

**Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München
Lehrstuhl für Technische Elektrophysik**

Charakterisierung und Optimierung piezoelektrischer MEMS-Mikrophone mittels physikalischer Modellierung und Simulation

Teresa Reutter

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Doris Schmitt-Landsiedel

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Wachutka
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel
Universität des Saarlandes, Saarbrücken

Die Dissertation wurde am 09.01.2013 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
am 01.10.2014 angenommen.

Selected Topics of Electronics and Micromechatronics
Ausgewählte Probleme der Elektronik und Mikromechatronik

Volume 47

Teresa Reutter

**Charakterisierung und Optimierung
piezoelektrischer MEMS-Mikrophone mittels
physikalischer Modellierung und Simulation**

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3490-5

ISSN 1618-7539

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Meinen Eltern

Kurzfassung

Seitdem namhafte Hersteller von modernen Smartphones immer öfter MEMS-Mikrophone in ihren Produkten einsetzen, ist sowohl die Bekanntheit wie auch der Absatz für diese relativ neuen Produkte im Vergleich zu den Vorjahren enorm angestiegen.

Bis vor kurzem wurden fast ausschließlich in konventioneller Feinwerktechnik gefertigte Mikrophone, vor allem Elektret-Mikrophone (ECM), verwendet. In den neu entstehenden und stetig wachsenden Anwendungsgebieten für Mikrophone, wie in Mobiltelefonen, Laptops, Digitalkameras oder auch in industriellen Anwendungen rücken aber immer mehr Anforderungen in den Vordergrund, die übliche Mikrophone nicht mehr erfüllen können. Kleinere Abmessungen, eine gute Reproduzierbarkeit, die Eignung zur automatischen Bestückung und eine geringere Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Interferenzen sind beispielsweise Eigenschaften, die durch die Verwendung von mikro-technologischen Verfahren besser realisiert werden können. Auf der anderen Seite treten aber aufgrund der sehr dünnen und filigranen Bauteilstrukturen Probleme durch herstellungsbedingte innere Spannungen auf, die zu einer starken Reduktion der Mikrophon-Sensitivität führen.

In dieser Arbeit wird ein neuartiger Ansatz für das Design eines MEMS-Mikrophons vorgestellt und im Hinblick auf einen kommerziellen Einsatz in der Unterhaltungselektronik evaluiert. Das Mikrophon basiert auf einer piezoelektrischen Schallwandlung, da dieser Ansatz einige Vorteile bietet und ein bestehender Prozess zur Erstellung der aktiven Schicht zur Verfügung steht. Das Konzept wird mittels physikalischer Modellbildung und Simulation charakterisiert, optimiert und im Vergleich zu existierenden kommerziellen kapazitiven Mikrophonen bewertet.

Die Charakterisierung der Membran auf Bauelementebene geschieht durch physikalische Modellierung und hierauf basierender Computersimulation mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (FEM), die durch Messungen der realen intrinsischen Spannungen und Materialparameter an Testmustern kalibriert wird. Hierbei werden sowohl mechanische Verspannungen als auch die elektro-mechanische Kopplung über den piezoelektrischen Effekt vollständig in der Simulation abgebildet, da nur so der Frequenzgang der Mikrophonmembran zuverlässig und realitätsgetreu simuliert und für die nachfolgende gezielte Optimierung ausgewertet werden kann. Dazu wurde mittels statistischer Varianzanalyse ein reduzierter Satz an signifikanten Parametern bestimmt, mit dem die Sensitivität der Membran bei einer Resonanzfrequenz von 25 kHz auf 1,64 mV/Pa maximiert wurde.

Darüber hinaus wurde mittels eines Kirchhoffschen Netzwerkmodells die Gehäusedämpfung zu 4,6 dBV bestimmt, woraus sich mit einer Verstärkung eine maximale Sensitivität von -40,6 dBV für das Gesamtsystem errechnet. Damit konnte im Vergleich zu bisherigen piezoelektrischen MEMS-Mikrophonen die Empfindlichkeit deutlich gesteigert werden,

so dass sie knapp innerhalb der für die Unterhaltungselektronik geforderten Spezifikationen liegen. Trotzdem kann das demonstrierte Design nicht zur kommerziellen Herstellung empfohlen werden, da die geometrischen Abmessungen, die zum Erreichen der genannten Sensitivität notwendig sind, auf dem existierenden Markt nicht konkurrenzfähig wären.

