

FEM-unterstützte Netzwerksimulation kapazitiver Silizium-Mikrofone

M. Földner*, **, A. Dehé*, R. Aigner* und R. Lerch**

*Infineon Technologies AG, 81730 München, Email: marc.fueldner@infineon.com

**Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Sensorik, 91052 Erlangen

Einleitung

Mikromechanische Silizium-Mikrofone besitzen gegenüber Elektret-Kondensatormikrofonen eine Reihe von Vorteilen. Sie können aufgrund ihrer Temperaturstabilität als SMD-Bauteil ausgeführt und durch einen automatisierten Lötprozess aufgebaut werden, bieten die Möglichkeit zur Miniaturisierung und erlauben die Integration von Schaltungselektronik.

Die Modellierung der Mikrofone ist zur Verringerung der Zahl der Entwicklungszyklen mit der zeit- und kostenintensiven Herstellung und Prüfung der Muster unerlässlich. Ein häufig angewandter Ansatz zur Simulation kapazitiver Mikrofone ist die Aufteilung des Gesamtsystems in lineare, konzentrierte Elemente [1]. Unter Ausnutzung der formalen Analogien zwischen den zugrundeliegenden Gleichungssystemen der elektrischen, mechanischen und akustischen Zustandsgrößen wird eine analog elektrische Schaltung des Mikrofans aufgestellt. Diese wird mit den Methoden der Netzwerkanalyse analytisch oder durch einen Schaltungssimulator gelöst. Besonderer Bedeutung kommt dabei der Beschreibung der mechanischen Nachgiebigkeit der schallempfindlichen Membran zu, da sie die Mikrofon-Empfindlichkeit und die dynamische Bandbreite wesentlich beeinflusst. Für kreisförmige und quadratische Membranen kann die mechanische Nachgiebigkeit mit Hilfe der Schalen- und Plattentheorie näherungsweise berechnet werden [2]. Dagegen erfordern die vorgestellten neuartigen Membrandesigns numerische Simulationen. Mit der Methode der Finiten-Elemente werden Simulationen zur mechanischen Nachgiebigkeit von Membranen mit gefederter Aufhängung bzw. mit korrigierter Oberfläche durchgeführt. Die numerischen Ergebnisse gehen in ein Netzwerkmodell des Mikrofans ein, so dass eine Gesamtsimulation der Mikrofone ermöglicht wird. Schließlich werden Messungen zur Mikrofon-Empfindlichkeit vorgestellt und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Membran-Design

Die untersuchten Silizium-Mikrofone setzen sich aus einer dicken epitaktisch gewachsenen Gegenelektrode, die zur Reduzierung der Steifigkeit des Luftpolsters im Kondensatorspalt hochgradig perforiert ist, einem mit Hilfe der Opferschichttechnik realisierten Kondensatorspalt und einer Membran aus Polysilizium zusammen [3]. Die Membran wird konventionell kreisförmig ausgebildet oder durch eine Strukturierung der Membranschicht an schmalen Federstrukturen aufgehängt. Abbildung 1 zeigt die Darstellung einer derartigen Feder-Membran mit 16 Federelementen. Im Vergleich zu einer am gesamten Umfang eingespannten Kreismembran wirken geringere Rückstellkräfte einer Schalldruckbelastung entgegen, so dass eine höhere mechanische Nachgiebigkeit erzielt wird. Darüber hinaus reduziert sich die Gesamtfläche der Einspannung und damit die Größe der parasitären Randkapazität.

Wird vor der Abscheidung der Membranschicht in den Untergrund ein umlaufender Graben strukturiert, erhält die Membran Korrigationen (Abbildung 2). Die Korrigationen können eine intrinsische Spannung in der Polysilizium-Membran durch eine laterale Deh-

nung aufnehmen und auf diese Weise die Membran-Nachgiebigkeit deutlich erhöhen.

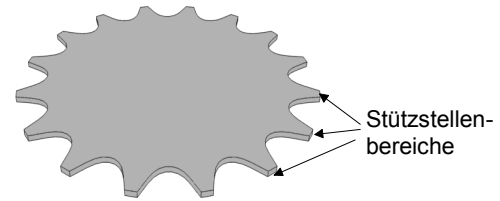


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Membran mit 16 Federelementen.

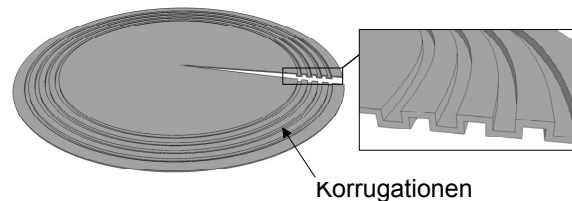


Abbildung 2: Darstellung einer korrigierten Membran.

