

Simulation von thermischen Einflüssen auf MEMS-Mikrofone

Hanna Ebbinghaus¹, Gregor Feiertag¹, Sebastian Walser²

¹Hochschule München, Lothstraße 64, 80335 München

²TDK Electronics AG, Rosenheimer Straße 116b, 81669 München

Kontakt: hanna.ebbinghaus@hm.edu

Zusammenfassung

Um die Genauigkeit von Flip-Chip MEMS-Mikrofonen zu verbessern, wurden Untersuchungen zum Temperaturverhalten der Empfindlichkeit durchgeführt. Es wurde das Verhalten auf einen Temperaturzyklus gemessen. Die Messungen zeigten, dass die Umgebungstemperaturen Einfluss auf die Empfindlichkeit des Mikrofons haben und eine Temperaturhysterese verursachen. Anschließend wurde das Verhalten auf den gleichen Temperaturzyklus simulativ berechnet. Eine Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation liegt vor. Dies ermöglicht es, weitere Untersuchungen simulativ durchführen zu können.

Keywords: MEMS- & Nanosensoren, Modellbildung, Simulation und Validierung

1 Einleitung

Aufgrund ihrer sehr kleinen Bauform und ihren guten elektroakustischen Eigenschaften sind MEMS-Mikrofone schon seit längerem Stand der Technik in der Unterhaltungselektronik. Im Bereich der Mobilkommunikation werden inzwischen fast ausschließlich MEMS-Mikrofone verwendet. Für die Störgeräuschunterdrückung ist es wichtig, dass sich die Empfindlichkeiten der in einem Gerät verwendeten Mikrofone möglichst wenig unterscheiden [1]. Streuungen kleiner ± 1 dBV/Pa bei Empfindlichkeiten von -38 dBV/Pa zählen derzeit zum Stand der Technik [2]. Zu Empfindlichkeitsstreuungen kann es aufgrund von mechanischen oder thermomechanischen Spannungen kommen. In diesem Beitrag wird die Temperaturhysterese eines MEMS-Mikrofons mittels Simulation berechnet. Die Simulationen werden mit experimentellen Untersuchungen verglichen

1.1 Flip-Chip MEMS-Mikrofon

Bei dem in diesem Beitrag untersuchten Mikrofon handelt es sich um ein Mikrofon, das in Flip-Chip-Montage aufgebaut wird (siehe Abb.1). [3]

Durch die Flip-Chip Montage der Chips können kleinere Bauteilgrößen erreicht werden. In Bild 2 ist zu erkennen, dass das Mikrofon aus einem differentiellen Sensor-Chip und einem ASIC-Chip (Application-specific integrated circuit chip) besteht. Der Schalleintritt erfolgt

durch Löcher im HTCC Substrat (High Temperature Cofired Ceramic). Das sehr kleine Vorvolumen wird durch eine Polymerfolie vom Rückvolumen getrennt. Das Rückvolumen wird mit Hilfe einer Metallkappe verschlossen. [3]

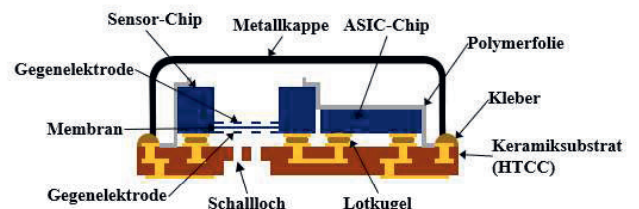


Abb. 1 Schematischer Querschnitt eines Flip-Chip MEMS-Mikrofons [3]

1.2 Differentieller Sensor-Chip

MEMS-Mikrofone bestehen aus einem elektroakustischen Wandler (Sensor-Chip) und einem ASIC-Chip. Der Sensor-Chip ist ein kapazitiver Wandler mit einer beweglichen Membran und zwei perforierten Gegenelektroden, siehe Abb. 2. [3]

