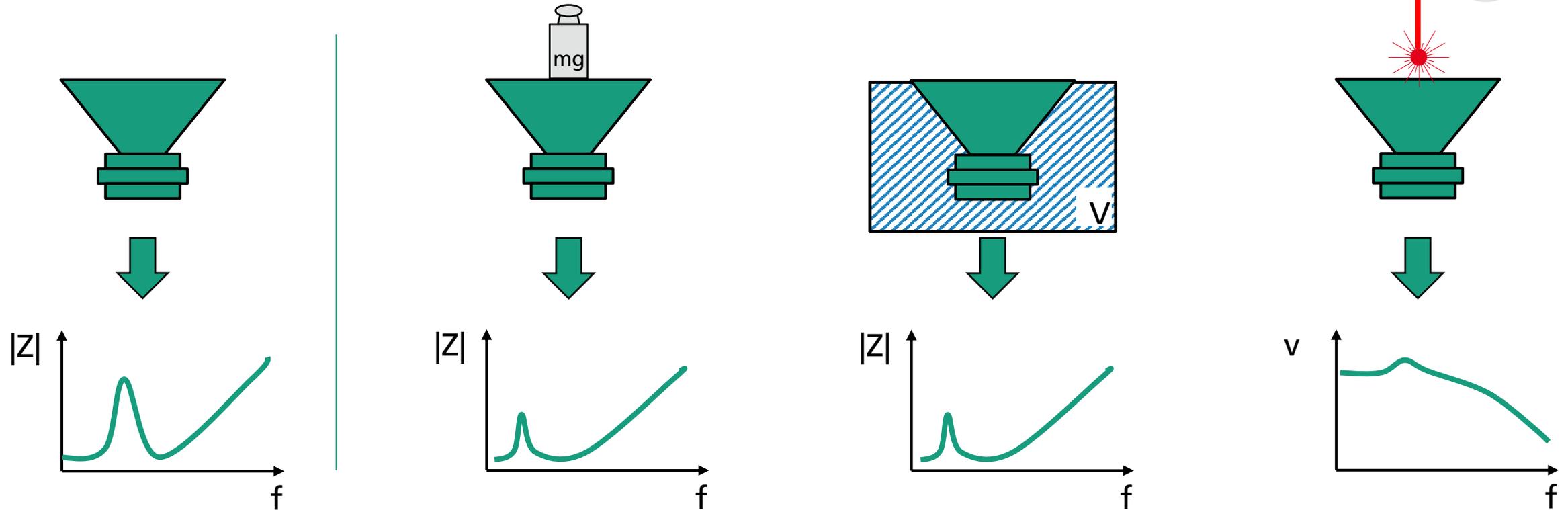
Masse + Reibung + Feder

Gehäuse

Strahler + Volumen

# Modellierung von Lautsprechern

## Der „klassische Weg“ – Wie kann man die Parameter bestimmen?

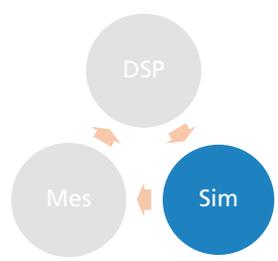


Um Kleinsignalparameter zu bestimmen zwei Messungen notwendig.

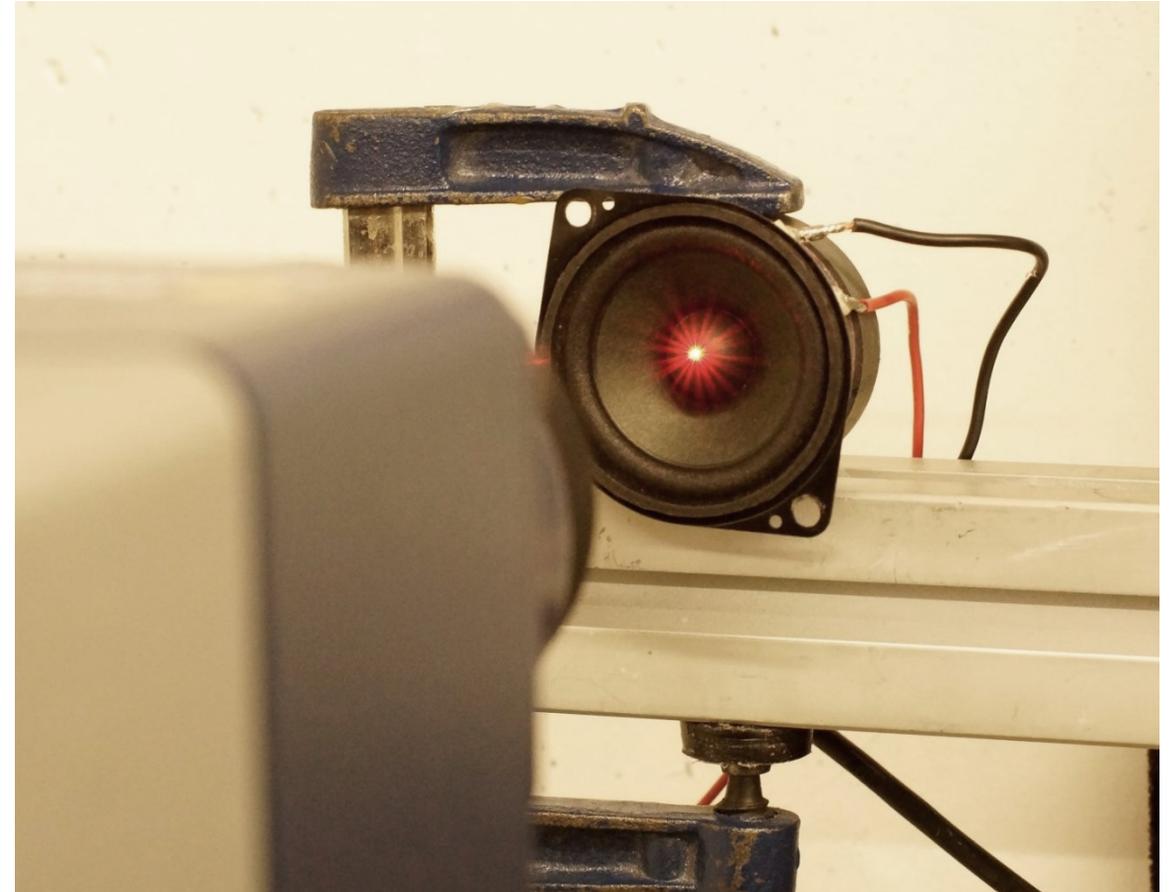
- Impedanzmessung + zweite Impedanzmessung mit veränderter akustischer oder mechanischer Last
- Oder Impedanzmessung + Messung der Auslenkung / Geschwindigkeit der Membran

# Modellierung von Lautsprechern

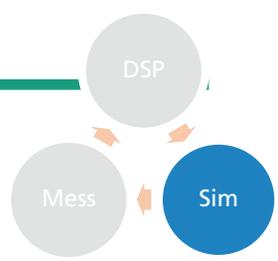
## Der „klassische Weg“ – Wie kann man die Parameter bestimmen



- Die Methode mit der veränderten Last kompliziert und fehleranfällig
  - Gewicht muss genau bekannt sein
  - Gewicht darf nicht zu asymmetrischer Belastung führen
  - Volumen muss vollständig dicht sein
- Geschwindigkeits- oder Auslenkungsmessungen an der Membran mit Hilfe von Lasern einfach und genau
  - State of the art

