

Resonante Silizium-Sensoren mit elektrothermischer Anregung und DMS in Metaldünnschichttechnologie

H. Bartuch^{*}, S. Büttgenbach^{**}, Th. Fabula⁺, H. Weiss^{*}

^{*} Gesellschaft für Mikrotechnik und Sensorik mbH, Industriestraße 7,
D-78112 St. Georgen

^{**} Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 8,
D-38106 Braunschweig

⁺ Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft für
angewandte Forschung e. V., Wilhelm-Schickard-Straße 10,
D-78052 Villingen-Schwenningen

Vortrag anlässlich der SENSOR 93 in Nürnberg, vom 12.-14. Oktober 1993



Resonante Silizium-Sensoren mit elektrothermischer Anregung und DMS in Metaldünnschichttechnologie

H. Bartuch*, S. Büttgenbach**, Th. Fabula+, H. Weiss*

* Gesellschaft für Mikrotechnik und Sensorik mbH, Industriestraße 7, D-78112 St. Georgen

** Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 8, D-38106 Braunschweig

+ Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V., Wilhelm-Schickard-Straße 10, D-78052 Villingen-Schwenningen

Abstract:

There is considerable interest in sensors based on mechanical resonance due to their high sensitivity to physical and chemical parameters and their frequency output. This paper reports on a study of electrothermally driven resonant silicon beams fabricated by micromachining and standard thin film technologies. The vibration of the beams is detected by metal strain gauges. The force as well as the gas flow sensitivity of the resonance frequency have been measured. The results show a fundamental resonance frequency of 4.265 kHz for a beam of 10 mm length, 1 mm width and 50 μm thickness, and frequency shifts of about 170 Hz/N ($F = 1\text{--}10\text{ N}$) and 100 Hz/m/s ($v = 1\text{--}3\text{ m/s}$), respectively. There is satisfactory agreement with results obtained from finite element modeling.

1 Einleitung

Moderne Meß- und Regelsysteme sind infolge der raschen Entwicklung der Mikroelektronik in zunehmendem Maße digitale Systeme. Für solche Systeme benötigt man Sensoren, die hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und ihrer geometrischen Abmessungen der Mikroelektronik angepaßt sind und mit dieser räumlich in einer Funktionseinheit integriert werden können. Zu ihrer Herstellung bietet sich als Miniaturisierungstechnologie die Mikromechanik an. Neben konventionellen Sensoren mit Analog-Digital-Wandlern spielen Sensoren mit Frequenzausgang eine große Rolle. Eine wichtige Möglichkeit zur Erzeugung eines frequenzanalogen Sensorsignals bieten mechanische schwingungsfähige Strukturen, deren Resonanzfrequenz durch Änderung des mechanischen Spannungszustandes von der zu messenden Größe abhängt. Als Werkstoff für mikromechanische Resonatoren ist einkristalliner Quarz von großer Bedeutung, da er als nichtzentrosymmetrischer Kristall piezoelektrisch ist. Aufgrund der hochentwickelten Verfahrenstechnik der Siliziumtechnologie und der hervorragenden mechanischen Eigenschaften ist auch Silizium ein wichtiger Werkstoff für mikromechanische Resonatoren [Duf 92]. Da es nicht piezoelektrisch ist, muß zur Anregung entweder eine piezoelektrische Schicht aufgebracht werden oder Anregung und Abtastung der Schwingungen müssen auf andere Weise erfolgen. Dabei stellt die elektrothermische Anregung eine relativ einfach zu realisierende Möglichkeit des Antriebes dar [Bou 90].

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zeigen, daß das Prinzip der elektrothermischen Anregung und der resistiven Abtastung mittels auf dem Balken applizierter DMS (Abb. 1) auch für vergleichsweise massereiche Siliziumresonatoren anwendbar ist. Der Einfluß mechanischer Vorspannungen auf die experimentellen Ergebnisse wird im Zusammenhang mit analytischen Rechnungen und Finite-Elemente-Modellierungen (FEM) diskutiert.

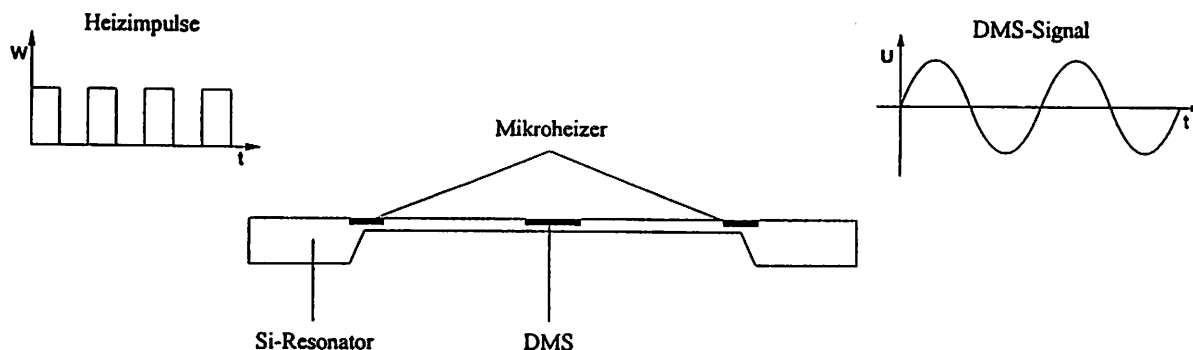


Abb. 1: Prinzip des elektrothermischen Antriebes

2 Design und Herstellung der Sensoren

Design:

