

# Piezoelektrische MEMS-Mikrofone mit Regelung durch Krafrückkopplung

Til Friebe<sup>1</sup>, Gabriele Bosetti<sup>1,2</sup>, Christian Bretthauer<sup>2</sup>, Gabriele Schrag<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Professur für Mikrosensorik und –aktorik, Technische Universität München,  
 Arcisstr. 21, 80290 München  
<sup>2</sup>Infineon Technologies AG, Am Campeon 1-15, 85579 Neubiberg  
 Kontakt: til.friebe@tum.de, +49-89-289-23129

## Zusammenfassung

Wir präsentieren das Design und eine erste experimentelle Validierung eines durch Krafrückkopplung geregelten piezoelektrischen MEMS-Mikrofons mit dem Ziel, die Sensorlinearität zu erhöhen, eine flache Frequenzantwort zu ermöglichen und Systemresonanzen zu dämpfen. Das MEMS-Konzept beruht auf einer allseitig eingespannten, gewellten Aluminiumnitridmembran. Das Design und die Auswertung der wichtigsten Sensorparameter wurden mithilfe von gekoppelten Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt und die Messungen erster Prototypen mit Hilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers bestätigen, dass die krafrückgekoppelte Regelung des MEMS-Mikrofons möglich ist.

**Keywords:** MEMS, Akustische Sensoren, Mikrofon, Piezoelektrisch, Regelung

## Hintergrund

MEMS Mikrofone sind komplexe Systeme, die in mehreren Energiebereichen wirken. Sie bestehen aus einem MEMS-Wandler, einem ASIC zur Signalverstärkung und -aufbereitung, sowie einem Gehäuse, das vor Umwelteinflüssen schützt und eine einfache Handhabung ermöglicht. Obwohl kapazitive Mikrofone seit vielen Jahrzehnten als Stand der Technik gelten, bieten piezoelektrische MEMS-Mikrofone einige Vorteile. Zu diesen zählt ein geringerer Stromverbrauch, da keine Vorspannung zur Signalauslese benötigt wird, sowie eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen Partikel und eine Reduktion des fluidischen Rauschens, da keine perforierte Gegenelektrode benötigt wird. Piezoelektrische MEMS-Mikrofone, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, setzen bimorphe, geschlitze Membranen, also balkenartige Strukturen ein, die wenig robust gegenüber Stößen und Überdruck und anfällig gegenüber intrinsischen Schichtspannungen sind. Die Nachteile dieses Ansatzes können durch ein innovatives Design ausgeglichen werden, das auf einer pseudo-bimorphen, einlagigen, allseitig eingespannten, korrigierten Membran basiert. [1]

Ein weiterer Vorteil des piezoelektrischen Mikrofons liegt im linearen Zusammenhang zwischen elektrischer Spannung und Kraft. Dieser vereinfacht die krafrückgekoppelte Regelung des Sensors (schematisch dargestellt in Abb. 1) und eröffnet so die Möglichkeit zur Optimierung der Sensorperformanz. [2]

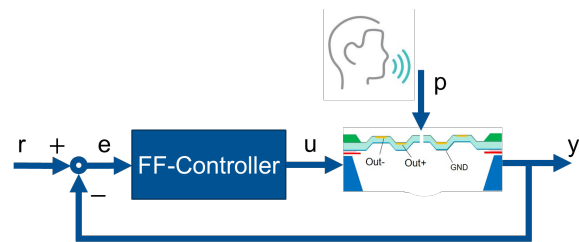


Abb. 1: Schematische Darstellung der Mikrofonregelung durch Krafrückkopplung (Force-Feedback-Controller).

## Methodik

Ein Benchmark-Design des Mikrofons ist in Abb. 2 dargestellt. Das Design ist rotationssymmetrisch um die z-Achse. Es enthält Wellungen (Korugationen), die zur Relaxierung der intrinsischen Spannung in den Materialschichten beitragen und für eine geometrische Separierung der unter Zugbeziehungweise Druckspannung stehenden „Berge“ und „Täler“ der Korugationen führen, wenn eine eintreffende Schallwelle die Membran verformt. Das piezoelektrische Material wird mit drei Elektroden kontaktiert: Während die Unterseite der Schicht ganzflächig durch die „Bottomelektrode“ kontaktiert ist, wird die Oberseite der Schicht in zwei Elektroden unterteilt, von denen die „Bergelektrode“ alle Berge der Korugationen elektrisch miteinander verschaltet, und die „Talelektrode“ in gleicher Weise die Täler. Der

