



Lehrstuhl für Mikromechanik, Mikrofluidik/Mikroaktorik Prof. Dr. rer.nat. H. Seidel

Abschlussbericht Resonator Datum: 20.01.2011

Nanostrukturierte mikromechanische Resonatoren für Fluidanwendungen

Zuwendungsempfänger/Auftragsnehmer Universität des Saarlandes	Förderkennzeichen: 16SV3875
Vorhabensbezeichnung (ggf. Kurzfassung):	Projektleiter:
Resonator	Prof. Dr. Helmut Seidel
Laufzeit des Vorhabens:	Berichtszeitraum:
01.05.2009 – 31.03.2010	01.05.2009 – 31.03.2010

Inhaltsverzeichnis

1	Wiss	Wissenschaftlich-technische Arbeiten und Ergebnisse					
	1.1	Resonator-Konzept mit Squeeze-Film-Effekt und elektrostatischer Anregung und					
		kapazitiver Auslesung	2				
		1.1.1 Squeeze-Film Theorie	2				
		1.1.2 Konzept und Fertigung	3				
		1.1.3 Messaufbau	8				
		1.1.4 Resonanzverschiebung	10				
		1.1.5 Güte und Gasabhängigkeit	13				
	1.2	2 Resonator-Konzept mit piezoelektrischer Anregung und Auslesung mit					
		Aluminiumnitrid	16				
		1.2.1 Herstellungsprozess	16				
		1.2.2 Auslenkung der Resonatoren	19				
	1.3 Resonator-Konzept mit Squeeze-Film-Effekt und piezoelektrischer Anr						
		Auslesung	19				
		1.3.1 Konzept und Fertigung	19				
		1.3.2 Analyse	21				
		1.3.3 Messaufbau	23				
		1.3.4 Resonanz- und Gütemessung	23				
	1.4	Referenzen	26				
2	Verg	ergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung					
3	Fort	schreibung des Verwertungsplans	27				
	3.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	27				
	3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende						
	3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	28				

1 Wissenschaftlich-technische Arbeiten und Ergebnisse

Im Projektzeitraum wurden drei Resonator-Konzepte bzw. Sensor-Konzepte erarbeitet, weiterentwickelt und schließlich mikromechanisch gefertigt. Dabei handelt es sich um ein Sensor-Konzept basierend auf dem Squeeze-Film-Effekt mit elektrostatischer Anregung und kapazitiver Auslesung, ein weiteres Resonator-Konzept basiert auf Balkenresonatoren mit piezoelektrischer Anregung und Auslesung mit Aluminiumnitrid sowie eine Kombination beider Konzepte.

Im Folgenden werden die drei zugrunde gelegten Konzepte vorgestellt sowie der Aufbau, die Herstellung und die vorgenommenen Messungen und Ergebnisse dargelegt. Die Charakterisierung der Resonatoren umfasst die druck- und gasartabhängige Messung der Resonanzverschiebung und der Güte zur Bestimmung wichtiger Fluidparamter, wie Druck und Viskosität des Umgebungsmediums.

1.1 Resonator-Konzept mit Squeeze-Film-Effekt und elektrostatischer Anregung und kapazitiver Auslesung

1.1.1 Squeeze-Film Theorie

Der Squeeze-Film-Effekt basiert auf einem schmalen Spalt zwischen zwei im vergleich dazu großen Flächen, in dem sich ein kompressibles Fluid befindet. Bei harmonischer periodischer Bewegung der Flächen zueinander, stellt sich ein komplexes, im Wesentlichen frequenz- und druckabhängiges, Verhalten mit dämpfenden und federnden Eigenschaften ein.

Das zugrunde gelegte theoretische Modell des Squeeze-Film-Effektes von W. S. Griffin [1] and J. J. Blech [2] basiert auf der linearisierten kompressiblen Reynoldschen Schmierfilmgleichung. Die grundlegenden Annahmen sind ein isothermes Verhalten, eine kleine Bewegungsamplitude und ein gegenüber den Plattendimensionen sehr viel kleinerer Spaltabstand der planparallelen Platten. F. Pan [3] präsentiert eine Lösung für gegeneinander verkippende Platten. Die Lösung der Reynolds-Gleichung hat zwei Komponenten, aus welchen sich der Squeeze-Dämpfungskoeffizient $c_{t,sq}$ und der Squeeze-Federkoeffizient $k_{t,sq}$

$$c_{t,sq} = \frac{16 \, l \, w^3 p_a}{\pi^6 \, h_0} \frac{\sigma}{\omega}_{odd \, m \, even \, n} \frac{m^2 + \frac{n}{\alpha}^2}{(m \, n)^2 - m^2 + \frac{n}{\alpha}^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4}} \qquad k_{t,sq} = \frac{16 \, l \, w^3 p_a}{\pi^8 \, h_0} \, \sigma^2_{odd \, m \, even \, n} \frac{1}{(m \, n)^2 - m^2 + \frac{n}{\alpha}^2 + \frac{\sigma^2}{\pi^4}}$$

mit dem Aspektverhältnis der Platten $\alpha = w/l$, dem Umgebungsdruck p_a und dem Spaltabstand h_0 ergibt. Die dimensionslose Squeeze-Zahl einer Platte mit den Dimensionen $l \times w$ ist

$$\sigma = \frac{12 \eta_{eff} l^2 \omega}{p_a h_0^2} \qquad \eta_{eff} = \frac{\eta}{1 + 9.638 \ K n^{1.159}}$$

und kann als ein Maß für die Dominanz der jeweiligen Komponente angesehen werden. Damit der Einfluss der Mittleren Freien Weglänge λ in Relation zum Spaltabstand Berücksichtigung findet, wird die dynamische Viskosität η des

Gases durch eine effektive dynamische Viskosität η_{eff} ersetzt (Approximation von T. Veijola [4]), wobei $Kn = \lambda/h_0$ die Knudsen-Zahl ist. $\omega = 2\pi f$ ist die Winkelgeschwindigkeit der harmonischen Plattenbewegung.

1.1.2 Konzept und Fertigung

In diesem Sensor-Konzept wird die eine Fläche durch einen Resonator aus Silizium und die Gegenfläche durch einen starren Deckel aus Glas gebildet. Beide werden durch eine externe mechanische Vorrichtung mechanisch miteinander verbunden, wodurch eine große Variabilität durch Austausch der jeweiligen Komponenten ermöglicht wird. Die Resonatoren bestehen aus einer Kombination von trocken- und nasschemisch geätztem kristallinem Silizium. Der für den Squeeze-Film-Effekts benötigte enge Luftspalt wird durch in die Glas-Deckel geätzte Gruben von definierter Tiefe erzeugt. Die Variation der Grubentiefe ist eine mögliche Größe zur Beeinflussung des Squeeze-Film-Effekts.



