

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

D. Tenholte; S. Kurth; T. Geßner; W. Dötzel

## **Ein mikromechanischer Vakuumsensor nach dem Reibungsprinzip**

### **ABSTRAKT**

In dieser Arbeit wird ein mikromechanischer Torsionsschwinger mit starrer Platte und elektrostatischem Antrieb vorgestellt. Die Squeezedämpfung zwischen der  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  großen Platte und einer gegenüberliegenden Wand wird als Maß für den zu messenden Druck verwendet. Der Abstand zwischen der schwingenden starren Platte und der Wand beträgt  $10 \text{ }\mu\text{m}$ . Hierdurch tritt der Squeezeeffekt auch noch bei höheren Drücken bis dicht unterhalb des Luftdrucks auf. Der Schwinger hat eine Eigenfrequenz von  $500 \text{ Hz}$ . Die Detektion der Dämpfung erfolgt über die freie, abklingende Schwingung. Der Sensor ist über einen Druckbereich von 6 Dekaden empfindlich und kann auch bei hohen Temperaturen bis  $300^\circ \text{ C}$  eingesetzt werden.

### **EINLEITUNG**

Reibungsvakuummeter haben ihre Anwendung zur Druckmessung im Hoch- und Feinvakuum. Bisherige feinwerktechnische Ausführungen dienen als hochgenaue Referenz- und Kalibriersensoren, sind allerdings empfindlich und stör anfällig gegenüber äußeren Einflüssen. Eine Ausnutzung der Abhängigkeit der Dämpfung vom Umgebungsdruck in Mikrosystemen zur Vakuummessung wird von Kurth u.a. beschrieben [1], findet jedoch bei anderen Autoren kaum Anwendung. Der dort beschriebene Sensor ist aufgrund seines Meßbereichs ( $0,1 \text{ Pa}$  bis  $10^4 \text{ Pa}$ ) lediglich für Messungen im Grob- und Feinvakuum, nicht aber im Hochvakuum geeignet. In dieser Arbeit wird ein neuer mikromechanischer Ansatz für ein Reibungsvakuummeter vorgestellt, das die Vorteile bisheriger Vakuummeter um einen größeren Meßbereich und geringere Stör anfälligkeit erweitert. Der Sensor besteht aus einem elektrostatisch angeregten Rotationsschwinger, der die Druckabhängigkeit der Squeeze- und Molekulardämpfung zur Bestimmung des Vakuumdrucks ausnutzt. Aufgrund der verwendeten Werkstoffe Silizium und Glas kann der Sensor, im Gegensatz zu anderen auf dem Markt befindlichen Sensoren, auch bei hohen Temperaturen bis  $300^\circ \text{ C}$  zur Vakuummessung eingesetzt werden. Im folgenden soll der Einfluß der Geometrieparameter des Schwingers auf den Verlauf der Druckabhängigkeit der Dämpfung beschrieben werden.

## AUFBAU UND FUNKTIONSPRINZIP

Das Funktionsprinzip des hier vorgestellten Sensors beruht auf der Gasdämpfung in engen Spalten. Numerische Simulationsmethoden dieser Dämpfung wurden u.a. von Veijola hergeleitet [2] und im Laufe der Jahre überarbeitet und verbessert [3]. Van Kampen [4] kommt in seinen Untersuchungen zu fast identischen Ergebnissen. Bao [5] und Hutcherson [6] erweitern das Modell der Squeezedämpfung um den Einfluß der Molekuldämpfung.