quasi-bimorphe Effekt der Korngationen ermöglicht die Membranauslenkung anhand der generierten elektrischen Spannung zwischen „Berg“- und „Bottomelektrode“ zu bestimmen. Gleichzeitig kann die Membran durch Anlegen einer Spannung zwischen der „Tal“- und „Bottomelektrode“ über den reziproken piezoelektrischen Effekt in Ruhelage gehalten werden, indem das Messsignal rückgekoppelt wird. Die „Bottomelektrode“ wird dabei auf elektrische Masse gelegt.

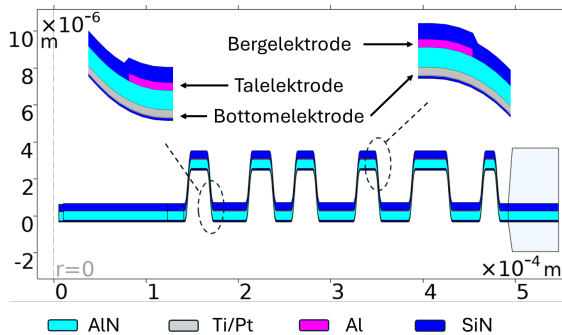


Abb. 2: Gewellte Membran aus AlN und SiN mit Berg- und Talelektrode aus Al und Bottomelektrode aus Ti/Pt (2D-Schnitt, Rotationsachse bei  $x=0$ ). Benchmarkdesign.

Um im rückgekoppelten Betrieb ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis des geregelten Sensors zu erhalten, und gleichzeitig einen energieeffizienten Betrieb zu ermöglichen, sollte die Energie des Messsignals maximiert und die Energie des Gegensteuersignals minimiert werden. Essenziell für das Regelungskonzept ist, dass das rückgekoppelte Aktuierungssignal sowohl die Messspannung auf 0 V regelt als auch die mechanische Spannung an den Messelektroden reduziert, und analog die Membranauslenkung verringert. Kann eine Membran entworfen werden, die diese Eigenschaften erfüllt, kann die Sensorlinearität erhöht werden, da die Struktur und das piezoelektrische Material selbst erst bei noch höheren Schalldrücken nichtlineare Effekte aufweisen. Alternativ könnte, um die Empfindlichkeit der Membran zu erhöhen, auch die Steifigkeit der Membran verringert werden. Die Komplexität der Geometrie erschwert die analytische Beschreibung des Membranverhaltens in Abhängigkeit der gesuchten Größen, sodass ein FEM-Modell in COMSOL Multiphysics erstellt wird, um das genaue Verhalten zu simulieren. Der Abgleich und die Validierung des Modells mit gefertigten Strukturen erfolgt über die statische Verformung der Membran im unbelasteten

Zustand, die durch fertigungsbedingte Verspannungen im Schichtstapel des Mikrofons entsteht und die Performanz des Mikrofons stark beeinflusst. Abb. 3 zeigt die statische Verbiegung des Benchmark-Mikrofons gemessen mittels Weißlicht-Interferometrie. Es zeigt sich, dass die Membran nach oben verbogen ist. Durch Anpassen der intrinsischen Materialspannung im FEM-Modell kann die statische Verbiegung der Membran in guter Genauigkeit nachgestellt werden. Dies zeigt das untere Diagramm in Abbildung 3, in der das Höhenprofil auf dem eingezeichnete Schnitt durch die Membran mit der statischen Verbiegung des FEM-Modells verglichen wird. Die intrinsische Materialspannung im FEM-Modell beeinflusst auch die erste Eigenfrequenz der Membran und ist ebenso auf die gemessene Vakuumresonanzfrequenz von 39 kHz abgestimmt. Im folgenden Abschnitt wird die Eignung des Mikrofondesigns aus Abb. 2 für einen Regelbetrieb unter Krafrückkopplung untersucht, um daraus Erkenntnisse darüber zu erhalten, welche Eigenschaften der Membran für die Krafrückkopplung wichtig sind und wie diese ggf. optimiert werden müssen.

