

Netzwerktheorie für mikro-akustische Systeme am Beispiel eines neuartigen überlastfesten Differenzdrucksensors

Linbo Tang, Timo Kober, Roland Werthschützky

Institut für Elektromechanische Konstruktionen, TU Darmstadt, Darmstadt
Tel.: 06151-1664295, e-mail: l.tang@emk.tu-darmstadt.de

Kurzfassung

Am Institut für Elektromechanische Konstruktionen wurde ein neuartiger überlastfester Differenzdrucksensor entwickelt [1]. Der Nennmessbereich des Messelements beträgt $\Delta p = 10$ mbar bei einem Überlastdruck von $p_{\text{stat}} = 160$ bar. Das Messelement weist eine Silizium-Messplatte und zwei strukturierte Gegenlager aus Glas auf (**Bild 1**). Bei Überschreiten des Nenndrucks legt sich die Messplatte an das Gegenlager an und der statische Überlastfall wird gesichert.

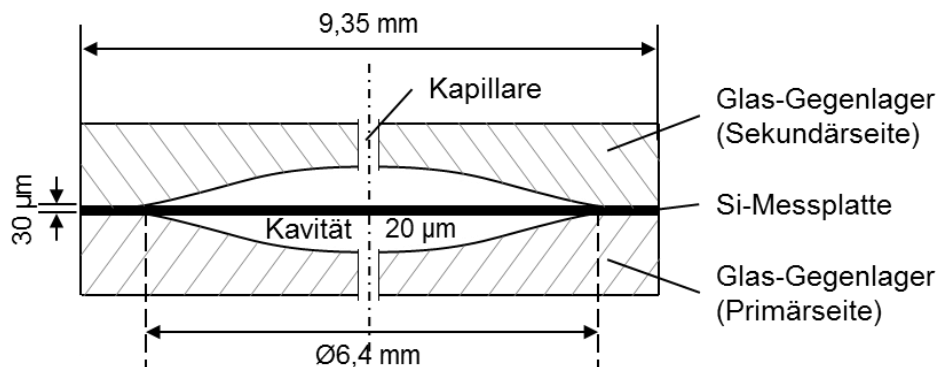


Bild 1: Aufbau des überlastfesten Differenzdruckmeselements;
Querschnitt der Primär- und Sekundärseite mit Abmessungen und prinzipieller Gegenlagerkontur.

Durch Anwendung der Netzwerktheorie mit verteilten Parametern werden die dynamischen Eigenschaften des Messelements untersucht.

1 Modellbildung des Messelements als mechanisch-akustisches System

Das Messelement ist rotationssymmetrisch aufgebaut. Die Messplatte weist einen Radius von $r_m = 3,2$ mm und eine Dicke von $D = 30$ μm auf. Die Kavitätshöhe der geformten Gegenlager beträgt $h_{\text{max}} = 20$ μm . Die Kapillare weist einen Radius von $r_k = 250$ μm und eine Länge von $l_k = 780$ μm auf. Die Primär- und Sekundärseite werden durch die Messplatte hermetisch voneinander getrennt. Das Messelement wird mit Silikonöl befüllt.

Das Messelement lässt sich grundsätzlich als ein mechanisch-akustisches Netzwerk beschreiben [2][3]. Die Messplatte weist eine mechanische Nachgiebigkeit auf. Das Silikonöl in der Kavität und in der Kapillare wird durch akustische Bauelemente: Reibung Z_a , Masse M_a und Nachgiebigkeit N_a beschrieben [4]. Als Koordinaten werden für akustische Systeme die Druckdifferenz p und der Volumenstrom q als komplexe Größen verwendet. Die mechanischen Koordinaten Kraft F und Geschwindigkeit v werden durch den mechanisch-akustischen Wandler in Druck p und Volumenstrom q umgewandelt [4].

1.1 Netzwerk mit verteilten Parametern

Die Verwendung der Netzwerktheorie mit konzentrierten Parametern weist zwar wie erwartet eine Tiefpass-Charakteristik auf, jedoch ohne Übereinstimmung mit den Messergebnissen [2]. Die Netzwerkbeschreibung mit konzentrierten Parametern bildet deren Ortsabhängigkeit nicht ab. Die akustische Reibung Z_a unter der Messplatte muss für mikro-akustische Systeme berücksichtigt werden. Deshalb wird die Netzwerkbeschreibung mit verteilten Parametern eingeführt, um das Messelement orts aufgelöst zu betrachten.

