

Untersuchungen zur Messung elektrischer Spannungen mit mikroelektromechanischen Bauelementen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Jan Dittmer
aus Gifhorn

eingereicht am: 15.12.2009

mündliche Prüfung am: 09.04.2010

Referenten: Prof. Dr. rer. nat. Stephanus Büttgenbach
Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Dr.-Ing. Rolf Judaschke

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer

2010

Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik

herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Band 26

Jan Dittmer

**Untersuchungen zur Messung elektrischer Spannungen
mit mikroelektromechanischen Bauelementen**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9134-1

ISSN 1433-1438

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in einem Kooperationsprojekt des Instituts für Mikrotechnik (IMT) der Technischen Universität Braunschweig und der Arbeitsgruppe 2.22 für Hochfrequenzmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. nat. Büttgenbach. Durch das mir entgegengebrachte Vertrauen konnte ich diese Arbeit in großer Freiheit selbst gestalten. Ebenfalls danke ich dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ostermeyer und dem Koreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Tutsch für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich meinem Arbeitsgruppenleiter und weiterem Koreferenten Herrn Dr.-Ing. Rolf Judaschke, der mich nach Braunschweig geholt, mich bei meiner Arbeit an der PTB immer unterstützt und in mich vertraut hat. Ferner danke ich dem Fachbereichsleiter Herrn Dr.-Ing. Thorsten Schrader durch dessen Einsatz das Kooperationsprojekt überhaupt erst entstehen konnte.

Herzlich danke ich auch meinen Kollegen am IMT für die technologische und seelische Unterstützung in allen Phasen der Arbeit. Insbesondere danke ich Björn Hoxhold für die Freundschaft, für viele interessante Stunden der Diskussion, des Prozessierens, des Lötens und des Fliegens. Weiterhin danke ich Stefanie Demming und Andreas Waldschik mit denen ich viel gelacht und (Miss-)Erfolge geteilt habe. Marco Feldmann danke ich für das näher bringefferner Konferenzziele. Außerdem danke ich Claudia Lesche, Christoph Böse und Udo Tritsch sowie allen weiteren Mitarbeitern für die immer freundliche und fröhliche Atmosphäre am Institut. Ich danke unserer akademischen Rätin Monika Leester-Schädel, unserer Sekretärin Frau Kauf, sowie den technischen Mitarbeitern für den zumeist reibungslosen Betrieb des Instituts, der Anlagen, der Versorgung mit Chemikalien und anderem Laborbedarf.

Von meinen Studenten möchte ich insbesondere Lars Hecht und Alexander Brennecke hervorheben, deren unermüdlicher Laboreinsatz, Ideen und Spaß an der Arbeit mir viel geholfen haben. Nicht vergessen werden sollen Frank Grabert, Andra Stoica, Gunnar Borchert und Claas Brunken, die ebenfalls ihren Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Auf privater Seite danke ich meiner Frau Antje, deren Verständnis, Motivation, Ansporn und Liebe mir ermöglicht haben diese Arbeit fertigzustellen. Ganz im Gegensatz zu meinem Sohn Lasse, dessen Interesse an seinem Vater häufig dem produktivem späten Feierabend entgegenstand und Nachtschichten, nicht nur am Institut und für diese Arbeit, erforderte. Ebenso danke ich meinen Eltern, Großeltern, und Geschwistern, die mich auf meinem Lebensweg immer begleitet, unterstützt und ermutigt haben und mir stets Rückhalt bieten.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Messmethodik	4
2.2 Digitale Verfahren	5
2.2.1 Digital Sampling	5
2.3 Dioden Verfahren	6
2.4 Thermische Verfahren	6
2.4.1 Thermistor	7
2.4.2 Thermokonverter	7
2.5 Elektrostatische Verfahren	8
2.5.1 Quadrantenelektrometer	10
2.5.2 Mikrotechnisch realisierte Verfahren	10
2.6 Vergleich und Zusammenfassung	18
3 Theorie und Modellierung	21
3.1 Systemanforderungen und -module	21
3.2 Translatorisches System	22
3.2.1 Kräfte und Kapazität in einem variablen Plattenkondensator	23
3.2.2 Pull-In-Spannung	23
3.2.3 Balkenfedern	25
3.2.4 Plattendurchbiegung	27
3.2.5 Casimireffekt und van-der-Waals Kräfte	28
3.2.6 Dynamisches Verhalten	29
3.2.7 Luftdämpfung (Squeeze-Film Damping)	29
3.2.8 Thermomechanisches Rauschen	32
3.3 Rotatorisches System	33
3.3.1 Momentengleichgewicht	34
3.3.2 Auflagerkraft	36
3.3.3 Kapazität	37
3.3.4 Drehfedern	38
3.3.5 Luftdämpfung und Rauschen	38