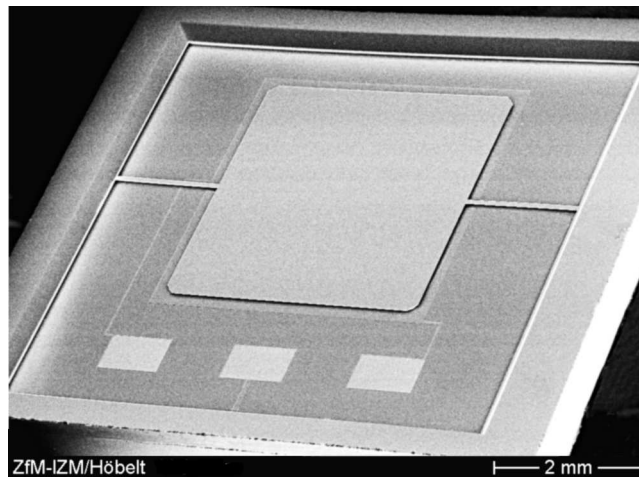


Abbildung 1: REM-Aufnahme des Sensors

Der Sensor ist komplett in Silizium- Bulkmechanik gefertigt (vgl. Abbildung 1). Er besteht aus einem etwa  $30\ \mu\text{m}$  dicken plattenförmigen Schwinger, der an zwei gegenüberliegenden Torsionsfedern aufgehängt ist und von ihnen in der Mitte des Chiprahmens gehalten wird. Der Aufbau des Sensors ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Die Abmessungen des Schwingers betragen  $4 \times 4\ \text{mm}^2$ , die Länge der Federn ist jeweils  $1,8\ \text{mm}$ , so daß sich mit Einbeziehung des Sensorrahmens eine Gesamtgröße des Sensorchips von  $9\ \text{mm}$  Länge,  $8\ \text{mm}$  Breite und  $1\ \text{mm}$  Höhe ergibt. Der Siliziumchip ist auf einen Glasträger gebondet, auf den zuvor die Gegenelektroden (Elektrode 2 und 3) aus Aluminium aufgesputtert wurden. Der Abstand zwischen Glasträger und Schwinger beträgt  $10\ \mu\text{m}$ .

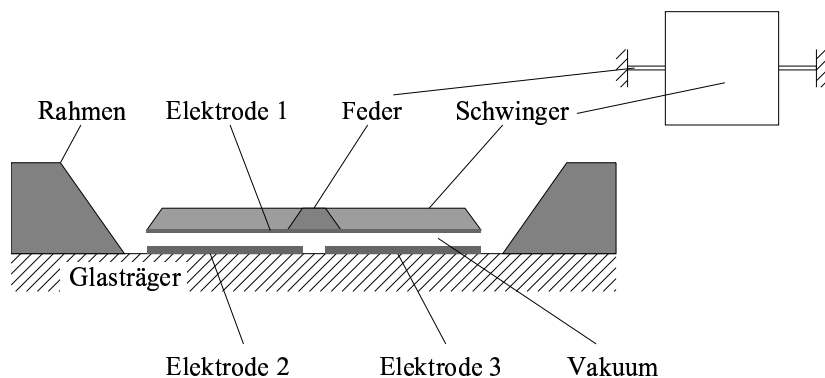


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Sensors

Durch die Sensorgeometrie ergibt sich für den Schwinger eine rotatorische Eigenfrequenz von ca.  $f_0 = 500$  Hz; die translatorische Eigenfrequenz beträgt ungefähr  $f_{0,tr} = 1500$  Hz.

Wird zwischen der Elektrode 2 und der mit Elektrode 3 kurzgeschlossenen Elektrode 1 eine elektrische Spannung  $U_p = 3$  V angelegt, so verkippt der sich in der Ausgangsposition ( $\varphi = 0$ ) befindende Schwinger aufgrund des spannungsabhängigen elektrostatischen Moments um den Winkel  $\varphi$ . Nach Abschalten der elektrischen Spannung führt der Schwinger eine freie, gedämpfte Schwingung aus, die für  $\delta < \omega_0$  durch die Gleichung

$$\varphi(t) = \hat{\varphi} e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_d t) \quad (1)$$

beschrieben werden kann.  $\delta = f(p)$  ist die druckabhängige Abklingkonstante des mechanischen Systems,  $\omega_d$  ist die Eigenkreisfrequenz der gedämpften Schwingung

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (2)$$

Werden die Maxima dieser abklingenden Schwingung detektiert und logarithmiert, so liegen sie auf einer Geraden, deren Steigung der Abklingkonstante  $\delta$  entspricht:

$$\ln \varphi(t) = \ln \hat{\varphi} - \delta t \quad (3)$$

Werden alle Maxima berücksichtigt, so kann je nach Umgebungsdruck  $p$  eine Geradenapproximation über mehrere 10 bis mehrere 1000 Werte durchgeführt werden, was letztlich einer Mittelung der Meßwerte entspricht. Durch dieses Auswerteverfahren ist es möglich, die Abklingkonstante mit einer relativen Meßabweichung kleiner 10% zu erfassen.