Finite-Elemente-Simulation der Membran-Nachgiebigkeit

Bei einem kapazitiven Sensor wie einem Mikrofon ist weniger die ortsabhängige Durchbiegung der Membran bei Druckbelastung von Interesse als vielmehr die mittlere Auslenkung. Die mechanische Nachgiebigkeit einer Membran S_m wird daher durch

$$S_m = \frac{\int w(x,y) \cdot dx \cdot dy}{\int dx \cdot dy} \quad (1)$$

definiert. Darin bezeichnet w die Auslenkung am Ort (x,y) der Membran. Die nichtlinearen Simulationen zur mechanischen Nachgiebigkeit der Feder- und Korrigationsmembranen wurden mit der Finite-Elemente-Software ANSYS durchgeführt. Im ersten Simulationsschritt wird eine intrinsische Zugspannung über eine thermische Kontraktion in die Membran eingebracht. Ein zweiter Simulationsschritt belegt die vorgespannte Membran mit einem homogenen Druck. Aus den simulierten Elementverschiebungen wird schließlich nach der Definition (1) die mechanische Nachgiebigkeit berechnet, wobei an die Stelle der Integrale Summen treten.

In Abbildung 3 ist die simulierte Nachgiebigkeit einer Feder-Membran und von Membranen mit vier bzw. acht Korrigationsringen gegen die Nachgiebigkeit einer Kreismembran aufgetragen. Die Membrandicke beträgt jeweils 200 nm, die Spannung 30 MPa und der Durchmesser 1 mm.

Die Feder-Membran ist mechanisch mehr als doppelt so empfindlich wie eine vergleichbare Kreismembran. Mit 4-fach bzw. 8-fach korrigierten Membranen werden sogar Nachgiebigkeitssteigerungen von 220 % bzw. 450 % erreicht.

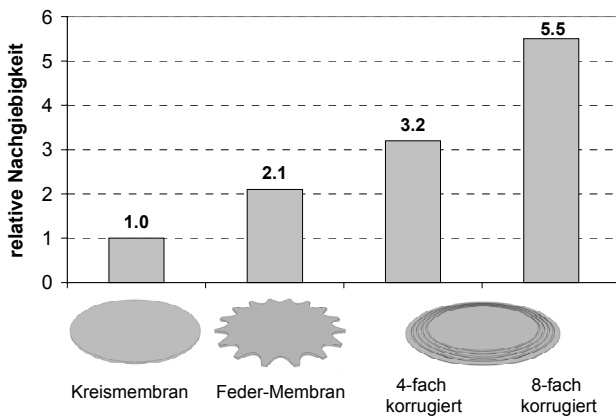


Abbildung 3: Empfindlichkeitsverbesserung von Feder- und Korrigationsmembranen in Relation zu einer Kreismembran.

Mikrofon-Netzwerkmodell

Der grundlegende Aufbau eines Mikrofon-Netzwerkmodells mit den analytischen Lösungen der enthaltenen Elemente wurde bereits in [3] präsentiert. Bei Eingabe der bekannten Design- und Technologieparameter liefert das Systemmodell sowohl die frequenzabhängige Empfindlichkeit als auch das Rauschen. Die stark vereinfachte Lösung des Netzwerkes ergibt für die Empfindlichkeit

$$S_0 = A \cdot \frac{U_0}{x_0} \cdot \frac{S_m}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{perforation} \cdot S_m)^2}} \quad (2)$$

Die Empfindlichkeit S_0 setzt sich aus dem Produkt der Schaltungsverstärkung A , der elektrischen „Verstärkung“ U_0/x_0 (U_0 =elektrische Vorspannung an der Mikrofonkapazität, x_0 =Spaltabstand) und der mechanischen Membran-Nachgiebigkeit S_m zusammen. Der Widerstandswert $R_{perforation}$ beschreibt die Dämpfungsverluste der viskosen Luftströmung durch die Perforationslöcher in der Gegenelektrode und bewirkt eine Tiefpassfilterung. Unter der Annahme einer laminaren Rohrströmung gilt nach dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz [4]

$$R_{perforation} = \frac{1}{N} \cdot \frac{8}{\pi} \cdot \frac{\eta \cdot t_{bp}}{r_h^4} \quad (3)$$

N bezeichnet die Perforationsanzahl, η die Viskosität der Luft, t_{bp} die Dicke der Gegenelektrode und r_h den Perforationsradius.

Messergebnisse

Nach dem Netzwerkmodell des Mikrofons kommt der Technologie und dem Design der Membran und der perforierten Gegenelektrode eine besondere Bedeutung zu. In diesem Abschnitt sollen daher die durchgeführten FEM-Simulationen der Membrandesigns zur Erhöhung der Empfindlichkeit und die Optimierung des Übertragungsverhaltens durch verschiedene Perforationsdesigns anhand von Messungen überprüft werden. In Abbildung 4 ist die Leerlaufempfindlichkeit von Silizium-Mikrofonen mit einer Kreismembran, einer Feder-Membran und einer 4-fach bzw. 8-fach korrigierten Kreismembran aufgetragen. Die Dicke der Membranen ist $0.2 \mu\text{m}$, der Membranradius $500 \mu\text{m}$, die Schichtspannung ca. 35 MPa , der Spaltabstand ca. $2 \mu\text{m}$.

