

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

Modellierung und Simulation des elektro-fluid-mechanisch gekoppelten Verhaltens von Mikrobauanteilen auf der Systemebene

Martin Nießner

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.-Ing. H.-G. Herzog

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. G. Wachutka
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. I. Eisele
Universität der Bundeswehr München

Die Dissertation wurde am 24.01.2012 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
am 16.12.2014 angenommen.

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

Volume 48

Martin Niessner

**Modellierung und Simulation des elektro-fluid-
mechanisch gekoppelten Verhaltens von
Mikrobauteilen auf der Systemebene**

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., 2015

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 978-3-8440-3827-9

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

Meiner Familie

Kurzfassung

Der Entwurfsprozess für Mikrosensoren und -aktoren ist bisher nicht durchgängig in einer Simulationsumgebung abgebildet, da sich der Übergang von der Ebene der feldtheoretischen Kontinuumsbeschreibung zur Ebene der systembezogenen Makromodellierung mithilfe von konzentrierten oder verteilten Kompaktmodellen nicht allgemeingültig automatisieren lässt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein automatisierbares Verfahren konzipiert, welches aus einer kontinuumstheoretischen Beschreibung physikalisch basierte Systemmodelle extrahiert, die es erlauben, das elektro-fluid-mechanisch gekoppelte Verhalten von mikrostrukturierten Bauteilen auf der Systemebene zu analysieren.

Die verallgemeinerte Kirchhoffsche Netzwerktheorie stellt den theoretischen Rahmen des Verfahrens dar und ermöglicht eine konsistente und energieformübergreifende Synthese verschiedener Modellierungsansätze. Deformierbare mikromechanische Komponenten werden auf der Systemebene mittels einer Superposition von Eigenmoden und einem linearen Kontaktmodell beschrieben. Die Eigenmoden werden hierbei mittels der Methode der finiten Elemente ermittelt. Elektrostatische Systeme werden mithilfe einer Kombination von differentieller Plattenkondensatornäherung und Lagrange-Formalismus modelliert. Die fluidische Dämpfung, namentlich die Schmierfilmdämpfung, wird mit einem Mixed-Level-Modell dargestellt. Die benutzerfreundliche Anwendbarkeit des Verfahrens wird durch ein speziell entwickeltes, modulares Programm gewährleistet, welches die drei Methoden der Modellbildung automatisiert und energieformübergreifende Kopplungen konkret realisiert.

Zur Validierung des Verfahrens werden für zwei Mikroresonatoren und einen mikromechanischen Hochfrequenzschalter elektro-fluid-mechanisch gekoppelte Systemmodelle extrahiert und experimentellen Daten gegenübergestellt. Die Modelle berechnen die auf die Strukturen wirkende Schmierfilmdämpfung mit einem relativen Fehler kleiner als 4 %. Die statischen Schnapp- und Löse-Spannungen sowie die Schließ- und Öffnungszeiten des mikromechanischen Schalters werden mit einem relativen Fehler von 5 % und weniger wiedergegeben. Das Verhalten nach einem dynamischen mechanischen Anschlag kann im Vergleich zum Experiment qualitativ richtig reproduziert werden.

Das automatisierte Verfahren generiert hinreichend genaue Modelle für eine prädiktive Simulation und ermöglicht auf diese Weise eine durchgängig rechnergestützte Designoptimierung einer Vielzahl von viskos gedämpften, elektrostatisch gesteuerten mikromechanischen Bauteilen.

Abstract

There is no software framework available yet that allows the seamless computer-aided design of microsensors and -actors throughout the complete development process. This is because there is no general method to automate the transition in modeling needed in order to move from device-level simulation to system-level simulation. A procedure addressing this problem is compiled that allows for a dedicated class of microdevices the generation of physics-based multi-energy domain coupled system-level models from respective device-level descriptions. These models enable the analysis of the fluid-electromechanically coupled behavior of microdevices on the system-level.

Generalized Kirchhoffian network theory is employed as a theoretical framework for the procedure and allows for a consistent combination of different modeling approaches. System-level models of movable and deformable mechanical components are derived using a superposition of eigenmodes that are extracted from finite element models. Mechanical contact is described employing a constant contact stiffness. A fragmentation into parallel plate capacitors in combination with the Lagrangian formalism is applied for the modeling of electrostatic fields. The squeeze-film damping forces exerted on the microdevices are calculated by a mixed-level model. A specifically developed easy-to-use toolbox automatically generates and couples the mechanical, electrostatic and fluidic models.

The performance of the thus extracted fluid-electromechanically coupled models is evaluated w.r.t. experimental data of two microresonators and one radio frequency micro-electromechanical switch. The system-level models calculate the squeeze-film damping forces with less than 4 % error. The errors concerning the static pull-in and release voltages as well as the opening and closing times of the microswitch are 5 % and less. The qualitative behavior after a dynamic impact can be reproduced correctly.