## SIMULATION DES SENSORS

Zur Berechnung des Squeezeeffekts werden die von Blech [7], Veijola [8] und van Kampen [4] beschriebenen Gleichungen verwendet. Die effektive Viskosität  $\eta_{eff}$  des den Sensor umgebenden Gases ist druckabhängig [8]:

$$\eta_{eff} = \frac{\eta}{1 + 9,638 \cdot \left( \frac{P_0 \cdot 64e-9}{p \cdot d_s} \right)^{1,159}} \quad (4)$$

$\eta$  ist die dynamische Viskosität von Luft ( $\eta = 18,3 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) und  $P_0$  der normale Luftdruck.

Dies führt zu einer druckabhängigen Squeezedämpfung  $\beta_{sq}$ , sowie zu einer ebenfalls druckabhängigen Squeezesteifigkeit  $k_{sq}$ . Unter Einbeziehung der Squeezezahl [7]

$$\sigma = \frac{12 \eta_{eff} \cdot b^2 \cdot \omega}{p \cdot d_s^2} \quad (5)$$

erhält man für den rotatorischen Fall die Squeezedämpfung [4]

$$\beta_{sq} = \frac{16\sigma \cdot p \cdot b^3 l}{\pi^6 \cdot d_s \cdot \omega} \cdot \sum_m \sum_n \frac{(2m-1)^2 + (2n)^2 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^2}{(2m-1)^2 \cdot (2n)^2 \left[ \left( (2m-1)^2 + (2n)^2 \cdot \left(\frac{l}{b}\right)^2 \right)^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4} \right]} \quad (6)$$

und die Squeezeesteifigkeit [4]

$$k_{sq} = \frac{16\sigma^2 \cdot p \cdot b^3 l}{\pi^8 \cdot d_s} \cdot \sum_m \sum_n \frac{1}{(2m)^2 \cdot (2n-1)^2 \left[ \left( (2m)^2 + (2n-1)^2 \cdot \left(\frac{b}{l}\right)^2 \right)^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4} \right]} \quad (7)$$

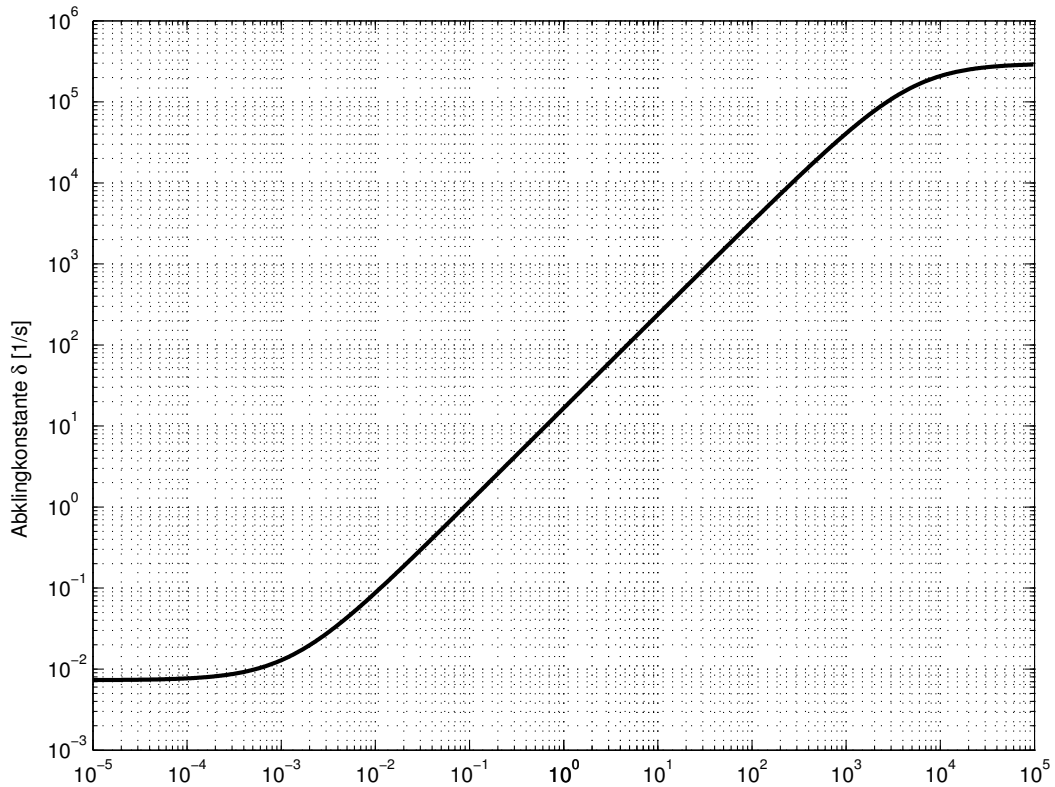


Abbildung 3: Simulierte Druckabhängigkeit der Abklingkonstante für den optimierten Sensor