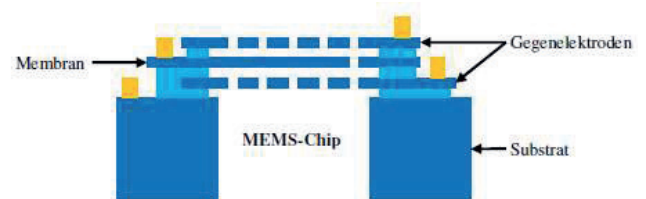


Abb. 2 Aufbau eines differentiellen Sensor-Chips mit Membran und zwei Gegenelektroden [2]

Die etwa 500 nm dünne Silizium-Membran folgt den Druckschwankungen des Schallfeldes. Über eine, zwischen Membran und den beiden Gegenelektroden angelegte, elektrische Spannung wird die Schwingung anhand der auftretenden Kapazitätsänderung in ein differentielles elektrisches Signal umgewandelt. [3]

2. Thermisches Verhalten von MEMS-Mikrofonen

Erste Untersuchungen zum thermischen Verhalten von MEMS-Mikrofonen zeigten, dass sich die Empfindlichkeit der Mikrofone durch eine Temperatureinwirkung ändert. Bei Temperaturen unter oder über der Raumtemperatur entstehen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten mechanische Spannungen. Wird das Mikrofon wieder auf Raumtemperatur gebracht, entsteht so ein anderer Spannungszustand als vor der Temperaturbelastung. Dies entspricht einer Temperaturhysterese der Empfindlichkeit des Mikrofons. Aufgrund der Temperaturbelastung ändert sich die Zugspannung der Membran. Dadurch kommt es zu Veränderungen in der Empfindlichkeit. Das thermische Verhalten der MEMS-Mikrofone wird zum einen experimentell und zum anderen simulativ mit der Finiten Elemente Methode (FEM) bestimmt. [4]

2.1 experimentelle Untersuchungen

Zur experimentellen Bestimmung des Temperaturverhaltens wurde untersucht, wie sich MEMS-Mikrofone verhalten, wenn sie groben Änderungen der Umgebungstemperatur ausgesetzt werden [5]. Dafür wurden die Mikrofone einem Temperaturzyklus ausgesetzt. Dies wurde für 20 Mikrofone durchgeführt. Zuerst wurde die Empfindlichkeit bei Raumtemperatur bestimmt, um im späteren Verlauf die Empfindlichkeitsänderung zu bestimmen. Anschließend wurde der Temperaturzyklus gestartet. Dafür werden die Mikrofone zunächst für 30 Minuten bei 85 °C gelagert. Nach einer Wartezeit von fünf Minuten bei Raumtemperatur wird die Empfindlichkeit erneut bestimmt. Nach weiteren fünf Minuten bei Raumtemperatur werden die Mikrofone für eine Dauer von 30 Minuten bei -40 °C gelagert. Auch hier wird nach einer Wartezeit von fünf Minuten bei Raumtemperatur die Empfindlichkeit erneut bestimmt. Dies wird insgesamt dreimal durchgeführt. Nach der letzten Wiederholung wird noch eine Messung nach einer Lagerung nach 85 °C durchgeführt.

Abschließend werden die Mikrofone noch für eine halbe Stunde bei Raumtemperatur gelagert und erneut die Empfindlichkeit bestimmt. Abbildung 3 zeigt den Messplan.

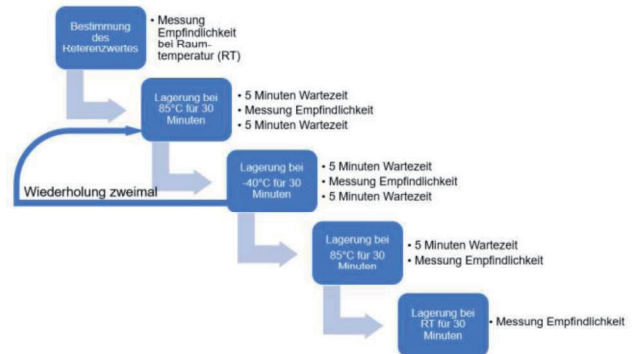


Abb. 3: Schematische Darstellung des Messplans

Die Empfindlichkeit der Mikrofone wurde in einer Messvorrichtung mit einer Druckkammer bestimmt. Abb. 4 zeigt den schematischen Messaufbau.