Abbildung 1: Schematischer Querschnitt des Sensors

In der momentanen Version werden die Resonatoren elektrostatisch angeregt und kapazitiv und optisch ausgelesen. Die Anrege- und Ausleseelektroden werden durch eine strukturierte Aluminiumbeschichtung des Glasdeckels erzeugt. Als Gegenelektrode fungiert der Resonator, weshalb hoch dotiertes Silizium zur besseren Leitfähigkeit verwendet wurde. Abbildung 1 zeigt einen schematischen Querschnitt des Sensor-Konzeptes.

Die Herstellung der Silizium-Resonatoren erfolgt in einem drei Masken Prozess. Exemplarisch wird die schematische Prozessfolge zur Herstellung in Abbildung 2 gezeigt.

Ausgehend von einem 500 µm dicken, doppelseitig polierten 4-Zoll Wafer mit einer <100> Kristallorientierung und einer elektrischen Leitfähigkeit von ca. 0.01 cm (P / Bohr), wird zunächst in einem PECVD-Verfahren etwa 600 nm Siliziumnitrid beidseitig abgeschieden. Dieses dient zum einen auf der Rückseite als Hardmaske für das Siliziumätzen, zum anderen auf der Vorderseite auch später als verbleibende elektrische Isolationsschicht zur Trennung der Elektroden (siehe Abbildung 1).

Es folgt eine rückseitige Strukturierung des Siliziumnitrids (klassischer Photolithographischer Lack-Prozess) mit den Kavitäten (Maske 1), wobei das Layout sowohl Resonatoren ohne (Abbildung 1) als auch mit Bossstrukturen enthält (Abbildung 2). Für das Ätzen des Siliziumnitrids wird eine 6% HF-Lösung benutzt (Ätzrate von ca. 85 nm/min).

Das anschließende anistrope Ätzen des Siliziums zur Herstellung der Membranen wird mit einer heißen (85℃) Kaliumhydrox id-Lösung (KOH) durchgeführt. Mit einer Konzentration der Lösung von 38% und einer Ätzrate von

etwa 60 $\mu\text{m/h}$ dauert es etwa 8 Stunden bis eine Membrandicke von 20 bzw. 40 μm erreicht sind.

Danach wird das Vorderseitennitrid positionsgenau, bezogen auf die Rückseitenkavitäten, strukturiert (Backside-Alignment, Maske 2). Dabei werden die Bereiche, in denen sich die Resonatorstrukturen befinden, geöffnet, so dass nur noch ein elektrisch isolierender Rahmen übrig bleibt. Bei der HF-Ätzung wird dabei gleichzeitig die auf der Rückseite verbliebene Siliziumnitrid-Hardmaske entfernt.



Abbildung 2: Schematische Prozessabfolge bei der Herstellung des Silizium-Oszillators:
a): Hoch dotierter Silizium-Wafer, b): Beidseitiges Abscheiden von SiN,
c): Strukturierung des Rückseitennitrids (oben) mit den Kavitätenstrukturen, d): KOHätzen der Kavitäten auf Membrandicke, e): Öffnen des Vorderseitennitrids (unten) im Bereich der Oszillatoren und Entfernen des Rückseitennitrids, f): Freistellen der Oszillatorstrukturen mittels Trockenätzen von der Vorderseite, g): Lokales Abscheiden einer Rückseitenmetallisierung

Die Strukturierung des Resonators (Maske 3), also das Freistellen der beweglichen Struktur (Aufhängebalken und Masse), wird mittels Trockenätzen von der Vorderseite durchgeführt. Als Maske dient ein einfacher Photolack AZ 1518 von MicroChemicals. Die Kavitäten auf der Rückseite werden dabei in Lack eingebettet (AZ 9260). Damit kann eine kontrollierte Ätzung durch das Silizium in den Lack erfolgen und die Rückseite der Resonatoren wird nicht durch das Trockenätzen geschädigt, zudem werden sie durch den Lack mechanisch fixiert und können den Belastungen beim späteren Vereinzeln mit der Wafersäge besser standhalten.

Eine Rückseiten-Metallisierung mit Gold oder Aluminium zur sicheren elektrischen Kontaktierung des Siliziums, wurde im Prototypenstadium einzeln abgeschieden und manuell durch abkleben strukturiert. Auf Waferebene soll eine Schattenmaske beim Sputtern zum Einsatz kommen.

Die Herstellung der Glas-Wafer erfolgt in einem zwei Masken Prozess. Exemplarisch wird wiederum die schematische Prozessfolge zur Herstellung in Abbildung 3 gezeigt.



Abbildung 3: Schematische Prozessabfolge bei der Herstellung des Glas-Deckelwafers: a): Glas-Wafer, b): Beidseitiges Abscheiden von Chrom/Gold, c): Strukturierung der Gold-Hardmaske mit den Kavitätenstrukturen, d): HF-ätzen der Kavitäten, e): Entfernen der Gold-Hardmaske, f): Abscheiden von Aluminium, g): Strukturierung der Elektroden, Leiterbahnen und Bondpads

Als Basis dient ein beidseitig polierter 4-Zoll Borosilikatglaswafer der Stärke 500 µm.

Zunächst wird beidseitig ein Chrom/Gold-Hardmaske von etwa 400 nm Gold abgeschieden. Chrom dient dabei nur als Haftvermittler (20 nm).

Strukturiert wird nur eine Seite des Glas-Wafers, die andere wird lediglich beim Ätzen der Gruben geschützt. Die Strukturierung der Gold-Hardmaske (Maske 1) erfolgt mit Königswasser 3:1 (3 HCL + HNO₃).

Die Grube wird schließlich isotrop mit 38-40% HF-Lösung in das Glas geätzt. Dabei beträgt die Ätzrate etwa 2,54 µm/min. Bei geringen Grubentiefen kann auch die 6% HF-Lösung benutzt werden. Realisiert wurden zunächst Grubentiefen von 1-10 µm.

Durch Abscheidung einer Aluminium-Metallisierung (ca. 1,2 μ m) und anschließendes strukturieren (Maske 2) werden die Elektroden, Leiterbahnen und Bondpads erzeugt. Das Ätzen des Aluminiums erfolgt mit Phosphorsäure bei 50°C.