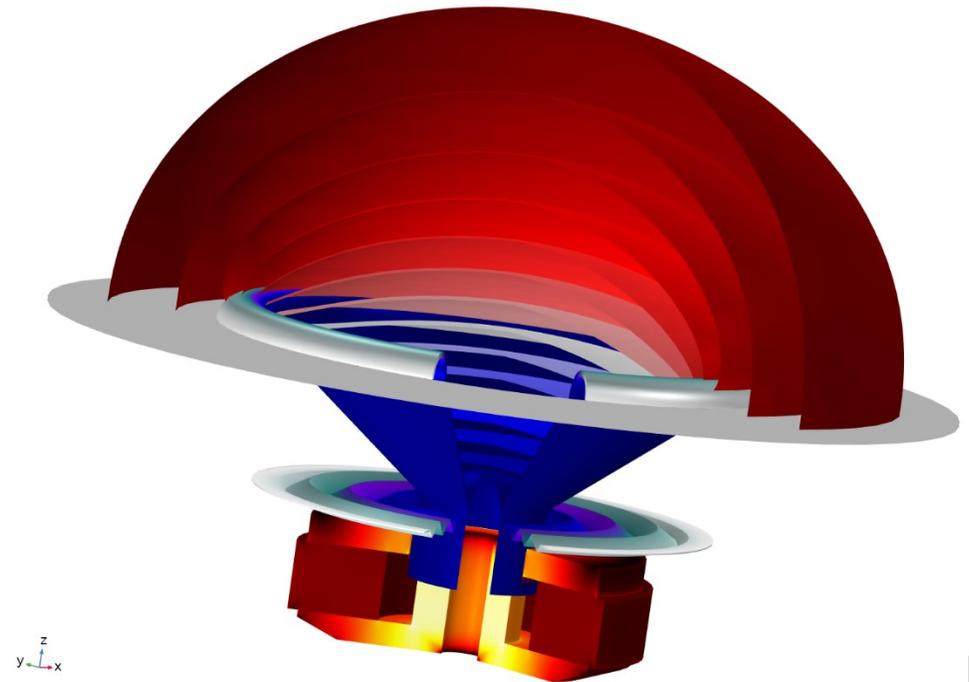


# MODELLIERUNG VON LAUTSPRECHERN



## Der „moderne Weg“ – Finite-Elemente Simulation (FEM)

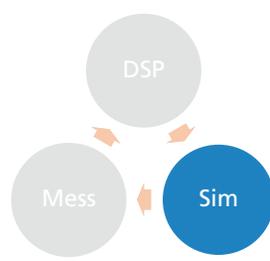
- Komplexe Sachverhalte multiphysikalisch abbildbar
- Extraktion von Werten aus FEM zur Verwendung in LEM möglich
- Materialparameter und Geometrien müssen bekannt sein
  - Oft unbekannt
  - Vielzahl an Messungen notwendig



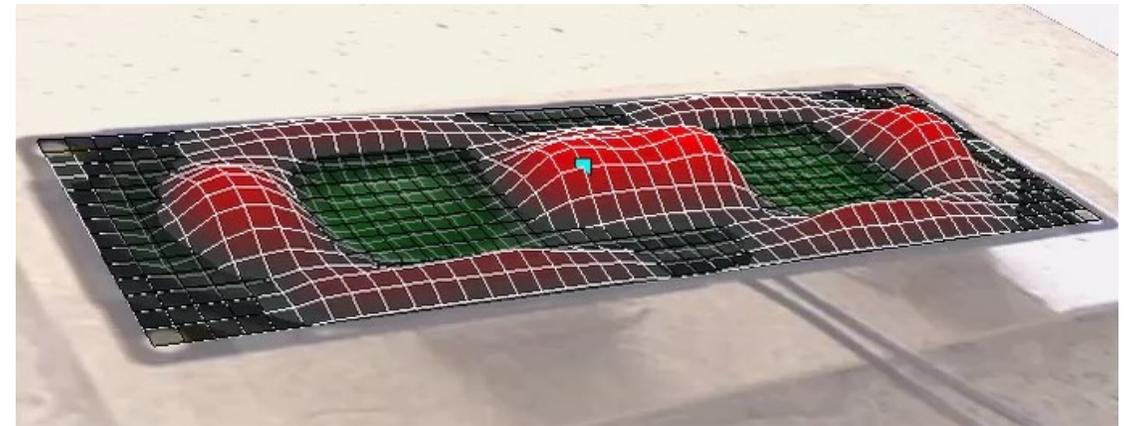
[9]

# Modellierung von Lautsprechern

## Partialschwingungen



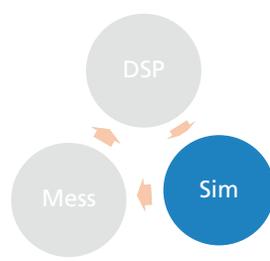
- Verifikation der Simulationsergebnisse mit Vibrometer-Messung
  - Betriebsschwingformen von Membran geben Hinweise ob Materialparameter korrekt gewählt wurden.
- Ziel: Überanpassung der Modelle durch manuelles anpassen von Materialparametern vermeiden.
  - Überanpassung: Modell bildet eine Situation treffend ab. Änderungen äußerer Parameter werden nicht korrekt abgebildet.



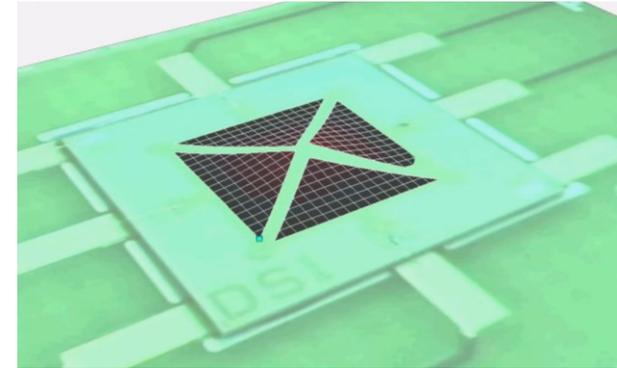
Herkömmlicher Kleinlautsprecher bei 5,156kHz

# Modellierung von Lautsprechern

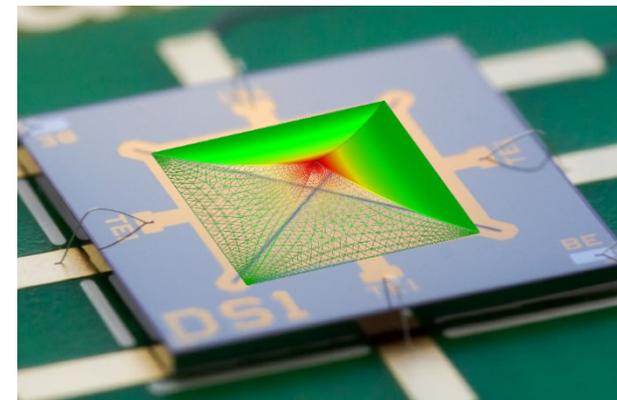
## Verifikation der Simulation



- Gemessene Membrangeschwindigkeit



- Simulation der Membranauslenkung mit Hilfe der FEM

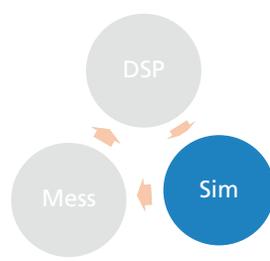


[10,11]

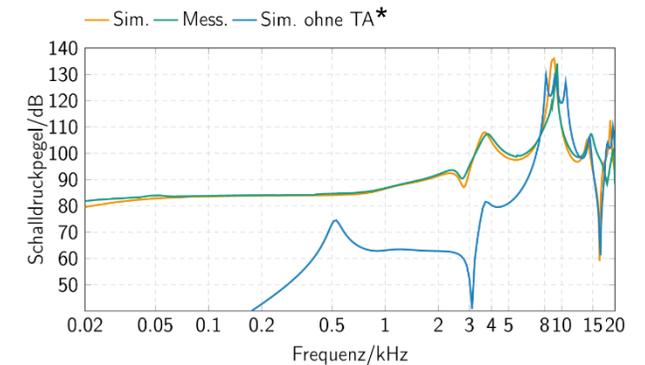
# Modellierung von Lautsprechern

## Ergebnisse

- Simulation MEMS Lautsprecher
- Verifikation durch Vibrometrie
- Einbau in Gehäuse
  - Realer Lautsprecher in 3D-Druck Gehäuse
  - FEM Modell in FEM Modell von Gehäuse
  - -> Ergebnisse vergleichbar!
- Modell Generalisiert !
  - Jetzt möglich: Untersuchung nicht messbarer Größen
- Hier: Einfluss der thermoakustischen Dämpfung im Gehäuse und in den Schlitten des Wandlers