Die Grundstruktur der Sensoren (Abb. 2) besteht aus einem $50\text{ }\mu\text{m}$ dicken und 1 mm breiten Siliziumbalken als Biegeschwinger, der von einem etwa $380\text{ }\mu\text{m}$ dicken und damit vergleichsweise starren Silizium-Rahmen umgeben ist. Die Balkenlängen betragen $8\text{ bzw. }10\text{ mm}$. Diese Geometrie kann im FE-Modell durch einen beidseitig fest eingespannten Balken mit trapezförmigem Querschnitt angenähert werden.

An den Balkenenden sind die zur thermischen Anregung notwendigen Mikroheizwiderstände ($300\text{ }\Omega$) platziert, während die DMS-Widerstände ($200\text{ }\Omega$) in Balkenmitte bzw. in Nähe der Balkenenden so angeordnet sind, daß eine möglichst große Brückenverformung erreicht wird. Um eine Außenkontaktierung zu ermöglichen bzw. um verschiedene Meßgrößen einleiten zu können wurden die Chips auf Keramikzwischenträger geklebt.

Schichtaufbau:

(100)-Si-Wafer mit:

- $1,2\text{ }\mu\text{m}$ thermischem Oxid
- 30 nm NiCr-Widerstandsschicht
- 320 nm Ti/Au-Kontaktschicht
- $3\text{ }\mu\text{m}$ Au (galv.)-Bondschiicht oder
- 450 nm Ti/Pd/Au-Lötkontaktschicht.

Mit diesem Schichtsystem sind, wie entsprechende Untersuchungen zum elektrischen Alterungsverhalten gezeigt haben, obere Einsatztemperaturen von 150°C für den Sensor realistisch. Die Widerstandsänderungen und damit die Änderung der elektrischen Leistungsaufnahme belaufen sich bei dieser Temperatur über einen Zeitraum von 1000 h auf einige Promille.

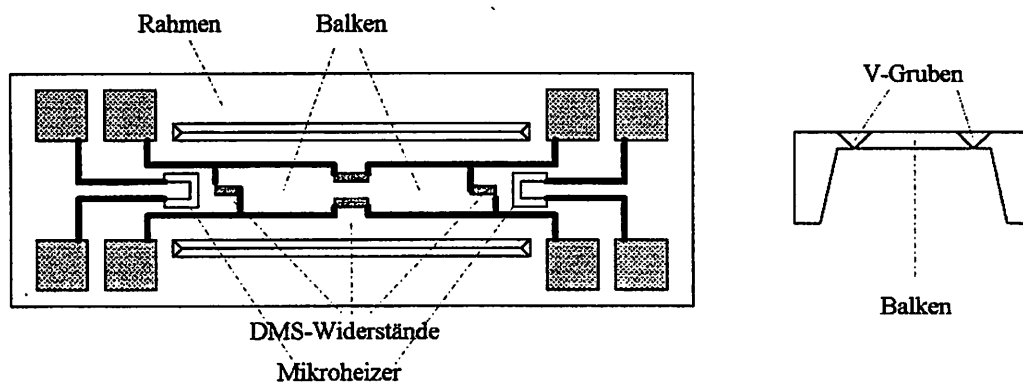


Abb. 2: Geometrie und elektrisches Layout der Sensoren (schematisch)

Technologieabfolge:

Die Umsetzung des elektrischen Layouts einschließlich der bond- bzw. lötbaren Außenanschlüsse erfolgte durchgängig in Metallschichttechnologie. Die hochstabilen NiCr-Schichten wurden partiell reaktiv gesputtert. Die Abscheidung des Kontaktschichtsystems erfolgte mittels Elektronenstrahlverdampfen. Zur Strukturierung wurden übliche photolithographische und naßchemische Prozessschritte angewandt.

Wie dem vereinfachten Technologieablaufschema in Abb. 3 zu entnehmen ist, ergibt sich eine gute Kompatibilität dieser Verfahrensschritte mit der Silizium-Ätztechnologie zur Herstellung der Balkenstrukturen. Zur Realisierung der Vorder- zur Rückseitenpositionierung und zur Ausrichtung des Gesamtlayouts bezüglich des Silizium-Kristallgitters erwiesen sich Laserjustierbohrungen als geeignet.