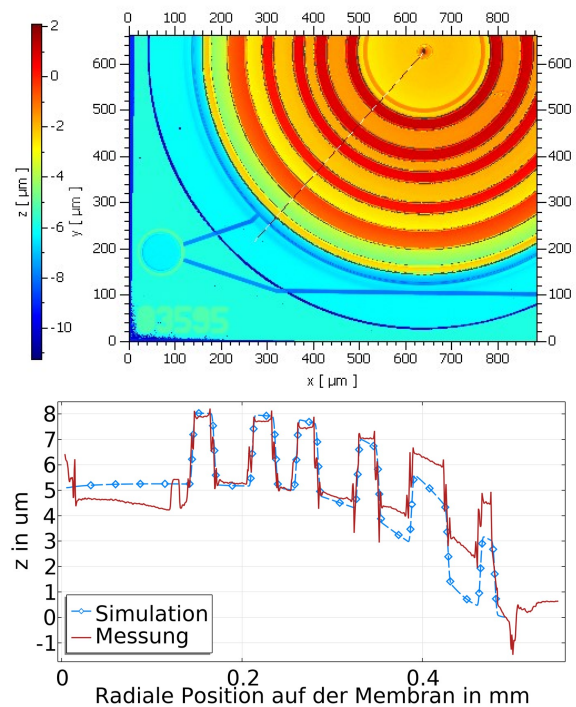


Abb. 3: Weißlicht-Interferometrie-Aufnahme des Benchmark-Mikrofons. Die untere Abbildung zeigt das Höhenprofil entlang des eingezeichneten Schnitts durch die Membran und den Vergleich mit der simulierten Auslenkung.

## Ergebnisse

Abb. 4 zeigt eine Proof-of-Concept Messung des Regelungsprinzips mit den zugehörigen Simulationsergebnissen. Sie zeigt die maximale dynamische Membranauslenkung aus der Ruhelage aus Abb. 3 im Profil für vier verschiedene Anregungen. Zunächst wird das Mikrofon mit einem Lautsprecher akustisch bei 1kHz mit einem Schalldruck von 101dB(SPL) angeregt (blau) und die Membranauslenkung mit einem Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) gemessen. Die Sensorspannung wird hier wie im regulären Mikrofonbetrieb zwischen „Berg“- und „Bottomelektrode“ gemessen. Danach wird der Lautsprecher abgeschaltet, und das Mikrofon selbst wie ein Lautsprecher betrieben, indem zwischen der „Tal“- und „Bottomelektrode“ eine Aktuierungsspannung von  $V = 0.84\text{V}$  mit einer Frequenz von 1 kHz angelegt wird (rot). Im dritten Schritt werden beide Anregungsformen mit einer Phasenverschiebung von  $180^\circ$  überlagert, um die in Versuch 1 gemessene Spannung zu kompensieren (grün). In diesem Betrieb kann zwischen „Berg“- und „Bottom“-Elektrode eine Sensorspannung von nahezu 0V gemessen werden, der Zustand, der sich unter Rückkopplung des Messsignals einstellen würde. Man erkennt, dass dabei die Membranauslenkung nicht vollständig kompensiert wird. Dies bedeutet, dass die Regelung der Membran kaum eine Verringerung der mechanischen Spannung des piezoelektrischen Materials zwischen den Messelektroden bewirken und somit auch keinen messtechnischen Vorteil bieten würde. Dieser könnte jedoch erreicht werden, wenn die Messspannung schon bei einer geringeren Aktuierungsspannung kompensiert werden würde. Die gelbe Kurve zeigt, dass die Aktuierungsspannung von  $V = 0.54\text{V}$  zu einer deutlichen Verringerung der Membranauslenkung führt, wobei allerdings die Sensorspannung nicht zu 0 V kompensiert wird. Diese mittels FEM-Modell der Membran virtuelle durchgeführte Experiment wird durch die Messergebnisse bestätigt. Lediglich die Aktuierungsspannungen mussten angepasst werden, da die Simulation im Vakuum durchgeführt wird und keine Dämpfungseffekte berücksichtigt wurden. Das mittels Simulation durchgeführte virtuelle Experiment ermöglicht nun tiefere Einblicke in das Membranverhalten unter Krafrückkopplung. Abb. 5 zeigt die mechanische Spannung in der Membran in den vier Anregungsmodi. Gezeigt ist die Summe der Radial- und Azimuthalkomponente der mechanischen Spannung, die ausschlaggebend für die im piezoelektrischen Material erzeugten Ladungen sind, da sie sich

über den  $d_{31}$ -Koeffizienten im piezoelektrischen Transversaleffekt auf das erzeugte elektrische Feld auswirken.

