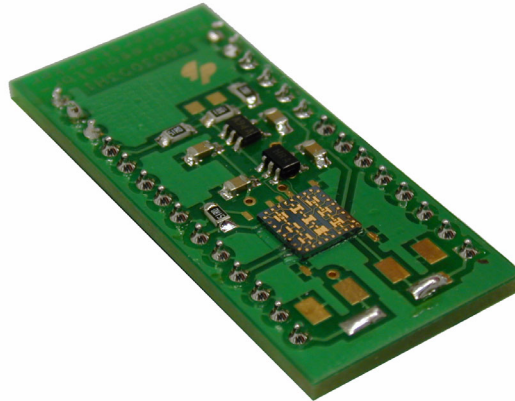


Diploma Thesis

# Assessment and Optimization of MEMS based Micro Resonators

Alexander Buhmann



## Abstract

This diploma thesis reports on (i) the theoretical fundamentals, (ii) the simulation, (iii) the development of an experimental setup, and (iv) the characterization of SOI-based micro-electro-mechanical resonators. An analytic model to describe the linear and nonlinear behaviour of the resonators is derived from the Bernoulli-Euler beam equation and a capacitive transducer model. The entire measurement setup is simulated with the network simulation program APLACTM using the harmonic balance method. The device characteristics, necessary for the APLACTM-simulations, are obtained from Finite Element Method (FEM) simulations using ANSYSTM. The FE-simulations solve the coupled electrostatic and structure mechanic problem applying anisotropic material properties. Further, six energy dissipation phenomena are modeled, which describe damping due to (i) volume, (ii) surface, (iii) thermoelastic, (iv) clamping, (v) air resistance and (vi) squeeze film effects. For these phenomena some of the existing theories for cantilevers are extended for clamped-clamped beams. The theory shows, that depending on the design parameters of the micro-resonator, either the thermoelastic or clamping effects dominate the energy dissipation phenomena at low ambient pressures.

The micro-resonators were fabricated by a process, which is based on (i) silicon on insulator (SOI) wafers, (ii) bulk silicon micromachining, (iii) photolithography on non-planar substrates and (iv) electroplating. The resonators consist of a clamped-clamped beam flanked by two electrodes which are used as drive and sense electrode. One key features of the fabrication process is the 0.2  $\mu\text{m}$  or 0.6  $\mu\text{m}$  wide transducer gap between beam and electrodes, fabricated with the first or second process run, respectively.

The characterization of the micro-resonators was performed with an amplifier circuit board developed during this thesis which contains two low noise amplifier stages. The resonators were characterized by measuring the frequency response for different bias voltages and ambient pressures. The relevant parameters to describe the system characteristics, e.g., quality factor, resonance frequency and insertion loss, are automatically extracted from a network analyzer using a LabViewTM program.

The dynamic functionality of the micro-resonators is demonstrated with one resonator from each of the two process runs. The resonance frequency of the 0.2  $\mu\text{m}$  gap micro-resonator is detected at 483 kHz compared to a designed resonance frequency of 556 kHz. The micro-resonator from the second process run with a gap width of 0.6  $\mu\text{m}$  shows a resonance frequency of

411 kHz compared to a designed resonance frequency of 476 kHz. The deviation of the resonance frequency with respect to the designed values is mainly due to underetching of the masking layer during the anisotropic etch step which results in reduced beam widths. The measured dependency of the resonance frequency and quality factor on bias voltage and ambient pressure are well described by the developed theoretical models.

### Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit beschreibt (i) die theoretischen Grundlagen, (ii) die Simulation, (iii) den experimentellen Messaufbau und (iv) die Charakterisierung von mikroelektromechanischen Resonatoren. Zur Beschreibung des linearen Verhaltens der Mikroresonatoren wird ein analytisches Modell basierend auf der Euler-Bernoulli-Balkengleichung und einem kapazitiven Wandler hergeleitet. Der gesamte Messaufbau wird mit der harmonic balance Methode des Netzwerksimulators der Firma APLAC™ simuliert. Das für diese Simulation erforderliche, charakteristische Verhalten der Resonatoren wird mit einer gekoppelten, elektrostatisch-strukturmechanischen Simulation mit Hilfe des FEM Programms ANSYS™ ermittelt. Dabei wird der Einfluss von anisotropen Materialeigenschaften berücksichtigt. Ferner werden sechs Dissipationsphänomene betrachtet, die Dämpfung aufgrund von (i) Volumen-, (ii) Oberflächen-, (iii) thermoleastischen, (iv) Einspannungs-, (v) Luftwiderstands- und (vi) squeeze film Effekten beschreiben. Für einige dieser Dissipationsphänomene werden existierende Modelle für einseitig eingespannte Balken auf die in dieser Arbeit verwendeten beidseitig eingespannten Balken erweitert. Dabei zeigt die Theorie, daß Einspannungseffekte und/oder thermoelastische Dämpfung bei niedrige Drücken dominieren.

Die Mikroresonatoren werden mit einem SOI-basierten (silicon-on-insulator) Prozess realisiert, der (i) Silizium-Volumen-Mikromechanik, (ii) Photolithographie auf nicht-planaren Substraten und (iii) galvanische Abscheidung von Mikrostrukturen kombiniert. Die Mikroresonatoren bestehen aus einem beidseitig eingespannten Balken, die von zwei Elektroden flankiert werden. Diese werden zur elektrostatischen Anregung und Detektion der Balkenschwingung verwendet. Der Prozess zeichnet sich durch sehr geringe Spalte zwischen Balken und Elektrode aus, welche im Falle des ersten Fertigungslaufes bei 0.2 µm und des zweiten bei 0.6 µm liegen.

Für die experimentelle Charakterisierung der Mikroresonatoren wurde eine Verstärkerschaltung entwickelt, die aus zwei rauscharmen Verstärkerstufen besteht. Die Charakterisierung der Resonatoren erfolgt über die Messung der Frequenzantwort für verschiedene Bias-Spannungen und Umgebungsdrücke. Die relevanten Systemparameter wie Güte, Resonanzfrequenz und Durchgangsverlust werden automatisch mit einem LabView™ Programm aus dem Netzwerkanalysator ausgelesen.

Die dynamische Funktionalität wird mit jeweils einem Resonator für die beiden Prozessläufe demonstriert. Hierbei wurde für den Resonator mit einer Spaltbreite von 0.2 µm eine Resonanzfrequenz von 483 kHz ermittelt, die unter der aufgrund des Designs erwarteten Frequenz von 556 kHz liegt. Beim Resonator mit 0.6 µm Spalt liegen die gemessene bzw. theoretische Resonanzfrequenz bei 411 kHz bzw. 476 kHz. Die Abweichung von den erwarteten Werten wird hauptsächlich auf ein Überätzen während des anisotropen Ätzschrittes zurückgeführt, das in schmälere Balken resultiert. Die gemessene Abhängigkeit der Resonanzfrequenz und Güte von der Bias-Spannung und dem Umgebungsdruck werden gut durch die hergeleiteten Theorien beschrieben.

### For further information, please contact:

Prof. Dr. Oliver Paul  
 Institute for Microsystem Technology IMTEK  
 Microsystem Materials Laboratory MML  
 Georges-Koehler Allee 103  
 79110 Freiburg, Germany  
 phone ++49/761-203-7190  
 fax ++49/761-203-7192  
 e-mail paul@imtek.de