Abstract

Since a steadily increasing number of nameable manufacturers of state of the art smart phones have switched to MEMS-microphones, the publicity and the distribution of this relatively new product grew rapidly over the last few years. New applications for microphones in for example mobile phones, laptops, digital cameras or industrial production enforce the need for characteristics conventionally manufactured devices cannot meet. MEMS devices, which are produced applying microtechnology, can fill this gap. These devices are very small, exhibit excellent reproducibility, can be integrated in automated mounting and are less sensitive to electromagnetic interference. As a drawback, process induced intrinsic stress can reduce the sensitivity of these microphones significantly.

This work presents a novel design for a multilayered piezoelectric membrane that can be used in a MEMS-microphone that is able to compensate intrinsic stress effects. The new design with aluminiumnitrid AlN as piezoelectric material is characterized and optimized applying physical modeling and simulation techniques.

A computational simulation model applying the finite element method was used to characterize the membrane on device level. The model was calibrated by measurements of material parameters and the intrinsic stress in the membrane layers. All intrinsic stress effects were then included in the simulation model along with the full piezoelectric coupling between the electrical and mechanical domain as these are inevitable prerequisites for a predictive simulation. To allow a fast and effective optimization, the parameters with a significant influence on the resonant frequency and the sensitivity of the membrane were determined via a statistical analysis of variance (ANOVA). The subsequent optimization resulted in a maximum sensitivity of 1.64 mV/Pa and a resonant frequency of 25 kHz.

Furthermore the damping of the package was determined applying a Kirchhoffian network model on system level. Adding the amplification of the ASIC allows a total system sensitivity of maximal -40.6 dBV. This is a considerable increase compared to previous publications and lies within the specifications for microphones in consumer electronics. Nevertheless the introduced MEMS-microphone cannot be recommended for commercial production as the dimensions that are necessary for the mentioned sensitivity would not be competitive on the market, which is dominated by capacitive microphones.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 MEMS und deren Modellierung	1
1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit	3
1.2.1 Zielsetzung	3
1.2.2 Gliederung der Arbeit	4
2. Mikrostrukturierte Mikrophone	7
2.1 Wichtige Kenngrößen	7
2.2 Konventionelle Mikrophone	12
2.3 MEMS-Mikrophone	15
2.3.1 Aufbau von MEMS-Mikrophonen	16
2.3.2 Wandlerprinzipien	16
2.3.3 Kommerzielle Mikrophone	18
3. Piezoelektrische MEMS-Mikrophone	21
3.1 Der piezoelektrische Effekt	21
3.1.1 Physikalische Modellierung	23
3.1.2 Piezoelektrische Materialien	36
3.2 Aufbau von piezoelektrischen MEMS-Mikrophonen	42
3.3 Designkonzept zur Reduktion von intrinsischen Spannungen	44
4. Experimentelle Charakterisierung	49
4.1 Innere Spannungen eines Schichtstapels	49
4.1.1 Entstehung und Messung von intrinsischen Spannungen	50
4.1.2 Auswertung	53

4.2	Materialeigenschaften von Parylene-Membranen	55
4.2.1	Bestimmung der Materialparameter	56
4.2.2	Interpretation der Ergebnisse	59
5.	Numerische Analyse von MEMS-Mikrofonmembranen	63
5.1	Verwendete Simulationsumgebungen	63
5.2	FEM-Modelle der Membranen	64
5.3	Modellierung von inneren Spannungen	67
5.3.1	Theoretischer Hintergrund	67
5.3.2	Implementation in speziellen Simulatoren	71
5.4	Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten	75
5.4.1	Knicken durch intrinsische Druckspannungen	75
5.4.2	Geometrische Nichtlinearitäten durch intrinsische Zugspannungen	77
6.	Optimierung von MEMS-Mikrofonmembranen	79
6.1	Bewertung der verschiedenen Mikrofondesigns	79
6.2	Identifikation der signifikanten Parameter	85
6.2.1	Varianzanalyse (ANOVA)	85
6.2.2	Auswertung	92
6.3	Optimierung des Frequenzgangs	98
6.4	Robustes Design	103
7.	Kritische Bewertung des Anwendungspotentials piezoelektrischer MEMS-Mikrophone	109
8.	Zusammenfassung	117
	Symbolverzeichnis	121
	Literaturverzeichnis	125
	Danksagung	133