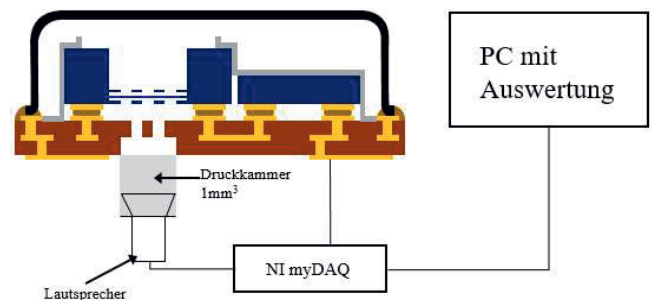


Abb. 4: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Das Mikrofon wird zur Bestimmung der Empfindlichkeit an die Druckkammer angeschlossen. Das Mikrofon wird mit einer Schallwelle mit einer Frequenz von 1 kHz bei einem Schalldruck von 1 Pa beschallt [4].

Für die Empfindlichkeitsänderung wurde der Mittelwert der Messungen bestimmt. Es wurde die Differenz zwischen dem Anfangswert und den Werten nach der Temperaturbelastung bestimmt. In Abb. 5 ist das Ergebnis der experimentellen Bestimmung dargestellt. Auf der Ordinate ist die Empfindlichkeitsänderung dargestellt und auf der Abszisse, die Temperatur, bei der die Mikrofone für 30 Minuten gelagert wurden. Die Messung fand bei Raumtemperatur statt.

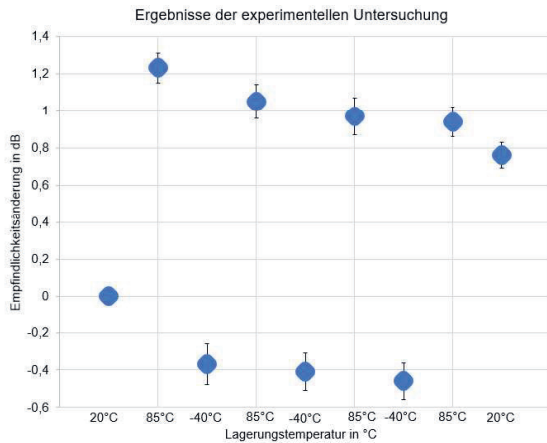


Abb.5: gemessene Änderung der Empfindlichkeit relativ zum Startwert. Messung bei RT nach Lagerung bei den auf der Ordinate angegebenen Temperaturen

In Abb. 5 ist erkennbar, dass sich die Empfindlichkeit des MEMS-Mikrofons durch Temperatureinwirkung ändert. Dies liegt an den thermisch induzierten Spannungen. Diese thermisch induzierten Spannungen führen dazu, dass die Empfindlichkeit bei den späteren Messungen nach den Lagerungen bei 85 ° C und – 40 ° C nicht auf den gleichen Wert zurück gehen. Dass die Empfindlichkeit nach der letzten Lagerung bei 20 ° C nicht auf null zurück geht, liegt an dem Kriechverhalten der Lotstellen.

2.2 Simulation

Für die FEM-Berechnungen wird die Kapazitätsänderung bestimmt, da sich die Kapazitätsänderung proportional zur Empfindlichkeitsänderung verhält. Die Simulationen werden mit der Open-Source-Software Code-Aster durchgeführt [6]. Dass sich diese Software für Simulationsberechnungen eignet, wurde schon in [7] gezeigt. In [7] wurde gezeigt, dass sich die Membran bei einem einwirkenden Druck kugelförmig verformt (siehe Abb. 6).