Bei gleichem Platzbedarf eines Mikrofons auf dem Silizium-Wafer erzielt man mit den optimierten Membrandesigns deutlich höhere Empfindlichkeiten von über 10 mV/Pa (Vorspannung 1 V).

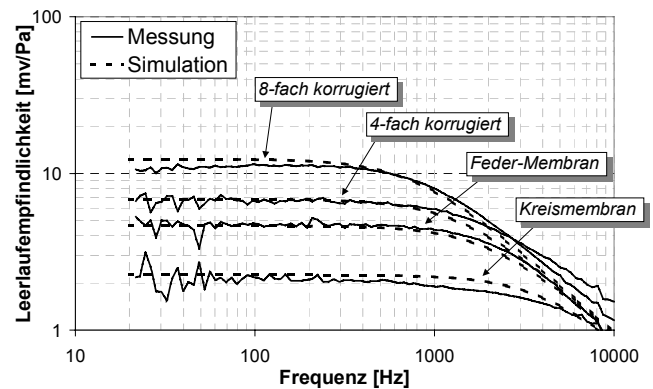


Abbildung 4: Leerlaufempfindlichkeit von Silizium-Mikrofonen mit Kreis-, Feder- und Korrigationsmembranen.

Insbesondere bei empfindlichen Membranen beobachtet man bereits ab ca. 1 kHz einen Abfall in der Empfindlichkeit durch eine hohe Strömungsdämpfung (Gl. (2) und (3)) Daher wurden Mikrofone mit verschiedenen Perforationsdesigns gefertigt. In Abbildung 5 ist die relative Empfindlichkeit (ref. 100 Hz) aufgetragen.

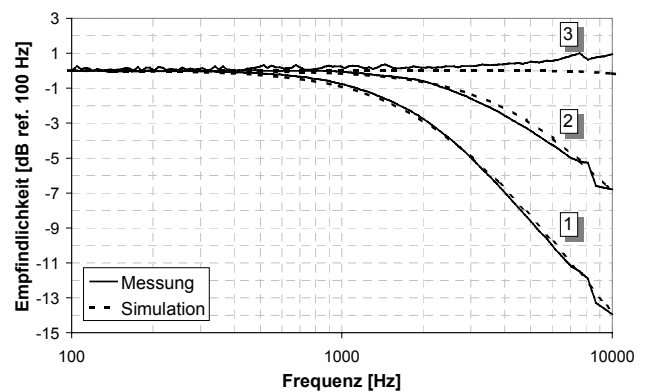


Abbildung 5: Empfindlichkeit und Perforationsdesign (1→2: Löcheranzahl +100%, 2→3: Perforationsradius +19%).

Der Vergleich zwischen Messung 1 und 2 zeigt die Verschiebung der oberen Grenzfrequenz bei einer Verdopplung der Löcheranzahl. Der linearen Abhängigkeit entsprechend (Gl. (3)), erhöht sich die obere 3dB -Grenzfrequenz von 2.1 kHz auf 4.4 kHz . Besonders stark wird die Strömungsdämpfung durch eine Vergrößerung der Perforationsweite reduziert. Die relativ geringe Aufweitung der Öffnungen um lediglich 19% (Messung 2 zu 3) führt bei gleicher Perforationsanzahl zu einer oberen Grenzfrequenz über 10 kHz . In Anbetracht der zum Teil mit Technologieschwankungen behafteten Parameter stimmen die theoretischen Empfindlichkeiten der FEM-unterstützten Netzwerkmodellierung sehr gut mit den Messergebnissen überein.

Diese Arbeit wurde durch das BMBF-Projekt „Integrierte mikro-mechanische Silizium-Mikrofone für Array-Anwendungen“ unterstützt.

[1] M. Lukes Silicon condenser microphone: electroacoustic model and simulation – Audio Technologies and Processing, S. 57-60 ATP 2001, 2001

[2] S. Timoshenko Theory of Plates and Shells – McGraw-Hill, NY, 1959

[3] M. Földner, A. Dehé, R. Aigner, T. Bever, R. Lerch, M. Kaltenbacher Empfindlichkeits- und Rauschanalyse eines kapazitiven Mikrofons in BICMOS-Technologie - 4. Chemnitzer Fachtagung Mikromechanik & Mikroelektronik, 1999

[4] A. Jørgensen Strömungslehre – Verlag W. Girardet, Essen, 1974