Nach **Bild 2** wird der Querschnitt des Messelements im Zylinder-Koordinatensystem (r, φ, ξ) dargestellt. Das Messelement weist eine Silizium-Messplatte und ein Glas-Gegenlager (Primärseite) auf. Als Eingangsgröße wird der Druck p_1 , der in die Kapillare eingeleitet wird, definiert. Die Ausgangsgrößen sind die verteilten Drücke p_{s_i} die über den Ringsegmenten der Messplatte abfallen.

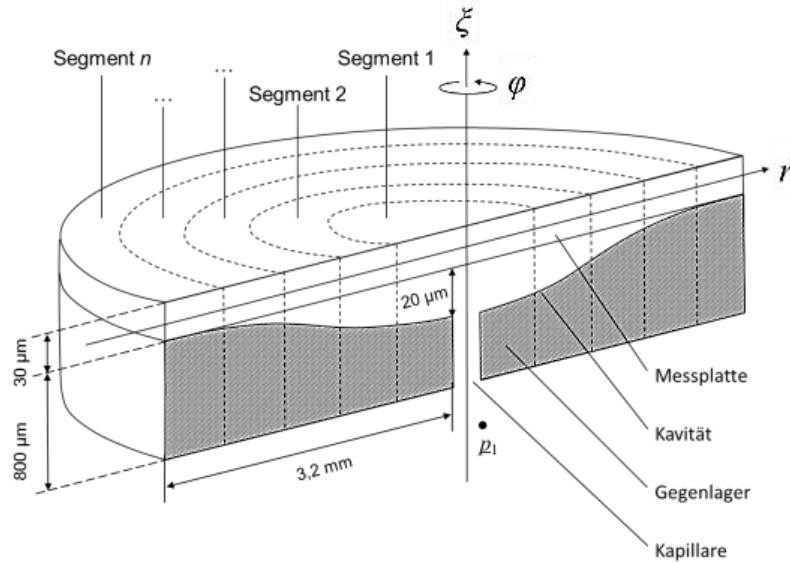


Bild 2: Querschnitt des Messelements mit Messplatte und einem Gegenlager [2].
Aufteilung in n Ringsegmente von innen nach außen.

Das Messelement wird einseitig mit Silikonöl Typ AK-10 der Viskosität $9,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ befüllt. Die Temperatur und die Viskosität werden für die Simulation als konstant vorausgesetzt. Beim Anlegen des Eingangsdrucks p_1 strömt das Silikonöl durch die Kapillare in die Kavität. Dadurch entsteht ein Volumenstrom $q(r)$, der von Segment zu Segment fließt. Wegen der hohen akustischen Reibung entsteht ein Druckabfall $p(r)$ in der Kavität (**Bild 3**).

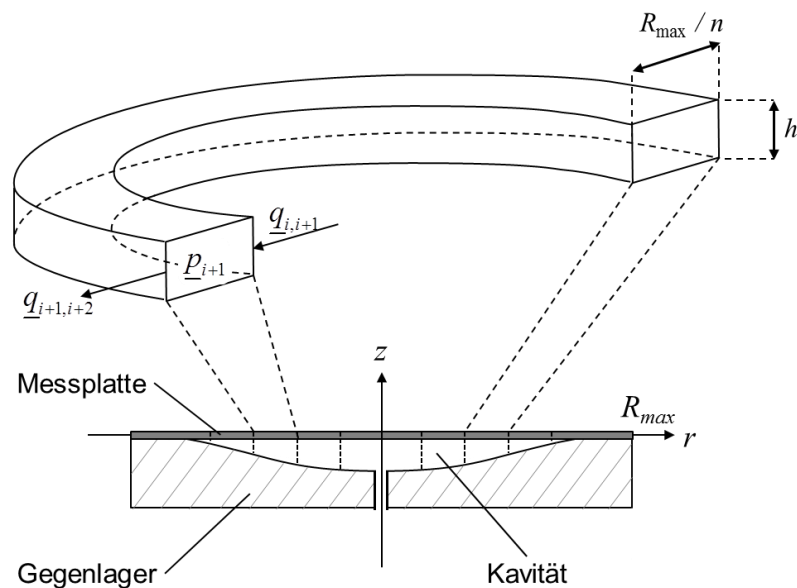


Bild 3: Darstellung eines halben Ringsegments der Kavität [2].

Jedes Segment besitzt die gleiche Breite (R_{\max}/n für n -Segmentteilungen). Die Höhe h eines Segments ist abhängig vom Messbereich und vom Radius der Messplatte.