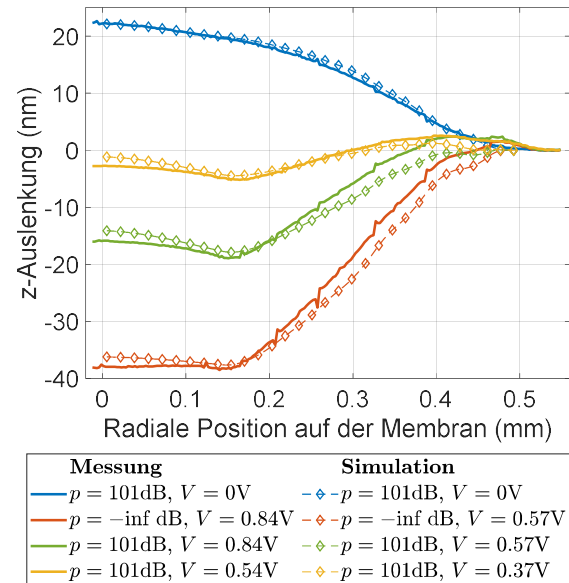


Abb. 4: LDV-Messung und FEM-Simulation der maximalen Auslenkung des Membranprofils des Benchmark-Designs bei a) rein akustischer Anregung mit einer Frequenz von 1kHz (blau), b) rein elektrischer Anregung mit einer Frequenz von 1kHz (rot), c) mit einer Kombination beider Anregungssignale unter  $180^\circ$  Phasenverschiebung (grün) und d) gleicher Kombination aber verringerter elektrischer Aktuierungsspannung (gelb).

Abb. 5 a) zeigt die mechanische Verspannung in der Membran im regulären Mikrofonbetrieb. Der quasi-bimorphe Effekt, den die Korrugationen bewirken, kann an der positiven mechanischen Spannung an den Bergelektroden bei gleichzeitiger negativer mechanischer Spannung an den Talelektroden beobachtet werden. Die ungleichnamigen mechanischen Spannungen erzeugen demnach ungleichnamige elektrische Spannungen, die mit der Bottomelektrode als elektrischer Masse, auch differentiell, ausgelesen werden können. Abb. 5 b) zeigt die mechanische Spannungsverteilung bei rein elektrischer Aktuierung mit 0.57V zwischen „Tal“- und „Bottomelektrode“. Unter den Talelektroden ergibt sich im piezoelektrischen Material durch die Aktuierung eine hohe Zugspannung. Die an den Tälern induzierten Momente wirken über den Hebel der Schrägen der Korrugationen auf die Berge und erzeugen eine Druckspannung. Auffällig ist, dass am

Berg der innersten Wellung (B1) im Gegensatz zu den Bergen der anderen Wellungen eine Zugspannung resultiert. Kombiniert man die beiden Anregungsarten, sodass die elektrische Spannung an der Bergelektrode auf 0V reduziert wird, ergibt sich die mechanische Spannungsverteilung aus Abb. 5 c). Man erkennt, dass auch die mechanische Spannung an den Bergen reduziert wird. Der innerste Berg (B1) und äußerste Berg (B6) weisen jedoch immer noch moderate mechanische Verspannungen auf. Die elektrische Spannung wird also nur auf 0V kompensiert, weil alle Berge elektrisch kurzgeschlossen sind und sich die erzeugten Ladungen ausgleichen. Diese Eigenschaft des Benchmark-Mikrofondesigns ist für den Regelbetrieb also nicht optimal, da die Nichtlinearitäten, die durch hohe mechanische Spannungen verursacht werden, nicht verhindert werden können. Abb. 5 d) zeigt die