[11]

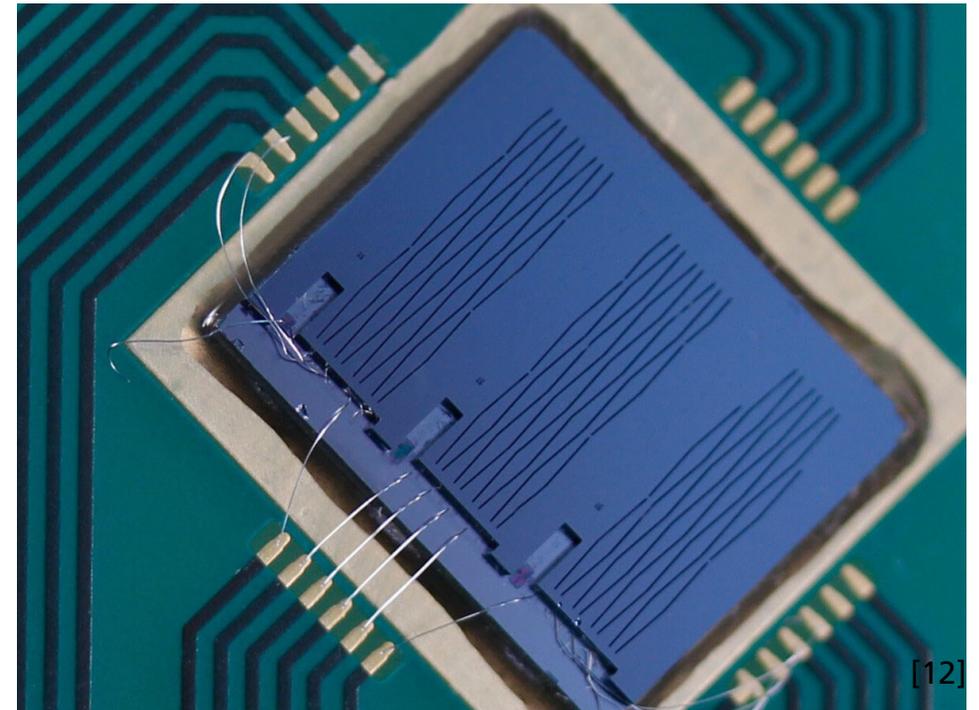


Gemessen in einem High-Res Ohrsimulator nach IEC60318-4

\*TA Thermoakustik = Dämpfung aufgrund von innerer Reibung und Wärmeaustausch [11]

# NANOSCOPIC ELECTROSTATIC DRIVE - NED IPMS/ARIOSO

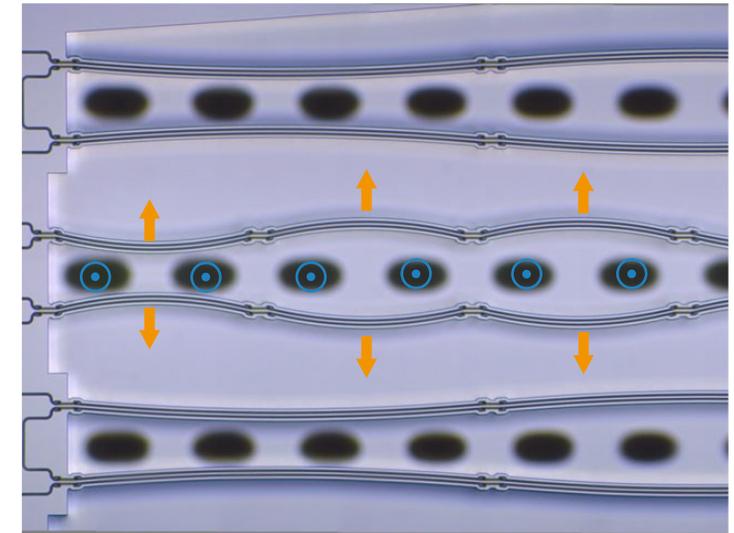
MEMS Lautsprecher mit lateraler Auslenkung unter einem Siliziumdeckel



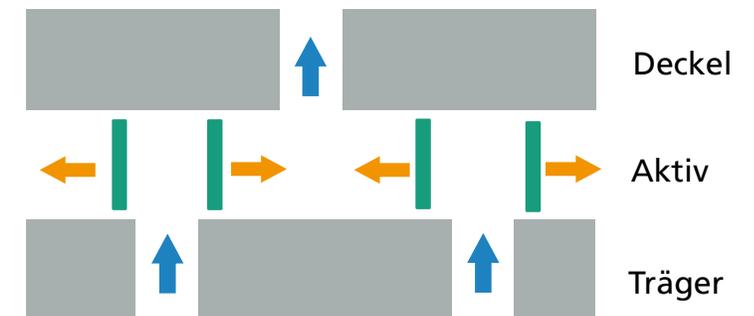
# IPMS/Arioso Nanoscopic Electrostatic Drive | kurz NED

## Funktionsweise

- Aufgebaut aus 3 Siliziumschichten (Wafer)
  - Träger, Aktiv und Deckel
- Träger und Deckel: Luft Ein- und Auslass Öffnungen
- In aktiver Schicht: Biegebalken mit elektrostatischem Antrieb
- Bewegung der Balken: Pumpen von Luft durch die Öffnungen in Träger und Deckel
  - Schallerzeugung



[7]



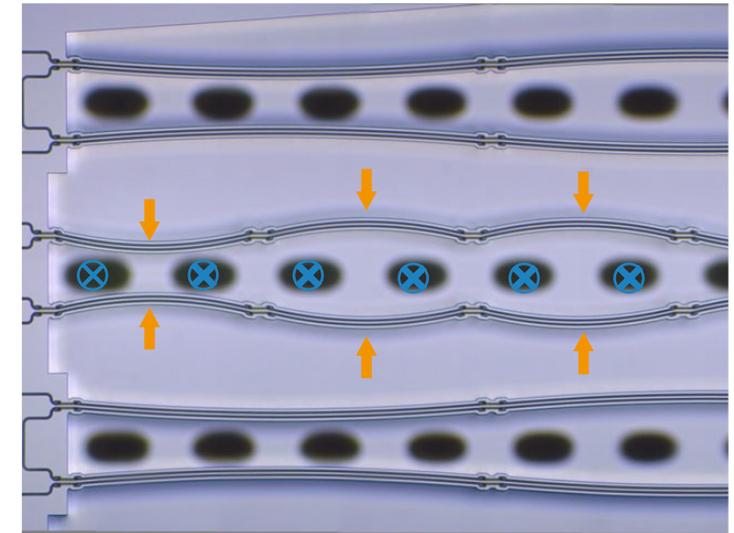
nicht nach Maßstab

nach [7]

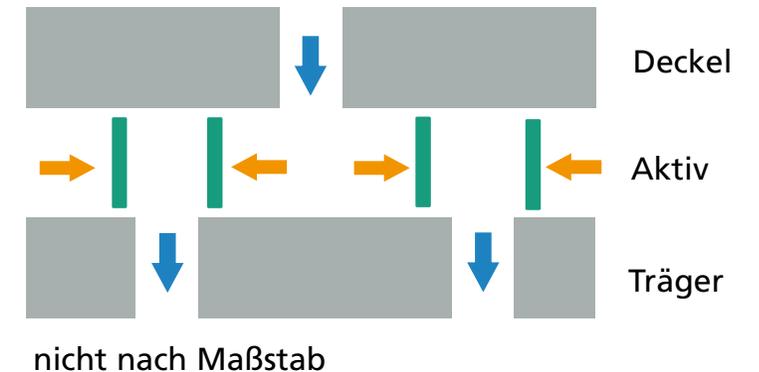
# IPMS/Arioso Nanoscopic Electrostatic Drive | kurz NED