2 Berechnung der akustischen Impedanzen in der Kavität

Die Kavität besitzt eine akustische Nachgiebigkeit N_k , und wegen dem Volumenstrom $q(r)$ auch eine akustische Reibung Z_k bzw. eine akustische Masse M_k . Durch die Aufteilung der Kavität in Ringsegmente werden die akustischen Impedanzen segmentweise betrachtet. Jedes Segment weist ein Volumen mit der Nachgiebigkeit $N_{k,i}$ auf. Die Übergänge zwischen den benachbarten Segmenten werden durch die akustische Reibung $Z_{k,i}$ und die akustische Masse $M_{k,i}$ beschrieben (**Bild 4**). Dabei werden die akustische Reibung und akustische Masse sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung betrachtet.

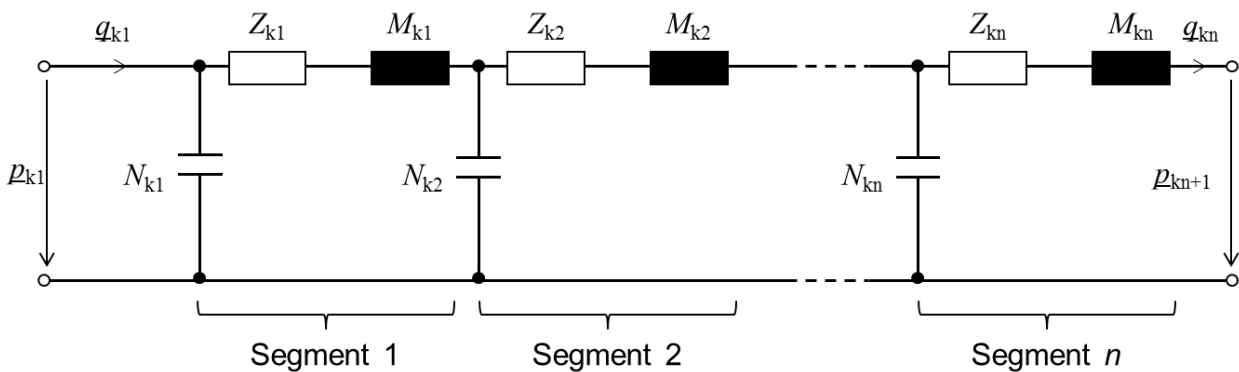


Bild 4: Netzwerkdarstellung der Segmente der Kavität in horizontaler Richtung.

2.1 Akustische Reibung in der Kavität

Wegen der kleinen Kavitätshöhe von maximal $20\ \mu\text{m}$ ist der Einfluss der akustischen Reibung signifikant für das dynamische Verhalten des Messelements.

Die akustische Reibung in horizontaler Richtung wird aus der allgemeinen Gleichung für die akustische Reibung hergeleitet [2]:

$$Z_{\text{kh},i}(r) = \frac{12\mu}{h(r)^2} \cdot \frac{R_{\max}/n}{2\pi \cdot R_{\max} \left(\frac{i}{n}\right) \cdot h(r)} \quad (1)$$

Das Ringsegment wird hier als Aneinanderreihung kanalartiger Hohlräume betrachtet, mit der Kanallänge R_{\max}/n und der Querschnittsfläche von $2\pi \cdot R_{\max}(i/n) \cdot h(r)$. Dabei ist R_{\max} der Plattenradius und n die Anzahl der Ringsegmente und $h(r)$ die Höhe der Segmente. Die Viskosität μ wird als konstant angesehen.

Nach Gl. (1) steigt die akustische Reibung in horizontaler Richtung in der Mitte und am Rand der Messplatte exponentiell an. Die Kavitätshöhe $h(r)$ zwischen Gegenlager und Messplatte verringert sich für $r \rightarrow R_{\max}$, wodurch die akustische Reibung Z_{kh} in Gl. (1) gegen unendlich verläuft. In der Mitte für $r \rightarrow 0$ konvergiert die Querschnittsfläche $2\pi \cdot R_{\max}(i/n) \cdot h(r)$ gegen Null, weshalb die akustische Reibung Z_{kh} auch für diesen Fall gegen unendlich läuft. Der letzte Fall entspricht nicht dem tatsächlichen Verhalten der akustischen Reibung. Die Kavität wird in der Mitte mit der Kapillare verbunden, d.h. das Silikonöl kann durch die Kapillare entweichen. Die akustische Reibung wird zwischen Kavität und Kapillare modelliert, um einen stetigen Übergang abzubilden.