Das Layout der Resonatoren wurde in unterschiedlichen Geometrievarianten Größen und Schwingungskonzepten ausgeführt (Abbildung 4). Dazu gehören Biegeschwinger (Aufhängung an zwei Balken an einer Seite), Torsionsschwinger (Aufhängung an zwei Balken an gegenüberliegenden Seiten) sowie "Parallelschwinger" (Aufhängung an allen 4 Ecken der Masse), die gleichförmig senkrecht zur Ebene schwingen, sich also nicht verkippen. Diese werden mit unterschiedlichen Aufhängungen ausgeführt.

Die Flächen-Dimensionierung der Massen ist recht groß gewählt, sie liegen im Bereich von $3200 \times 2400 \ \mu\text{m}^2$ bis $1600 \times 1600 \ \mu\text{m}^2$. Damit sind Randeffekte des Squeeze-Film-Effektes vernachlässigbar. Die Dimensionierung der Balken ist so ausgelegt, dass sich die Vakuum-Resonanzfrequenz der Resonatoren bei etwa 2 kHz liegt, da der Squeeze-Film-Effekt bei Druckerhöhung eine Verschiebung der Resonanzfrequenz zu höheren Frequenzen hin bewirkt. Je nach dem, ob die Massen mit zusätzlichen Bulkstrukturen designt sind, wird auf eine Membranbzw. Balkendicke von 20 bzw. 40 μ m geätzt. Die Balkenlängen bei Biegeschwingern beträgt 200 μ m und bei Torsions- und Parallelschwinger in der Regel 400 μ m. Die Breiten der Balken bewegen sich zwischen 20 und 200 μ m.



Abbildung 4: Grundlegende Resonatorgeometrien (Strukturierte Lackmaske): a) Biegeschwinger, b) Tosionsschwinger, c) Parallelschwinger Variante 1, d) Parallelschwinger Variante 2

Abbildung 5 zeigt beispielhaft einen fertig prozessierten Die eines Biege-Resonators nach dem Vereinzeln durch sägen sowie der Reinigung. Die Bilder wurden von der Rückseite aufgenommen. Deutlich sind die KOH-Ätzflanken der Kavität und die manuell strukturierte Kontaktmetallisierung aus Gold zu erkennen. In der Vergrößerung des Resonators ist auch die Oberflächenrauheit der KOH-Ätzung zu erkennen.



Abbildung 5: Kompletter Die eines Biege-Resonators und die die Vergrößerung des Resonators, aufgenommen von der Rückseite

In Abbildung 6 ist beispielhaft der Die eines Parallel-Resonators mit Bossstruktur abgebildet. Die Außenmaße der Dies beträgt jeweils 6.8×7.6 mm², die Innenmaße der durch Trockenätzung freigestellten Öffnung beträgt maximal 3.4×4.2 mm².



Abbildung 6: Kompletter Die eines Parallel-Resonators mit Bossstruktur, aufgenommen von der Rückseite

Die Silizium-Resonatoren und Glas-Deckel mit Kavität und Elektroden werden mechanische Vorrichtung mechanisch durch eine externe miteinander verbunden. Dadurch wird eine große Variabilität durch Austausch der jeweiligen Komponenten ermöglicht. Zunächst wird der Glas-Die (9 x 9 mm²) in einen 24poligen DIL-Sockel geklebt und die entsprechenden Elektroden mit einem Wedge-Wedge Drahtbondverfahren, durch Einwirkung von Ultraschall und Temperatur, mit einem Golddraht mit den entsprechenden Kontaktpins verbunden (Abbildung 7). Danach wird ein Montagerahmen aus Aluminium mit Gewindebohrungen auf den Sockel geklebt. Im Folgenden wird der Silizium-Die mit dem Resonator positionsgenau unter dem Mikroskop über den Elektroden auf dem Glas-Die positioniert und anschließend mit einer Klemmbrücke und Schrauben fixiert (Abbildung 8).



Abbildung 7: Sensor-Sockel mit Deckel-Die und aufgeklebtem Aluminium Montagerahmen

Eine Öffnung in der Klemmbrücke bewirkt, dass ausschließlich der Rahmen des Resonators belastet wird und erlaubt es die Position zu kontrollieren sowie Messungen mit einem Laservibrometer durchzuführen, bei der die Resonatorstruktur optisch frei zugängig sein muss.



Abbildung 8: Fertig aufgebauter 1. Sensor-Prototyp mit verschraubter Klemmbrücke

1.1.3 Messaufbau

Eine umfangreiche systematische Charakterisierung der gefertigten Resonatoren erfolgt durch die Analyse der elektrisch erfassbaren Messgrößen wie Resonanzfrequenz, Betrag, Phase und Güte. Die wesentlichen Rahmenbedingungen bilden dabei die die Möglichkeit den Umgebungsdrucks stabil in einem weiten Druckbereich einstellen zu können bei gleichzeitiger Variation der umgebenden Gasatmosphäre.

Die am Lehrstuhl für Mikromechanik selbst entwickelte Vakuumkammer kann diese Rahmenbedingungen bereitstellen. Es ist möglich unterschiedliche Gase zuzuführen und simultan in einem weiten Bereich von 10⁻⁶ bis 1000 mbar den Druck einzustellen Die Messergebnisse liefern die Grundlage für eine Druckund Viskositätsmessung. Die folgende Abbildung 9 zeigt die Vakuumanlage mit dem Laservibrometer- Messaufbau.



Abbildung 9: Vakuumanlage mit Messaufbau Polytec Laservibrometer

Der Messaufbau für die kapazitiven Sensoren nutzt ein Modulationsverfahren mit einem AC-Trägersignal und einer DC-Biasspannung. Die Elektronik dazu befindet sich direkt am Sensorsockel innerhalb der Vakuumkammer. Somit kann Vorverstärktes Sensorsignal von einem Lock-in-Verstärker analysiert werden (Abbildung 10).



Abbildung 10: Schematischer Messaufbau für die kapazitiven Sensoren

Die Anregung erfolgt getrennt von der Auslesung auf Elektroden innerhalb der Grube des Glasdeckels. Die Anregespannung bewegt sich im Bereich von 0.01-15 V.

Parallel dazu kann durch ein Schauglas im Deckel der Vakuumkammer ein Laservibrometer auf den Resonator fokussiert werden. Die unabhängige optische Messung mit dem Laservibrometer erlaubt zudem die Ermittelung der absoluten Schwingungsamplitude.

Die Bestimmung der Güte kann mit zwei Methoden erfolgen. Aus dem durch einen Frequenzsweep gewonnenen Amplitudenverlauf kann die Resonanzfrequenz als auch die Güte ermittelt werden. Zudem besteht die Möglichkeit aus Abklingkurven nach Abschaltung der Anregung die Güte zu bestimmen.