## Funktionsweise

- Aufgebaut aus 3 Siliziumschichten (Wafer)
  - Träger, Aktiv und Deckel
- Träger und Deckel: Luft Ein- und Auslass Öffnungen
- In aktiver Schicht: Biegebalken mit elektrostatischem Antrieb
- Bewegung der Balken: Pumpen von Luft durch die Öffnungen in Träger und Deckel
  - Schallerzeugung



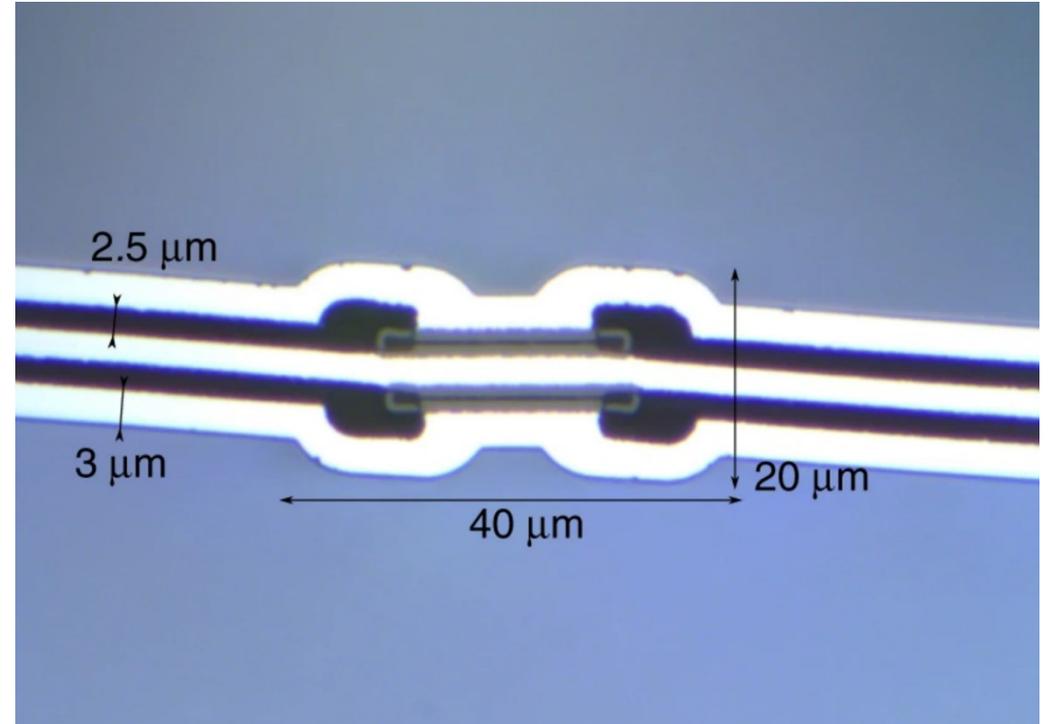
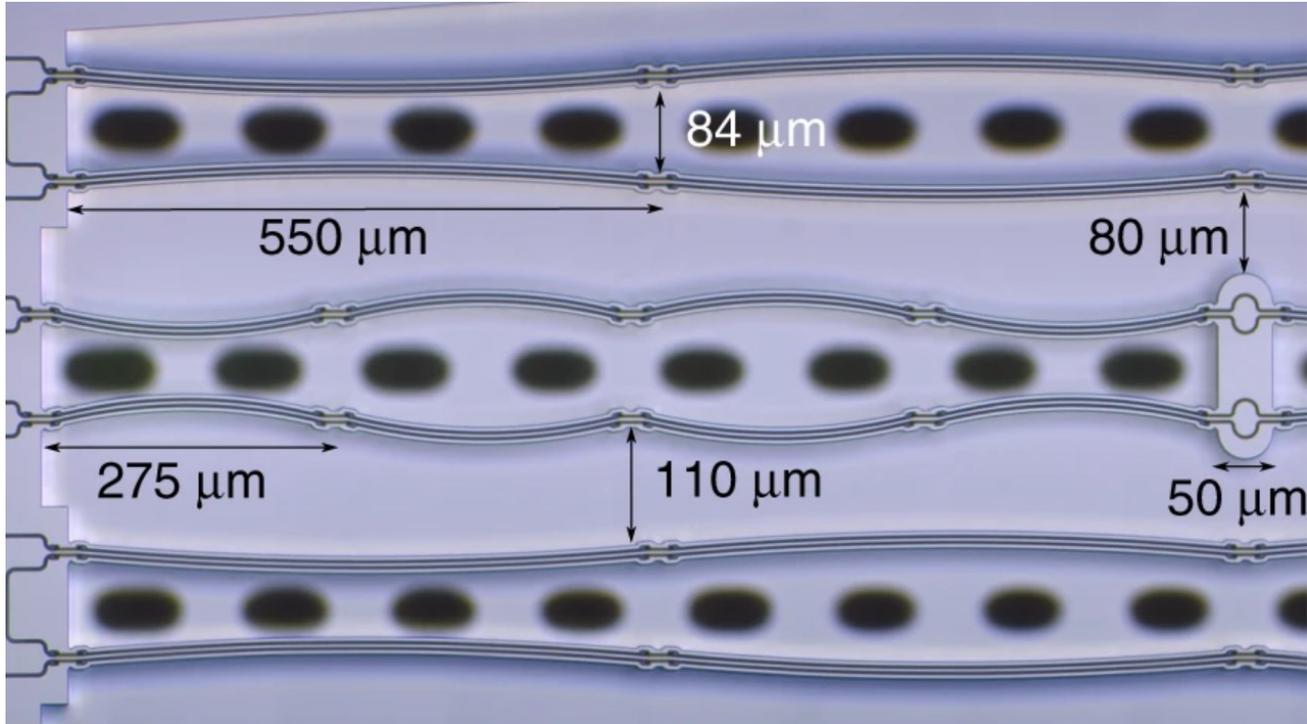
[7]



nach [7]

# IPMS/Arioso Nanoscopic Electrostatic Drive | kurz NED

## Abmessungen

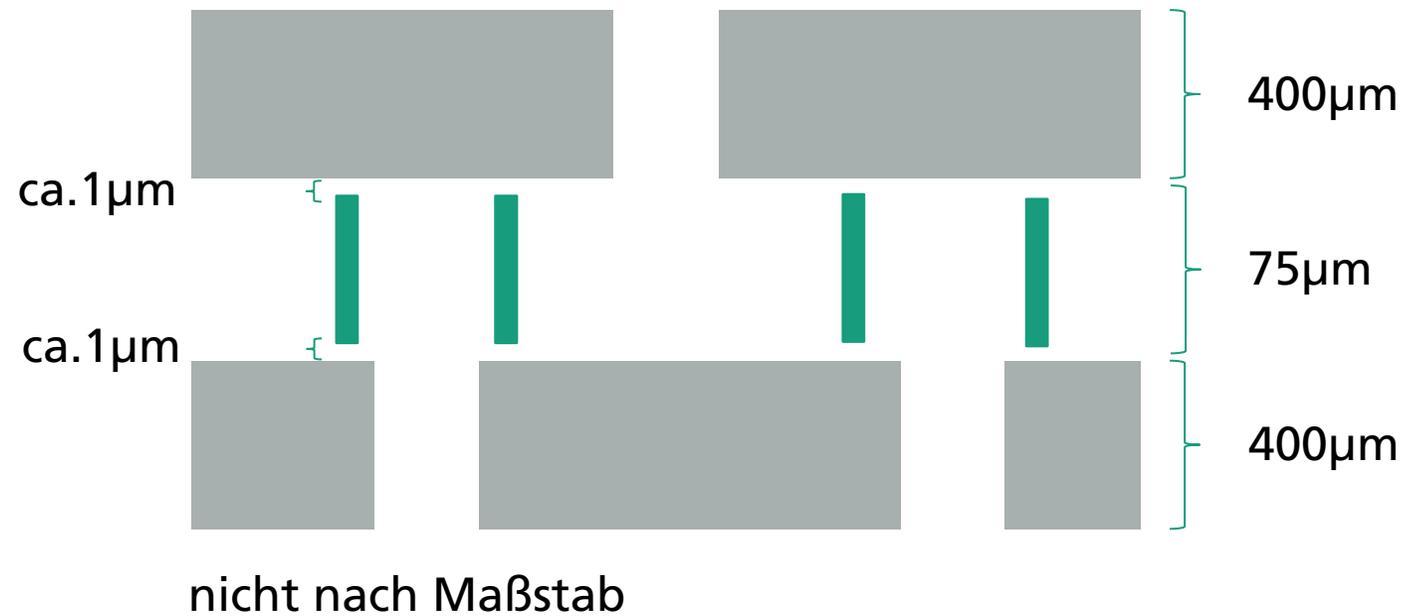


[7]