3.3.6	Dynamisches Verhalten	38
3.4	Numerische Modellierung	39
3.5	Modellierung hochfrequenztechnischer Effekte	41
3.6	Weitere Effekte	43
3.6.1	Streuungsfelder	43
3.6.2	Maximale Feldstärke	44
3.6.3	Dielektrische Aufladung	44
3.6.4	Temperatureinfluss	44
3.6.5	Luftfeuchtigkeit	45
3.6.6	Schwerkraft und Vibrationen	45
3.7	Kapazitive- und Wegmesstechnik	46
3.7.1	Wegmesstechnik	47
3.7.2	Kapazitive Messtechnik	47
3.8	Messmethodik und -unsicherheit	49
3.8.1	Offsetspannung	50
4	Mikromechanische Sensoren	53
4.1	Anforderungen an das Gesamtsystem	55
4.2	Rotatorischer Sensor aus Bulk-Silizium	56
4.2.1	Entwicklung des Sensoraufbaus	57
4.2.2	Charakterisierung der Aktoren aus Silizium	59
4.2.3	Batch-Fertigungsprozess	60
4.2.4	Messergebnisse	69
4.2.5	Ersatzschaltbild des realen Sensors	72
4.2.6	Optimierungspotenzial	73
4.3	Translatorischer Sensor aus galvanisch verstärktem Kupfer	74
4.3.1	Aufbau und Auslegung	75
4.3.2	Fertigungsprozess	77
4.3.3	Messergebnisse	84
4.3.4	Optimierungspotenzial	85
5	Zusammenfassung und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis	89
A	Materialeigenschaften	A-1
B	Verwendete Anlagen und Fotolacke	A-3
C	Prozessplan für den rotatorischen Sensor aus Bulk-Silizium	A-5
D	Prozessplan für den translatorischen Sensor aus galvanisiertem Kupfer	A-9
E	Quellcode der Matlab Funktion es_prop	A-11

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
U_{dc}	V	Gleichspannung
U_{ac}	V	Wechselspannung, Effektivwert
\hat{U}	V	Wechselspannung, Scheitelwert
P	W	Leistung
C	F	Kapazität (fF = 10^{-15} F, aF = 10^{-18} F)
Q	C	Ladung
R	Ω	Elektrischer Widerstand
Z	Ω	Impedanz
ω	rad/s	Kreisfrequenz
F	N	Kraft
p	N/m ²	Druck
M	Nm	Moment
B, L	m	Breite und Länge der Aktorplatte
w, l	m	Breite und Länge der Aufhängungsbalken
t	m	Dicke des Aufhängungsbalkens und der Aktorplatte
h_0	m	Elektrodenabstand in Ruhelage
h	m	Elektrodenabstand
x	m	Auslenkung aus der Ruhelage
ϕ	rad	Drehwinkel aus der Ruhelage
ψ	rad	Auf die maximale Auslenkung normierter Drehwinkel
k	N/m	Translatorische Federkonstante
k_ϕ	Nm/rad	Rotatorische Federkonstante
η	Ns/m	Translatorische Dämpfungskonstante
η_ϕ	Nms/rad	Rotatorische Dämpfungskonstante
$f_0, f_{0,\phi}$	Hz	Resonanzfrequenz, translatorisch und rotatorisch
m	kg	Masse
I_p	kg·m ²	Trägheitsmoment
I_y	m ⁴	Flächenträgheitsmoment

Materialeigenschaften und physikalische Konstanten

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
ε_0	As/Vm	Elektrische Feldkonstante, $8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm
ε_r	-	Permittivitätszahl des Dielektrikums
ε	As/Vm	Permittivität, $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$
κ	S/m	Leitfähigkeit
E	Pa	Elastizitätsmodul
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
μ_a	Pa·s	Viskosität
$\mu_{a,\text{eff}}$	Pa·s	Effektive Viskosität
K_n	-	Knudsen Konstante
k_B	J/K	Boltzmannkonstante, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
\hbar	s	Planck Konstante, $1,05 \cdot 10^{-34}$ Js
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit, $2,988 \cdot 10^8$ m/s