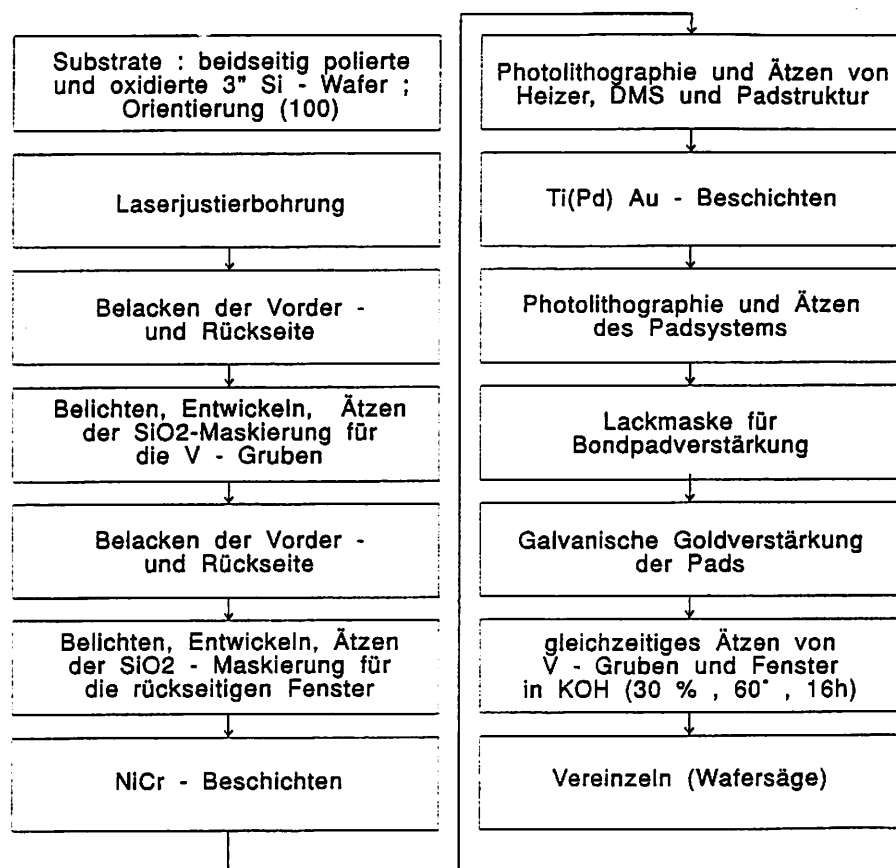


Abb. 3: Vereinfachtes Technologieablaufschemata zur Herstellung der Sensoren

3 Experimentelle Untersuchungen und Diskussion der Ergebnisse

3.1 Schwingungsverhalten

Fremdanregung:

Um das dynamische Verhalten der Balkenresonatoren ohne Temperatureinfluß zu untersuchen, wurden sie ohne Metallschichtsystem mit Hilfe von Piezokeramiken über Körperschall zum Schwingen angeregt. Die Abtastung erfolgte interferometrisch mit einem Laservibrometer (POLYTEC OFW1102), unter Verwendung der Laser-Dopplertechnik, so daß Biegeschwingungen aus der Balkenebene heraus detektiert werden können. In Tab. 1 sind die gemessenen Resonanzfrequenzen im Vergleich mit FEM-Berechnungen zusammengestellt [Bra 92]. Die Modellierung erfolgte dreidimensional mit isotropen Materialkennwerten unter Berücksichtigung der schrägen Balkeneinspannung durch die (111)-Siliziumebenen. Die ersten beiden Oberschwingungen aus der Balkenebene heraus sind mit Z2 und Z3 gekennzeichnet und besitzen zwei bzw. drei Schwingungsbäuche. Die Abweichungen zu den gemessenen Werten betragen etwa 5-6 % infolge der durch die SiO₂-Schicht bewirkte innere Vorspannung [Mur 92].

Mode	FEM-Berechnung		Messung	
	L = 10 mm	L = 8 mm	L = 10 mm	L = 8 mm
Z1	4,349 kHz	6,787 kHz	4,150 kHz	7,255 kHz
Z2	12,010 kHz	18,760 kHz	11,390 kHz	19,445 kHz
Z3	23,612 kHz	36,941 kHz	22,410 kHz	36,435 kHz

Tab. 1: Resonanzfrequenzen von Silizium-Biegebalken bei Fremdanregung im Vergleich mit FEM-Berechnungen

Die Resonanzfrequenz der Grundbiegeschwingung eines doppelseitig eingespannten Biegebalkens der Länge L und Dicke t läßt sich analytisch berechnen:

$$f = 1,028 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}} \quad (1)$$

Bei den Biegeschwingungen erfolgt die Balkendehnung in $\langle 110 \rangle$ -Kristallrichtung, so daß für den Elastizitätsmodul $E = 168,9$ GPa und für die Poissonzahl $\nu = 0,063$ verwendet wurde. Die Dichte ρ von Silizium beträgt 2329 kg/m^3 . Die angegebenen Materialdaten beziehen sich auf Zimmertemperatur. Die analytische Berechnung nach Gleichung (1) ergibt für unverspannte Siliziumbalken bei 10 bzw. 8 mm Resonatorlänge Resonanzfrequenzen von 4,386 kHz bzw. 6,853 kHz in guter Übereinstimmung (1%) mit den numerisch berechneten Ergebnissen.