[7]

# IPMS/Arioso Nanoscopic Electrostatic Drive | kurz NED

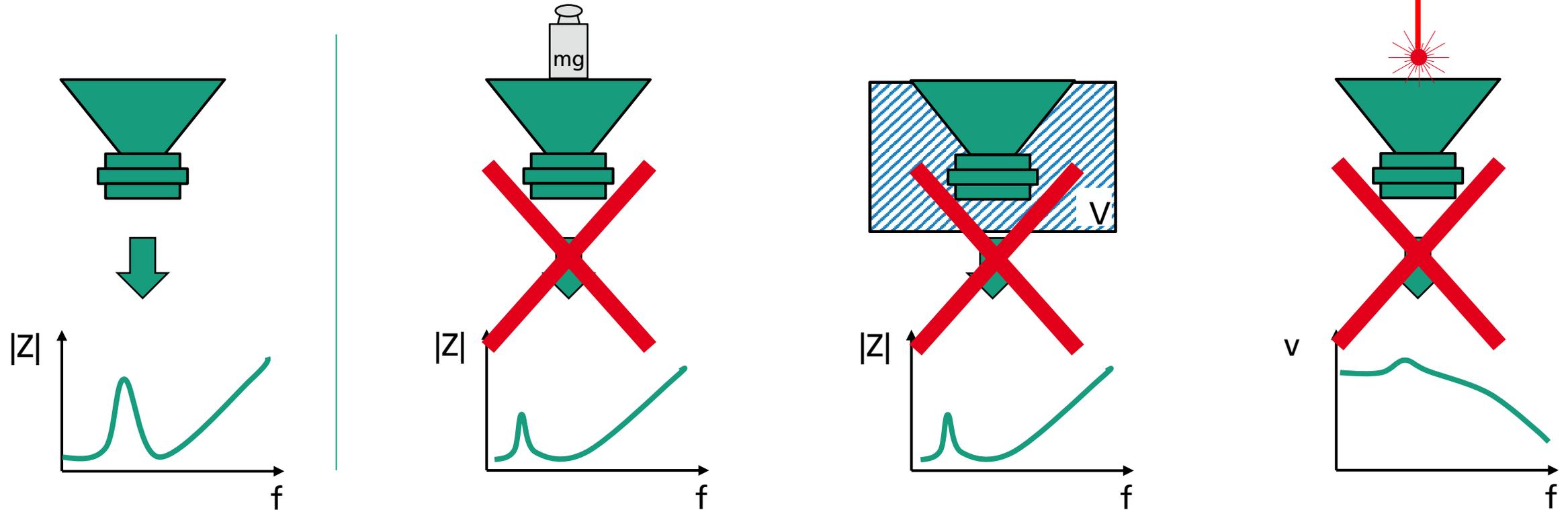
## Abmessungen



nach[7]

# IPMS / Arioso Nanoscopic Electrostatic Drive | kurz NED

## Das „unlösbare“ Problem



Problem: Bei diesem Lautsprecher keines der bekannten Verfahren anwendbar!

Grund: Deckel versperrt Zugang zu Aktoren -> Entfernen des Decks ändert akustische Last auf unbekannte Art und Weise

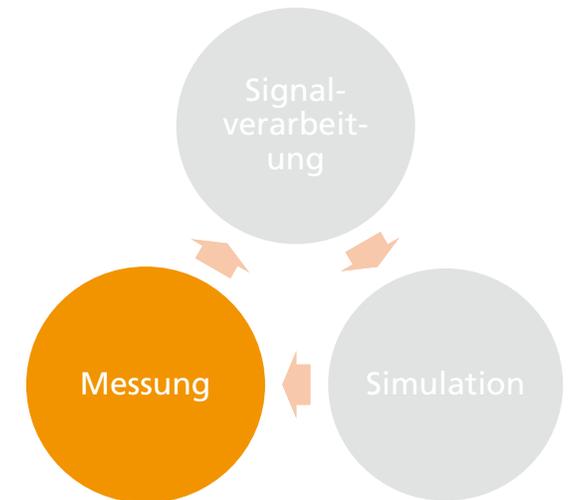
---

# MESSUNGEN MIT DEM NEUEN POLYTEC MSA-650 „IRIS“

Das Unsichtbare messbar machen

---

Neuartiges Laservibrometer erlaubt Schwingungsmessung durch Siliziumdeckel hindurch.



# Messungen mit dem neuen Polytec MSA-650 „IRIS“

## Beschreibung

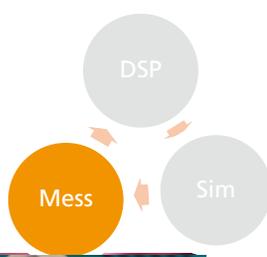
- Kurzkohärente Lichtquelle
  - Lässt nur Interferenzen an der Messfläche zu
  - verhindert Reflektionen am darüber liegenden Silizium
- IR Laservibrometer für out-of-Plane-Bewegung
- IR Stroboskop-Kamera für in-Plane-Bewegung



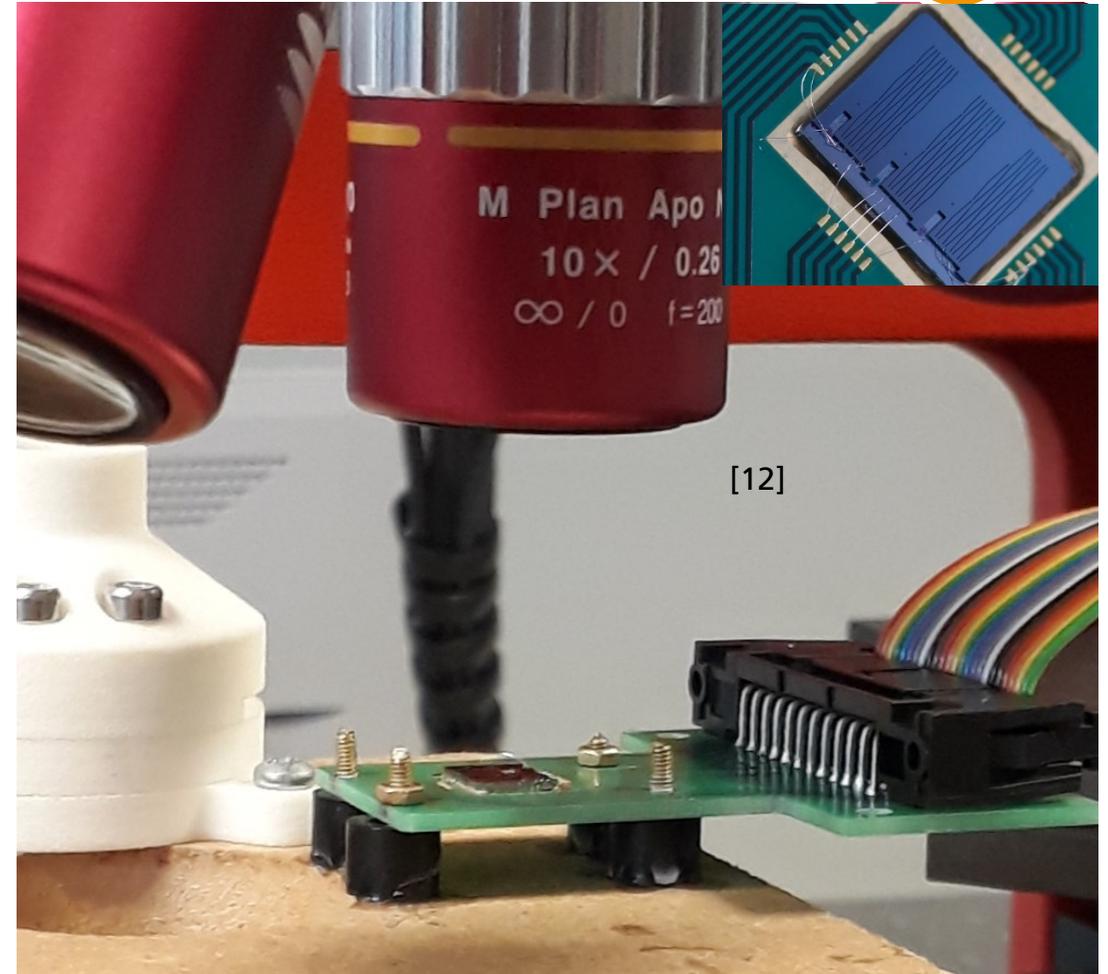
[13]