Für den hier untersuchten Fall wird davon ausgegangen, daß der Schwinger mit seiner Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  schwingt:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}} \quad (8)$$

Die Abklingkonstante wird aus der berechneten Güte Q des Systems bei Anregung mit der Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  bestimmt:

$$\delta = \frac{\omega_0}{2Q} \quad (9)$$

Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 3 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß theoretisch ein Meßbereich von 7 Dekaden erreicht werden kann.

### MESSUNGEN AN VORHANDENEN SENSOREN

Um die Genauigkeit der Simulation des Sensors einschätzen zu können, wurden in einem ersten Schritt Messungen an bereits vorhandenen Mikroschwingern durchgeführt. Die Schwinger entsprechen den theoretisch untersuchten Sensoren vom Aufbau her, allerdings sind sie von den Abmessungen her weniger für einen Einsatz als Vakuumsensoren geeignet, so daß ein veringertes Meßbereich zu erwarten ist.

Schwingerlänge	$l = 4,0 \text{ mm}$	Federlänge	$l_F = 1,83 \text{ mm}$
Schwingerbreite	$b = 4,0 \text{ mm}$	Federbreite	$b_F = 29 \text{ }\mu\text{m}$
Schwingerdicke	$d = 30 \text{ }\mu\text{m}$	Spaltabstand	$\text{gap} = 10 \text{ }\mu\text{m}$

*Tabelle 1: Layoutparameter der untersuchten Sensoren*

Die Abmessungen der untersuchten Sensoren sind in Tabelle 1 aufgeführt, die tatsächliche Schwingerdicke kann aber von Exemplar zu Exemplar um wenige Mikrometer schwanken. Die rotatorische Resonanzfrequenz dieser Sensoren liegt wegen der Exemplarstreuung im Bereich von 470 bis 480 Hz.

Der Schwinger wurde durch eine zwischen Schwinger (Elektrode 1) und Grundelektrode (Elektrode 2) angelegte Gleichspannung von  $U_p = 3 \text{ V}$  statisch ausgelenkt. Die Auslenkung des Schwingers wurde optisch mittels PSD (Position Sensitive Device) oder kapazitiv mittels Trägerfrequenzmeßbrücke (C/U-Wandler) detektiert und von einer zugehörigen Auswerteschaltung in eine der Auslenkung proportionale Spannung gewandelt, die über eine Digital/Analog-Wandlertkarte am PC aufgenommen wurde. Per Software erfolgte eine Detektion und Logarithmierung der Maxima und Minima, aus denen durch Geradenapproximation die Abklingkonstante  $\delta$  berechnet wurde.

Die so aufgenommene Abhängigkeit der Abklingkonstante  $\delta$  vom den Sensor umgebenden Druck  $p$  ist in Abbildung 4 dargestellt. Man erkennt im doppelt-logarithmischen Maßstab deutlich einen linearen Zusammenhang zwischen Abklingkonstante und Druck über einen großen Druckbereich von  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$  bis  $5 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ , was 6 Dekaden entspricht. Für Drücke unterhalb von  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$  flacht die Kurve ab. In diesem Bereich ist die druckabhängige Dämpfung zwar noch vorhanden, sie wird aber von thermoelastischen Verlusten überlagert, sowie von Verlusten, die durch die Einspannung des Schwingers mittels der Torsionsfedern in den Rahmen entstehen. Zum Vergleich ist der simulierte Abhängigkeitsverlauf in der Abbildung 4 mit eingezeichnet.