Die Berechnung der akustischen Reibung in vertikaler Richtung erfolgt nach [2] durch Gl. (2)

$$Z_{kv,i}(r) = \frac{12\mu}{(R_{\max}/n)^2} \cdot \frac{h(r)}{\pi \cdot \left(R_{\max} \left(\frac{i+1}{n} \right) - R_{\max} \left(\frac{i}{n} \right) \right)^2}. \quad (2)$$

Auch hier wird das Ringsegment als Aneinanderreihung kanalartiger Hohlräume betrachtet. Jedoch wird die Kanallänge durch $h(r)$ und die Querschnittsfläche durch $\pi \cdot (R_{\max}(i+1/n) - R_{\max}(i/n))^2$ beschrieben.

Am Rand der Messplatte für $r \rightarrow R_{\max}$ konvergiert die akustische Reibung Z_{kv} gegen Null, da dort die Kavitätshöhe $h(r)$ gegen Null verläuft (**Bild 2**). In der Mitte ist die akustische Reibung Z_{kv} am größten, weil die Querschnittsfläche am kleinsten ist. Jedoch muss der Übergang zur akustischen Reibung der Kapillare berücksichtigt werden. **Bild 5** zeigt ein Vergleich der akustischen Reibung in horizontaler und in vertikaler Richtung [2]. Die akustische Reibung wird für $0 < r < R_{\max}$ dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die akustische Reibung in horizontaler Richtung dominant ist.

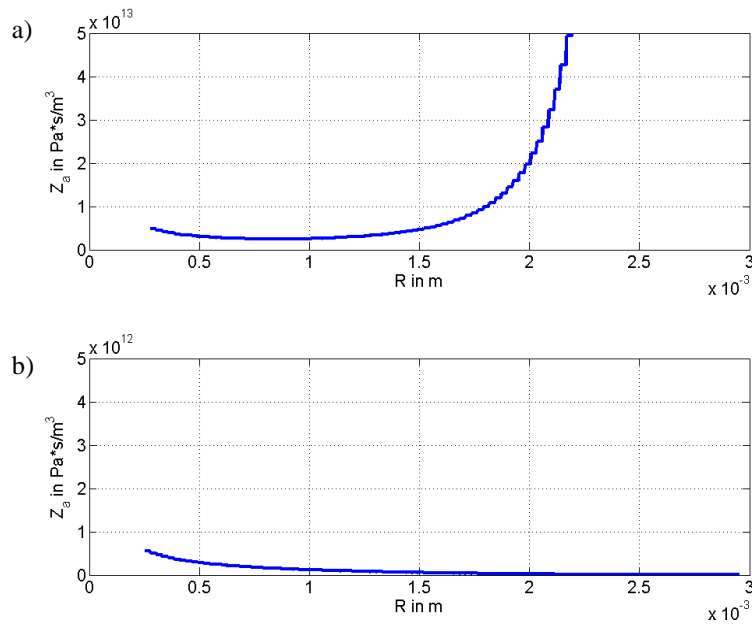


Bild 5: Verlauf der akustischen Reibung für $p_1 = 10$ mbar in Abhängigkeit vom Plattenradius [2];

- a) Akustische Reibung unter der Messplatte in horizontaler Richtung;
 b) Akustische Reibung unter der Messplatte in vertikaler Richtung.

3 Das Netzwerkmodell mit verteilten Parametern

Bild 6 zeigt allgemein das Netzwerkmodell des Messelements mit n Segmenten für die einseitige Ölfüllung. Die Netzwerkelemente des Gesamtnetzwerks werden in **Tabelle 1** aufgelistet.

Tabelle 1: Netzwerkelement des akustischen Netzwerks mit verteilten Parametern

| Symbol | Beschreibung |
|--------------------------|---|
| $N_{si,i}$ | Akustische Nachgiebigkeit der Plattensegmente |
| $N_{m,i}$ | Akustische Nachgiebigkeit der Ölsegmente des Silikonöls |
| $\underline{X}_{m,i}$ | Akustische Impedanz der Kavitätssegmente in horizontaler Richtung |
| $\underline{X}_{Si,m,i}$ | Akustische Impedanz der Kavitätssegmente in vertikaler Richtung |
| \underline{X}_1 | Akustische Impedanz der Kapillare |

Dabei werden akustische Reibung und akustische Masse als akustische Impedanz \underline{X} zusammengefasst. Die akustische Nachgiebigkeit der Messplatte wird mit N_{si} und die akustische Nachgiebigkeit der Kavitäten mit N beschrieben.