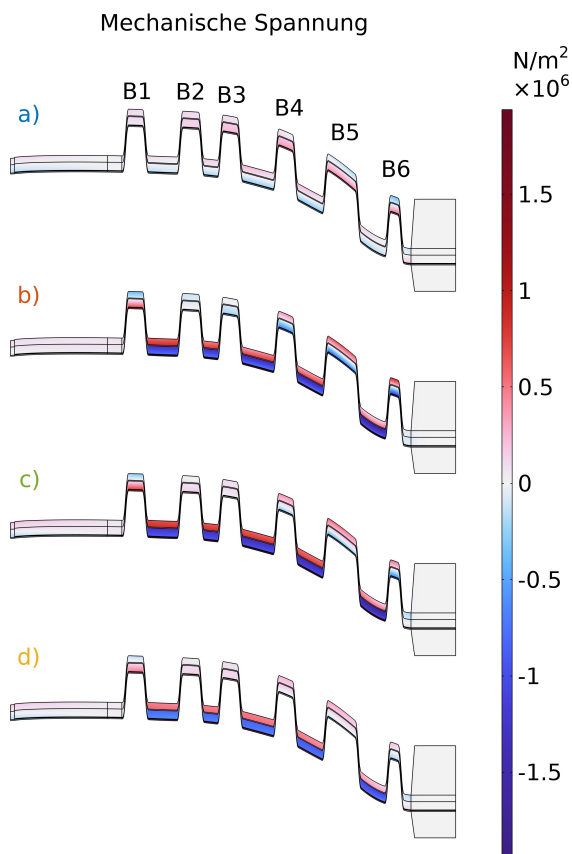


Abb. 5: Summe der Radial- und Azimutalkomponente der mechanischen Spannung in der Membran, die die im Text beschriebenen vier verschiedenen Anregungskonfigurationen (a-d), erzeugen.

mechanische Verspannung bei Betrieb mit geringerer elektrischer Spannungsamplitude,

die zu einer verminderten Verspannung in den Bergelektroden führen würde. Eine Änderung, die diese Eigenschaft der Membran verbessern könnte, wäre den Berg B1 elektrisch nicht an die Bergelektrode anzuschließen. Damit behält man die mechanische Relaxation der intrinsischen Verspannung der Membran durch die Korrugation bei, verringert aber den ungewünschten elektrischen Effekt auf die Bergelektrode. Abb. 6 zeigt den Vergleich zwischen dem so erhaltenen Biegeprofil und dem ursprünglichen Profil aus Abb. 3 bei jeweiliger Spannungskompensation. Man erkennt, dass sich die Auslenkung im modifizierten Fall um etwa 30% verringert, da die Messspannung mit einer 11% geringeren Aktuierungsspannung kompensiert werden kann.

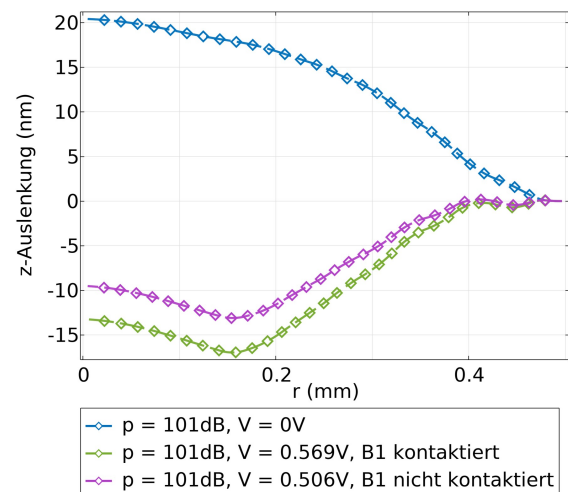


Abb. 6: FEM-Simulation der Auslenkung des Membranprofils von Design A mit/ohne elektrischer Kontaktierung des innersten Korrugationsberges (B1) bei rein akustischer Anregung bei 1kHz (blau), mit zusätzlichem 180° phasenverschobenem elektrischen Anregungssignal, welches die Messspannung kompensiert (grün/violett).

## Diskussion der Ergebnisse

Es stellt sich die Frage, ob sich die im vorigen Abschnitt durch Krafterückkopplung erhaltene Verbesserung der mechanischen Performanz auch in der elektrischen Performanz niederschlägt. Im Wesentlichen besteht diese aus zwei Aspekten: der elektrischen Energie, die die Membran als Sensor liefert, und der elektrischen Energie, die zur Kompensation des Messsignals aufgebracht werden muss.