Elektrothermischer Antrieb:

Durch Ansteuerung der Mikroheizer mit Impulsen geeigneter Folgefrequenz und ausreichender elektrischer Leistung werden die Siliziumbalken in Resonanz versetzt [Wie 93]. Für mittlere Heizleistungen von etwa 50 mW und ohne Anlegen einer Brückenspeisespannung (d.h. Niedertemperaturbereich) stimmen die durch optische Abtastung ermittelten Resonanzfrequenzen gut mit denen der Fremdanregung überein. Da die Eigenerwärmung der Sensoren in diesem Fall sehr gering ist (ΔT zur Umgebung < 4 K) kann daraus gefolgert werden, daß das auf dem Balken befindliche Metallschichtsystem gegenüber der SiO_2 -Schicht keine wesentlichen Veränderungen der mechanischen Vorspannungen der Balken hervorruft. Für die aufgenommenen Amplitudenspektren ist charakteristisch, daß aufgrund der symmetrischen Anregung als Schwingungsmoden nur die Grundmode (Z1) und die zweite Obermode (Z3) vorkommen.

In Abb. 4 sind die experimentell ermittelten Eigenschwingungsformen eines 10 mm langen Balkens im Vergleich mit FEM-Berechnungen dargestellt. Der Balken wurde elektrothermisch mit einer niedrigen Heizleistung von $P_{\text{Heiz}} = 50$ mW angeregt und optisch abgetastet [Mül 92]. Die relativen Schwingungsamplituden der rechnerischen Modalanalyse wurden auf die gemessenen Maximalwerte normiert.

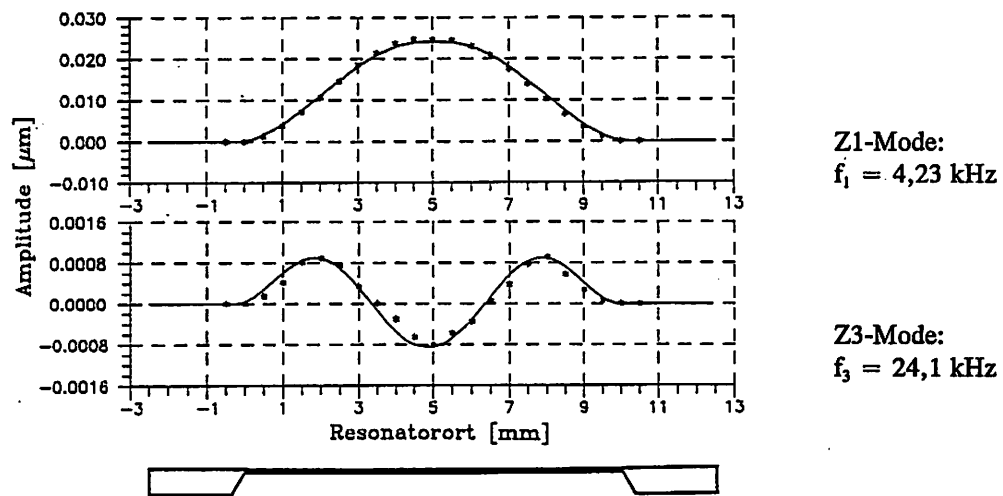


Abb. 4 : Experimentell ermittelte Eigenschwingungsformen des Biegebalkens im Vergleich mit FEM-Berechnungen (* Messungen nach [Mül 92], — FEM)

Um die für die Signalgewinnung mittels DMS (K-Faktor ≈ 2) notwendigen Schwingungsamplituden in der Größenordnung von einigen hundert Nanometern zu erzeugen, waren mittlere Impulsheizleistungen um 180 mW notwendig. Da die DMS-Widerstände bei Anlegen einer Brückenspeisespannung zusätzliche Wärmequellen darstellen, ergeben sich, wie Infrarotmessungen zeigen, Temperaturüberhöhungen in Balkenmitte bis zu 60 K bei $P_{\text{DMS}} = 650$ mW. Gleichzeitig ändert sich die Temperatur des Keramikträgers, so daß aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Silizium und Keramik zusätzliche axiale Kräfte auf den Balken übertragen werden. Dieser Effekt ist bei der Interpretation des gemessenen, nichtmonotonen Frequenzganges der Grundmode in Abhängigkeit von der in der Brücke umgesetzten elektrischen Leistung mit zu beachten.

Die bei stetig zunehmender Brückenverlustleistung zu beobachtende Frequenzabnahme bis zu einem kritischen Wert von P_{DMS} , oberhalb dessen die Frequenz wieder zunimmt, läßt sich mit dem "buckled-beam"-Modell nach [Bou 91] beschreiben. Unter der Grundannahme, daß ein an beiden Seiten fest eingespannter Balken unter Zugvorspannungen steht, die deutlich größer sein müssen als die aus der Biegesteifigkeit resultierende Spannung, folgt bei zunehmender

Temperaturüberhöhung ΔT des Balkens gegenüber seiner Umgebung ein Abbau dieser Zugspannungen durch Kompression und damit für eine kritische Temperaturdifferenz ΔT_{kr} eine Frequenzabnahme bis auf Null. Oberhalb dieser Temperaturdifferenz verändert sich die Biegelinie, so daß infolge Ausknickens der vorher gerade Balken verwölbt wird. Die dabei auftretenden Zugspannungen führen zu einer Zunahme der Resonanzfrequenz. Ausgehend vom mathematischen Modellansatz in [Gei 91] wurden die folgenden analytischen Beziehungen zur Anpassung der experimentellen Werte abgeleitet:

$$f(\Delta T) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{S - E\alpha\Delta T}{3\rho}} \quad \text{für } 0 \leq \Delta T \leq \Delta T_{kr} \quad (2)$$

$$f(\Delta T) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{E\alpha\Delta T - S}{\rho}} \quad \text{für } \Delta T \geq \Delta T_{kr} \quad (3)$$

wobei $\Delta T_{kr} = S/E\alpha$ ist und der thermische Ausdehnungskoeffizient von Silizium $\alpha = 2,33 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ beträgt. Der freie Parameter S stellt die Summe der axialen Vorspannungen und die aus der Biegesteifigkeit resultierende Spannung dar.