# Messungen mit dem neuen Polytec MSA-650 „IRIS“

## In-Plane-Bewegung

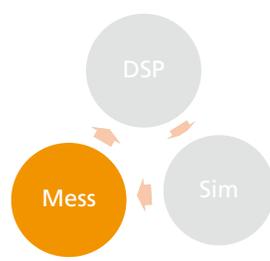


- Messaufbau für Messung der In-Plane-Bewegung mit IR Stroboskop-Kamera

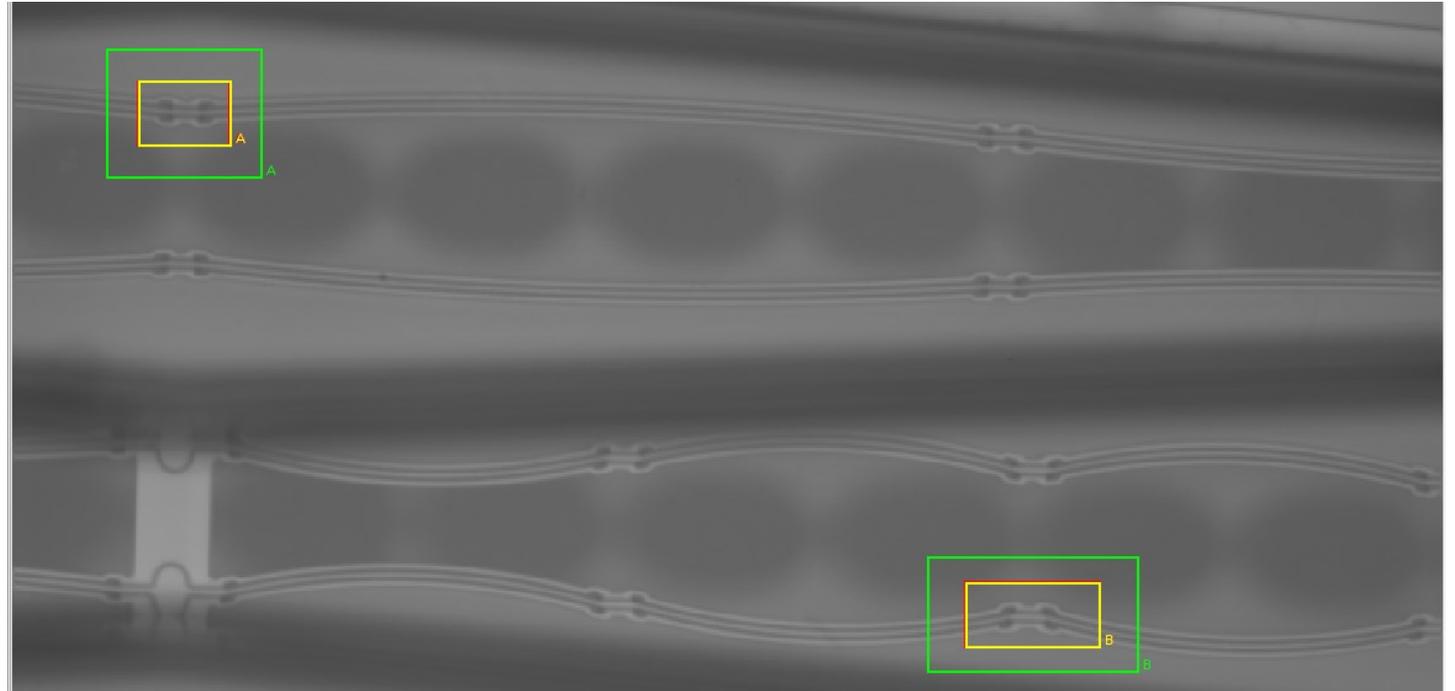


# Messungen mit dem neuen Polytec MSA-650 „IRIS“

## In-Plane Bewegung - Messeinstellungen

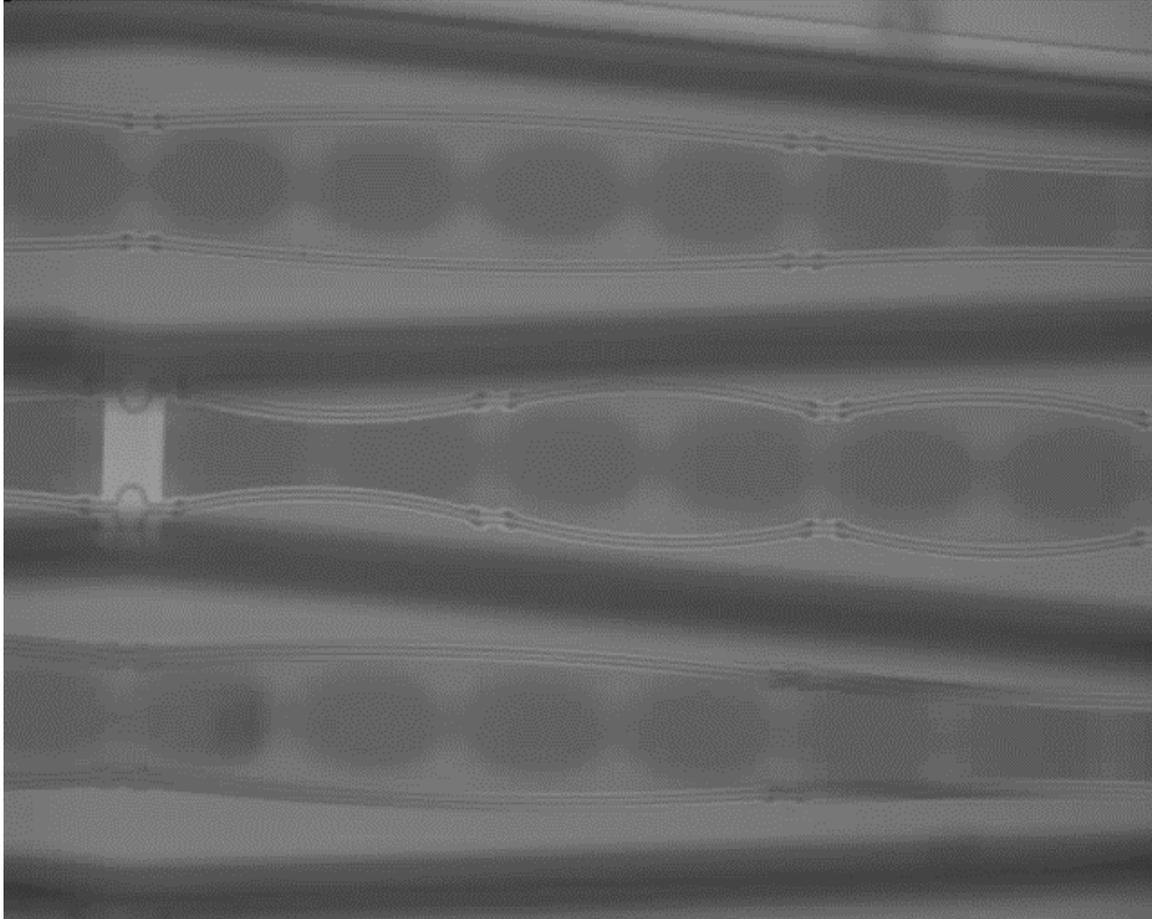
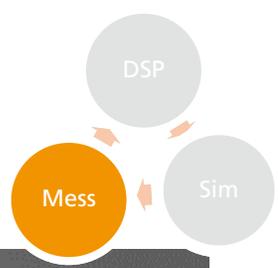