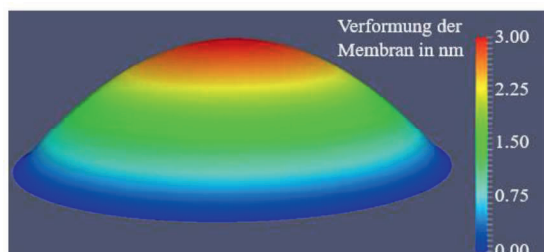


Abb. 6: Verformung der Membran eines MEMS-Mikrofons [7]

Die Kapazität eines Kondensator, bei dem eine der Platten kugelförmig verformt ist, berechnet sich nach Gl. (1) [8].

$$C = \frac{\epsilon_0 * A}{g_0} * \left(1 + \frac{1}{3} \frac{g'}{g_0} \right) \quad \text{Gl. (1)}$$

Dabei entspricht ϵ_0 der elektrischen Feldkonstante, A der Fläche, g_0 der Anfangsabstand zwischen der Membran und der Gegenelektrode und g' der Auslenkung in der Mitte der Membran bei einem einwirkenden Druck. Nach Gl. (1) wurde die Kapazität in der Simulation bestimmt.

Für die Simulation wurde das geometrische Modell des Mikrofons erstellt und vernetzt. ES wurde das folgende Modell dafür verwendet (Abb. 7). Bei den Lotstellen handelt es sich um Zylinder, die mit einem elastisch-plastischen Materialmodell simuliert worden sind.

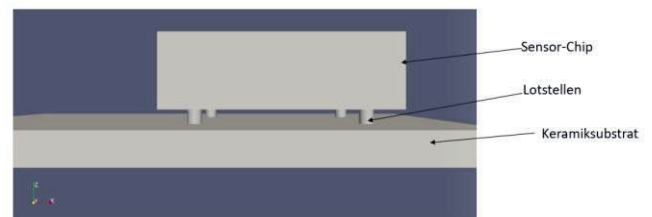


Abb. 7: Modell des simulierten Mikrofons

In der Simulation wurde der gleiche Temperaturzyklus (siehe Abb. 3) berechnet. Es wurde für jede Temperatur eine Simulation bei + 1 Pa und – 1 Pa durchgeführt, da dies einer Schallwelle mit einer Frequenz 1 kHz und 1 Pa Schalldruck entspricht. Für jede Temperatur wurde die Differenz bestimmt. Anschließend wurde das logarithmische Verhältnis zum ersten simulierten Wert (=Ausgangswert) bestimmt. Abb. 8 zeigt das Ergebnis der Simulation.

In Abb. 8 geht die Empfindlichkeit nach einer simulierten Lagerung bei den Temperaturen 85 ° C und – 40 ° C nicht auf den Startwert zurück. Dies liegt an den thermisch induzierten Spannungen im MEMS-Mikrofon. Dass der letzte Wert nach einer simulierten Lagerung der Mikrofone bei 20 ° C nicht weiter abnimmt, liegt daran, dass in der Simulation ein elastisch-plastisches Materialverhalten der Lotstellen angenommen wurde und das Kriechverhalten nicht berücksichtigt wurde.

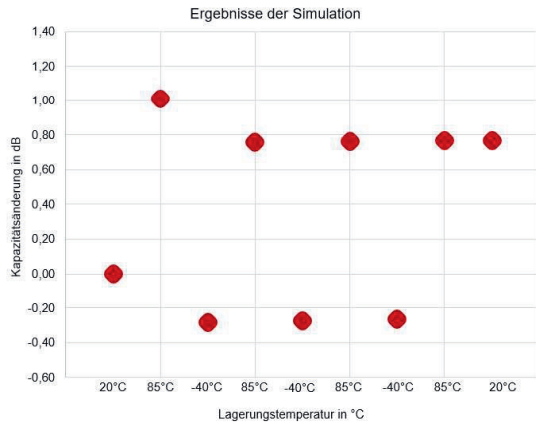


Abb. 8: simulativ bestimmte Änderung der Kapazität relativ zum Startwert. Simulation bei RT nach Lagerung bei den auf der Ordinate angegebenen Temperaturen

3 Vergleich von Experiment und Simulation

Abb. 9 zeigt einen Vergleich von den Messergebnissen und den FEM-Berechnungen.