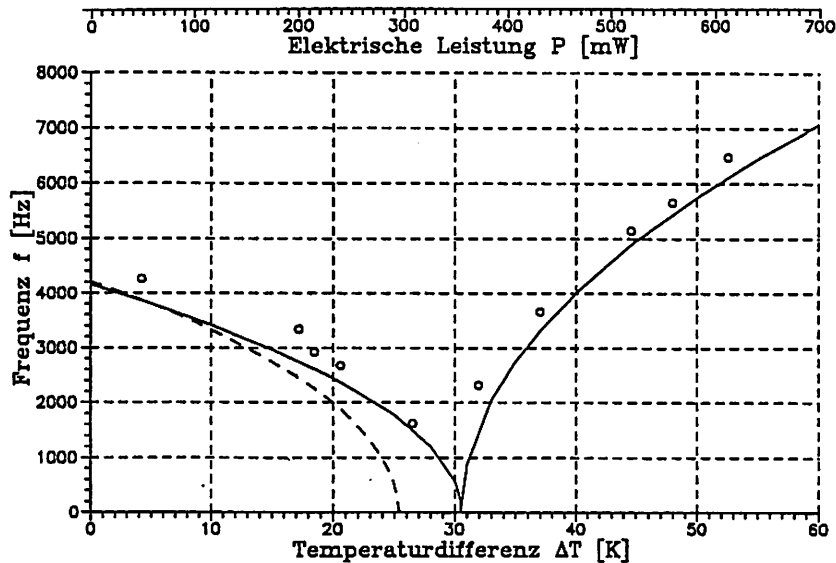


Abb. 5 : Abhängigkeit der Resonanzfrequenz der Grundmode von der in der DMS-Brücke umgesetzten elektrischen Leistung (Balkenlänge: $L = 10 \text{ mm}$, Impulsheizleistung: 180 mW , \circ Meßpunkte nach [Wie 93], — FEM, — analytisch angepaßt nach Gleichungen (2) und (3))

Wird für den Zusammenhang zwischen Temperaturüberhöhung und elektrischer Verlustleistung $\Delta T = 0,084 P_{DMS}$ gesetzt, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung für $S \approx 12,1 \text{ MPa}$, was einer kritischen Temperaturdifferenz ΔT_{kr} von $30,6 \text{ K}$ entspricht. Dieser Wert liegt erwartungsgemäß über dem aus FEM-Berechnungen ermittelten Wert von $25,5 \text{ K}$, da im FE-Modell keine Vorspannungen angenommen wurden. Berücksichtigt wurde hierbei neben der Temperaturabhängigkeit der Materialparameter lediglich die aus den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium und SiO_2 resultierenden thermisch induzierten Spannungen. In Abb. 5 sind die experimentellen Werte, die an die Messungen analytisch angepaßt und die FE-modellierten Kurvenverläufe dargestellt.

3.2 Sensitives Verhalten

Einwirkung einer Axialkraft:

Die Kraftempfindlichkeit der Sensoren wurde im Niedertemperaturbereich ($P_{Heiz} = 50 \text{ mW}$, $P_{DMS} = 0$) gemessen, wobei die Abtastung optisch erfolgte. Die Sensoren mit der Balkenlänge von 10 mm wiesen im Kraftbereich bis etwa 11 N eine Frequenzverschiebung von etwa 1820 Hz auf. Die Grundfrequenz betrug $4,265 \text{ kHz}$. Wird die Gesamtquerschnittsfläche der Sensoren (ca. $7,1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$) zugrunde gelegt, so entspricht dieses einer mechanischen Verspannung im Resonator von rund $15,3 \text{ MPa}$, so daß die gemessene Empfindlichkeit etwa 119 Hz/MPa beträgt.

Zur Überprüfung der FE-Modellannahmen wurde die Eigenfrequenzverschiebung unter der Einwirkung einer Axialkraft berechnet. Durch die äußere Lasteinwirkung ergibt sich eine Überlagerung eines statischen und eines dynamischen

Problems. Im ersten Schritt wird die Balkendehnung als Funktion der einwirkenden Last ermittelt, im zweiten Schritt die Frequenzverschiebung in Abhängigkeit der Änderung der Resonatorsteifigkeit. Für eine Zugspannung von 15,2 MPa wurde eine Frequenzänderung von etwa 1,868 kHz berechnet, was einer Empfindlichkeit von etwa 123 Hz/MPa entspricht. Diese Werte stimmen gut miteinander überein, so daß die Modellannahmen bestätigt wurden und die Konsistenz des FE-Modells gegeben ist. Die Empfindlichkeit der Siliziumbalken läßt sich durch eine geeignete Wahl der Querschnittsfläche der Verstärkungsstege (Rahmen) und der Balkendimensionen für Kraftsensoranwendungen in unterschiedlichen Kraftbereichen genau einstellen. In Abb. 6 sind die experimentellen und numerisch berechneten Ergebnisse graphisch dargestellt.