1.1.4 Resonanzverschiebung

Die Messungen und Simulationen wurden an einem Biege-Resonator (vergleichbar mit Abbildung 5) mit folgenden Spezifikationen durchgeführt [5]. Der Resonator hat eine (Squeeze-Film-) Fläche von 2400 × 2400 μ m², welche durch einen doppelten Biegebalken auf der einen Seite an den Rahmen des Sensors befestigt ist. Die Länge der Balken ist jeweils 200 μ m, die Balkenbreite 80 μ m. Die Dicke der Struktur (Masse und Balken) beträgt 36 μ m. Der Squeeze-Film Spaltabstand ist 5 μ m groß. Alle Untersuchungen wurden unter N₂-Atmosphäre durchgeführt.

Abbildung 11 zeigt die Simulation der Amplitude des harmonischen Oszillators mit Squeeze-Film-Koeffizienten für verschiedene Umgebungsdrücke über die Frequenz aufgetragen. Dabei werden in der dazugehörigen Differentialgleichung $J \varphi + c_t \varphi + k_t \varphi = M$ die Feder- und Dämpfungskoeffizienten k_t und c_t des Systems durch eine Kombination (Summe) aus der mechanischen und der Squeeze-Film Komponente gebildet. Die mechanische Dämpfungskomponente, die intrinsische Materialdämpfung des kristallinen Siliziums, wird hierbei allerdings vernachlässigt. ist dabei der Drehwinkel, J das Massenträgheitsmoment der Struktur und M ist das extern angreifende harmonische Antriebsmoment.



Abbildung 11: Simulierte frequenzabhängige Amplitude für verschiedene Umgebungsdrücke

Es ist deutlich eine Erhöhung der Frequenz mit dem Umgebungsdruck zu sehen. Eine Druckänderung bewirkt eine Änderung des Squeeze-Federkoeffizienten und damit der Gesamtfedersteifigkeit des Systems. Erwartungsgemäß erhöht sich auch die Dämpfung, wenn der Druck steigt.

Abbildung 12 zeigt die Verschiebung der Resonanzfrequenz durch den Umgebungsdruck.



Abbildung 12: Simulierte druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz

Die Resonanzfrequenz des Sensors wurde für unterschiedliche Drücken in einem Bereich von $2 \cdot 10^{-6}$ bis 300 mbar (Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15) gemessen.



Abbildung 13: Gemessene druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz (doppelt logarithmisch, f_r vs. p_a)

Die Messungen (Abbildung 13) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit der Simulation (Abbildung 12). Unterschiede lassen sich mit Variationen in Herstellungsprozess erklären.



Abbildung 14: Gemessene druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz (linear, f_r^2 vs. p_a)

Im Vakuum unterhalb von 0,03 mbar zeigt die Resonanzfrequenz kaum Veränderungen, im Druckbereich zwischen 0,03 und 10 mbar zeigt sich ein nahezu linearer Zusammenhang (Abbildung 15) und für Drücke größer als 10 mbar ist eine lineare Korrelation zwischen dem Quadrat der Resonanzfrequenz f_r^2 und dem Umgebungsdruck p_a zu sehen (Abbildung 14).



Abbildung 15: Gemessene druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz (linear, f_r vs. p_a)

Die Untersuchungen im Vakuumbereich zeigen eine starke druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz des Sensors. Es zeigt sich in unterschiedlichen Druckbereichen, trotz starker Änderung der Dämpfung und Güte, je nach Skalierung der Achsen, ein lineares Verhalten. Eine Nutzung des Squeeze-Film Effektes für die Drucksensorik ist im Bereich der Kontinuumsströmung sicherlich möglich, aber auch im Übergangsbereich bis in die Nähe der freien Molekularströmung ist ein Einsatz denkbar.

1.1.5 Güte und Gasabhängigkeit

Die Messung der Gasartabhängigkeit wurde mit vier verschiedenen Gasen (N_2 , Ar, CO_2 und Ne) durchgeführt [6]. In späteren Messungen wurde zusätzlich He verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Gase sind in folgender Tabelle 1 aufgeführt.

Gasart	Anzahl der Atome	Dynamische Viskosität [kg/m/s] [7]	Produkt von Mittlerer Freier Weglänge und Druck [m mbar] [8]	Molekulargewicht [g/mol] [7]
N_2	2	$17.9 \cdot 10^{-6}$	5.9·10 ⁻⁵	28.014
Ar	1	$22.8 \cdot 10^{-6}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	39.948
CO_2	3	$14.83 \cdot 10^{-6}$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	44.010
Ne	1	31.6·10 ⁻⁶	$12.7 \cdot 10^{-5}$	20.180
He	1	19.68·10 ⁻⁶	$17.5 \cdot 10^{-5}$	4.003

Tabelle 1: Grundlegende Eigenschaften der experimentell verwendeten Gase

Trotz der stark unterschiedlichen Moleküleigenschaften, die Atomzahl variiert von 1 bis 3 und das Molekulargewicht hat ändert sich bis zu einem Faktor 11, zeigen die Messungen bei unterschiedlichen Gasatmosphären, dass die druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz nahezu unabhängig von den Gas-Arten ist (Abbildung 16, Abbildung 17).



Abbildung 16: Druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz für verschiedene Gasatmosphären (doppelt logarithmisch, f_r vs. p_a)



Abbildung 17: Druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz für verschiedene Gasatmosphären (linear, f_r^2 vs. p_a)

Die Ergebnisse der Güte-Faktor-Messung sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Das Diagramm zeigt den Güte-Faktor als Funktion von unterschiedlichen Drücken zwischen $2 \cdot 10^{-6}$ und 10 mbar.



Abbildung 18: Druckabhängiger Güte-Faktor für verschiedene Gasatmosphären (Kaltkathoden-Sensor und Pirani-Sensor)

Für Drücke unterhalb 10⁻⁴ mbar wurde eine maximale Güte von etwa 45.000 erreicht. Hier ist der Begrenzungsfaktor die Materialdämpfung innerhalb der Silizium-Strukturen. In dieser Region ist die Gasdämpfung vernachlässigbar und damit wird die Güte unabhängig vom Druck.

Für niedrige Drücke im molekularen Strömungsbereich mit Knudsen-Zahlen über 1 (entsprechend einem Druck unter 10 mbar bei einem Spaltabstand von 5 μ m), ist der Güte-Faktor unabhängig von der Gasart und ihrer Viskosität. Dies kann

auf die, im Vergleich zum Squeeze-Film Spaltabstand, große Mittlere Freie Weglänge der Gasmoleküle zurückgeführt werden. Daher interagieren die Atome nicht mehr miteinander, sondern nur noch mit den schwingenden und statischen Flächen des Sensors. Die Viskosität ist jedoch eine Eigenschaft, die sich aus der Wechselwirkung der Gasmoleküle untereinander begründet.