Tab. 1 vergleicht die Energien der beiden Konfigurationen, die sich durch Gleichung 1 mit der simulierten Maxwellkapazität  $C$  und der Elektrodenladung  $Q$  ergeben.

$$E = \frac{1}{2} Q^2 C^{-1} \quad (1)$$

Es zeigt sich, dass ohne elektrische Kontaktierung des innersten Korrugationsberges (B1) die zur Kompensation der Messspannung benötigte Aktuierungsenergie reduziert wird. Gleichzeitig ist die Sensorenergie leicht erhöht. Dies zeigt, dass die wohlüberlegte Kontaktierung der Elektroden zu einer verbesserten Sensorleistung beitragen kann. Dazu zählt selbstverständlich auch die Wahl, ob die Berg- oder Talelektrode zur Aktuierung oder zum Messen genutzt wird. Die dritte Zeile in Tab. 1 zeigt die Sensor- und Aktuierungsenergie im umgekehrten Fall, dass die Talelektrode das Messsignal liefert, und die Bergelektrode zur Gegenaktuierung genutzt wird. Hier wird ersichtlich, dass sich zwar die Aktuierungsenergie um 66% verringert, gleichzeitig aber die Sensorenergie um 77% sinkt. Da die Sensorleistung in dieser Anwendung im Fokus steht, ist es sicherlich zielführender diese Größe als wichtiger zu bewerten. Ein dezidierter Trade-off muss hier allerdings mit dem Schaltungsdesign vereinbart werden.

Tab. 1: Vergleich zwischen der elektrischen Performanz des Benchmark-Designs mit bzw. ohne elektrischer Kontaktierung des innersten Korrugationsberges (B1).

| Elektrodenkonfiguration            | $E_{\text{Sensor}}$ (aJ) | $E_{\text{Aktuierung}}$ (pJ) |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| <b>B1 kontaktiert</b>              | 144.2                    | 11.7                         |
| <b>B1 nicht kontaktiert</b>        | 147.0                    | 9.3                          |
| <b>Sensor und Aktor vertauscht</b> | 33.7                     | 3.2                          |

## Zusammenfassung

Diese Arbeit zeigt die Möglichkeit zur Regelung durch Kraftrückkopplung für gewellte piezoelektrische Mikrofone durch sowohl Messung als auch Simulation eines Benchmark-Mikrofondesigns. Die Aktuierung eines Elektrodenpaares kann dabei sowohl das elektrische Signal des anderen Elektrodenpaares kompensieren als auch die mechanische Spannung im eingebetteten piezoelektrischen Material reduzieren. Da die Sättigung der mechanischen Spannung die

Quelle von Nichtlinearitäten in der Sensorperformanz darstellt, kann geschlussfolgert werden, dass die Regelung eines geeigneten Mikrofondesigns die Sensorlinearität erhöhen kann. In der Performanz des geregelten Mikrofans besteht ein Konflikt zwischen der Sensorenergie und der zur Kompensation der Messspannung benötigten Aktuierungsenergie. Also muss ein Kompromiss (Trade-off) im Schaltungsdesign gefunden werden.

## Ausblick

Eine weiteres Stellrad zur Optimierung der Sensorperformanz stellt die Längenanpassung der Membrankorugationen dar. [1] Durch die intrinsischen Materialspannungen ist die manuelle Suche nach einem noch performanteren Membrandesign sehr komplex. In der Literatur wird daher auf Optimierungsalgorithmen zurückgegriffen, die die einzelnen geometrischen Parameter der Membrankorugationen variieren, um die Zielgröße der Sensorenergie zu optimieren und damit optimierte Membrandesigns zu finden. [3] Um für den beschriebenen Zielkonflikt zwischen maximaler Sensor- und minimaler Aktuierungsenergie einen möglichst guten Kompromiss zu finden, können Mehrzieloptimierungsalgorithmen angewandt werden. Diese finden Pareto-optimale Lösungen für das Problem und erleichtern somit die Abschätzung des bestmöglichen Mikrofondesigns.

## Literaturnachweis

- [1] Bosetti, G., Bretthauer, C., Bogner, A., Krenzer, M., Gierl, K., Timme, H.-J., Heiss, H., & Schrag, G. (2023). A Novel High-SNR Full Bandwidth Piezoelectric MEMS Microphone Based on a Fully Clamped Aluminum Nitride Corrugated Membrane. 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 366–369.
- [2] Lang, C., & Tielert, R. (1999). A low noise accelerometer with digital PID-type controller and multibit force feedback. Proceedings of the 25th European Solid-State Circuits Conference, 250–253.
- [3] Bosetti, G., Bretthauer, C., Bogner, A., Krenzer, M., Gierl, K., Heiss, H., & Schrag, G. (2024). Design Optimization of a Corrugated Piezoelectric MEMS Microphone applying Genetic Algorithms. 25th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 1–5. doi: 10.1109/EuroSimE60745.2024.10491462