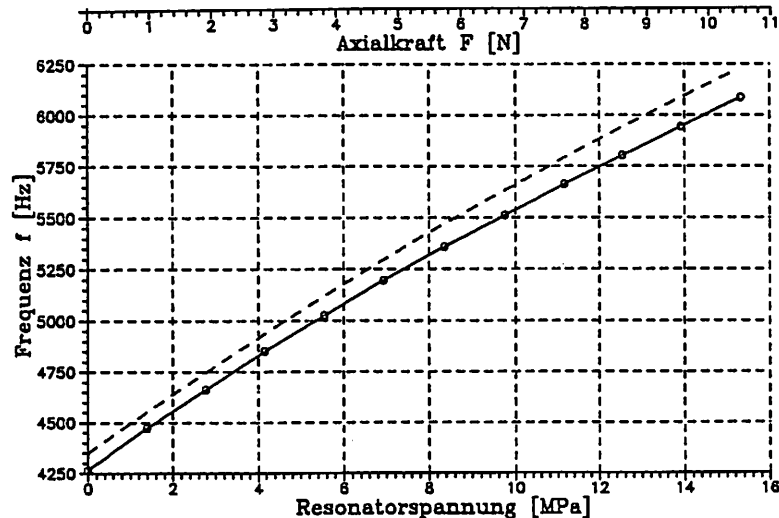


Abb. 6 : Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von einer Axialkraft und der im Resonator auftretenden mechanischen Spannung im Vergleich mit FEM-Berechnungen (o Meßwerte nach [Mül 92], — FEM)

Einfluß von Gasströmung: (thermisches Anemometerprinzip)

Ein auf einem Keramikzwischenträger montierter Sensor wurde in ein Strömungsröhr parallel zum Gasfluß (Luft) eingebaut und bei DMS-Verlustleistungen unterhalb und oberhalb des mit der kritischen Temperaturüberhöhung korrelierenden Wertes (180 mW) betrieben. In Abb. 7 sind die experimentell ermittelten Zusammenhänge von Frequenzänderung und Fluidgeschwindigkeit dargestellt [Wie 93]. Charakteristisch ist, daß im Anfangsverlauf der Meßkurven (die Meßwerte wurden stets im thermischen Gleichgewicht aufgenommen) gerade ein gegenläufiges Verhalten der Resonanzfrequenzänderung beobachtet wird, als nach der Sensorcharakteristik (Abb. 5) zu erwarten wäre. Erst oberhalb von etwa 1 m/s bewirkt die zunehmende Fluidgeschwindigkeit eine Abkühlung, so daß für $P_{DMS} < P_k$ eine Frequenzzunahme, für $P_{DMS} > P_k$ eine Frequenzabnahme eintritt. Diese Beobachtung läßt sich qualitativ verstehen, wenn man berücksichtigt, daß der Keramikzwischenträger gleichfalls gekühlt wird. Aufgrund seines hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bewirkt die Längenkontraktion eine axiale Druckkraft auf den Sensor, was partiell die Frequenzänderungen infolge des Anemometereffektes kompensiert.

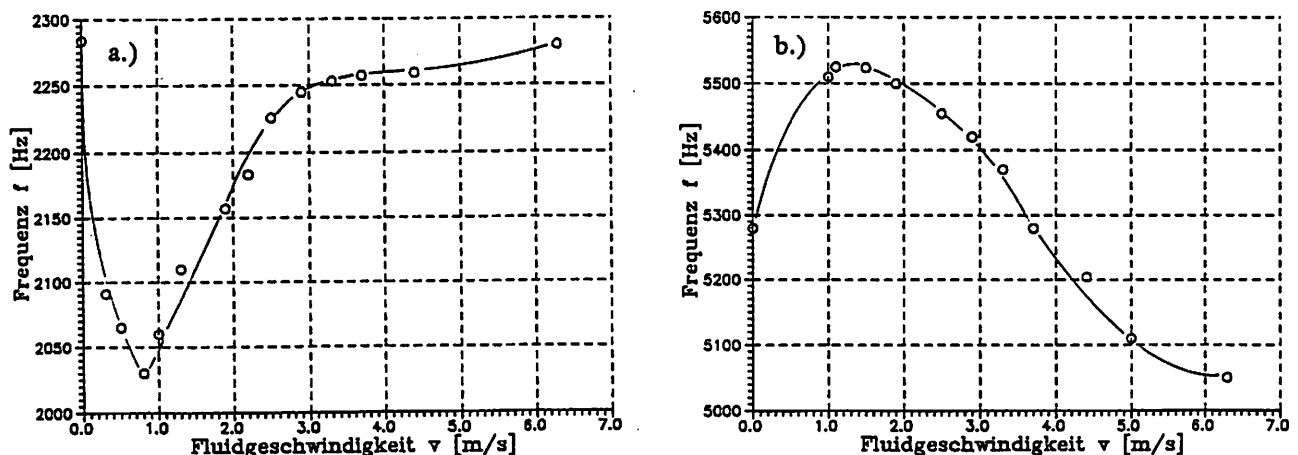


Abb. 7 : Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Strömungsgeschwindigkeit:
a.) $P_{DMS} = 150 \text{ mW} < P_{krit}$, b.) $P_{DMS} = 330 \text{ mW} > P_{krit}$ [Wie 93]