- Balkenstrukturen durch den Deckel klar erkennbar
- Festlegen der interessanten Messbereiche in grafischer Oberfläche der Software



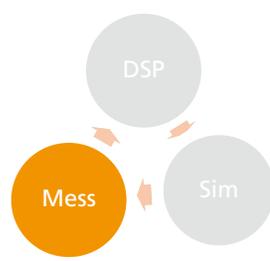
# Messungen mit dem neuen Polytec MSA-650 „IRIS“

## In-Plane Bewegung - Video

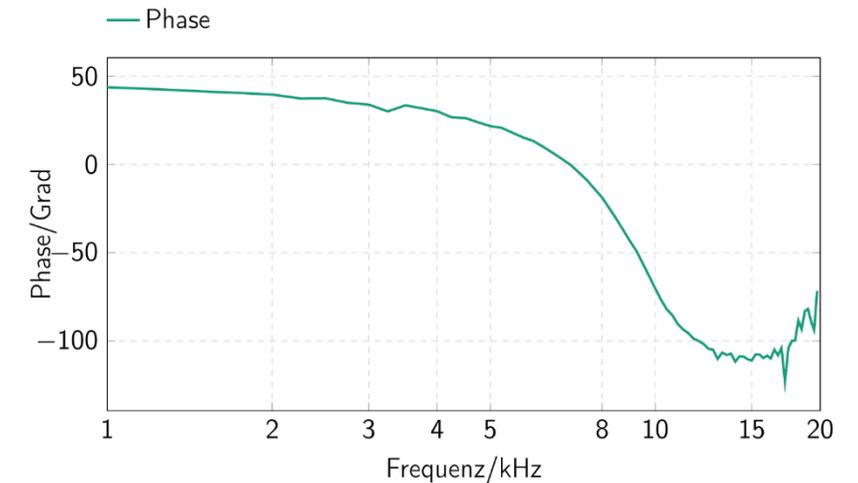
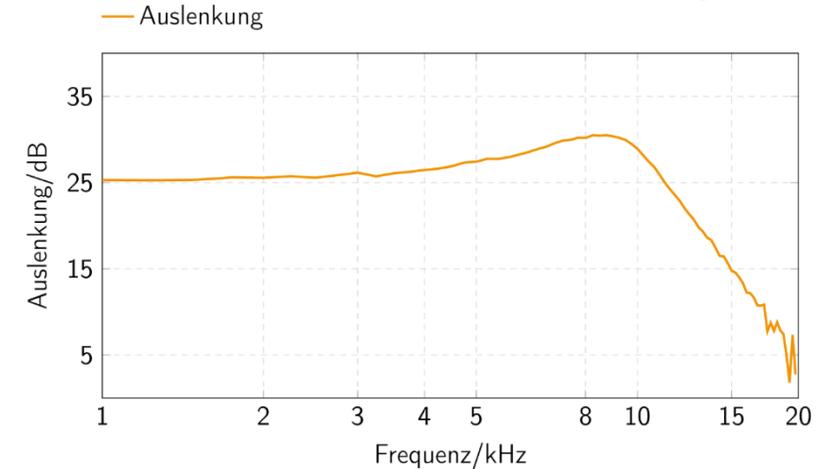


# Messungen mit dem neuen Polytec MSA-650 „IRIS“

## In-Plane Bewegung – Ergebnisse der breitbandigen Anregung

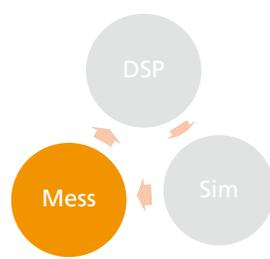


- Auswertung der Auslenkung bei breitbandiger Anregung am zuvor festgelegten Messpunkt „A“
- 0 dB Referenz willkürlich gewählt
- Werte im Nanometerbereich
  