Die nicht reale Abweichung der verschiedenen Gase im Bereich zwischen 10⁻⁴ und 10⁻³ mbar ist auf die Messmethode des verwendeten Referenzdrucksensors zurückzuführen. Dieser besteht aus einem kombinierten Kaltkathoden- und Pirani-Sensor. Bei beiden Messmethoden besteht eine Abhängigkeit von der Art des Gases, welche nicht vollständig kompensiert werden. Die Verwendung eines, mit einem kapazitiven Funktionsprinzip arbeitenden, Membran-Drucksensors kann diese Ungenauigkeit für den Druckabschnitt zwischen 10⁻² und 1 mbar beseitigen (Abbildung 19).



Abbildung 19: Druckabhängiger Güte-Faktor für verschiedene Gasatmosphären (Membran Sensor)

Für Drücke oberhalb 10⁻¹ mbar kann eine zunehmende Abhängigkeit des Güte-Faktors von der Viskosität des Gases gesehen werden. Die Abweichungen in der Nähe von 10⁻² mbar kann auf die zunehmende Ungenauigkeit des Membran-Drucksensors zurückgeführt werden, da das Messsignal linear mit dem Druck skaliert, und der Sensor in die Nähe seiner Auflösungsgrenze kommt.

Unter Einbeziehung des Squeeze-Film-Effektes wurde ein MEMS-Sensor entworfen, entwickelt und gemessen, um wichtige Parameter wie fluidischen Gasdruck und Viskosität unter reduziertem Druck zu messen. Erste Prototypen wurden mit unterschiedlichen Geometrien und unter Verwendung einer Kombination von trockenen und nasschemischen Ätzverfahren realisiert. Die Messungen der Squeeze Wirkung dieser Sensoren zeigen in einem Breiten Druckbereich gasartunabhängige lineare Änderungen der Resonanzfrequenz. Dies könnte in einem gasartunabhängigen Vakuum-Drucksensor Anwendung finden. In dem molekularen Strömungsbereich ist der Güte-Faktor unabhängig von der Gasart. Für Aussagen im Bereich der Kontinuumsströmung muss aufgrund messtechnischer Schwierigkeiten des kapazitiven Konzeptes auf ein Konzept mit piezoelektrischer Anregung und Auslesung gewechselt werden.

1.2 Resonator-Konzept mit piezoelektrischer Anregung und Auslesung mit Aluminiumnitrid

In diesem Abschnitt wird die Herstellung von piezoelektrisch angeregten Resonatoren für MEMS Anwendungen dargestellt. Es wurden einseitig eingespannte Resonatoren hergestellt. Für die piezoelektrische Anregung werden AIN-Schichten mit verschiedenen Piezokoeffizienten eingesetzt. Dadurch können die Auslenkungen der Resonatoren in Abhängigkeit von den Piezokoeffizienten ermittelt werden. Die Auslenkung eines Resonators setzt sich zusammen aus einem Eigenspannungsanteil sowie einem piezoelektrischen und einem thermischen Anteil.

1.2.1 Herstellungsprozess

Anhand des nachfolgenden Ablaufdiagramms (Abbildung 20) wird die Prozessfolge zur Herstellung von Resonatoren schematisch beschrieben.





Ausgangsmaterial:

Als Ausgangmaterial werden doppelseitig polierte Siliziumsubstrate mit (100) Orientierung verwendet. Die Siliziumsubstrate sind Bor dotiert und sollen als Bodenelektrode dienen. Der spezifische Widerstand ist kleiner als 0,1 cm. Die Dicke der Siliziumsubstrate liegt bei 450 μ m ± 25 μ m.

Thermische Oxidation:

Die Siliziumsubstrate wurden in einem Horizontalofen trocken oxidiert. Die Dicke der SiO₂ Schicht beträgt nach 4 h Oxidationszeit bei 1000 $^{\circ}$ ca. 120 nm. Das Oxid dient zum einen als Haftschicht für Si₃N₄ und zum anderen als elektrischer Isolator.

Si_3N_4 Abscheidung mittels PECVD-Anlage:

Nach dem Oxidationsschritt erfolgt eine Abscheidung einer Si₃N₄-Schicht auf beiden Seiten des Wafers. Dabei wird eine PECVD-Anlage eingesetzt. Die Dicke der Si₃N₄ Schicht beträgt 300 nm. Die Substrattemperatur während der Abscheidung lag bei 380°C und eine Abscheiderate von 15 nm/min wurde ermittelt.

Die Si₃N₄ Schicht auf der Rückseite wird als Maskierung für den ansiotropen Ätzschritt benutzt. Die Si₃N₄ Schicht auf der Vorderseite war aus gerätetechnischen Gründen zum Schutz der Vorderseite notwendig.

Für die Strukturierung der kombinierten Si_3N_4 und SiO_2 -Schichten wurde eine 6% HF-Lösung benutzt. Beim Lithografieschritt wurde ein Standardlack (AZ1518) eingesetzt.

Membranherstellung durch anisotropes Si-Ätzen:

Die anistrope Silizium Ätzung zur Herstellung von Membranen wird mit einer heißen (85°) Kaliumhydroxid- Lösung durchgeführt. Die Konzentration der Lösung liegt bei 38%. Die Ätzzeit beträgt bei einer Ätzrate von 65 µm/h ca. 7 Stunden. Die Bestimmung der Membrandicke erfolgt "Auf-Zeit". Dazu wird die erreichte Ätztiefe mehrmals gemessen. Wenn die Membrandicke erreicht ist, werden die Si₃N₄ und SiO₂-Schichten entfernt und der Wafer anschließend trocken oxidiert.

Herstellung und Strukturierung der piezoelektrischen AlN-Schicht:

Es wurden Schichten mit guter c-Achsen Orientierung (guter piezoelektrischen Koeffizienten), aber zum Vergleich auch solche mit schlechter c-Achsen Orientierung hergestellt. Die AIN-Schichten haben eine Dicke von ungefähr 1000 nm und werden nach Strukturierung der SiO₂-Schicht abgeschieden. Die SiO₂-Schicht wird nur an den Stellen des später frei schwingenden Resonators und des Bodenkontaktes entfernt (grüner Bereich in Abbildung 21). Die AIN-Schicht wird ebenfalls an der Stelle des Bodenkontaktes sowie an einem 30 µm breiten Randbereich um den Biegebalken herum für die Trockenätzung (schraffierter Bereich) entfernt, wie Abbildung 21 in der Draufsicht zeigt.