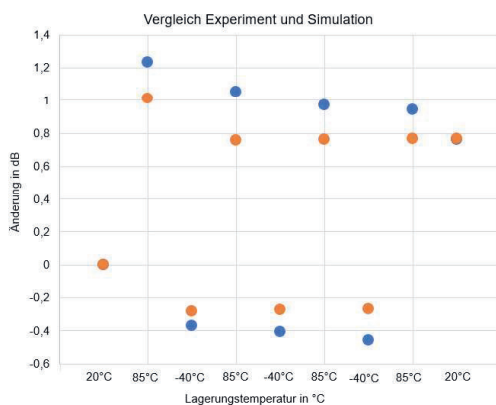


Abb. 9: Vergleich Messung und Simulation

Sowohl die Messungen als auch die Simulationen zeigen, dass die Empfindlichkeit bei Temperaturen über der Raumtemperatur zunimmt. Bei Temperaturen unter der Raumtemperatur nimmt die Empfindlichkeit ab. Dies zeigt, dass die Temperatur einen Einfluss auf die Empfindlichkeit des Mikrofons hat.

Es ist zu erkennen, dass die Tendenz der Ergebnisse bei der Messung und bei der Simulation gleich ist. Allerdings zeigt Abb. 9 auch, dass die Ergebnisse der Simulation im Schnitt um ca. 20 % abweichen. Des Weiteren lässt sich in Abb. 9 erkennen, dass die Empfindlichkeit nicht mehr auf den Referenzwert zurückgeht. Bei den Messungen nimmt die Empfindlichkeit im späteren zeitlichen Verlauf dennoch weiter ab. Dies liegt an dem Kriech-

verhalten der Lotstellen. Das Kriechen wurde in der Simulation nicht berücksichtigt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In unserem Beitrag wurde das thermische Verhalten von MEMS-Mikrofonen experimentell und simulativ bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse gut übereinstimmen. Die Simulation liefert glaubwürdige Ergebnisse.

Durch die Simulation wird es möglich sein, neue Mikrofonaufbauten auf ihr Temperaturverhalten zu prüfen. Außerdem soll der Einfluss des Kriechverhaltens der Lotstellen auf die Empfindlichkeit untersucht werden.

Literatur

- [1] Z.-H. Fu, F. Fan, J.-D. Huang; *Dual-microphone noise reduction for mobile phone application*; in Acoustic, Speech and Signal Processing Conference, Vancouver, Canada, May 26-31, 2013, pp. 7239-7243
- [2] S. Walser, G. Feiertag, M. Loibl, W. Pahl, M. Winter, C. Siegel, A. Leidl; *MEMS-Mikrofone mit hohem Signal zu Rausch Abstand und geringen Sensitivitätsstreuungen*; in Tagungsband Mikrosystemtechnik Kongress 2015, Karlsruhe, Deutschland, 26. – 28. Oktober 2015, S. 171-174
- [3] S. Walser, C. Siegel, M. Winter, G. Feiertag, M. Loibl, A. Leidl; *MEMS microphones with narrow sensitivity distribution*; Sensors and Actuators A; vol. 247; pp. 663-670, 2016
- [4] H. Ebbinghaus, A P. Chew, G. Feiertag, S. Walser; *Messung und Berechnung der Temperaturhysterese von Flip-Chip MEMS-Mikrofonen*, Tagungsband Mikrosystemtechnikkongress 2017, München, Deutschland, 23. – 25. Oktober 2017 München
- [5] C. Philipp; *Analyse temperaturbedingter Relaxationsprozesse bei MEMS-Mikrofonen*, Masterarbeit 2016, HS München, Deutschland
- [6] www.code-aster.org
- [7] H. Ebbinghaus, G. Feiertag, S. Walser; *Calculation of the Deformation of a Circular Fixed Silicon Membrane with Prestress by Finite Element Analysis*, Sensoren und Messsysteme 2018, Nürnberg, Deutschland, 26. – 27. Juni 2018
- [8] D. T. Martin, *Design, Fabrication, and characterization of a MEMS dual-backplate capacitive microphone*, Dissertation 2007, University of Florida, USA