- Phasenmessung

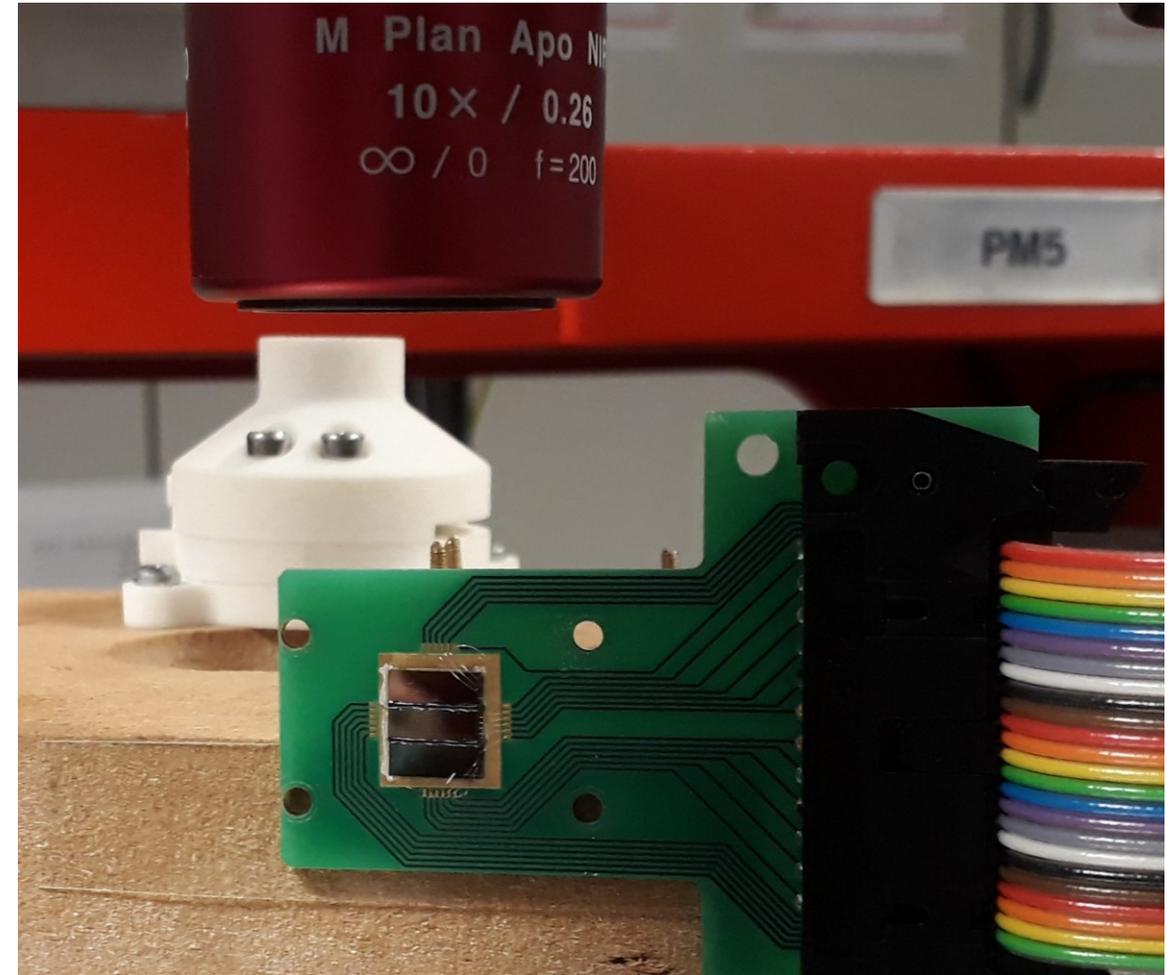


# Messungen mit dem neuen Polytec MSA-650 „IRIS“

## Out-of-Plane-Bewegung

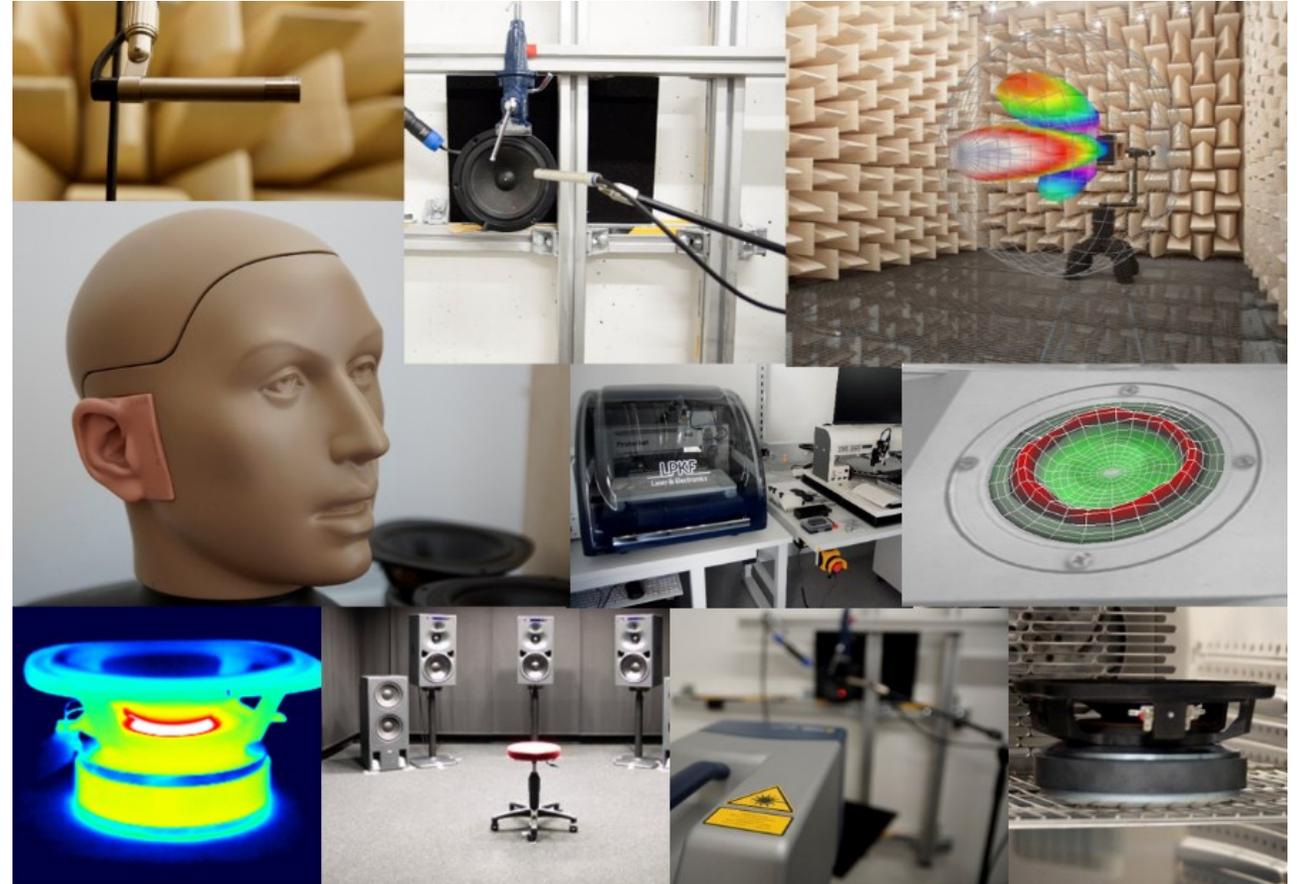


- Messaufbau für Messung der out-of-Plane-Bewegung mit IR Laservibrometer
- MEMS Lautsprecher auf Seite gekippt
- Fokussierter Laser auf 75  $\mu\text{m}$  dicken Balken gerichtet
- Schnittkante des Lautsprechers sehr Rau
  - Schlechte Bedingungen
- Sinusförmige Anregung mit dem Laservibrometer nachweisbar



# Zusammenfassung

- Hohes Potenzial für MEMS Lautsprecher
- MEMS Lautsprecher erfolgreich ohne Signalverarbeitung?
  - Ausreizen bis ans Limit
  - Hohe Anforderungen an Klang
- MEMS lohnt sich erst bei großen Stückzahlen
  - Universelle Mechanik mit spezialisierter Elektronik?
- Mit MSA-650 für Zukunft mit MEMS Lautsprechern gerüstet!



# Literaturverzeichnis

- [1] Beer, Daniel; Rusconi, Andrea; Stoppel, Fabian; Ehrig, Lutz (2020): MEMS-Lautsprecher — Ein Paradigmenwechsel. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA) (Hg.): Akustik Journal. Unter Mitarbeit von Prof. Dr.-Ing. Detlef Krahe (01/20).
- [2] Lee, Seung S.; Ried, R. P.; White, R. M. (1996): Piezoelectric cantilever microphone and microspeaker. In: *J. Microelectromech. Syst.* 5 (4), S. 238–242. DOI: 10.1109/84.546403.
- [3] Harradine, M. A.; Birch, T. S.; Stevens, J. C.; Shearwood, C. (1997): A micro-machined loudspeaker for the hearing impaired. In: Kensall D. Wise (Hg.): Transducers 97. Digest of technical papers. International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97). Chicago, IL, USA, 16-19 June 1997. S. 429–432.
- [4] Neumann, J. J.; Gabriel, K. J. (2001): CMOS-MEMS membrane for audio-frequency acoustic actuation. In: Technical digest / MEMS 2001, the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Interlaken, Switzerland, January 21 - 25, 2001.
- [5] © USound GmbH <https://www.usound.com/>
- [6] Fritsch, Tobias; Beer, Daniel; Küller, Jan; Fischer, Georg; Zhykhar, Albert; Fiedler, Matthias (2021): MEMS Acoustical Actuators: Principles, Challenges and Perspectives. In: Lena Zentner und Steffen Strehle (Hg.): MICROACTUATORS, MICROSENSORS AND MICROMECHANISMS. Mamm 2020, Bd. 96. [S.I.]: SPRINGER NATURE (Mechanisms and Machine Science), S. 125–136
- [7] Kaiser, Bert; Langa, Sergiu; Ehrig, Lutz; Stolz, Michael; Schenk, Hermann; Conrad, Holger et al. (2019): Concept and proof for an all-silicon MEMS micro speaker utilizing air chambers. In: *Microsystems & nanoengineering* 5, S. 43. DOI: 10.1038/s41378-019-0095-9.

# Literaturverzeichnis

- [8] © xMEMS <https://xmems.com> (28.10.2020)
- [9] <https://www.comsol.com/release/5.4/acoustics-module> (28.10.2020)
- [10] Stoppel, Fabian; Männchen, Andreas; Niekiel, Florian; Beer, Daniel; Giese, Thorsten; Wagner, Bernhard (2018): New integrated full-range MEMS speaker for in-ear applications. In: IEEE Staff (Hg.): 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Belfast, 1/21/2018 - 1/25/2018. Piscataway: IEEE, S. 1068–1071.
- [11] Küller, Jan, IDMT, Vortrag zum Herbsttreffen des Fachausschuss Elektroakustik der DEGA am 30.09.2020
- [12] <https://audioxpress.com/news/micro-loudspeaker-innovator-arioso-systems-gmbh-ready-to-enter-the-market> (02.11.2020)
- [13] <https://www.polytec.com/de/vibrometrie/produkte/mikroskopbasierte-vibrometer/msa-iris-messdienstleistung/>
- [14] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/Impossible\\_staircase.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/Impossible_staircase.svg) (03.11.2020)
- [15] <https://cdn1.vogel.de/unsafe/fit-in/1000x0/images.vogel.de/vogelonline/bdb/1736100/1736108/original.jpg> (03.11.2020)