These results prove that the presented procedure generates multi-energy domain coupled system-level models that are predictive w.r.t. experiments. Thus, the automated procedure is suited to facilitate the seamless computer-aided design of electrostatically controlled and viscously damped microstructures.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Mikrosysteme	1
1.2 Marktentwicklung und Anwendungsfelder von Mikrosystemen	3
1.3 Modellierung und Simulation im Entwurf von Mikrosensoren und -aktoren	8
1.4 Zielsetzung der Arbeit	16
1.5 Hochfrequenzmikroschalter als Demonstrator	17
1.6 Konvention	19
2. Modellierung von Mikrosystemen auf der Systemebene	21
2.1 Modellierungsebenen	21
2.1.1 Definition und Einordnung der Modellierungsebenen	22
2.1.2 Simulationswerkzeuge für die Systemebene	24
2.2 Theoretische Grundlagen	25
2.2.1 Partitionierung in Subsysteme und Synthese des Gesamtmodells	25
2.2.2 Systemdarstellung als verallgemeinertes Kirchhoffsches Netzwerk	27
2.3 Modellierung von Subsystemen	38
2.3.1 Anforderungen an die Modellierung	39
2.3.2 Ansätze für die Modellierung von Subsystemen	39
3. Modellierung dynamisch verformbarer mechanischer Subsysteme	47
3.1 Grundlagen der Mechanik verformbarer Körper	47
3.2 Ordnungsreduktion mittels modaler Superposition	49
3.3 Nichtlinearitäten	52
3.4 Reibungsfreier mechanischer Kontakt	54
4. Modellierung elektrostatischer Subsysteme	59
4.1 Elektrostatische Grundlagen für Mehrelektroden-Kondensatoranordnungen	59
4.2 Differentielle Plattenkondensatornäherung	62

4.3	Streifelder	63
4.4	Beschreibung mithilfe des Lagrangeschen Formalismus	64
4.5	Elektromechanische Kopplung	65
4.5.1	Phänomenologische Beschreibung	65
4.5.2	Implementierung	71
5.	Modellierung fluidischer Subsysteme: Dämpfung von perforierten Mikrostrukturen	73
5.1	Fluidmechanische Grundlagen	73
5.2	Schmierfilmdämpfung	79
5.3	Mixed-Level Modell	83
5.3.1	Finites Netzwerk zur Diskretisierung der Reynoldsgleichung	85
5.3.2	Kompaktmodellierung von Rändern und Perforationen	87
5.3.3	Bewertung des Mixed-Level-Modells	90
5.3.4	Korrekturfaktoren für verdünnte Gase	95
5.3.5	Physikalisch basierte Ordnungsreduktion	98
5.4	Fluid-Struktur Wechselwirkung	100
5.5	Alternative Modellierungsansätze	101
5.5.1	Analytische Modellierung durch Zerlegung in Lochzellen	101
5.5.2	Modellierung auf der Basis einer modifizierten Reynoldsgleichung	103
5.5.3	Hybride Modelle	103
6.	Automatisierte Modellgenerierung	105
6.1	Zusammenführung	105
6.2	Motivation	107
6.3	Ablauf der automatisierten Modellerstellung	107
6.4	Algorithmen	109
6.5	Automatische Ordnungsreduktion des Mixed-Level Modells	113
6.6	Besonderheiten bei der Implementierung des mechanischen Kontaktes	114
7.	Experimentelle Validierung des mechanisch-fluidischen gekoppelten Modells	117
7.1	Experimenteller Messaufbau	117
7.2	Teststrukturen	120
7.3	Messergebnisse und Diskussion	124
7.4	Vergleich mit dem mechanisch-fluidisch gekoppelten Mixed-Level Modell	128
7.5	Vergleich mit alternativen Dämpfungsmodellen	131
7.6	Zusammenfassung	133

8. Simulation eines Hochfrequenzmikroschalters auf der Systemebene	135
8.1 Herstellung des Schalters	135
8.2 Experimentelle Charakterisierung des Schalters	137
8.2.1 Topographie	137
8.2.2 Eigenfrequenzen und -schwingformen	140
8.2.3 Schließ- und Öffnungsverhalten	142
8.3 Simulation des Schalters	147
8.3.1 Modellerstellung und -kalibrierung	147
8.3.2 Schließ- und Öffnungsverhalten	152
8.3.3 Zusammenfassung	155
8.4 Reduktion der Anschlagsgeschwindigkeit	156
9. Zusammenfassung und Ausblick	159
Anhang	163
A. Symbol- und Variablenverzeichnis	165
B. Ergänzungen zur Fluidik	175
B.1 Korrekturfaktoren für verdünnte Gase	175
B.2 Kompaktmodell von Veijola	176
B.3 Kompaktmodell von Bao	179
C. Quantifizierung der Dämpfung auf Resonatoren	181
C.1 Gütefaktor Q	181
C.2 Dämpfungsmaß ζ	183
C.3 Logarithmisches Dekrement Λ	184
C.4 Abklingkonstante δ	184
Literaturverzeichnis	186