Abbildung 21: Ausschnitt aus dem Maskendesign für SiO₂ und AIN Strukturierung

Erzeugung der Metallisierung:

Nach dem Strukturieren der AlN-Schicht müssen die Top- und Bodenelektrode realisiert werden. Als Bodenelektrode wird das Siliziumsubstrat direkt benutzt und über die geöffnete Stelle (Kontaktloch) durch eine Metallabscheidung kontaktiert. Als Topelektrode wird die gleiche Metallisierung wie für das Kontaktloch verwendet. Sie wird geometrisch 10 µm schmäler als der freischwingende Balken ausgelegt, um einen Kurzschluss zwischen den beiden Elektroden zu verhindern. Die Topelektrode wird nach außen auf eine größere Kontaktfläche geführt (Abbildung 22).



Abbildung 22: Ausschnitt aus dem Maskendesign für die Top- und Boden-Elektrode und für den Trockenätzprozess

Um qualitativ hochwertige Bodenkontakte zu erhalten, wird vor dem Abscheiden der Metallelektrode ein HF-Dip zur Entfernung von natürlichem Oxid durchgeführt. Als Metallisierung wird eine 500 nm dicke Aluminiumschicht gesputtert. Nach einem Lithografieschritt wird die Alu-Strukturierung mit Nassätztechnik durchgeführt. Als Ätzlösung wird eine Phosphorsäureätzmischung eingesetzt. Um die Ätzung der AlN-Schicht zu unterbinden, wird eine Ätzbadtemperatur von 40℃ verwendet, da in die sem Temperaturbereich die Ätzrate der AlN-Schicht vernachlässigbar ist.

Freistellung des Biegebalkens:

Abschließend werden von der Vorderseite die Balkenstrukturen freigelegt. Ein Cryo-Ätzprozess wird für die Ätzung des 20 μ m dicken Siliziums eingesetzt (Abbildung 23). Für die Maskierung wird der Photolack (S 1818) von "microresist" benutzt. Als Ätzgas wird eine Mischung aus SF₆ und O₂ eingesetzt. Zuletzt wird der Lack mit Aceton entfernt.



Abbildung 23: REM-Bild eines Cantilevers mit AIN-Dünnfilm und Alu-Topelektrode

Damit ist der Herstellungsprozess von Resonatoren abgeschlossen. Die Resonatoren können abschließend mit einer Diamantsäge vereinzelt werden. Danach werden sie in ein Testgehäuse eingebaut und drahtgebondet oder auch direkt mit einem Nadelprober kontaktiert. Das Verhalten der Resonatoren wurde hauptsächlich mit einem Laservibrometer charakterisiert.

1.2.2 Auslenkung der Resonatoren

Eigenspannungsanteil:

Die im Rahmen dieses Projekts realisierten Resonatoren sind stressarm. Abbildung 24 zeigt das gemessene mechanische Auslenkungsprofil eines 640 µm langen Resonators. Die maximale Auslenkung betrug 1,88 µm.



Abbildung 24: Eigenspannungsbedingte mechanische Auslenkung eines 640 µm langen Resonators

1.3 Resonator-Konzept mit Squeeze-Film-Effekt und piezoelektrischer Anregung und Auslesung

Aufgrund der Schwierigkeit bei elektrostatischer Anregung und kapazitiver Messung bei sehr geringen Güten bzw. höheren Drücken (größer 10 mbar) verwertbare Messergebnisse zu erzielen, wurde im Projektzeitraum mit der mikromechanischen Fertigung eines neuen Resonator-Konzeptes begonnen, bei dem das Squeeze-Film-Konzept durch Adaption der piezoelektrischen Anregung des zweiten Resonator-Konzeptes erweitert wurde. Damit ist es möglich, auch innerhalb des fluiden Strömungsbereichs, gasartabhängige Messungen durchzuführen.

1.3.1 Konzept und Fertigung

Folgende Abbildung 25 zeigt den schematischen Querschnitt des neuen AlN-Sensorkonzeptes. Die SiN-Schicht (grün), welche als Hartmaske beim ätzen des Siliziums verwendet wurde, verbleibt als elektrische Isolationsschicht. Die piezoelektrische AlN-Funktionsschicht (violett) wird über den Biegebalken platziert und entsprechend strukturiert. Sie verbleibt zwar großflächig, kann ihre piezoelektrische Funktionalität jedoch nur an den mechanisch beweglichen Stellen mit geringerer Steifigkeit (Balken) ausüben. Gold (gelb) wird als oberer elektrischer Kontakt-Layer aufgrund der Korrosionsfestigkeit verwendet. Der Massekontakt wird durch das Si-Substrat (blau) gebildet. Der wesentliche Vorteil gegenüber dem kapazitiven Konzept liegt in dem einfacheren messtechnischen Aufwand beim piezoelektrischen Messprinzip, welches zudem unabhängig vom Spaltabstand und des eingeschlossenen Dielektrikums ist. Parasitäre Kapazitäten spielen im Vergleich zum kapazitiven Konzept keine besonders kritische Rolle.



Abbildung 25: Schematischer Querschnitt des AIN-Sensorkonzeptes

Die Herstellung der Glas-Deckel vereinfacht sich, da keine Elektroden innerhalb der Grube benötigt werden und somit die Gold-Hartmaske nach dem Ätzen der Gruben für die elektrischen Durchkontaktierungspads weiter verwendet werden kann. Diese sind notwendig, da eine elektrische Kontaktierung der AIN-Funktionsschicht über den Deckel erfolgt (Linke Seite Abbildung 25). Ein elektrischer Kontakt über die mechanische Klemmbrücke kann entfallen, da die Kontaktierung des Si-Substrates ebenfalls über den Glasdeckel nach außen geführt werden kann (Rechte Seite Abbildung 25).

Problematisch sind die intrinsischen mechanischen Spannungen, die beim Sputtern in der AIN-Schicht entstehen und so zu einer statischen Auslenkung des Resonators führen können.

Die Herstellung der Silizium-Resonatoren mit AIN-Konzept erfolgt in einem fünf Masken Prozess. Aufbauend auf dem kapazitiven Konzept, folgen nach der Strukturierung des vorder- und rückseitigen SiN-Layers zwei zusätzliche Abscheide- und Strukturierungsschritte bei denen zunächst der AIN-Funktionslayer und dann ein Gold-Metallisierungslayer aufgebracht und strukturiert werden.