Um die thermische Wechselwirkung zwischen Resonator und dem umströmenden Fluid und die Auswirkung auf die Resonanzfrequenz zu untersuchen, wurde das Strömungsberechnungsprogramm FIDAP [FDI] mit dem Strukturberechnungsprogramm ANSYS [SAS] gekoppelt. Hierzu wurde die FE-Modellgeometrie mit den entsprechenden Randbedingungen in ANSYS definiert und die Temperaturen ($T = 20^\circ\text{C}$) und Geschwindigkeiten am Eintritt des Strömungsrohres als Anfangsbedingungen vorgegeben. Anschließend erfolgte mit FIDAP die Berechnung der geschwindigkeitsabhängigen Temperaturverteilung, die als Eingabedaten für eine statische Temperaturanalyse an ANSYS wieder übergeben wurden. In einer nachfolgenden Modalanalyse wurden die Eigenfrequenzen des thermisch verspannten Balkenresonators ermittelt. Das zweidimensionale FE-Modell stellt einen Schnitt durch den Sensor und das Strömungsrohr dar und verwendet temperaturabhängige Materialdaten für Silizium und den Keramiksubstratträger. Die Berechnung erfolgte unter der Annahme laminarer und inkompressibler Strömung. In Abb. 8 ist die berechnete Temperaturverteilung im Fluid und dem Siliziumresonator für eine mittlere Eintrittsgeschwindigkeit von $0,5\text{ m/s}$ dargestellt. Die mittlere Temperatur auf dem Siliziumbalken beträgt etwa 35°C , während der Keramikträger im vorderen Staupunkt um etwa 10°C abgekühlt wird.

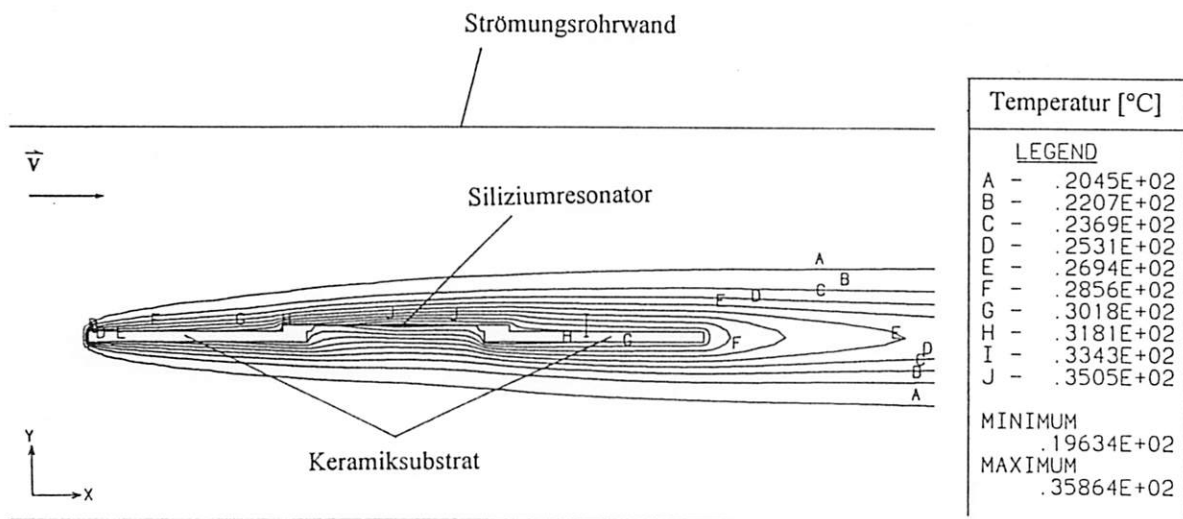


Abb. 8 : Berechnete Temperaturverteilung im Fluid (laminare Strömung: $v = 0,5\text{ m/s}$, $T = 20^\circ\text{C}$)

In Abb. 9 ist die infolge der thermischen Fluid-Struktur-Wechselwirkung berechnete Abhängigkeit der Resonanzfrequenz der Grundmode von der Strömungsgeschwindigkeit für niedrige Leistungen ($P_{\text{DMS}} < P_{\text{krit}}$) dargestellt. Die Resonanzfrequenzänderung df/dv beträgt bei der FEM-Berechnung etwa $1,5\text{ kHz pro m/s}$ ($v = 0,2\text{--}1\text{ m/s}$) und fällt im Gegensatz zu der Messung (Abb. 7 a: $v = 1\text{--}3\text{ m/s}$) um etwa eine Größenordnung höher aus. Zum einen liegt dies an der mechanischen Gegenwirkung des Keramiksubstrates, die nur bei der Strömungssimulation mit modelliert wurde, zum anderen an der nur ungenügend erfassten Gesamtwärmebilanz des Sensors.

