

Modellbildung auf Geometrie- und Systemebene
für Squeeze-Film-Dämpfung und Wärmeverlust in
mikromechanischen Sensoren unter
Berücksichtigung ausgedünnter Gase

Der Fachbereich Physik/Elektrotechnik der
Universität Bremen

zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

Dipl.-Phys. Felix Petri

Bremen 2006

**Als Dissertation genehmigt vom
Fachbereich Physik/Elektrotechnik der
Universität Bremen**

Tag der Einreichung:	03.08.2006
Tag der Promotion:	29.11.2006
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Laur
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Beneke

Berichte aus der Mikromechanik

Felix Petri

**Modellbildung auf Geometrie- und Systemebene
für Squeeze-Film-Dämpfung und Wärmeverlust
in mikromechanischen Sensoren
unter Berücksichtigung ausgedünnter Gase**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2007

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.: Bremen, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6354-6

ISSN 0947-2398

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

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Wärmeverlust und Squeeze-Film-Dämpfung in MEMS für ausgedünnte Gase untersucht.

Im Fall von schwingenden Sensorelementen (in der Regel komplexe Strukturen) tritt als größter Energieverlust die Squeeze-Film-Dämpfung auf.

Im ersten Abschnitt wird durch Abänderung der DSMC-Methode eine Möglichkeit angegeben, um die Dämpfung von z.B. MEMS-Balken transient zu simulieren. Darauf aufbauend werden Dämpfungseffekte für hohe Geschwindigkeiten untersucht. Weil der verwendete Algorithmus eine hohe statistische Streuung aufweist, werden Verfahren zur Reduktion der Streuung evaluiert. Es zeigt sich, dass die Molecular-Block-Methode unter Verwendung von Fitfaktoren einsetzbar ist, während die IP-Methode falsche Ergebnisse liefert. Mit der Kopplung des DSMC-Verfahrens und einer neuen stochastischen Differenzialgleichung, wird der Einfluß des Brownschen Rauschens auf einen MEMS Balken untersucht.

Im zweiten Abschnitt wird das Dämpfungsverhalten rechteckig perforierter Platten untersucht. Hier wurde ein Berechnungsverfahren verwendet, das die perforierte Platte in Elementarzellen zerlegt und die Dämpfung des ausgedünnten Gases pro Elementarzelle angibt. Darauf aufbauend konnte durch Kopplung verschiedener strömungsmechanischer Ansätze eine modifizierte Reynoldsgleichung aufgestellt werden, die sowohl die rechteckigen Perforationslöcher als auch die Effekte ausgedünnter Gase berücksichtigt. Die simulierten Ergebnisse wurden mit Hilfe von Messungen an Teststrukturen mit hoher Genauigkeit bestätigt. Auf der Grundlage dieser Dämpfungsberechnung und der Theorie elektrostatischer Streufelder werden Perforationsdesigns hinsichtlich ihres Auswertesignals optimiert.

Der dritte Teil der Dissertation befasst sich mit thermischer Dissipation am Beispiel des Heißfilmluftmassensensors (HFM). Bei einer HFM-Variante befindet sich unter dem Heizer, abgetrennt durch eine Membran, eine evakuierte Kaverne. Der Wärmetransport innerhalb dieser Kaverne wird mit Hilfe der DSMC-Methode untersucht. Die numerische Methode berücksichtigt im Gegensatz zu bisherigen Veröffentlichungen auch den Einfluss des Temperaturprofils und einer durchgebogenen Membran, die sich auf Grund des Druckunterschiedes zwischen Kaverne und Außenwelt ergibt. Es werden Einschwingeffekte, Effekte der Transpiration und Temperatursprungphänomene untersucht. Außerdem wird der Einfluss des Akkomodationskoeffizienten evaluiert.

Summary

The thesis at hand analyses squeeze-film damping and heat loss in MEMS for rarefied gases.

In the case of oscillating sensor elements (in general complex structures) the major part of energy dissipation is due to squeeze film damping.

In the first part of the thesis, the classical Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) code is modified, in order to be able to compute transiently the damping of a MEMS beam. Transient effects become more important for high velocities, therefore the damping of a fast moving beam is simulated. Because the method used is sensitive to statistical scatter, an evaluation of several algorithms for reducing the scatter is given. The Molecular Block method can be used with fit parameters, while the information preserving method is not suitable. By coupling the DSMC algorithm and a new stochastic differential equation, the effects of the Brownian motion of the gas particles to a MEMS-beam are examined.

The second part is concerned with the damping behaviour of rectangular perforated plates. By coupling different fluidic approaches, the perforated plate is divided into a set of elementary cells for each of them a damping constant can be given. The total damping coefficient is computed by the sum of the contributions of the single cells. Taking the results of this computation, a new Reynolds equation for rectangular perforated plates, which covers the effects of rarefied gases and the rectangular perforation, is established. The simulated results are verified up to a high precision, using test structures. As an application of the method, the detection signal of a perforated plate is optimized, using the new damping theory and electrostatical stray field theory.