Abbildung 26: Wafer AIN-Konzept (vor dem Trockenätzen): a) Strukturierte Vorderseite: SiN, AIN, Au sowie strukturierte Lackmaske Trockenätzen b) KOH-geätzte Rückseite mit Lackeinbettung der Kavitäten für das Trockenätzen Mit einem einseitig geschlossenen, die Vorderseite des Wafers schützenden Ätzhalters, können in KOH die Kavitäten der Waferrückseite geätzt werden, bis eine Membranstärke von etwa 20-25 µm erreicht ist. Analog zum kapazitiven Konzept erfolgt das Freistellen der beweglichen Struktur (Aufhängebalken und Masse) mittels Trockenätzen von der Vorderseite. Die Abbildung 26 zeigt einen nach AIN-Konzept gefertigten Wafer vor dem Trockenätzen.

Die folgende Abbildung 27 zeigt exemplarisch eine Auswahl fertiger Biege-Resonatoren mit AIN-Konzept unterschiedlichen Geometriedesigns nach dem Vereinzeln.



Abbildung 27: Resonator-Dies unterschiedlicher AIN-Biegeresonatoren

Dabei ist in Gold der Metallisierungslayer mit den Zuleitungen, Kontaktpads und Massefläche zu sehen. Grün erscheint der Isolationslayer aus SiN und grau die unbeschichteten Siliziumresonatoren. Die AIN-Schicht entspricht, abzüglich des Bereichs der Massekontaktierung, dem Gold-Layer und ist hier nicht sichtbar.

1.3.2 Analyse

Zur Prozessanalyse wurden neben optischen Kontrollen unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt. Als Beispiel werden die Ergebnisse von Profilometer- und Interferometermessungen vorgestellt.



Abbildung 28: Profilometer, Schichtdickenmessung SiN-, AIN- und Au-Layer (843 nm, 1305 nm, 625 nm)

Die Messung der Schichtdicken der einzelnen Layer ist zur Bestimmung des Squeeze-Spaltabstandes notwendig. Dieser ergibt sich aus den Dicken der drei Layer (Au, AIN, SiN) auf dem Si-Die des Resonators, dem Au-Layer auf dem Deckel, sowie der geätzten Grubentiefe. Die Messungen können jeweils mit einem Profilometer mit sehr hoher Genauigkeit durchgeführt werden (Abbildung 28).

Die Messung der Membran- bzw. Balkendicke ist für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und damit zur Berechnung der zu erwartenden Resonanzfrequenz notwendig. Diese sind die Grundlage für die elektrischen Messungen. Genaue Schichtdickenmessungen von Silizium können mit Hilfe der Fouriertransformierten-Infrarotspektroskopie (FTIR) durchgeführt werden. Abbildung 29 zeigt ein Absorptionsspektrum eines Resonator-Dies, wobei der Infrarotstrahl durch die freie Masse des Oszillators gerichtet ist.



Abbildung 29: FTIR-Absoptionsspektrum eines Resonator-Dies

Mit der Formel d = m/(2 n), kann mit dem bekannten Brechungsindex n = 3.42von Silizium und durch das Abzählen der Anzahl m der Oszillationen innerhalb eines Wellenzahlintervalls die Dicke der Resonatormasse und damit der Membran- und auch Balkendicke berechnet werden.

Das Oberflächenprofil der Resonatoren kann mit einem Weißlicht-Interferometer ermittelt werden.



Abbildung 30: Weißlicht-Interferometer, Oberflächenprofil AIN-Resonator

Bei erster Fertigung intrinsischer Stress im AIN noch zu groß (Abbildung 30). Die resultierende Verbiegung der Balken führt aufgrund der Größe der Strukturen zu einer starken maximalen statischen Auslenkung, welche bei großen Massen 40 µm betragen kann (Abbildung 31).



Abbildung 31: Weißlicht-Interferometer, Statische Auslenkung AIN-Resonator

1.3.3 Messaufbau

Der Messaufbau für die piezoelektrischen Sensoren (Abbildung 32) ist einfacher, er besteht im Wesentlichen nur aus Funktionsgenerator und Lock-in-Verstärker. Es wird keine vorgeschaltete zusätzliche Elektronik zur Signalaufbereitung benötigt. Der Signalstrom der piezoelektrischen Elemente auf den Biegebalken kann direkt ausgewertet werden. Anrege- und Ausleseeinheit sind wiederum getrennt ausgeführt.



Abbildung 32: Schematischer Messaufbau für die piezoelektrischen Sensoren

1.3.4 Resonanz- und Gütemessung

Die ersten Messungen wurden aufgrund der statischen Auslenkung an Resonatoren ohne Deckel und damit noch ohne Squeeze-Film-Dämpfung durchgeführt. Die Resonator-Dies wurden, anstatt der Deckel, direkt in den Sockel geklebt und gedrahtbondet (Abbildung 33a).



Abbildung 33: a) Ungedeckelter Biegeresonator, b) Komplett aufgebauter AIN-Sensor

Messungen an komplett aufgebauten Sensoren mit Deckel und alternativer Parallelschwinger Variante, die eine allseitig eingespannte resonante Masse haben (Abbildung 33b), haben bezüglich elektrischer Messung leider zu keinem verwertbaren Ergebnis geführt. Aufgrund der Art der Einspannung sind sehr viel kleinere Schwingungsamplituden zu erwarten. Das Laservibrometer stand zu diesem Zeitpunkt nicht mehr zur Verfügung.

Folgende Messergebnisse stammen von einem ungedeckelten Biegeresonator mit einer Fläche von 1600 × 1600 μ m², der Balkenlänge von 500 μ m und der Balkenbreite von 600 μ m. Messungen sind bis Atmosphärendruck problemlos möglich.

Die Abbildung 34 zeigt das druckabhängige Dämpfungsverhalten in einer amplitudennormierten Darstellung.



Abbildung 34: Decay-Messung mit Laservibrometer unter N2-Atmosphäre (normierte Amplitude)

Die Abklingkurven (Decay-Kurven) zeigen die Dämpfung in einer N_2 Umgebungsatmosphäre. Erwartungsgemäß sinkt mit steigendem Druck die

Abklingdauer. Gemessen wurden für unterschiedliche Gasatmosphären (N_2 , Ar, CO_2 , Ne, He).

Die Berechnung der Güte kann aus dem exponentiellen Amplitudenabfall der Abklingkurven berechnet werden. Aus den Messungen für unterschiedliche Drücke und für die Gasatmosphären N_2 , Ar, CO_2 , Ne und He ergibt sich der Güteverlauf aus folgender Abbildung 35.