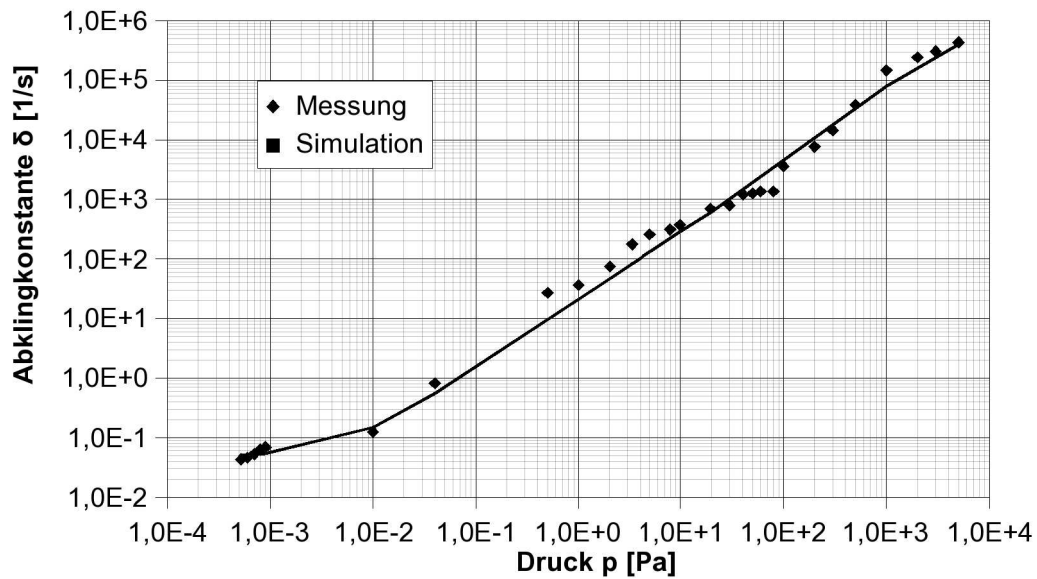


Abbildung 4: Gemessene und simulierte Druckabhängigkeit der Abklingkonstante

Wie zu sehen ist, stimmen Messung und Simulation sehr gut überein. Es kann aufgrund der Simulation davon ausgegangen werden, daß ein Sensor mit einem Meßbereich von rund 7 Dekaden realisierbar ist.

Für geringe Drücke erfolgt die Bestimmung der Abklingkonstante  $\delta$ , wie im Abschnitt *Aufbau und Funktionsprinzip* beschrieben, über eine Logarithmierung der Maxima und Minima der aufgenommenen abklingenden Schwingung und anschließender Geradenapproximation dieser Werte. Die Steigung der Geraden entspricht der Abklingkonstante.

Aufgrund der Eigenfrequenz von  $f_0 \approx 500$  Hz ist ab einem Druck von 10 Pa die Bestimmung der Abklingkonstante über die abklingende Schwingung nicht mehr möglich, da nur noch 5 bis 10 Maxima auftreten. Für weiter steigende Drücke tritt bei den untersuchten Schwingern der Kriechfall auf ( $\delta > \omega_0$ ). Zur Bestimmung der Abklingkonstante wurde der Sensor in diesem Druckbereich mit einer sinusförmigen Spannung angeregt, deren Frequenz knapp unterhalb der Eigenfrequenz  $f_0$  lag. Hierbei wurde die Amplitude der Erregerspannung  $U_P$  so geregelt, daß die Schwingamplitude des Sensors für alle Drücke konstant blieb. Die aufgenommenen Werte der druckabhängigen Erregerspannung wurden anschließend in die entsprechende Abklingkonstante umgerechnet. Das elektrostatische Moment, das zu einer Auslenkung des Schwingers führt, ist nach Gleichung proportional zum Quadrat der angelegten Spannung  $U_P$ . Trägt man die Werte dieser quadrierten Spannung über dem Druck auf, so entspricht die Steigung der Kurve der Steigung der druckabhängigen Abklingkonstante  $\delta$ . Die beiden Kurven unterscheiden sich lediglich in der Höhe, so daß ein Umrechnungsfaktor  $c_k = 40$  eingeführt wurde. Die Umrechnung der Erregerspannung  $U_P$  in die entsprechende Abklingkonstante  $\delta$  erfolgt dann nach der Gleichung

$$\delta(p) = 40 \cdot U_P^2(p) \quad (10)$$



Der Sensor besteht ausschließlich aus Silizium, Glas und Aluminium, so daß aufgrund der Sensormaterialien nichts dagegen spricht, den Sensor auch bei höheren Temperaturen bis über 300° C zu betreiben. Um eine Funktion des Sensors bei höheren Temperaturen nachzuweisen, wurde bei zwei verschiedenen Drücken und jeweils drei unterschiedlichen Temperaturen die Abklingkonstante  $\delta$  aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

<i>Druck p [Pa]</i>	<i>Temperatur <math>\theta</math> [° C]</i>	<i>Abklingkonstante <math>\delta</math> [1/s]</i>
2,00	26	5,39E+1
2,00	157	6,75E+1
2,00	345	5,97E+1

*Tabelle 2: Abklingkonstante des untersuchten Sensors bei verschiedenen Temperaturen*

Die Werte stimmen annähernd mit der zuvor gemessenen Kennlinie und der Simulation überein, wenn man die Meßabweichung von  $\pm 30\%$  des als Referenz verwendeten Piranensors berücksichtigt.