In the third part of the thesis the heat film mass flow sensor (HFM) is regarded as a technical system having energy dissipation due to heat flow. In a variant of the HFM, an evacuated cavern is situated below the heater, separated by a membrane. The heat flow through this cavern is computed. Due to the pressure difference inside and the normal pressure outside, the membrane has a bented geometry. Therefore, the use of analytical methods is inappropriate. The DSMC method is used, regarding both, the temperature profile and the bented membrane. In the system effects like temperature jump phenomena and transpiration can be detected. Furthermore, the influence of the accommodation coefficient is examined.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Abkürzungen und Symbole	xiv
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Squeeze Film Dämpfung in Inertialsensoren	2
1.2 Wärmeverlust durch eine bei Unterdruck verschlossene Kaverne	5
1.3 Ziel und Aufbau der vorliegenden Arbeit	5
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Modellierung in der Mikrosystemtechnik und Dämpfung als Designparameter	7
2.1.1 Modellierungsmethodik	7
2.1.2 Aufbau und Energiedissipation in MEMS	10
2.2 Beschreibung der Dynamik ausgedünnter Gase	12
2.2.1 Ausgedünnte Gase in MEMS	12
2.2.2 Die Boltzmanngleichung	15
2.2.3 Lösung der Boltzmanngleichung für den Gleichgewichtszustand	16
2.2.4 Modelle für die Gas-Wand-Wechselwirkung	17
2.2.5 Beschreibung DSMC	18
2.3 Kontinuumsmechanische Grundlagen	22
2.3.1 Navier-Stokes-Gleichung mit speziellen Lösungen	22
2.3.2 Reynoldsgleichung	24
2.3.3 Modifizierte Reynoldsgleichung	27
2.4 Kompaktmodelle zur Dämpfungsberechnung von ausgedünnten Gasen	28
2.4.1 Lösungen der Boltzmanngleichung für Squeeze-Film von unendlich großen Platten und Reynoldsgleichung	28
2.4.2 Dämpfung eines MEMS-Balkens	30
2.5 Theorie des Wärmetransportes	31
2.5.1 Wärmeleitung im Free-Flow Regime	32
2.5.2 Strömungen durch Temperaturunterschiede bei ausgedünnten Gasen	33
3 Transiente Dämpfungsberechnung auf Geometrieebene	37
3.1 Evaluation numerischer Methoden zur Beschreibung der Gasdynamik in MEMS	37

3.1.1	Numerische Lösung der Boltzmann-Gleichung	38
3.1.2	Lösung der Boltzmann-Gleichung mit Monte-Carlo Methoden (Collisional Kinetic Theory)	39
3.2	Transientes DSMC	39
3.2.1	Konzept und Umsetzung des transienten DSMCs	40
3.2.2	Numerische Ergebnisse	44
3.2.3	Methoden zur Reduktion statistischer Streuung	45
3.3	Gas-Wand-Wechselwirkungsuntersuchung mit stochastischem Stoß- modell	49
3.3.1	Aufbau eines stochastischen Modells und Herleitung eines Lösungs- algorithmus	49
3.3.2	Qualitative Numerische Ergebnisse und deren Interpretation	54
3.4	Evaluation der numerischen Methodik zur Auslegung von MEMS Strukturen	56
4	Dämpfungsberechnung mit Kompaktmodellen	59
4.1	Elementarzellenansatz und Strömungszerlegung	60
4.1.1	Rohrströmung	61
4.1.2	Blendenströmung	64
4.1.3	Squeeze-Bereich	65
4.1.4	Randbereich und Gesamtmodell	66
4.2	Reynoldsgleichung für perforierte Platten bei ausgedünnten Gasen	67
4.2.1	Aufstellung der modifizierten Reynoldsgleichung	67
4.2.2	Randbedingungen und effektive Breite eines MEMS-Balkens	68
4.3	Signaloptimierung einer Plattenstruktur	69
4.3.1	Definition des Signals	69
4.3.2	Elektrostatische Betrachtungen	70
4.3.3	Randbedingungen für die Optimierung und Ergebnisse	71
4.4	Experimentelle Verifikation	73
4.4.1	Design von Teststrukturen	73
4.4.2	Methode der Druckmessung	74
4.4.3	Erfassung der geometrischen Daten	75
4.4.4	Aufnahme des Phasen- und Amplitudenganges	76
4.5	Modellbibliotheken und Einbau in Simulatoren	80
5	Wärmetransport auf der Geometrieebene am Beispiel HFM	83
5.1	Funktionsweise des HFM	84
5.2	Randbedingungen und Symmetrien	85
5.3	DSMC als Berechnungsverfahren und Modellerstellung	89
5.3.1	Anpassungen an das DSMC	89
5.3.2	Verifikation des Verfahrens	93
5.3.3	Grenzen des Verfahrens: Kleine Temperaturdifferenzen	94
5.4	Leistungsverlust und Temperaturverteilung	95

5.4.1	Diskussion des Einschwingverhaltens und stationärer Zustand	95
5.4.2	Eingeschwungene 2D-DSMC Lösung ohne Durchbiegung der Membran	96
5.4.3	Eingeschwungene Lösung mit Membrandurchbiegung	100
6	Zusammenfassung und Ausblick	105
A	Flussraten für rechteckige Kanäle	107
B	Herleitung der vertikalen Strömungsrate für rechteckig perforierte Platten	109
B.1	Herleitung für ausgedünnte Gase	109
B.2	Herleitung mittels eines kontinuumsmechanischen Ansatzes	110
C	Effektive Breite von Balken	111
	Literaturverzeichnis	113