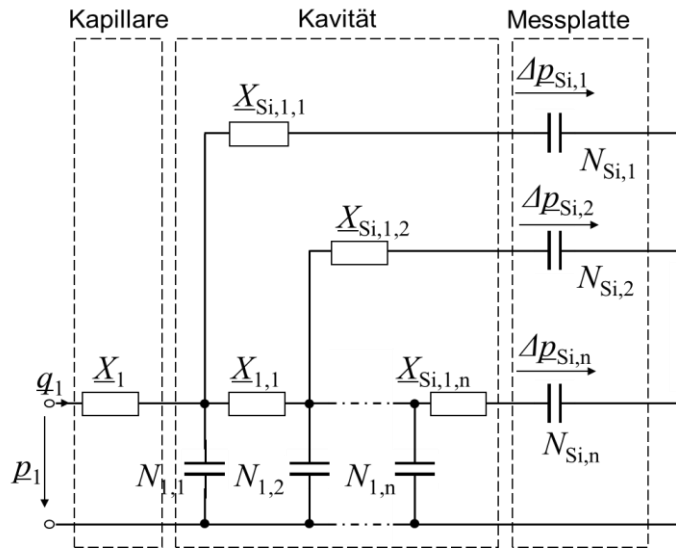


Bild 6: Akustisches Netzwerkmodell mit n Segmenten für die einseitige Ölfüllung [2].

3.1 Vergleich der Netzwerksimulation mit dem Messergebnis

Das Netzwerkmodell aus **Bild 6** wird für $n = 12$ Segmente mit LTspice simuliert. Als Eingangsdruck wird ein impulsartiger Druck $p_1 = 10$ mbar definiert. Die Viskosität des Silikonöls wird als konstant angenommen. Die Druckverteilung über der Messplatte wird in **Bild 7** als Ausgangsgröße ausgegeben.

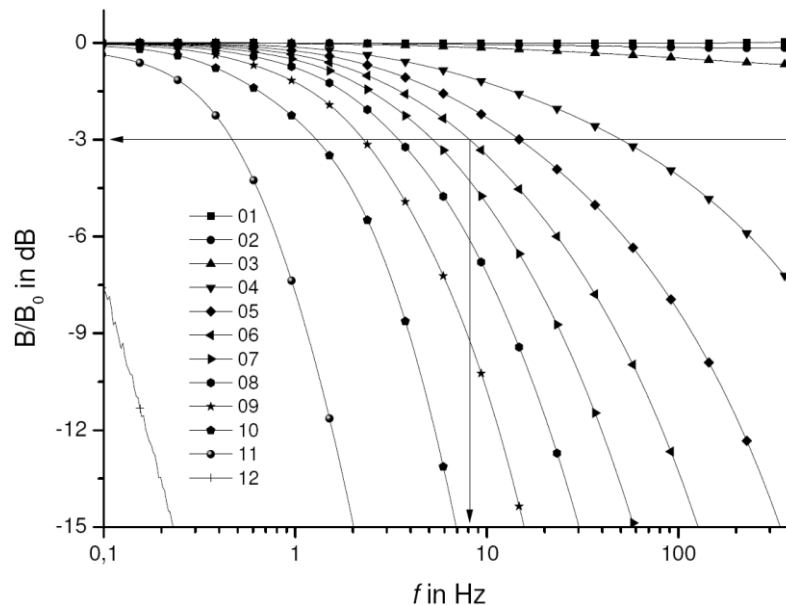


Bild 7: Amplitudenfrequenzgänge der Plattensegmente des Messelements für einseitige Ölfüllung mit Silikonöl AK-10 [3].

Segment 01 befindet sich in der Mitte und Segment 12 am Rand der Messplatte. Die einzelnen Amplitudenfrequenzgänge des Drucks der jeweiligen Segmente beschreiben noch nicht den Amplitudenfrequenzgang des Messelements. Der Amplitudengang des Messelements wird durch den Ausschlag der gesamten Messplatte beschrieben. Durch Zusammensetzung der Ringsegmente lässt sich nachweisen, dass die mittleren Segmente (für $n = 12$ entsprechend 5. und 6. Segment) einen wesentlichen Anteil zum Plattenausschlag beitragen [3]. Aus **Bild 7** erfolgt daher für die Grenzfrequenz des Messelements bei $f_0 = 10$ Hz. Dieser Wert wurde auch durch Messungen bestätigt [3].