Es konnte somit im Versuch nachgewiesen werden, daß sich der Sensor zur Vakuumdruckmessung auch bei höheren Temperaturen bis über 300° C eignet. Für Temperaturen über 350° C kann die Abklingkonstante aufgrund von Störungen der aufgenommenen abklingenden Schwingung nicht mehr sicher bestimmt werden. Ursache hierfür ist vermutlich die thermische Ausdehnung des Schwingers.

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Es wurde gezeigt, daß die druckabhängige Dämpfung in engen Spalten als Maß für den Umgebungsdruck verwendet werden kann. Für einen Torsionsschwinger wurde ein Simulationsmodell entworfen, das die Abhängigkeit der Dämpfung vom Umgebungsdruck beschreibt. An vorhandenen Mikroschwingern wurden Messungen durchgeführt, um Aussagen über die Qualität des erarbeiteten Modells zu treffen. Das Ergebnis zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung. Ein Einsatz der Sensoren bei höheren Temperaturen bis über 300° C ist möglich.

Die vorhandenen und untersuchten Sensoren haben einen Meßbereich von 6 Dekaden, der durch eine Optimierung der Sensorgeometrie auf 7 Dekaden erweitert werden kann. Aufgrund der gewählten Methode zur Bestimmung der Abklingkonstante  $\delta$  wird eine sehr hohe Meßgenauigkeit erreicht. Der relative Fehler kann bei dieser Art der Auswertung mit unter 10% des gemessenen Wertes angenommen werden. Bei entsprechend angepaßter Elektronik, die zur Aufnahme der Schwingung eingesetzt wird, ist es möglich, den relativen Fehler auf unter 5% zu verringern.

**Literatur- bzw. Quellenhinweise:**

- [1] S. Kurth, K. Hiller, N. Zichner, J. Mehner, T. Iwert, S. Biehl, W. Dötzel, T. Gessner, *A micromachined pressure gauge for the vacuum range based on damping of a resonator*, Proc. of SPIE, Vol. 4559, pp. 103-111, 2001
- [2] T. Veijola, H. Kuisma, J. Ladenperä, T. Ryhänen, *Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer*, Sensors and Actuators A48, pp. 239-248, 1995
- [3] T. Veijola, *Compact models for squeezed-film dampers with inertial effects*, Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, DTIP 2004, Montreux, pp. 365-369, May 2004
- [4] R. P. van Kampen, R. F. Wolffenbuttel, *Modeling the mechanical behavior of bulk-micromachined silicon accelerometers*, Sensors and Actuators A64, pp. 137-150, 1998
- [5] M. Bao, H. Yang, H. Yin, Y. Sun, *Energy transfer model for squeeze-film air damping in low vacuum*, J. Micromech. Microeng. 12, pp. 341-346, 2002
- [6] S. Hutcherson, W. Ye, *On the squeeze-film damping of micro-resonators in the free-molecule regime*, J. Micromech. Microeng. 14, pp.1726-1733, 2004
- [7] J. J. Blech, *On Isothermal Squeeze Film*, ASME Journal of Lubrication Techn., Vol. 105, pp. 615-620, 1983
- [8] T. Veijola et al., *Model for gas film damping in a Silicon accelerometer*, Technical Digest of Transucers '97, Vol. 2, pp. 1097-1100

**Autorenangaben:**

Dipl.-Ing. Dirk Tenholte  
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Dötzel  
Technische Universität Chemnitz  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Professur für Mikrosystem- und Gerätetechnik  
09107 Chemnitz  
Tel.: 0371 531-3220  
Fax: 0371 531-3259  
eMail: [dirk.tenholte@etit.tu-chemnitz.de](mailto:dirk.tenholte@etit.tu-chemnitz.de)

Dr.-Ing. Steffen Kurth  
Prof. Dr. Dr. Prof. h.c. mult. Thomas Geßner  
Fraunhofer IZM  
Abt. Micro Devices and Equipment  
09126 Chemnitz