Abbildung 35: Druckabhängiger Güteverlauf bei unterschiedlichen Gasatmosphären (ohne Squeeze-Spalt, bzw. Spalt sehr groß)

Obwohl dieser Resonator-Aufbau keinen Squeeze-Spalt beinhaltet, ist trotzdem eine deutliche Separierung der unterschiedlichen Gase im fluiden Strömungsbereich erkennbar.

Die maximale Güte bei hohem Vakuum ist aufgrund der Mikrostruktur der AlN-Schicht mit etwa 7000 deutlich geringer als beim kapazitiven Konzept (45000). Die piezoelektrische AlN-Schicht besteht aus Körnern mit säulenförmigen Kristallwachstum und c-Achsen Orientierung, was zu einer stärkeren intrinsischen Materialdämpfung führt als bei reinem einkristallinem Silizium.

In der Abbildung 36 ist die dazugehörige druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz dargestellt. Natürlich zeigt sich aber nicht die große Resonanz-Verschiebung zu höheren Frequenzen hin, wie sie beim Squeeze-Effekt zu erwarten ist, sondern die recht kleine Verringerung der Resonanzfrequenz des gedämpften harmonischen Oszillators. Aber auch diese Verschiebung der Resonanzfrequenz zeigt im fluiden Strömungsbereich eine deutliche Separierung in Abhängigkeit von der Gasatmosphäre.



Abbildung 36: Druckabhängige Verschiebung der Resonanzfrequenz bei unterschiedlichen Gasatmosphären (ohne Squeeze-Spalt, bzw. Spalt sehr groß)

1.4 Referenzen

- [1] Griffin W. S., Richardson H. H., Yamanami S.; A Study of Fluid Squeeze-Film Damping; Journal of Basic Engineering, 1966, vol. 88, no. 2, pp. 451–456
- [2] Blech, J. J.; On Isothermal Squeeze Films; *Journal of Lubrication Technology -Transactions of the Asme*, 1983, vol. 105, no. 4, pp. 615–620
- [3] Pan F., Kubby J., Peeters E., Tran A. T., Mukherjee S.; Squeeze film damping effect on the dynamic response of a MEMS torsion mirror; *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1998, vol. 8, no. 3, pp. 200–208
- [4] Veijola T., Kuisma H., Lahdenpera J., Ryhanen T.; Equivalent-Circuit Model of the Squeezed Gas Film in A Silicon Accelerometer; Sensors and Actuators A-Physical, 1995, vol. 48, no. 3, pp. 239–248
- [5] Schwarz P., Feili D., Seidel H.; Squeeze Film Effect Based Micro Sensor for Vacuum Pressure Measurement; *Smart systems integration*, Como, Italy, 2010, Paper 87
- [6] Schwarz P., Feili D., Engel R., Pagel N., Seidel H.; *Vacuum Pressure and Gas Detection with a Silicon Based Micromechanical Squeeze Film Sensor*, Proc. Eurosensors XXIV, Linz, Austria, 2010
- [7] Schön H.; Handbuch der Reinsten Gase; Berlin, Springer, 2005
- [8] Wutz M., Adam H., Walcher W., Jousten K.; Handbuch Vakuumtechnik, Theorie und Praxis; 7. Aufl. Braunschweig, Vieweg, 2000

2 Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen Planung

Im Projektzeitraum wurden drei Resonator-Konzepte bzw. Sensor-Konzepte erarbeitet, weiterentwickelt, mikromechanisch gefertigt und schließlich charakterisiert. Darin enthalten sind Squeeze-Film-Effekte und elektrostatisch / kapazitive oder piezoelektrische Funktionsprinzipien. Die Charakterisierung der Sensoren umfasst die druck- und gasartabhängige Messung der Resonanzverschiebung und der Güte zur Bestimmung wichtiger Fluidparamter, wie Druck und Viskosität des Umgebungsmediums.

Die Messungen der Squeeze Wirkung dieser Sensoren zeigen in einem Breiten Druckbereich gasartunabhängige lineare Änderungen der Resonanzfrequenz. Dies könnte in einem gasartunabhängigen Vakuum-Drucksensor Anwendung finden.

In dem molekularen Strömungsbereich ist der Güte-Faktor unabhängig von der Gasart. Für belastbare Aussagen im Bereich der Kontinuumsströmung muss aufgrund messtechnischer Schwierigkeiten des kapazitiven Konzeptes auf ein Konzept mit piezoelektrischer Anregung und Auslesung gewechselt werden, mit denen dann auch Messungen bis Atmosphärendruck durchgeführt werden konnten. Intrinsische mechanische Spannungen der piezoelektrischen AlN-Schicht haben im ersten Prozessierungsdurchlauf zu statischen Auslenkungen der Resonatoren geführt, weshalb eine Deckelung zunächst nicht möglich war. Es konnte jedoch für den fluiden Strömungsbereich im Güteverlauf als auch in der Verschiebung der Resonanzfrequenz (ohne Deckel) eine deutliche Separierung in Abhängigkeit von der Gasatmosphäre nachgewiesen werden. Dies ist die Grundlage für einen Sensor zur Bestimmung elementarer Gaseigenschaften, wie beispielsweise der Viskosität.

3 Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Nein

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Das Projekt liefert einen Beitrag zur Auslegung neuartiger, auf physikalischen Prinzipien beruhender Sensoren zur Bestimmung von Gaseigenschaften. Hierbei wird eine schwingungsfähige Struktur mit Luftspalten im Mikrometerbereich mit einer nanokristallinen piezoelektrischen Schicht kombiniert. Die gewonnen Erkenntnisse bieten das Potential zur wirtschaftlichen Umsetzung insbesondere im Verbund mit mittelständischen Firmen. Insbesondere konnte die Machbarkeit eines gasartunabhängigen Vakuumsensors auf Basis der Auswertung der Resonanzfrequenzverschiebung (Squeeze-Film-Effekt) demonstriert werden.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Erfolgsaussichten im wissenschaftlich-technischen Bereich sind weiterhin sehr gut. Auf Grund der Verfügbarkeit unseres Messplatzes mit frei wählbarem Druck über neun Größenordnungen und mit frei wählbarer Gasatmosphäre stehen uns experimentelle Möglichkeiten zur Verfügung, die kaum an einem anderen Ort vorhanden sind. Die Einflussparameter für die Gasart-Abhängigkeit der Resonatorgüte konnte noch nicht vollständig geklärt werden. Hier sind weitere Untersuchungen von höchstem wissenschaftlichem Interesse.