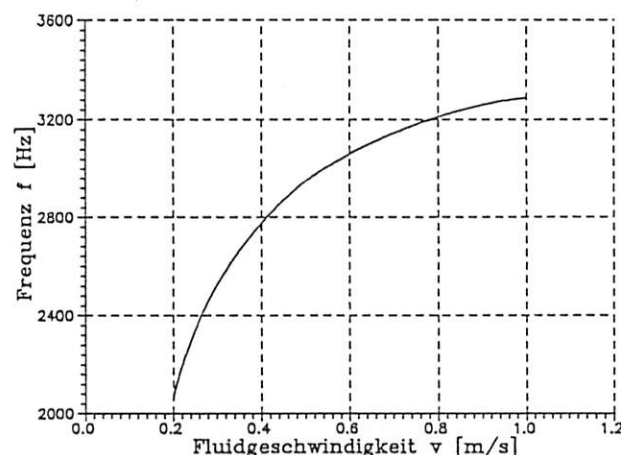


Abb. 9 : FEM-Berechnung der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Strömungsgeschwindigkeit [Mes 93]

4 Zusammenfassung

Das Verfahren zur Herstellung der in diesem Beitrag beschriebenen frequenzanalogen Silizium-Sensoren mit elektrothermischem Antrieb sichert eine hohe Kompatibilität der für das elektrische Layout durchgängig genutzten Metalldünnschichttechnologie mit der Silizium-Ätztechnologie. Damit sind gute Voraussetzungen für hohe Ausbeuten und niedrige Kosten gegeben. Die hohe thermische Stabilität des verwendeten Metallschichtsystems stellt einen Hochtemperatureinsatz ($T > 150^{\circ}\text{C}$) in Aussicht.

Der elektrothermische Antrieb erlaubt abhängig von Impulsfolgefrequenz und Heizleistung ein stabiles Anregen der Resonatoren in Bereichen außerhalb der kritischen Temperaturüberhöhung.

Die Diskussion der experimentellen Ergebnisse zum Schwingungsverhalten und der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von Kraft und Gasströmung verdeutlichen den hohen Einfluß innerer Verspannungen und die Auswirkungen der Aufbau- und Verbindungstechnik auf die Sensorcharakteristiken. Hier sind Schwerpunkte in einer weiteren angepaßten Sensorentwicklung zu suchen, um die potentiell hohen Empfindlichkeiten eines solchen Resonators voll ausnutzen zu können.

Das Verhalten der Resonatoren wurde sowohl analytisch ("buckled-beam"-Modell) als auch mittels FE-Modellierung in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen beschrieben. Die Strömungsberechnungen haben allerdings eher qualitativen Charakter, so daß quantitative Aussagen Gegenstand weiterer Untersuchungen sein müssen.

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Verbundvorhabens "Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren" vom Bundesministerium für Forschung und Technologie unter den Förderkennzeichen 13 AS 0114 / 161A durchgeführt.

Literaturverzeichnis:

- [Bou 90] : S. Bouwstra, Resonating microbridges mass flow sensor, Dissertation, Universität von Twente, Enschede, Niederlande (1990)
- [Bou 91] : S. Bouwstra, B. Geijselaers, On the resonance frequencies of microbridges, Proc. TRANSDUCERS (1991) 538-542
- [Bra 92] : C. Braxmaier, Fremdanregung von Balken durch Dickenschwinger zur Eigenfrequenzbestimmung, Praktikumsarbeit, HSG-IMIT, VS-Villingen (1992)
- [Duf 92] : M. Dufour, M.T. Delaye, F. Michel, J.S. Danel, B. Diem, G. Delapierre, A comparison between micromachined pressure sensors using quartz or silicon vibrating beams, Sensors and Actuators A, 34 (1992) 201-209
- [FDI] : Fluid Dynamics International, Inc., Evanston, Illinois, USA
- [Gei 91] : H.J.M. Geijselaers, H. Tjeldeman, The dynamic mechanical characteristics of a resonating microbridge mass-flow sensor, Sensors and Actuators A, 29 (1991) 37-41
- [Mes 93] : S. Messner, Finite-Elemente Berechnung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung bei einem mikromechanischen Strömungssensor, Diplomarbeit, Universität Stuttgart/HSG-IMIT, VS-Villingen (in Vorbereitung)
- [Mur 92] : H. Muro, H. Kaneko, S. Kiyota, P.J. French, Stress analysis of SiO_2/Si bi-metal effect in silicon accelerometers and its compensation, Sensors and Actuators A, 34 (1992) 43-49
- [Mül 92] : M. Müller, Aufbau und Inbetriebnahme eines optischen Meßplatzes zur Charakterisierung von resonanten mikromechanischen Strukturen, Diplomarbeit, FH-Furtwangen (1992)
- [SASI] : Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA, USA
- [Wie 93] : M.-C. Wiedemann, Entwicklung von Anregungsschaltungen für frequenzanaloge Sensoren, Diplomarbeit, FH-Kiel (in Vorbereitung)