3.2 Modellierung der Sensor-Abmessung

In weiteren Untersuchungen wird eine Miniaturisierung des Messelements angestrebt. Vorteil einer Miniaturisierung ist die größere Ausbeute der Sensoren beim Herstellungsprozess und die dadurch verbundene Kostenreduzierung. Es wurden Netzwerksimulationen mit kleinerer Kantenabmessung und um Faktor 10 geringerer Kavitätshöhe von einigen μm durchgeführt. Dabei wurde ein linearer Zusammenhang zwischen der Bauteilgeometrie und den akustischen Bauteilparametern vorausgesetzt. Die Grenzfrequenz des miniaturisierten Messelements ergibt sich aus der Netzwerksimulation mit $f_0 = 35$ Hz (**Bild 8**).

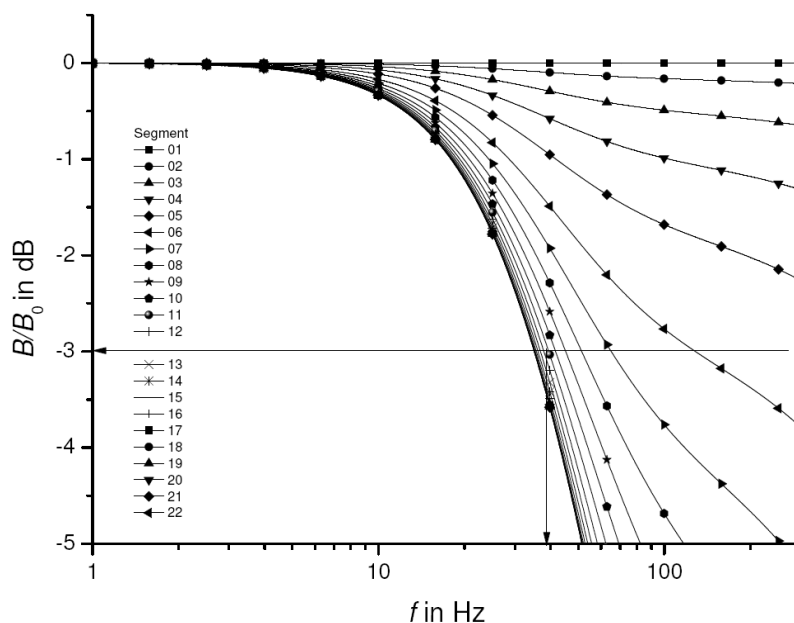


Bild 8: Amplitudenfrequenzgänge der Plattensegmente des miniaturisierten Messelements für einseitige Ölfüllung mit Silikonöl AK-10.

Jedoch weisen die Messungen am miniaturisierten Messelement mit einigen μm Kavitätshöhe mit ca. $f_0 = 1$ Hz eine deutlich geringere Grenzfrequenz auf. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Silikonöl trotz der Abmessung in μm -Bereich wie ein Newtonsches Fluid verhält. Eine mögliche Ursache könnte der Einfluss von Oberflächeneffekten sein, die eine Vergrößerung der akustischen Reibung verursachen [5].

4 Fazit

Die Ergebnisse bestätigen, dass die Netzwerktheorie mit verteilten akustischen Parametern zur Beschreibung von mikro-akustischen Systemen prinzipiell geeignet ist. Allerdings darf eine kritische Abmessung von $10 \mu\text{m}$ für flüssigkeitsgefüllte Hohlräume nicht unterschritten werden. Die Berechnung der verteilten Reibungen in Mikrospalten $h < 10 \mu\text{m}$ muss unter Berücksichtigung von Oberflächeneffekten an der Grenzfläche Platte-Fluid erweitert werden.

Literatur

- [1] Kober, Timo: Entwurf und Realisierung eines überlastfesten kapazitiven Silizium-Primärsensors als Messelement für hochempfindliche Differenzdrucksensor. Dissertation, TU-Darmstadt, 2014.
- [2] Tang, Linbo: Entwicklung eines Differenzdrucksensors der für impulsartige Überlastung geeignet ist. Diplomarbeit, TU-Darmstadt, 2012.
- [3] Tang, Linbo: Dynamische Simulation eines überlastfesten Drucksensors auf Basis der Netzwerktheorie mit verteilten Parametern. Sensoren und Messsysteme 2014, Nürnberg, 2014
- [4] Werthschützky, Roland: Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009.
- [5] Bao, M.-H.: Micro Mechanical Transducers: Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes, Amsterdam, Elsevier, 2000